

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO RASANTE EN UNA
RÁPIDA ESCALONADA APLICANDO LA DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD). PROGRAMA FLOW-3D.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MASTER EN
RECURSOS HÍDRICOS.**

**CASA TIPÁN EDWIN PATRICIO.
edwin_casa_21@hotmail.com**

**DIRECTORA: ING. M.SC XIMENA HIDALGO BUSTAMANTE.
hidalgo.ximena@epn.edu.ec**

Quito, Noviembre 2016.

DECLARACIÓN

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

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

CASA TIPÁN EDWIN PATRICIO.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Casa Tipán Edwin Patricio bajo mi supervisión.

ING. M. SC XIMENA HIDALGO BUSTAMANTE
DIRECTORA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios a mi familia, a mis padres Gladys, Segundo, a mis hermanos Estefanía, Byron por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida.

Un enorme agradecimiento al Doctor Marco Castro y a la Ingeniera Ximena Hidalgo por su apoyo y supervisión en el desarrollo del trabajo de titulación. En especial agradezco tener la oportunidad de trabajar junto a ellos, ayudarme a crecer profesional y personalmente.

Agradezco de corazón a mis amigos Patricio Ortega y Pablo Vera con quienes conformo un excelente equipo en todo ámbito.

Finalmente agradezco la colaboración de los empleados del laboratorio del CIERHI de la Escuela Politécnica Nacional: Manuel, Santiago, Wilson, Juan Carlos. Gracias a todos.

Edwin Casa.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación a mis padres: Gladys, Segundo. A mis hermanos: Estefanía, Byron. A Belén Iza con mucho amor...

Edwin Casa.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
CONTENIDO	VI
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTADO DE CUADROS	XV
LISTADO DE GRÁFICOS	XVII
LISTADO DE FOTOGRAFÍAS	XVIII
LISTADO DE PLANOS.....	XX
SIMBOLOGÍA.....	XXI
RESUMEN	XXIII
ABSTRACT	XXIV

CAPITULO 1

ANTECEDENTES	1
1.1 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL MOVIMIENTO DEL AGUA SOBRE UNA RÁPIDA ESCALONADA.	1
1.1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.2 FLUJO DE ESCALÓN EN ESCALÓN (NAPPLE FLOW).....	2
1.1.3 FLUJO EN TRANSICIÓN.	6
1.1.4 FLUJO RASANTE (SKIMMING FLOW).	7
1.2 SIMULACION NUMÉRICA DE FENOMENOS HIDRAULICOS, MODELOS MULTIDIMENSIONALES.	16
1.2.1 MODELO UNIDIMENSIONAL.	17
1.2.2 MODELO BIDIMENSIONAL.	18
1.2.3 MODELO TRIDIMENSIONAL.....	18
1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD). SOFTWARE FLOW-3D.....	19

1.4 ESTADO DEL ARTE: MODELACIÓN DEL FLUJO RASANTE EN UNA RÁPIDA ESCALONADA.....	22
1.4.1 MEDICIONES EN LABORATORIO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN LA REGIÓN NO AIREADA DEL FLUJO RASANTE EN UN VERTEDERO ESCALONADO, CON MALLADO MULTIBLOQUE.....	23
1.4.2 LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN EN UN VERTEDERO ESCALONADO CON PENDIENTE FUERTE.	26
1.4.3 PROCESO DE TRANSPORTE DE AIRE EN LA RÁPIDA ESCALONADA CON PENDIENTE MODERADA.....	28
1.4.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA REGIÓN DEL FLUJO UNIFORME EN UNA RÁPIDA ESCALONADA.....	29
1.5 CONCLUSIONES: BASES Y CRITERIOS DISPONIBLES EN LA LITERATURA TÉCNICA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO RASANTE EN EL PROGRAMA FLOW 3D.....	31

CAPITULO 2.

HIDRODINÁMICA: BASE TEÓRICA APLICABLE PARA EL ANÁLISIS DEL FLUJO RASANTE.	33
2.1 INTRODUCCION	33
2.2 ECUACIÓN GENERAL DE CONSERVACIÓN.	36
2.3 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.	37
2.4 ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO	39
2.5 ECUACIÓN GENERAL DEL MOVIMIENTO. ECUACIÓN DE NAVIER-STOKES.....	39
2.6 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.	40
2.7 SUB-MODELO ARRASTRE DE AIRE (AIR ENTRAINMENT).	41
2.8 SUB-MODELO DRIFT FLUX.	43
2.9 BREVE INTRODUCCIÓN A LA TURBULENCIA.....	45
2.9.1 TURBULENCIA.	45
2.9.2 ESCALAS DE LA TURBULENCIA.	46

CAPÍTULO 3.**INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN NUMÉRICA (CFD) APLICANDO**

PROGRAMA COMPUTACIONAL FLOW-3D.....	49
3.1 METODOLOGÍAS PARA REALIZAR LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL.	49
3.1.1 MALLADO EN EL PROGRAMA COMPUTACIONAL FLOW-3D	51
3.1.2 REDUCCION DE LA DIMENSIONALIDAD.	55
3.2 CONDICIONES DE FRONTERA EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.	55
3.3 MODELIZACIÓN DE LA TURBULENCIA: USOS Y RESTRICCIONES.	59
3.3.1 SIMULACIÓN NUMÉRICA DIRECTA (DNS).	60
3.3.2 SIMULACIÓN TÉCNICAS (LES).....	60
3.3.3 ECUACIONES DE NAVIER-STOKES PROMEDIADAS POR REYNOLDS (RANS).....	61
3.3.4 MODELOS DE TURBULENCIA DISPONIBLES EN EL PROGRAMA FLOW 3D.....	62
3.4 MODELIZACIÓN DEL FENÓMENO FÍSICO ACERCA DEL FLUJO RASANTE EN UNA RÁPIDA ESCALONADA Y CONDICIONES INICIALES DE LA SIMULACION NUMÉRICA.	64
3.5 RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DEL MOVIMIENTO. PROGRAMA FLOW-3D.	65
3.5.1 MÉTODOS ITERATIVOS DE RESOLUCIÓN.....	67
3.6 CONCLUSIONES.	69

CAPITULO 4.**CASO DE APLICACIÓN DEL PAQUETE COMPUTACIONAL FLOW-3D AL**

FLUJO SOBRE LA RÁPIDA ESCALONADA-EL BATÁN.	70
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE DISEÑO ORIGINAL DEL CASO DE APLICACIÓN.....	70
4.1.1 COLECTOR PRINCIPAL O TÚNEL DE CONDUCCIÓN.....	72
4.1.2 PRIMER CUENCO DISIPADOR (CUENCO 1).....	73
4.1.3 RÁPIDA ESCALONADA 1.	74
4.1.4 SEGUNDO CUENCO DISIPADOR.....	75
4.2 OBJETIVO GENERAL DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.	76
4.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.	76

4.4 REPRESENTACIÓN DE LA GEOMETRÍA. CASO DE APLICACIÓN EN EL MODELO NUMÉRICO.....	77
4.4.1 MALLADO PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	80
4.4.2 CONDICIONES DE BORDE DEL MODELO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	82
4.4.3 PARÁMETROS INICIALES, FÍSICOS Y NUMÉRICOS DE LA MODELACIÓN EN FLOW-3D.....	83
4.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90

CAPITULO 5.

CALIBRACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA CON AYUDA DEL MODELO FÍSICO.....	91
5.1 BREVE DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO.....	91
5.1.1 CRITERIOS DE SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA.....	91
5.1.2. MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA CON PERFIL ESCALONADO.....	92
5.2 CONSIDERACIONES IMPORTANTES PARA LA CALIBRACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	94
5.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE MALLA.....	96
5.3.1 RESULTADOS NUMÉRICOS SEGÚN LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE MALLA.....	98
5.4 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MODELO DE TURBULENCIA.....	105
5.4.1 RESULTADOS NUMÉRICOS SEGÚN LA INFLUENCIA DEL MODELO DE TURBULENCIA.....	107
5.4.1 ESCENARIO S7, MODELO LES.....	111
5.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	114

CAPÍTULO 6.

RESULTADO OBTENIDOS CON LA MODELACIÓN NUMÉRICA PARA EL CASO DE APLICACIÓN DE LA RÁPIDA EL BATÁN.....	119
6.1 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO RASANTE CON GEOMETRÍA DEL DISEÑO ORIGINAL.....	121
6.1.1 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL ESCALÓN.....	121
6.1.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN EL ESCALÓN.....	123

6.1.3 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA. LOCALIZACIÓN DE LA REGIÓN UNIFORME.	126
6.1.4 PROFUNDIDADES DEL FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.	131
6.1.5 CONCENTRACIÓN DE AIRE Y DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH, EN LA REGIÓN UNIFORME DEL FLUJO RASANTE.	132
6.1.5 DISIPACIÓN DE ENERGÍA AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA.	135
6.2 COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA MODELACIÓN NUMÉRICA Y LA MODELACIÓN FÍSICA ACERCA DEL FLUJO RASANTE EN LA RÁPIDA ESCONADA EL BATÁN.	138
6.2.1 COMPARACIÓN DEL FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA.	139
6.2.2 UBICACIÓN DEL PUNTO DE INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN.	146
6.2.3 PORCENTAJE DE CONCENTRACION DE AIRE EN EL FLUJO RASANTE.	151
6.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS DEL FLUJO RASANTE SOBRE LA RAPIDA ESCALONADA EL BATÁN.	158

CAPÍTULO 7.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	161
7.1 CONCLUSIONES SOBRE EL TRABAJO DE TITULACIÓN.	161
7.2 CONCLUSIONES GENERALES SOBRE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA. ...	162
7.3 RECOMENDACIONES.	164

CAPITULO 8.

BIBLIOGRAFÍA	166
ANEXOS	169

ANEXO A.

RESULTADOS NUMERICOS OBTENIDOS DEL PAQUETE FLOW-3D.	170
--	-----

ANEXO B.

PRUEBAS DE VISUALIZACIÓN Y REGISTRO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO PARA CAUDALES DE OPERACIÓN (MAYORES A DE 25 m ³ /s) EN EL SISTEMA DE OBRAS QUE CONFORMA LA RAPIDA ESCALONADA.....	192
ANEXO C.	
PLANOS.....	200

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL FLUJO DE ESCALÓN EN ESCALÓN.	3
FIGURA 1.2 RÁPIDA ESCALONA, ESQUEMA DEL FLUJO RASANTE.	8
FIGURA 1.3 MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN PROGRAMA HEC-RAS. ...	17
FIGURA 1.4 ESQUEMA DE LA RÁPIDA ESCALONADA Y MODELO FÍSICO. ...	24
FIGURA 1.5 DOMINIO Y CONDICIONES DE FRONTERA DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.	25
FIGURA 1.6 GEOMETRÍA DE LA RÁPIDA ESCALONADA.	27
FIGURA 1.7 FLUJO MIXTO (AGUA-AIRE) EN LA RÁPIDA ESCALONADA	27
FIGURA 1.8 CONCENTRACIÓN DE AIRE Y AUMENTO DEL VOLUMEN DE FLUJO A LA SALIDA DE LA RÁPIDA.	29
FIGURA 1.9 CONFIGURACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA.	30
FIGURA 1.10 VELOCIDAD DE FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA.	31
FIGURA 2.1 SISTEMA ANALIZADO EN EL MÉTODO DE LAGRANGE.	35
FIGURA 2.2: SISTEMA ANALIZADO EN EL MÉTODO DE EULER.	36
FIGURA 2.3 MECANISMO DE LA INTRODUCCIÓN DE AIRE. (A) MODELO DE LA INTRODUCCIÓN DE AIRE. (B) FUERZAS ACTUANTES EN EL LÍQUIDO ELEMENTAL.	42
FIGURA 2.4 ESPECTRO DE ENERGÍA TURBULENTA (ESCALA LOGARÍTMICA, ADOPTADO POR DAVIDSON, 2004).	47
FIGURA 3.1 EJEMPLO DE MALLA ESTRUCTURADA MULTI-BLOQUE	50
FIGURA 3.2 EJEMPLO DE MALLA NO ESTRUCTURADA.	50
FIGURA 3.3 MALLADO UNIFORME EN EL PROGRAMA FLOW-3D.....	52
FIGURA 3.4 MALLADO MULTIBLOQUE EN EL PROGRAMA FLOW-3D.....	53
FIGURA 3.5 MALLA ANIDADA. PROGRAMA FLOW-3D.	54
FIGURA 3.6 MALLA TRASLAPADA. PROGRAMA FLOW-3D.....	54
FIGURA 3.7 CONDICIONES DE CONTORNO EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA. (A) CONDICIÓN DE PRESIÓN CONSTANTE (P-P). (B) ENTRADA DE FLUJO Y AL MENOS UNA SALIDA CON PRESIÓN CONSTANTE (Q-P). (C) ENTRADA DE FLUJO Y AL MENOS UNA SALIDA DE FLUJO (Q-O).....	56

FIGURA 3.8 ESQUEMA DE LA CONDICIÓN DE FRONTERA. ONDA LINEAL PERIÓDICA.....	59
FIGURA 4.1 UBICACIÓN DEL SISTEMA DE DESCARGA DE LAS AGUAS COMBINADAS CON RÁPIDA ESCALONADA Y LISA HACIA LA QUEBRADA EL BATÁN.	71
FIGURA 4.2 IMPLANTACIÓN GENERAL DE LA DESCARGA CON RÁPIDA ESCALONADA EN LA QUEBRADA EL BATÁN.	71
FIGURA 4.3 VISTA EN TRES DIMENSIONES DE LA PROLONGACIÓN DEL COLECTOR CUYA SECCIÓN ES UN TÚNEL BAÚL.	72
FIGURA 4.4 VISTA EN TRES DIMENSIONES DEL PRIMER CUENCO DE DISIPACIÓN.....	73
FIGURA 4.5 VISTA EN 3D DE LA RÁPIDA ESCALONADA A MODELAR.	74
FIGURA 4.6 VISTA EN TRES DIMENSIONES DEL CUENCO DISIPADOR No 2, UBICADO AL PIE DE LA RÁPIDA 1.	75
FIGURA 4.7 PERFIL LONGITUDINAL DEL MODELO FÍSICO A ESCALA 1:20. DE LA RÁPIDA ESCALONADA.	78
FIGURA 4.8 GEOMETRÍA DE LA RÁPIDA ESCALONADA GENERADA EN EL PROGRAMA AUTOCAD.	79
FIGURA 4.9 GEOMETRÍA IMPORTADA AL PROGRAMA FLOW-3D.....	80
FIGURA 4.10 A) MALLADO ORTOGONAL CONSTANTE CON TAMAÑO IGUAL A 5 mm. B) RENDERIZADO DE LA REGIÓN MALLADA.	81
FIGURA 4.10 CONTINUACIÓN.	82
FIGURA 4.11 PARÁMETROS GENERALES PARA LA SIMULACIÓN. PROGRAMA FLOW-3D.	84
FIGURA 4.12 ACTIVACIÓN DE LA GRAVEDAD. PROGRAMA FLOW-3D.....	85
FIGURA 4.13 ACTIVACIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA. PROGRAMA FLOW-3D.	86
FIGURA 4.14 ACTIVACIÓN DEL MODELO DE AIREACIÓN EN EL FLUJO. PROGRAMA FLOW-3D.	87
FIGURA 4.15 ACTIVACIÓN DEL MODELO DRIFT FLUX. PROGRAMA FLOW-3D.....	88
FIGURA 4.16 INGRESO DE PARÁMETROS NUMÉRICAS. PROGRAMA FLOW-3D.....	89

FIGURA 5.1 ESQUEMA EN TRES DIMENSIONES (3D) DEL MODELO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	93
FIGURA 5.2 MODELO DE LA RÁPIDA ESCALONADA A 45°. IDENTIFICACIÓN DEL NÚMERO TOTAL DE ESCALONES.	99
FIGURA 5.3 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD A LO LARGO DE LA RÁPIDA. (A) SIMULACIÓN “S0”, TAMAÑO DE MALLA IGUAL A 5mm. (B) SIMULACIÓN “S1”, TAMAÑO DE MALLA IGUAL A 4mm (C) SIMULACIÓN “S2”, TAMAÑO DE MALLA IGUAL A 3mm (D) SIMULACIÓN “S3”, TAMAÑO DE MALLA IGUAL A 2mm.	101
FIGURA 5.4 RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA VISCOSIDAD DINÁMICA.	109
FIGURA 5.5 PERFIL DEL FLUJO RASANTE Y PORCENTAJE DE CONCENTRACIÓN DE AIRE A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.	112
FIGURA 5.6 PERFIL DEL FLUJO RASANTE Y VELOCIDADES DEL FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.	113
FIGURA 6.1 GEOMETRÍA DE LOS ESCALONES.	121
FIGURA 6.2 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL ESCALÓN No 70.....	122
FIGURA 6.3 ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES.	124
FIGURA 6.4 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO EN LA RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{\text{MODELO}}= 13.97 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}= 25 \text{ m}^3/\text{s}$	127
FIGURA 6.5 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO EN LA RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{\text{MODELO}}= 22.36 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}= 40 \text{ m}^3/\text{s}$	127
FIGURA 6.6 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO EN LA RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{\text{MODELO}}= 27.95 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}= 50 \text{ m}^3/\text{s}$	128
FIGURA 6.7 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO EN RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{\text{MODELO}}= 41.92 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}= 75 \text{ m}^3/\text{s}$	128
FIGURA 6.8 ENERGÍA HIDRÁULICA TOTAL A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.	136
FIGURA 6.9 REGIONES PARTICULARES EN EL FLUJO RASANTE.	139
FIGURA 6.10 CUENCO DISIPADOR DE ENERGÍA AGUAS ARRIBA DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	140

LISTADO DE CUADROS

CUADRO 1.1 RELACIONES EXPERIMENTALES Y CONDICIONES PARA LA FORMACIÓN DE NAPPE FLOW.	4
CUADRO 1.2 RELACIONES EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN NAPPLE FLOW.	5
CUADRO 1.3 RELACIONES EXPERIMENTALES PARA IDENTIFICAR EL FLUJO EN TRANSICIÓN.	6
CUADRO 1.4 RELACIONES EXPERIMENTALES DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y FACTOR DE FRICCIÓN DEL FLUJO.	9
CUADRO 1.5 RELACIONES PARA IDENTIFICAR EL PUNTO DE INICIO DE ARRASTRE DE AIRE.....	11
CUADRO 1.6 PROFUNDIDAD DEL FLUJO AUTOAIREADO AL 90% DE CONCENTRACIÓN DE AIRE.	12
CUADRO 1.7 CONCENTRACIÓN DE AIRE.	13
CUADRO 1.8 DETERMINACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA.	14
CUADRO 1.9 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA FLOW-3D.....	21
CUADRO 4.1 DIMENSIONES EN PROTOTIPO Y EN MODELO.	77
CUADRO 4.2 CONDICIONES DE FRONTERA PARA EL CASO DE APLICACIÓN.....	83
CUADRO 5.1 PLAN DE SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA EL ANÁLISIS DEL TAMAÑO DE MALLA.	97
CUADRO 5.2 TIEMPO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA	100
CUADRO 5.3 PLAN DE SIMULACIONES NUMÉRICAS SEGÚN EL MODELO DE TURBULENCIA.	106
CUADRO 5.4 TIEMPO Y DURACIÓN EN TIEMPO REAL DE LA CORRIDA PREVIO EL ALCANCE DE LA ESTABILIDAD Y CONVERGENCIA.....	107
CUADRO 6.1 PLAN DE SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA EL ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.	120
CUADRO 6.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL FLUJO RASANTE.	129
CUADRO 6.3 CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE Y EL FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH.....	133

CUADRO 6.4 RUGOSIDAD ABSOLUTA DE LA RAPIDA ESCALONADA Y LA RELACIÓN ADIMENSIONAL k/D_H	134
CUADRO 6.5 DISIPACIÓN DE ENERGÍA AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA PARA LA SERIE DE CAUDALES DEL PLAN DE SIMULACIONES.	137
CUADRO 6.6 COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LOS RESULTADO DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.	145
CUADRO 6.7 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO FÍSICO, MODELO NUMÉRICO Y EXPRESIONES TEÓRICAS.....	150
CUADRO 6.8 RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL MODELO FÍSICO, MODELO NUMERICO, EXPRESION TEÓRICA.....	156

LISTADO DE GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES, SEGÚN EL TAMAÑO DE MALLA.....	102
GRÁFICO 5.2 PROFUNDIDAD DEL FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	104
GRÁFICO 5.3 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DEL FLUJO SEGÚN LA INFLUENCIA DEL MODELO DE TURBULENCIA.	108
GRÁFICO 5.4 INFLUENCIA DEL MODELO DE LA TURBULENCIA EN LA PROFUNDIDAD DEL FLUJO RASANTE.....	110
GRÁFICO 6.1 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES. TEÓRICO Y NUMÉRICO .	125
GRÁFICO 6.2 DISTRIBUCION DE VELOCIDADES. PLAN DE SIMULACIONES NUMÉRICAS.....	126
GRÁFICO 6.3 PARÁMETRO ADIMENSIONAL “ d_c/h ” vs DISTANCIA HASTA EL INICIO DE LA REGIÓN UNIFORME “ L_r ”.....	130
GRÁFICO 6.4 PARÁMETRO ADIMENSIONAL (d_c/h) VS VELOCIDAD MEDIA DEL FLUJO.....	131
GRÁFICO 6.5 PROFUNDIDADES DE FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	132
GRÁFICO 6.6 PARAMETRO ADIMENSIONAL “ k/D_H ” - FACTOR DE FRICCIÓN.....	135
GRÁFICO 6.7 PARÁMETRO ADIMENSIONAL “ d_c/h ” VS PROFUNDIDAD CRÍTICA EN LA CRESTA DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	146
GRÁFICO 6.8 PARÁMETRO ADIMENSIONAL (d_c/h) VS PROFUNDIDAD DEL FLUJO EN LA REGIÓN UNIFORME.....	157

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 1.1 TIPOS DE VERTIDO EN UNA RÁPIDA ESCALONADA.	2
FOTOGRAFÍA 1.2 FLUJO DE ESCALÓN EN ESCALÓN.....	3
FOTOGRAFÍA 1.3 FLUJO RASANTE EN UN VERTEDERO ESCALONADO.....	7
FOTOGRAFÍA 1.4 MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.....	19
FOTOGRAFÍA 2.1 CARACTERÍSTICAS DEL TIPO DE FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO.....	46
FOTOGRAFÍA 5.1 MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA CONSTRUIDA A ESCALA 1:20.	94
FOTOGRAFÍA 6.1 FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA. (A) PRUEBA EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.....	141
FOTOGRAFÍA 6.2 FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA. (A) PRUEBA EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.....	142
FOTOGRAFÍA 6.3 FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA. (A) PRUEBA EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.....	143
FOTOGRAFÍA 6.4 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA.	144
FOTOGRAFÍA 6.5 INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN DEL FLUJO EN UNA RÁPIDA ESCALONADA. (A) MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.	147
FOTOGRAFÍA 6.6 INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN DEL FLUJO EN UNA RÁPIDA ESCALONADA. (A) MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.	148
FOTOGRAFÍA 6.7 INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN DEL FLUJO EN UNA RÁPIDA ESCALONADA. (A) MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.	149

FOTOGRAFÍA 6.8 FLUJO RASANTE. CONCENTRACIÓN DE AIRE. (A)	
MODELO FÍSICO, VISTA LATERAL (B) MODELO FÍSICO, VISTA FRONTAL (C)	
MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D, VISTA LATERAL.....	152
FOTOGRAFÍA 6.9 FLUJO RASANTE. CONCENTRACIÓN DE AIRE. (A)	
MODELO FÍSICO, VISTA LATERAL (B) MODELO FÍSICO, VISTA FRONTAL (C)	
MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D, VISTA LATERAL.....	153
FOTOGRAFÍA 6.10 FLUJO RASANTE. CONCENTRACIÓN DE AIRE. (A)	
MODELO FÍSICO, VISTA LATERAL (B) MODELO FÍSICO, VISTA FRONTAL (C)	
MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D, VISTA LATERAL.....	154
FOTOGRAFÍA 6.11 FLUJO RASANTE. CONCENTRACIÓN DE AIRE. (A)	
MODELO FÍSICO, VISTA LATERAL (B) MODELO FÍSICO, VISTA FRONTAL (C)	
MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D, VISTA LATERAL.....	155

LISTADO DE PLANOS

PLANO No 1 VISTA EN PERSPECTIVA DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	201
--	-----

SIMBOLOGÍA

A_x, A_y, A_z : Área fraccional abierta a fluir según el eje de dirección.	$\frac{h}{L}$: Pendiente de la rápida
α : Aceleración	$H_{\text{máx}}$: Energía total aguas arriba del vertedero.
C: Velocidad de onda	H_r : Energía residual.
CFL: Número de Courant.	Δh : Pérdida de energía.
C_D : Coeficiente de fracción, 0.50 para formas esféricas.	k: Rugosidad generada por el escalón.
C_f : Coeficiente de fricción.	k- ϵ : Modelo de turbulencia.
E: Energía	K_T : Energía cinética turbulenta.
ϵ : Tasas de disipación viscosa.	k_p : Coeficiente de arrastre por unidad de volumen.
f_x, f_y, f_z : Aceleraciones viscosas.	L_t : Tamaño característico de los remolinos turbulentos
F_r : Número de Froude.	l: Longitud del escalón.
f: Factor de fricción de Darcy-Weisbach.	q: Caudal unitario.
f_e : Factor de fricción en la región uniforme.	ρ : Densidad del flujo mixto
δ : Desarrollo de la capa límite.	p: Presión
g: Aceleración de la gravedad	P_t : Fuerza por perturbaciones turbulentas
G_x, G_y, G_z : Aceleraciones del cuerpo.	P_d : Fuerza de gravedad y tensión superficial.
h: Altura del escalón.	Re: Número de Reynolds

H_d : Altura del vertedero.	VOF: Método Volumen of fluid
R_{SOR} : Fuente másica.	y_2 : Profundidad del flujo al pie de la rápida.
R_{DIF} : Término de difusión turbulenta.	$y_{90,u}$: Profundidad del flujo mixto uniforme al 90% de aireación.
R_p : Tamaño medio de la partícula, componente disperso.	y_c : Profundidad critica
RNG: Grupo renormalizado.	y_i : Profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación.
ρ_w : Densidad del agua.	Δx : Tamaño máximo de celda.
ρ_a : Densidad del aire.	x,y,z: Eje de coordenadas rectangulares
TLEN: Longitud de mezcla turbulenta	\emptyset : Propiedades extensivas
TruVOF: Unsplit lagrangian method split lagrangian method	φ : Propiedades intensivas
τ_{ij} : Tensor de Esfuerzos	∇ : Operador nabla
t: tiempo	θ : Ángulo de inclinación de la rápida.
Δt : Paso temporal.	σ : Coeficiente de la tensión superficial del agua.
V_m : Velocidad media del flujo.	μ_c : Viscosidad dinámica del flujo mixto.
$V_{m\acute{a}x}$: Velocidad máxima del flujo.	v' : Velocidad normal turbulenta.
V_F : Volumen fraccional del fluido.	
u,v,w: Componente de la velocidad en dirección de las coordenadas (x,y,z).	
μ_w : Viscosidad dinámica del agua.	
μ_a : Viscosidad dinámica del aire.	

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo principal desarrollar la modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando el paquete comercial FLOW-3D. El flujo en una rápida escalonada no es sencillo teniendo en cuenta los diferentes regímenes de flujo que se presentan a lo largo de la rápida. Actualmente el diseño de estas estructuras se realiza en función del uso de expresiones empíricas obtenidas en base a la modelación física. Y estudios complementarios en modelación numérica del flujo sobre la rápida escalonada con apoyo de un código CFD. En un modelo numérico, la calibración previa con un modelo físico es fundamental para validar los resultados obtenidos de las variables fluido-dinámicas

La modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada se desarrolló en 2 dimensiones (2D) debido a que el flujo rasante o flujo sobre el fondo virtual presenta las características de un flujo plano. Se requeriría un modelo tridimensional (3D) en casos de estudios de los vórtices o recirculaciones en todo el ancho del escalón y ondas cruzadas en sentido transversal de la rápida.

El desarrollo del trabajo de estudio se realiza con la ayuda del programa FLOW-3D. La modelación numérica tiene como base la ecuación general del movimiento y ciertos sub modelos que representan el flujo bifásico (agua-aire) en una rápida escalonada. Para el presente trabajo la combinación de ecuaciones que representan de mejor manera las características del flujo rasante y que utiliza el programa computacional son: La ecuación de continuidad, la ecuación de cantidad de movimiento, el algoritmo VOF, el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ RNG, el sub-modelo de introducción de aire y el sub-modelo de flujo deriva. Bajo estas consideraciones la comparación de los resultados de la modelación numérico con la modelación física muestra relativamente una buena concordancia.

Palabras claves: rápida escalonada, flujo rasante, introducción de aire, modelación numérica, FLOW-3D.

ABSTRACT

This work has as main objective to develop numerical modeling of skimming flow in a spillway stepped using the FLOW-3D commercial package. The flow in a spillway stepped is not easy considering the different flow regimes that occur along the spillway. Currently the design of these structures is performed according to the use of empirical expressions obtained based on physical modeling. And further studies in numerical modeling of flow over the spillway stepped with the support of a CFD code. In a numerical model, the calibration with a physical model is essential to validate the results of the dynamic fluid-variables.

Numerical modeling of flow in a spillway stepped developed in two dimensions (2D) because skimming flow or flow over the virtual background having the characteristics of a planar flow. A three-dimensional (3D) model would be required in cases of studies on or recirculation vortices across the width of the step and crosswise cross spillway waves.

The development of studio work is done with the help of FLOW-3D program. Numerical modeling is based on the general equation of motion and certain sub models representing the two-phase flow (water-air) in a spillway stepped. For this work the combination of equations representing better flow characteristics ground and using the computer program are: Equation of continuity, equation of momentum, algorithm VOF, turbulence model $k-\varepsilon$ RNG, sub-model introduction of air and sub - model drift flow. Under these considerations comparing the numerical modeling results on physical modeling relatively shows good agreement.

Keywords: spillway stepped, skimming flow, air entrainment, numerical modeling, FLOW-3D.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

1.1 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL MOVIMIENTO DEL AGUA SOBRE UNA RÁPIDA ESCALONADA.

1.1.1 INTRODUCCIÓN.

Los vertederos escalonados son estructuras hidráulicas que han venido siendo utilizados por el hombre con el fin de disipar la energía del agua por alrededor de 3000 años. En la actualidad el proceso constructivo de un vertedero escalonado resulta muy eficiente y eficaz, mediante la construcción de presas de concreto compactado con rodillo (R.C.C.).

La rápida escalonada presenta un mayor porcentaje de disipación de energía en comparación con la rápida lisa lo que es ventajoso ya que se reduce la profundidad y tamaño del cuenco amortiguador al pie del mismo. (Chanson H., 2002).

La descarga unitaria en una rápida escalonada se limita a 30 (m³/s)/m debido a la detección de daños por cavitación para descargas más altas¹.

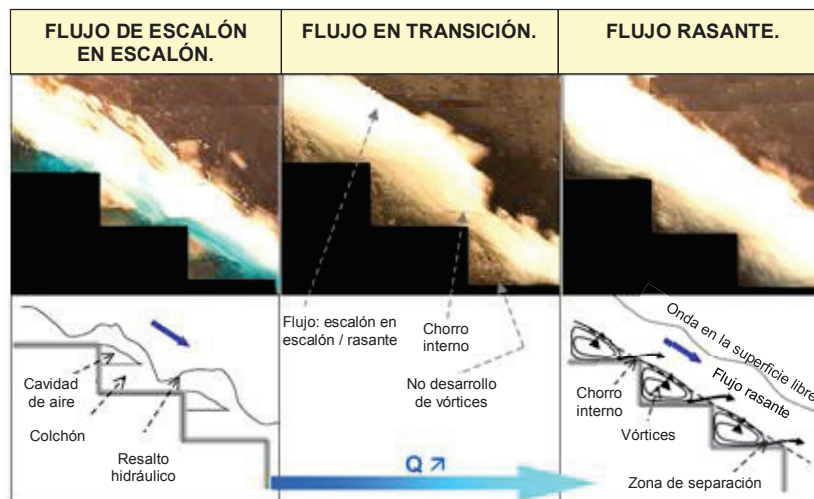
Existen tres tipos de vertido en una rápida escalonada:

- Flujo de escalón en escalón (Napple Flow).
- Flujo en transición.
- Flujo rasante (Skimming Flow).

¹ Khatsuria, R.M., (2005), Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. Department of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology Atlanta. USA.

Es necesario conocer los conceptos básicos de los tres tipos de flujos con el fin de establecer las bases y criterios para la modelación numérica del flujo en un vertedero escalonado.

FOTOGRAFÍA 1.1 Tipos de vertido en una rápida escalonada.



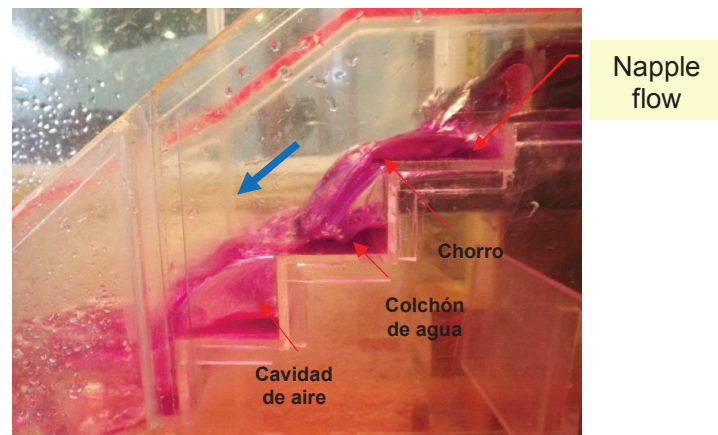
Fuente: Laboratoire de Constructions Hydrauliques Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.

1.1.2 FLUJO DE ESCALÓN EN ESCALÓN (NAPPLE FLOW)².

El flujo se caracteriza por una serie de saltos de un escalón a otro escalón. La disipación de energía se produce por la ruptura del chorro en el aire y la mezcla de este chorro en el escalón sin o con la formación del resalto hidráulico.

² Khatsuria, R.M., (2005), Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. Department of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology Atlanta, USA.

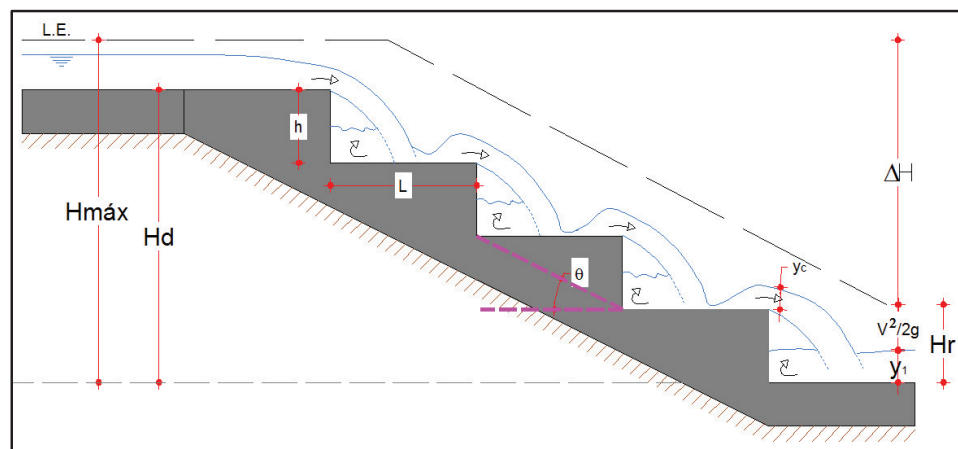
FOTOGRAFÍA 1.2 FLUJO DE ESCALÓN EN ESCALÓN



FUENTE: Vertedero Sarapullo. Modelo físico de la Presa Toachi fase 3. Proyecto hidroeléctrico Toachi Pilatón.

Los principales parámetros hidráulicos que se identifican en el flujo de escalón en escalón, según la mayoría de investigadores, son: la altura del escalón (h), longitud del escalón (L), descarga unitaria (q), ángulo de inclinación de la rápida con respecto al plano horizontal (θ). Los parámetros antes mencionados se presentan en la figura 1.1.

FIGURA 1.1 PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL FLUJO DE ESCALÓN EN ESCALÓN.



ELABORADO POR: Edwin Casa

Algunos investigadores han propuesto relaciones empíricas con el objeto de identificar en qué condiciones se presentaría un flujo de escalón en escalón. Para ello en el siguiente cuadro se resumen algunas ecuaciones experimentales y sus condiciones de aplicación.

CUADRO 1.1 RELACIONES EXPERIMENTALES Y CONDICIONES PARA LA FORMACIÓN DE NAPPE FLOW³.

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Chanson (1994-a)	$\frac{y_c}{h} \leq 0.0916 \left(\frac{h}{L}\right)^{-1.276}$ <u>Válida para:</u> $0.2 \leq \left(\frac{h}{L}\right) \leq 0.6$	Formación de nappe flow con el desarrollo completo del salto hidráulico
Yasuda et al. (2001)	$\frac{h}{y_c} = 0.57 \left(\frac{h}{L}\right)^3 + 1.3$ <u>Válida para:</u> $0 < \frac{h}{y_c} \leq 1.37 ; 0.1 \leq \left(\frac{h}{L}\right) \leq 1.43$	Límite mínimo de la altura del escalón para la formación de nappe flow.
Chanson (2001-a)	$\frac{y_c}{h} = 0.89 - 0.4 \left(\frac{h}{L}\right)$ <u>Válida para:</u> $0.05 \leq \left(\frac{h}{L}\right) \leq 1.7$	Formación de nappe flow, válida para flujo uniforme o cuasi-uniforme
Chinnarasri (2002)	$\frac{y_c}{h} = 0.98(0.55) \left(\frac{h}{L}\right)$	Límite superior para nappe flow.

ELABORADO POR: Edwin Casa

Donde:

- y_c = Profundidad crítica.
 h = Altura del escalón.
 L = Longitud del escalón.

³ Khatsuria, R.M., (2005), Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. Department of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta.

Aguas abajo, luego del descenso del agua por el vertedero escalonado, al pie se produce una disipación de la energía. Para el caso del flujo de escalón en escalón, la energía residual (H_r) al pie se expresa como:

$$H_r = y_1 + \frac{q^2}{2g(y_1)^2} \quad (1.1)$$

Donde y_1 es la profundidad de agua al pie del vertedero y q es el caudal por unidad de ancho. La disipación de energía ΔH se calcula con la ecuación 1.2, siendo $H_{m\acute{a}x}$ la energía total aguas arriba del vertedero.

$$\Delta H = H_{m\acute{a}x} - H_r \quad (1.2)$$

Algunas relaciones para el cálculo de la disipación de energía en este tipo de flujo, desarrolladas mediante estudios experimentales se describen en el cuadro 1.2.

CUADRO 1.2 RELACIONES EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN NAPPLE FLOW.

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Chanson (1994-b)	$\frac{H_r}{H_{m\acute{a}x}} = \frac{0.54 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.55}}{1.5 + \left(\frac{H_d}{y_c}\right)}$	Disipación de energía para nappe flow, con formación del resalto hidráulico.
Fratino et al (2000)	$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} = 1 - \frac{y_1 + \frac{1}{2} \frac{y_c^3}{y_1^3}}{H_d + \left(\frac{3}{2}\right) y_c}$	Disipación de energía para flujo de escalón en escalón.
$H_d =$	Altura del vertedero medida desde la cresta hasta el pie del mismo	

ELABORADO POR: Edwin Casa

1.1.3 FLUJO EN TRANSICIÓN.

Con el incremento del caudal de descarga por la rápida, se va perdiendo el flujo de escalón en escalón (nappe flow) y aparece este régimen que se caracteriza por un alto grado de aireación, salpicaduras de agua, caótico, etc. A continuación se resumen relaciones experimentales que indica el inicio del flujo donde no se puede identificar precisamente el flujo de escalón en escalón ni el flujo rasante.

CUADRO 1.3 RELACIONES EXPERIMENTALES PARA IDENTIFICAR EL FLUJO EN TRANSICIÓN.

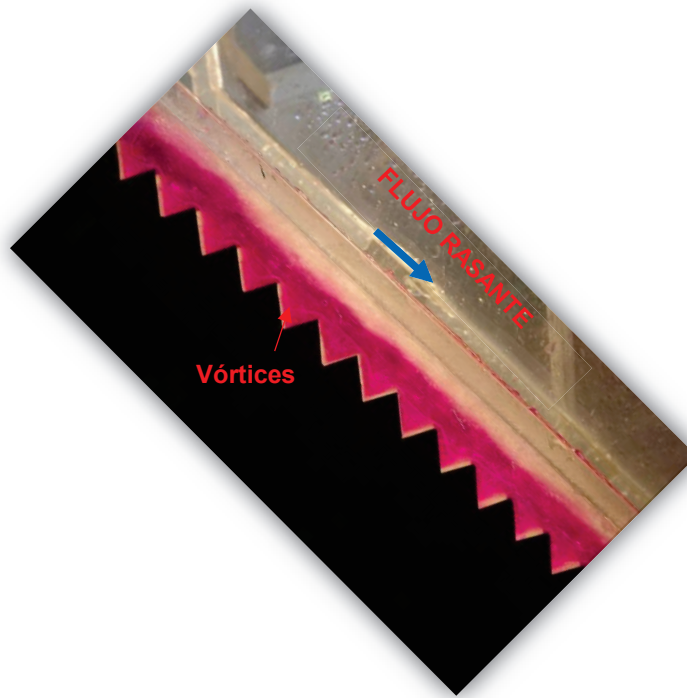
AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Rajaratnam (1990)	$\frac{y_c}{h} > 0.80$ <u>Válida para</u> $0.4 < \left(\frac{h}{l}\right) < 0.9$	Régimen de transición entre nappe flow y skimming flow.
Chanson (1994 – a)	$\frac{y_c}{h} > 1.057 - 0.465 \left(\frac{h}{l}\right)$ <u>Válida para</u> $0.2 \leq \left(\frac{h}{l}\right) \leq 1.25$	
Mondardo et al (1995)	$\frac{y_c}{h} > 1.1974 - 0.59501 \left(\frac{h}{l}\right)$	
Boes (2000)	$\frac{y_c}{h} = 0.91 - 0.14 \left(\frac{h}{l}\right)$ <u>Válida para</u> $0.47 < \left(\frac{h}{l}\right) < 1.43$	

ELABORADO POR: Edwin Casa

1.1.4 FLUJO RASANTE (SKIMMING FLOW)⁴.

Incrementando el caudal en la rápida escalonada el flujo de agua llena todas las cavidades de los escalones formándose de ésta manera un fondo virtual o fondo falso. A esto se lo conoce como flujo rasante completamente desarrollado, se caracteriza por un flujo aireado en la superficie libre, formación de burbujas y vórtices estables en los escalones.

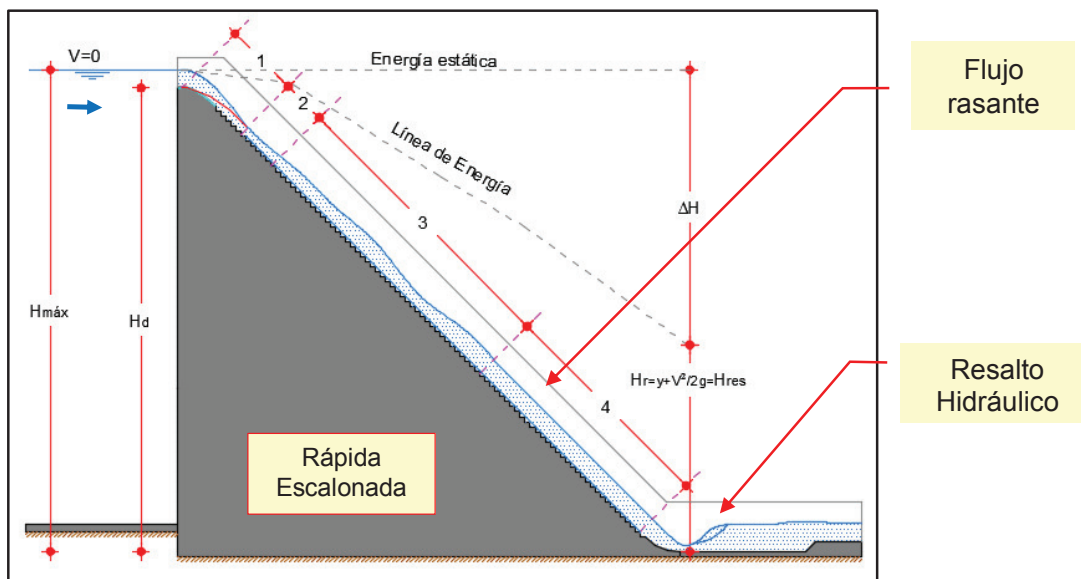
FOTOGRAFÍA 1.3 FLUJO RASANTE EN UN VERTEDERO ESCALONADO.



FUENTE: Vertedero Sarapullo. Modelo físico de la presa Toachi fase 3. Proyecto hidroeléctrico Toachi Pilatón.

⁴ Humberto Chanson, (2015). International Association for Hydro-environment Engineering and Research. School of civil engineering, University of Queensland, Brisbane, Australia.

FIGURA 1.2 RÁPIDA ESCALONA, ESQUEMA DEL FLUJO RASANTE.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

En la figura 1.2 se identifican las cuatro zonas presentes en el tipo de flujo rasante, según la literatura técnica: (1) Flujo no aireado similar al flujo en superficie lisa. Se presenta el crecimiento de la capa límite hasta la superficie libre del flujo. (2) Desarrollo del flujo parcialmente aireado. (3) Desarrollo del flujo completamente aireado. (4) Flujo en estado de equilibrio, uniforme y completamente aireado.

Entre las consideraciones más relevantes para el diseño de un vertedero escalonado con flujo rasante se describe las siguientes:

- La estimación de la resistencia al movimiento, es decir pérdidas de energía debido a la fricción.
- Propiedades del flujo aireado.
- Introducción y arrastre de aire.
- Disipación de energía
- Consideración de las fluctuaciones de presión y cavitación.

1.1.4.1 ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA AL MOVIMIENTO⁵.

La resistencia al movimiento depende de factores tales como: la pendiente de la rápida, la geometría de los escalones. La altura del escalón condiciona la introducción y el arrastre de aire en el flujo.

El flujo rasante o skimming flow en contacto con el flujo recirculatorio en los escalones genera un esfuerzo cortante τ cuya expresión es:

$$\tau = \frac{1}{2} C_f \rho_m u_m^2 \quad (1.3)$$

Donde:

u_m = Velocidad media del flujo.

ρ_m = Promedio de la densidad del flujo sobre la profundidad con 90% de aireación.

C_f = Coeficiente de fricción.

Algunos investigadores analizan la resistencia del flujo en términos del coeficiente de fricción del flujo C_f , o del factor de fricción de Darcy-Weisbach f .

CUADRO 1.4 RELACIONES EXPERIMENTALES DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y FACTOR DE FRICCIÓN DEL FLUJO.

AUTOR	EXPRESIÓN
Rajaratnam and Katopodis (1984)	$C_f = \frac{2g y_{90} \text{sen } \theta}{u_m^2}$, $C_f = (0.05 \text{ a } 0.18)$; $Re = (5 \times 10^3 \text{ a } 1 \times 10^6)$
Tozzi (1994)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.16 + 1.24 \log \frac{y}{k}$

⁵ Khatsuria, R.M., (2005), Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. Department of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta.

Chanson et al (2001 – b)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.16 + 1.24 \log \frac{y}{k}$
Yasuda (2001)	$f = 4C_{rw} = 8 \left(\frac{y_w}{y_c} \right)^3 \text{sen}\theta$
Chinnarasri (2002)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 + 1.19 \log \frac{y_o}{k}; 0.1 \leq \left(\frac{k}{y_o} \right) \leq 2.1; \theta = 15^\circ \text{ a } 59^\circ$
Boes and Minor (2002)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{1}{\sqrt{0.5-0.42\text{sen}(2\theta)}} \left[1.0 - 0.25 \log \left(\frac{k}{D_{hwu}} \right) \right]; D_{hwu} = 4y_{wu}$ $\frac{y_{wu}}{y_c} = 0.215(\text{sen}\theta)^{-1/3}$

ELABORADO POR: Edwin Casa.

Donde:

- y = Profundidad del flujo.
k= Rugosidad generada por el escalón.
 C_{rw} = Coeficiente de fricción agua clara.
 y_w = Profundidad de agua clara
 C_{rw} = Coeficiente de fricción en agua clara. Flujo rasante.
 y_{wu} = Profundidad de agua clara. Zona uniforme en el flujo rasante.
 D_{hwu} = Longitud característica. Zona uniforme en el flujo rasante.

1.1.4.2 FLUJO AIREADO.

LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE INICIO DE ARRASTRE DE AIRE.

Agua arriba de la rápida escalonada, el flujo rasante se caracteriza por la presencia de un flujo libre, uniforme, sin arrastre de aire. Cuando el desarrollo de la capa límite llega a la superficie libre, se produce un fuerte arrastre de aire hacia aguas abajo, lo cual favorece la disipación de energía. La ubicación del punto de inicio del flujo autoaireado puede obtenerse analizando el desarrollo de la capa límite. De esta manera varios autores describen expresiones para el cálculo teórico del inicio de introducción y arrastre de aire en un flujo rasante.

CUADRO 1.5 RELACIONES PARA IDENTIFICAR EL PUNTO DE INICIO DE ARRASTRE DE AIRE.

AUTOR	EXPRESIÓN
Chanson (1994-a)	$\frac{L_i}{k} = 9.719(\text{sen}\alpha)^{0.796} F_h^{0.713} ; \frac{y_i}{k} = \frac{0.4034}{(\text{sen}\alpha)^{0.04}} F_h^{0.592} ;$ $F_h = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin \theta (h \cos \alpha)^3}}$
Chamani (2000)	$\frac{L_i}{k} = 8.29 F_i^{0.85} ; F_i = \frac{q_w}{\sqrt{g \left(\frac{h}{l}\right)^* k}}$
Matos (2000)	$\frac{L_i}{k} = 6.289 F_i^{0.734} ; \frac{y_i}{k_s} = 0.361 F_s^{0.606} ; F_s = \frac{q_w}{\sqrt{g \cdot h^3}}$
Boes and Minor (2002)	$L_i = \frac{5.90 y_c^{1.2}}{(\text{sen}\theta)^{1.4} h^{0.2}}$

ELABORADO POR: Edwin Casa.

Donde:

- k= Rugosidad, altura perpendicular al fondo falso.
- y_i = Profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación.
- L_i = Distancia medida desde el ingreso a la rápida hasta el inicio de introducción y arrastre de aire.
- F_h = Parámetro adimensional en función de altura del escalón y del caudal unitario.
- F_s = Parámetro adimensional en función de altura del escalón y del caudal unitario.
- F_i = Parámetro dimensional (m)

PROFUNDIDAD DEL FLUJO MIXTO (AGUA-AIRE).

Esta profundidad se ubica en el tramo final de la rápida escalonada. La literatura técnica menciona un flujo mixto completamente desarrollado cuando el flujo alcanza el equilibrio y contiene una concentración de aire del 90%.

Entre las expresiones para el cálculo teórico se tienen:

CUADRO 1.6 PROFUNDIDAD DEL FLUJO AUTOAIREADO AL 90% DE CONCENTRACIÓN DE AIRE.

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Boes and Boes (2000)	$\frac{y_{90,(x)}}{y_{90,(u)}} = \text{Tanh} \left[1.1 \frac{y_{90,(u)}^2 \sin \alpha}{y_c^3} (x - L_i) \right]$	
Tatewar et al. (2000)	$\text{Log} \left(\frac{y_{90,u}}{h} \right) = 0.3011 \log \left(\frac{q^2}{gh^3} \right) + 0.01696 \left(\frac{h}{l} \right) - 0.2053$	$\alpha = 51^\circ - 59^\circ$ $\frac{y_c}{h} = 0.8 \text{ a } 4.4$
Boes and Minor (2002)	$\frac{y_{90,u}}{h} = 0.50(F_h^*)^{0.1 \text{ Tan } \theta + 0.50}$ $F_h^* = \frac{q}{(g \sin \theta h^3)}$	

ELABORADO POR: Edwin Casa.

Donde:

- $y_{90,u}$ = Profundidad del flujo mixto uniforme correspondiente al 90% de concentración de aire.
- h = Altura del escalón.
- F_h^* = Parámetro adimensional en función de altura del escalón y del caudal unitario.

CONCENTRACIÓN DE AIRE.

La introducción de aire se produce principalmente cuando la energía cinética turbulenta aumenta, el aire queda atrapado y se libera de forma continua. La velocidad turbulenta normal a la superficie libre v' debe superar la presión de la

tensión superficial y ser mayor que la componente de velocidad de ascenso de la burbuja, para que la burbuja sea transportada. Estas condiciones son⁶:

$$v' = \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma}{\rho_w \cdot d_{ab}}} \quad (1.4)$$

$$v' = u_r \cdot \cos \alpha \quad (1.5)$$

Dónde: σ es la tensión superficial, d_{ab} diámetro de la burbuja de aire, u_r es la velocidad de ascenso de la burbuja y ρ_w es la densidad del agua. La distribución de la concentración de aire en el flujo rasante puede ser estimada mediante expresiones que se presentan en el cuadro 1.7.

CUADRO 1.7 CONCENTRACIÓN DE AIRE.

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Matos et al. (2000)	$C_{\text{mean}(i)} = 0.163 F_h^{0.154}$	Concentración de aire en el punto de inicio de la autoaireación.
Matos et al. (2000)	$C_{\text{mean}} = 0.210 + 0.297 \exp \left[-0.497 \left(\ln \left(\frac{L \cdot L_i}{y_i} \right) - 2.972 \right)^2 \right]$	Concentración de aire, aguas abajo del punto de inicio de la autoaireación.
Frizell et al. (2000)	$C_{\text{mean}} = 0.23 + 0.017 \left(\frac{L - L_i}{y_i} \right)$	Concentración de aire, aguas abajo del punto de inyección.

ELABORADO POR: Edwin Casa.

Donde:

$L =$ Distancia medida a lo largo de la rápida.

$F_h =$ Parámetro adimensional en función de altura del escalón y del caudal unitario.

$y_i =$ Profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación.

⁶ CHANSON, H. (1993). "Stepped Spillway Flows and Air Entrainment." Can. JI of Civil Eng., Vol. 20, No. 3, June, pp. 422-435 (ISSN 0315-1468).

$L_i =$ Distancia medida desde el ingreso a la rápida hasta el inicio de introducción y arrastre de aire.

$C_{\text{mean}} =$ Concentración de aire.

DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

La disipación de energía es generada por la recirculación del flujo en los escalones y por los vórtices que se desprenden y son arrastrados por el flujo hacia aguas abajo. En el cuadro 1.8 se presentan expresiones para el cálculo de la disipación de energía cuando se tiene un flujo uniforme y no uniforme.

CUADRO 1.8 DETERMINACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Yashuda et al. (2001)	$\frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} = 1 - \frac{\left(\frac{y_w}{y_c}\right)^{-2} + 2\left(\frac{y_w}{y_c}\right)\cos\theta}{3 + 2\left(\frac{H_d}{y_c}\right)}$	Pérdida de energía, independiente si el flujo es uniforme o no.
Chanson. (1994-b)	$\frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_a}{8\sin\theta}\right)^{1/3}\cos\theta + \frac{1}{2}\left(\frac{f_a}{8\sin\theta}\right)^{-2/3}}{3 + 2\left(\frac{H_d}{y_c}\right)}$	Flujo uniforme cuasiuniforme
Ghare et al. (2002)	$\frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} = -0.0209 \ln\left[\frac{y_c}{h}\right] + 0.9055$	Flujo no uniforme
Boes y Minor (2002)	$\frac{H_r}{H_{\text{máx}}} = \exp\left[\left(-0.045\left[\frac{k}{D_{h,w}}\right]^{0.1}(\sin\theta)^{-0.8}\right)\right]\frac{H_d}{y_c}$	Flujo no uniforme

ELABORADO POR: Edwin Casa.

Donde:

$y_w =$ Profundidad de agua referida desde el fondo virtual.

$f_a =$ Factor de fricción para el flujo aireado uniforme.

$D_{h,w} =$ Profundidad de agua clara.

$\Delta H =$ Pérdida de energía.

$H_{\text{máx}} =$ Energía total aguas arriba de la rápida escalonada.

$K =$ Rugosidad por efecto de los escalones.

En conclusión sobre la revisión bibliográfica podemos evidenciar que el diseño de una rápida escalonada en la actualidad se realiza en función de relaciones experimentales obtenidas mediante la modelación física.

Hay que considerar que una modelación hidráulica de un flujo bifásico agua-aire, altamente turbulento no puede ser modelado con precisión utilizando la similitud restringida de Froude, debido a los efectos de escala producto de la viscosidad y tensión superficial. Estudios de Boes (2000) indican que los efectos de escala serían insignificantes si se verifica en el modelo que el número de Reynolds y el número de Weber son al menos 10^5 y 10^2 , respectivamente.

Una herramienta complementaria de la modelación física hidráulica es la modelación numérica. Sus resultados, permite reducir tiempo y costos en la fase de modificaciones del diseño original de las estructuras hidráulicas, dado que la simulación numérica calibrado con el modelo físico permite desarrollar las posibles modificaciones del modelo hidráulico en forma eficiente y oportuna.

El presente trabajo de titulación analiza en un modelo numérico el vertido sobre una rápida escalonada con flujo rasante o skimming flow para un rango de caudales que van desde los $20 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el caudal de diseño que corresponde a $75 \text{ m}^3/\text{s}$.

1.2 SIMULACION NUMÉRICA DE FENÓMENOS HIDRÁULICOS, MODELOS MULTIDIMENSIONALES⁷.

Durante las últimas décadas en diversas instituciones de investigación se realizan estudios en el campo de la modelación física de estructuras hidráulicas, con el fin de mejorar el conocimiento de los fenómenos hidráulicos, y permitiendo así obtener la solución de problemas hidráulicos complejos.

El avance tecnológico en las capacidades de cálculo de los ordenadores, así como la mejora de algoritmos computacionales ha llevado a un importante desarrollo de modelos numéricos de simulación del flujo a superficie libre.

Los tipos de modelos numéricos según la dimensionalidad son: Unidimensional, bidimensional y tridimensional.

El agua es un medio continuo constituido por un número infinito de partículas, por lo que resulta virtualmente imposible determinar las propiedades físicas de cada partícula. Por ello el análisis de la dinámica del movimiento del agua resulta muy compleja en varias estructuras hidráulicas de interés práctico para el ingeniero civil⁸.

Con el objetivo de representar adecuadamente y conocer las características físicas del movimiento del flujo, se discretiza el dominio continuo en un número finito de volúmenes de control.

⁷ Fernández Oro J. M. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos. Barcelona: Reverté.

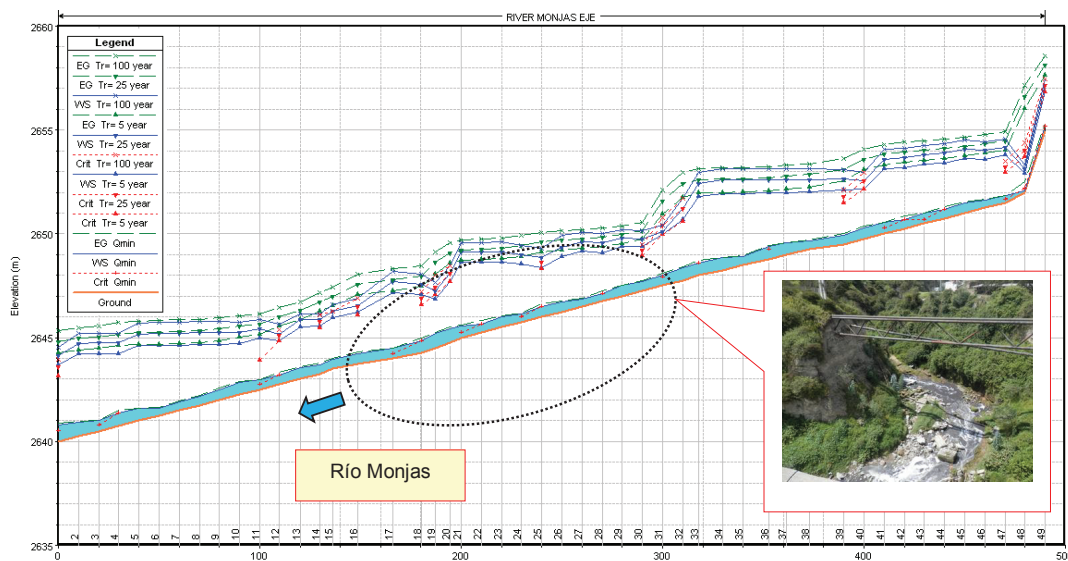
⁸ J. Antonio Maza Álvarez. (1984). Hidrodinámica, Bases para hidráulica fluvial.

1.2.1 MODELO UNIDIMENSIONAL.

Es aquella modelación numérica en donde una dimensión prevalece sobre las otras 2 dimensiones. Se considera dos condiciones en la simulación unidimensional: el primero consiste en emplear un valor medio de la velocidad, con lo cual se descarta variaciones tanto horizontales como verticales. La segunda consideración indica que la dirección del flujo es perpendicular a la sección transversal. En la sección transversal analizada con modelo unidimensional prácticamente se condiciona, expresándola en términos de valores promedio de velocidad, densidad, etc.

Como recomendación, el uso del modelo numérico unidimensional es adecuado para la evaluación del perfil de flujo a lo largo de cursos naturales de montaña y de pie de montaña, puesto que su representación unidimensional del flujo se adapta con buena aproximación al flujo real en este tipo de cursos naturales (encajonados, con un canal principal para el flujo del agua, sin valles amplios de inundación). Entre los software libres para la modelación unidimensional tenemos al paquete computacional HEC RAS.

FIGURA 1.3 MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN PROGRAMA HEC-RAS.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

1.2.2 MODELO BIDIMENSIONAL⁹.

Se conoce también como flujo plano, pues se supone que las partículas fluyen en planos paralelos y por lo tanto no existe variación o cambios de flujo en la dirección perpendicular a estos planos.

El modelo bidimensional es empleado satisfactoriamente en flujos extendidos como son ríos de llanura, donde la variación vertical de la velocidad es mínima, por ello también suelen llamarse modelos de aguas poco profundas. Entre los programas de uso libre para la modelación bidimensional tenemos al paquete computacional HEC RAS 5.0 y el programa IBER.

1.2.3 MODELO TRIDIMENSIONAL¹⁰

Una modelo tridimensional es una representación mucho más compleja del flujo donde se determina las tres componentes espaciales de las variables en función del tiempo.

Los modelos en tres dimensiones requieren la resolución numérica de la ecuación general de transporte. Una vez discretizado el dominio se plantea en cada celda las ecuaciones que resultan ser no lineales y para su fácil resolución se linealizan, obteniendo así un sistema algebraico de ecuaciones. Finalmente se resuelve numéricamente de forma iterativa el sistema algebraico para obtener la solución final del campo fluido dinámico.

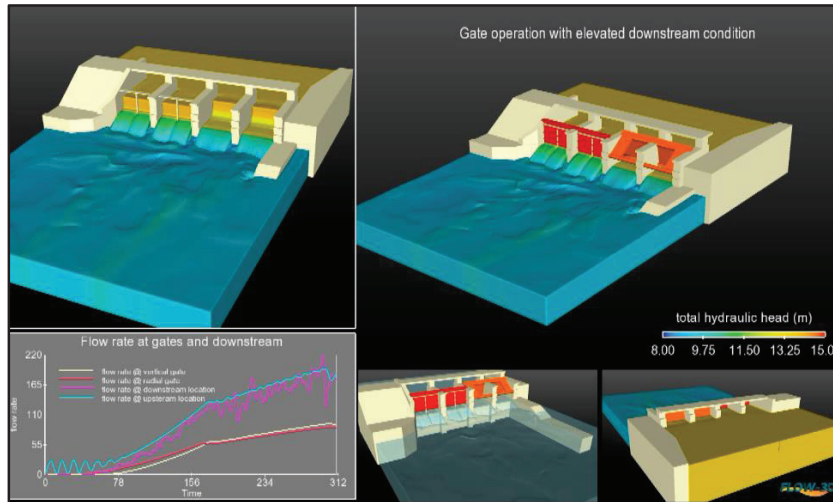
Entre los códigos CFD existentes en el mercado para la modelación tridimensional tenemos al FLOW-3D, ANSYS CFX, FLUENT. En cuanto a software libre o gratuito

⁹ Streeter Victor, Mecánica de fluidos, Novena edición, (2000), Editorial Mc Graw-Hill Interamericana, S. A, Avenida de las América 46ñ41. Santa Fé de Bogotá Colombia.

¹⁰ Streeter Victor, Mecánica de fluidos, Novena edición, (2000), Editorial Mc Graw-Hill Interamericana, S. A, Avenida de las América 46ñ41. Santa Fé de Bogotá Colombia.

tenemos al OpenFOAM el cual requiere para su empleo el sistema operativo Linux y en las últimas versiones se disponen también para el sistema operativo windows.

FOTOGRAFÍA 1.4 MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.



FUENTE: FLOW-3D V11, Webinar, may 2015.

1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD). SOFTWARE FLOW-3D.¹¹

La dinámica de fluidos computacional (CFD) consiste en la aplicación de técnicas numéricas para la resolución de fenómenos físicos que intervienen en el proceso del movimiento del fluido. Los programas creados para resolver las ecuaciones matemáticas, que expresan las leyes por las que se rigen los fluidos, son capaces de ejecutar un gran número de cálculos por unidad de tiempo.

Establecidas las base teóricas de la mecánica de fluidos donde se da lugar a las ecuaciones de Navier-Stoke, además el campo de la investigación centrado en el

¹¹ Fernández Oro J. M. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos. Barcelona: Reverté.

estudio de capas límites, turbulencia en los flujos que hasta la presente fecha son la principal línea de investigación dentro del CFD para su modelización y tratamiento. Con la aparición de modernas computadoras a mediados del siglo XX el impulsor de las técnicas CFD se constituyó el laboratorio nacional de los Álamos (LANL). En 1985 LANL comercializa el programa FLOW-3D para la modelación de flujos con superficie libre.

El software FLOW-3D resuelve en tres dimensiones las ecuaciones promediadas de Reynolds–Navier Stokes (RANS) junto con los algoritmos FAVOR y VOF para el contorno sólido y seguimiento de la superficie libre respectivamente.

El solucionador emplea el método de diferencias finitas. La presión y la velocidad están acoplados de manera implícita debido a que la presión aparece en la ecuación de momento y la velocidad se tiene en la ecuación de continuidad. De esta manera se resuelven de forma iterativa usando técnicas de relajación.¹²

FLOW-3D presenta en su estructura las siguientes etapas: Preproceso, Solucionador y postproceso.

¹² Flow Science, Inc. (2012). FLOW 3D 10.1.0 Documentation Release.

CUADRO 1.9 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA FLOW-3D.

PREPROCESO	SOLUCIONADOR	POSTPROCESO
Permite: Crear la geometría. Generar el mallado en toda la geometría Identificar claramente el fenómeno físico a simular y la propiedad del fluido. Establecer las condiciones iniciales y la condición de borde compatible para la simulación numérica.	Permite: Ejecutar la simulación y esperar que el programa resuelva de forma iterativa las ecuaciones que definen el fenómeno físico. Dependiendo de los modelos a resolver, del tamaño del mallado y de los ordenadores empleados para la simulación, éstas pueden durar desde minutos hasta semanas (o meses) de cálculos en tiempo real.	Permite: Analizar los resultados entregados por el programa Flow-3D en forma de: Textos, gráficos de las variables del fluido en una dimensión, dos dimensiones y tres dimensiones, planteado de vectores, animaciones, etc.

FUENTE: Fernández Oro J. M. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos. Barcelona: Reverté.

En resumen el solucionador del programa FLOW-3D resuelve el campo fluido-dinámico a partir de la siguiente secuencia:

1. El dominio continuo se discretiza o divide en un valor finito de volúmenes de control. Para el caso de modelación tridimensional las celdas son volumétricas y para el caso de modelación bidimensional las celdas son planas.

2. Se plantea la ecuación de conservación para la masa y cantidad de movimiento en cada celda.
3. Las ecuaciones a resolver se linealizan para obtener un sistema algebraico de ecuaciones menos complejo.
4. Por último de forma iterativa se resuelve numéricamente y así obtener la solución del problema físico simulado.

Una de las desventajas del uso del programa FLOW-3D radica en la necesidad del empleo de ordenadores muy potentes y las licencias para el uso del software, lo que encarece el costo final del proyecto de investigación.

Es muy importante contar con personal calificado que maneje el software e interprete correctamente los resultados entregados sobre la modelación numérica. Caso contrario se puede cometer errores inaceptables en el análisis numérico.

1.4 ESTADO DEL ARTE: MODELACIÓN DEL FLUJO RASANTE EN UNA RÁPIDA ESCALONADA.

Es de interés e importancia el estudio de una rápida escalonada ya que esta estructura resulta eficiente para disipar la energía en: una central hidroeléctrica, descarga de agua lluvia hacia un cuerpo receptor, venciendo grandes desniveles topográficos.

El análisis de la rápida escalonada resulta complejo debido a que se tiene diferentes regímenes del flujo y regiones a lo largo de toda la estructura. Las características del flujo en la rápida escalonada actualmente son abordadas mediante el uso de relaciones empíricas y modelos físicos, la representación de la interacción entre el aire y el agua resulta no exacta por los efectos de escala.

Con la aplicación del programa computacional Flow-3D se puede ampliar el análisis del flujo sobre una rápida escalonada. Las investigaciones en la actualidad se

centran en discusiones del flujo aireado en la región donde se presenta el flujo rasante.

A continuación se resumen cuatro investigaciones relevantes identificadas en la revisión bibliográfica acerca del estudio del flujo rasante en la rápida escalonada aplicando la metodología CFD con el programa computacional FLOW-3D.

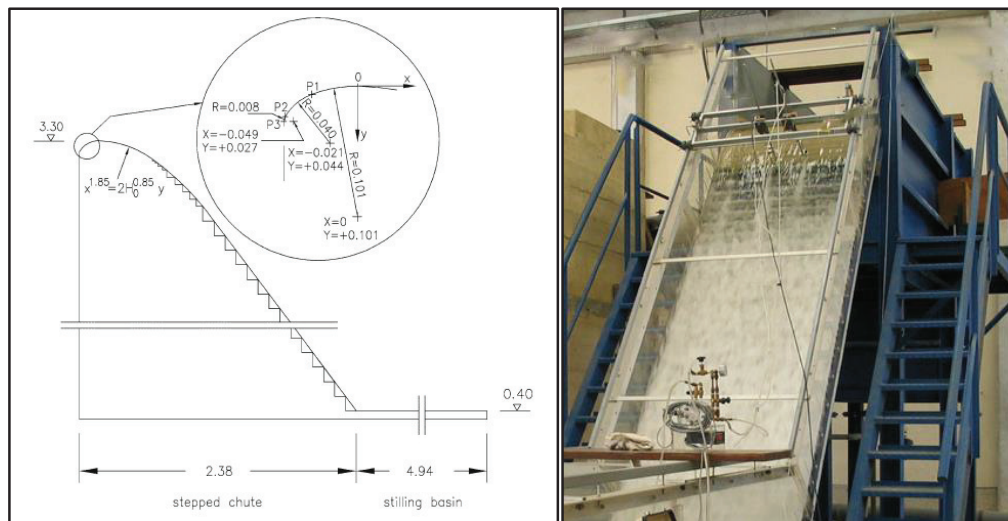
1.4.1 MEDICIONES EN LABORATORIO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN LA REGIÓN NO AIREADA DEL FLUJO RASANTE EN UN VERTEDERO ESCALONADO, CON MALLADO MULTIBLOQUE.¹³

Este estudio analiza el flujo antes del punto de inicio de la autoaireación. Se caracteriza por un flujo no aireado y de importancia para vertederos escalonados pequeños con grandes caudales específicos.

La simulación numérica representa las dimensiones del modelo físico con el objeto de analizar y comparar los resultados. El modelo físico está constituido por la rápida escalonada y un cuenco disipador al pie de la rápida. La rápida modelada tiene una altura de 2.90m con ancho de 1.0m, la pendiente tiene la relación 1V:0.75H, formando un ángulo de 53° con la horizontal. El cuenco tiene una longitud de 5m y es del mismo ancho de la rápida. En la figura 1.4 se observa la geometría anteriormente descrita.

¹³ Bombardelli, F.A., Meireles, I. and Matos, J., (2010), "Laboratory measurement and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways", *Environ Fluid Mechanics*.

FIGURA 1.4 ESQUEMA DE LA RÁPIDA ESCALONADA Y MODELO FÍSICO.



FUENTE: Bombardelli, F.A., Meireles, I. and Matos, J., (2010).

El modelo numérico se desarrolló en 2 dimensiones. El programa reconoce y resuelve la superficie libre mediante el algoritmo TruVOF. Las condiciones de frontera para la simulación, aguas arriba y aguas abajo quedan establecidas por la presión, obtenidas según las mediciones en el modelación experimental.

El uso del modelo de turbulencia $K-\epsilon$, combinado con el algoritmo TruVOF permite una buena representación de las características del flujo en la zona no aireada. La representación del arrastre de aire natural debido a la turbulencia en la superficie libre se reproduce en el modelo con la activación del sub-modelo “air entrainment”.

Los resultados hidráulicos del flujo en la cresta del vertedero se realizaron mediante el análisis de 3 tamaños de malla, que van desde los 2.7 mm hasta los 4.0 mm. El empleo de múltiples bloques ayuda en la optimización del mallado, permitiendo un ahorro en tiempo y calculo. Las corridas del modelo numérico se desarrollaron en un ordenador personal de 2,66 GHz Pentium y 8 Gb de memoria RAM.

El crecimiento de la capa limite en una rápida escalonada puede ser estimado con la misma ecuación para una rápida lisa, así:

$$\frac{\delta}{L} = a \left(\frac{L}{k_s} \right)^{-b} \quad (1.6)$$

Dónde:

δ = Desarrollo de la capa limite.

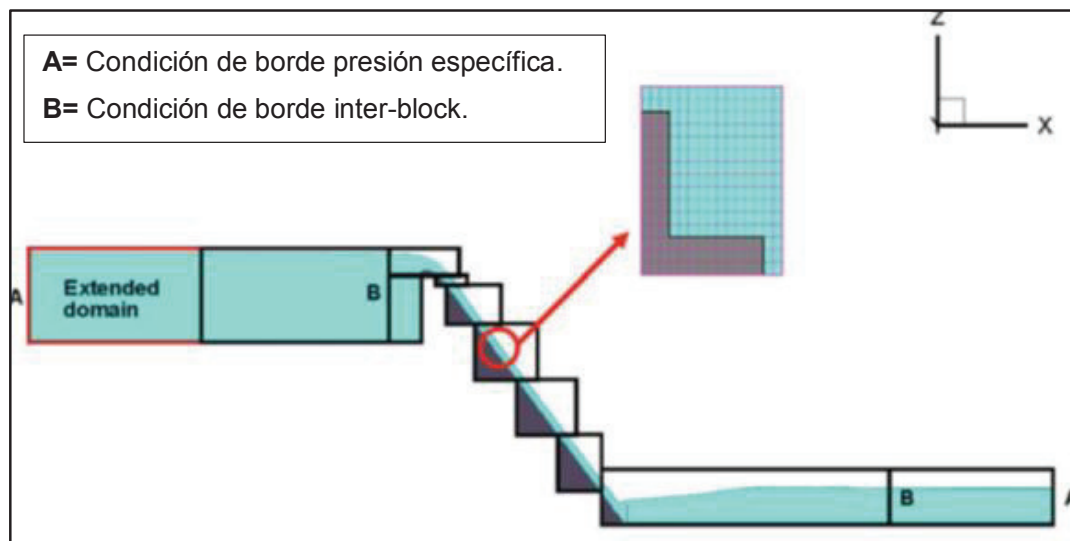
L = Longitud desde la cresta del vertedero.

k_s = Rugosidad, medida perpendicular del fondo falso en una rápida escalonada.

a, b = Números reales.

Los valores encontrados de “b” en este estudio son más superiores al valor de 0.13 (Para rápidas lisas). Esto indica el desarrollo más rápido de la capa límite en vertederos escalonados. El punto de inicio de la autoaireación corresponde a la sección donde el crecimiento de la capa límite alcanza la superficie libre del flujo.

FIGURA 1.5 DOMINIO Y CONDICIONES DE FRONTERA DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.



FUENTE: Bombardelli, F.A., Meireles, I. and Matos, J., (2010).

1.4.2 LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN EN UN VERTEDERO ESCALONADO CON PENDIENTE FUERTE.¹⁴

En este estudio la geometría del modelo numérico tiene las dimensiones del modelo físico, comprende un canal de aproximación de 0.50 m de ancho y 3.40 m de longitud. La cresta del vertedero de forma curva se une con el vertedero escalonado que tiene un ángulo de inclinación de 50°. La contrahuella tiene una altura de 0.093m y la huella es de 0.078m. En la figura 1.6 se muestra el perfil de la rápida escalonada.

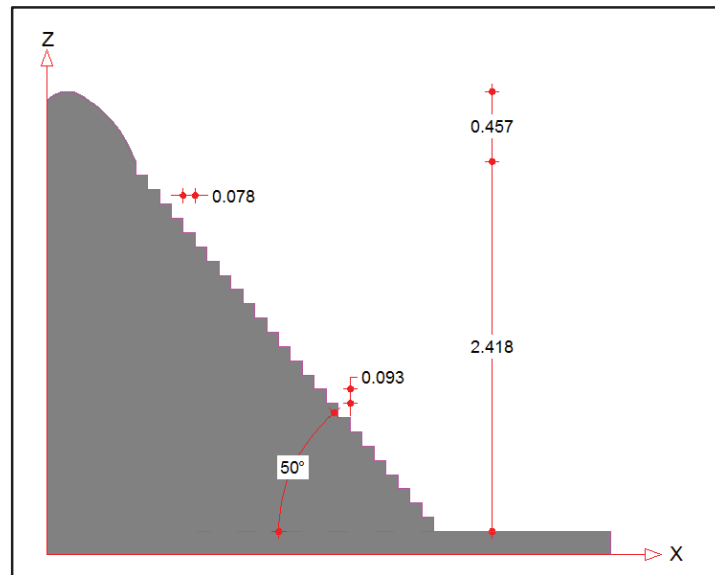
Las características y configuración del modelo numérico para la simulación en el programa FLOW 3D son:

- Empleo de modelos de turbulencia $k - \varepsilon$ RNG y LES (Large Eddy simulation).
- Consideración de la introducción de aire en el flujo turbulento. (Descripción del sub-modelo en el numeral 2.7)
- Dominio de la modelación en 2 dimensiones. (750000 celdas)

En la figura 1.7 se muestra el resultado de la modelación numérica con introducción de aire, el valor 1.00 indica que la celda está llena de fluido y el valor 0.00 indica que la celda está vacía de fluido.

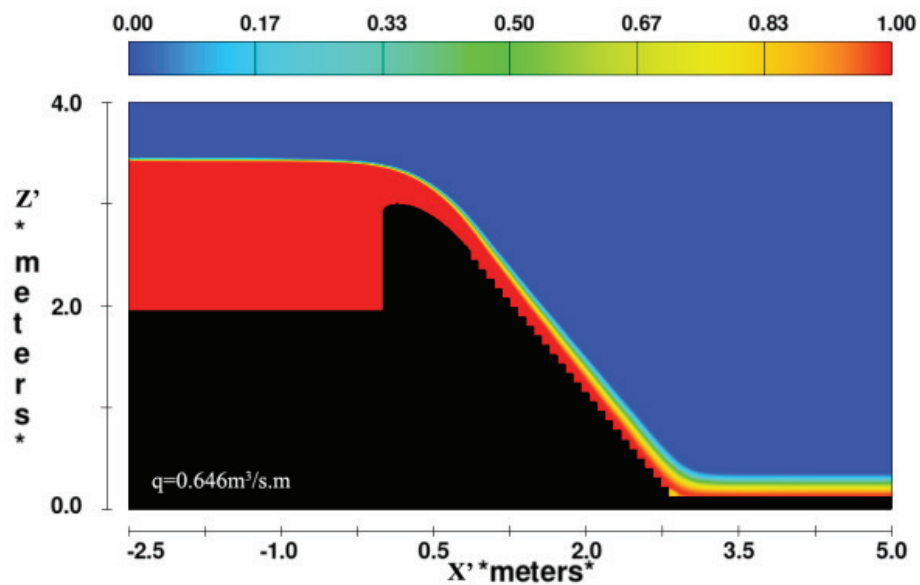
¹⁴ Sarfaraz M., Attari, J. and Pfister M., (2012) "Numerical Computation of Inception Point Location for Steeply Sloping Stepped Spillways", 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Iran.

FIGURA 1.6 GEOMETRÍA DE LA RÁPIDA ESCALONADA.



FUENTE: Sarfaraz M., Attari, J. and Pfister M., (2012) "Numerical Computation of Inception Point Location for Steeply Sloping Stepped Spillways

FIGURA 1.7 FLUJO MIXTO (AGUA-AIRE) EN LA RÁPIDA ESCALONADA



FUENTE: Sarfaraz M., Attari, J. and Pfister M., (2012) "Numerical Computation of Inception Point Location for Steeply Sloping Stepped Spillways.

1.4.3 PROCESO DE TRANSPORTE DE AIRE EN LA RÁPIDA ESCALONADA CON PENDIENTE MODERADA.¹⁵

El estudio se basa en un modelo numérico en tres dimensiones, acerca del flujo sobre un vertedero escalonado, en donde analiza la zona no aireada y la autoaireada.

Las dos regiones de flujo tienen comportamientos muy distintos y se consideran sub-modelo modelos diferentes para la estimación de la introducción y transporte de aire.

La geometría de la rápida escalonada presenta una pendiente de 1V:2H, un ancho de la rápida igual a 30 cm, 23 escalones y una altura de caída total de 2.34 m.

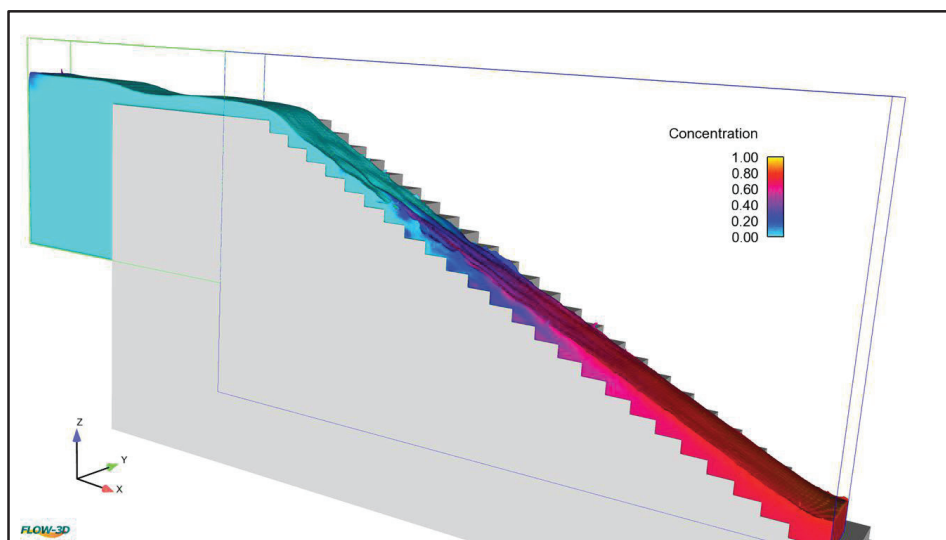
Las características y configuración del modelo numérico para la simulación en el programa FLOW 3D son:

- Modelos de turbulencia $k - \varepsilon$ RNG
- Sub-modelo air entrainment. El sub-modelo identifica correctamente cuando el aire se incorpora al flujo. (Descripción del sub-modelo en el numeral 2.7)
- Sub-modelo drift-flux. (Descripción del sub-modelo en el numeral 2.8)
- Dos bloques de malla (El bloque 1 con tamaño de celdas igual a 0.0126m y el bloque 2 con tamaño de celdas igual a 0.0063.)
- Total de celdas de 7,5 millones.

En la figura 1.8 se observa el flujo autoaireado y el proceso de aumento del flujo en el modelo numérico con la misma descarga. El exceso de volumen de flujo se prevé debido a la sobreestimación de la entrada de aire.

¹⁵ Valero, D., Bung, D., (2015), "Hybrid investigation of air transport processes in moderately sloped stepped spillway flows", E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands.

FIGURA 1.8 CONCENTRACIÓN DE AIRE Y AUMENTO DEL VOLUMEN DE FLUJO A LA SALIDA DE LA RÁPIDA.



FUENTE: Valero, D., Bung, D., (2015), “Hybrid investigation of air transport processes in moderately sloped stepped spillway flows.”

En la figura anterior la consideración de concentración de aire para la profundidad de agua con el 90 % de aireación es menor al 90%, esta diferencia es debido a que el programa resuelve el arrastre del aire como un escalar, donde la condición de contorno en la superficie libre $C=100\%$. Esta manera de simplificar del programa FLOW-3D, condiciona el real comportamiento del fenómeno de autoaireación.

1.4.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA REGIÓN DEL FLUJO UNIFORME EN UNA RÁPIDA ESCALONADA¹⁶.

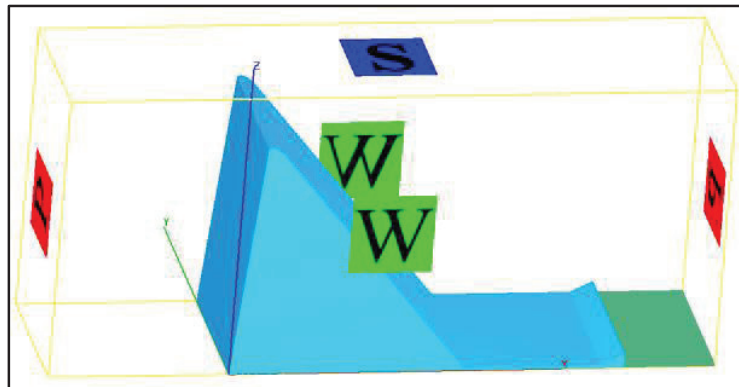
La geometría de la rápida escalonada tiene las dimensiones del prototipo, con una pendiente 1.2 V; 1.0 H, posee 70 escalones, la altura del escalón es de 1.20 m y la longitud del mismo es de 1.0 m.

¹⁶ Sarfaraz, M. and Attari, J. (2011), “Numerical Simulation of Uniform Flow Region over a Steeply Sloping Stepped Spillway”, 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Las características y configuración del modelo numérico para la simulación en el programa FLOW 3D son:

- Modelo de turbulencia $k - \epsilon$ RNG.
- Sub-modelo air entrainment. El modelo reconoce correctamente cuando el aire se incorpora al flujo.
- Sub-modelo drift-flux.
- Las condiciones de frontera para resolver la simulación son: en la dirección Z condición de simetría, en la dirección X la condición de presión específica de estancamiento y en la dirección Y la condición de pared, lo que implica velocidades normales nulas en la pared.(Ver Figura 1.9)

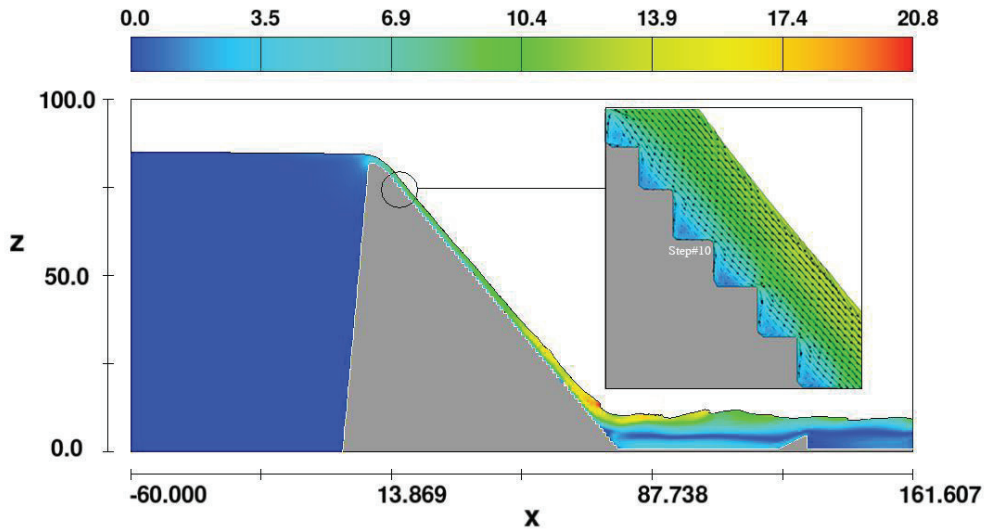
FIGURA 1.9 CONFIGURACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA.



FUENTE: Sarfaraz, M. and Attari, J. (2011), "Numerical Simulation of Uniform Flow Region over a Steeply Sloping Stepped Spillway".

En la figura 1.10, las velocidades de flujo en la rápida escalonada aumentan en la parte superior de la misma, pero tiende a un valor constante dentro de la región del flujo uniforme en el tramo final de la rápida. La distribución de velocidades en la dirección vertical muestra que la magnitud de velocidad va en aumento desde el fondo falso hacia la superficie libre del flujo.

FIGURA 1.10 VELOCIDAD DE FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA.



FUENTE: Sarfaraz, M. and Attari, J. (2011), “Numerical Simulation of Uniform Flow Region over a Steeply Sloping Stepped Spillway”.

1.5 CONCLUSIONES: BASES Y CRITERIOS DISPONIBLES EN LA LITERATURA TÉCNICA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO RASANTE EN EL PROGRAMA FLOW 3D.

En conclusión se describe a continuación las ecuaciones que tienen características especiales para la resolución del flujo bifásico (agua-aire) en una rápida escalonada particularmente cuando el flujo es rasante:

- El paquete comercial FLOW-3D resuelve en tres dimensiones las ecuaciones promediadas de Reynolds–Navier Stokes (RANS), en donde la representación de la turbulencia con el modelo $k-\varepsilon$ Renormalizado muestra buenos resultados en investigaciones y estudio del flujo rasante.
- FLOW-3D además emplea el algoritmo FAVOR para el tratamiento del contorno sólido y el algoritmo VOF ó TruVOF para la solución del seguimiento de la superficie libre del agua.

- El solucionador emplea el método de diferencias finitas. La variable de la presión se tiene en la ecuación de momento y la variable de la velocidad en la ecuación de continuidad. Por esta razón la presión y la velocidad están acoplados de manera implícita en la solución del campo fluido-dinámico y se resuelven de manera iterativa usando técnicas de relajación.
- El sub-modelo air entrainment, permite identificar adecuadamente cuando el aire se incorpora al flujo.
- El Sub-modelo drift flux o emulsión de aire, identifica un flujo compuesto de agua con burbujas de aire en una rápida escalonada, produciendo diferencias de velocidad debido a las diferentes densidades. El objetivo del modelo drift flux es calcular el movimiento de las dos fases (agua-aire) relacionando el volumen con el promedio de su velocidad.
- Es importante iniciar una simulación con condiciones de frontera obtenidas del modelo experimental y posteriormente los resultados de la simulación numérica comparar con los registros experimentales como: velocidad media, profundidad del flujo, la ubicación de la región del punto de inicio de autoaireación y la ubicación de la región uniforme completamente autoaireado para así de esta forma validar y complementar el estudio en modelo físico del diseño hidráulico de un vertedero escalonado.

CAPITULO 2.

HIDRODINÁMICA: BASE TEÓRICA APLICABLE PARA EL ANÁLISIS DEL FLUJO RASANTE.

2.1 INTRODUCCION

Los procesos fundamentales del movimiento de un fluido son la transferencia de masa, cantidad de movimiento y calor. Cada uno asociado a su vez con una ley básica de la física.

Otras importantes formulaciones complementarias que describen los fenómenos moleculares son las que relacionan los esfuerzos con las deformaciones, denominadas ecuaciones constitutivas del fluido.

Con base a los principios de conservación de masa y la segunda ley de Newton, se obtienen las ecuaciones fundamentales de la hidráulica: la ecuación de continuidad y la ecuación de cantidad de movimiento respectivamente. Cuando a las ecuaciones de cantidad de movimiento (Ecuación de Euler) se combina con las ecuaciones constitutivas del fluido resulta la ecuación general del movimiento o ecuación de Navier-Stokes¹⁷.

En hidromecánica estos estudios comprenden dos etapas:

- Establecer las ecuaciones diferenciales o integrales que gobiernan el movimiento (ley) de una partícula fluida.
- Establecer diferentes métodos numéricos utilizados para resolver estas ecuaciones de transporte de fluido.

¹⁷ Maza J. Antonio Maza Álvarez. (1984). Hidrodinámica, Bases para hidráulica fluvial.

El movimiento del fluido en un campo es considerado un medio continuo, donde se identifica una distribución continua de una cantidad escalar (magnitud), vectorial (tres valores asociados a las tres direcciones ortogonales) o tensorial (cantidades más complejas que requieren nueve o más componentes escalares para una especificación completa, entre éstas, están los esfuerzos, las deformaciones y los momentos de inercia).

El estudio del movimiento de una partícula y las leyes que gobiernan el transporte de un fluido pueden establecerse con base en los principios que rigen el movimiento de esa partícula, estas son: A lo largo de la línea de corriente, a través de un área o sección transversal y de un volumen de control.

En hidráulica para el análisis del movimiento del fluido se usa principalmente volúmenes de controles infinitesimales y finitos que conducen al establecimiento de ecuaciones diferenciales y ecuaciones integrales respectivamente.

Las propiedades de un sistema analizado generalmente pueden clasificarse en dos grupos: En propiedades extensivas (ϕ), que son aquellas que dependen de la cantidad de materia existente en el sistema como la masa, el volumen y la cantidad de movimiento. Y en propiedades intensivas (φ), siendo estas independientes a la cantidad de materia en el sistema como: la densidad, la presión, la velocidad o cualquier otra propiedad que sea dada por unidad de masa.

Las leyes de gobierno del movimiento del fluido pueden formularse mediante dos procedimientos: Método de Lagrange y Método de Euler.

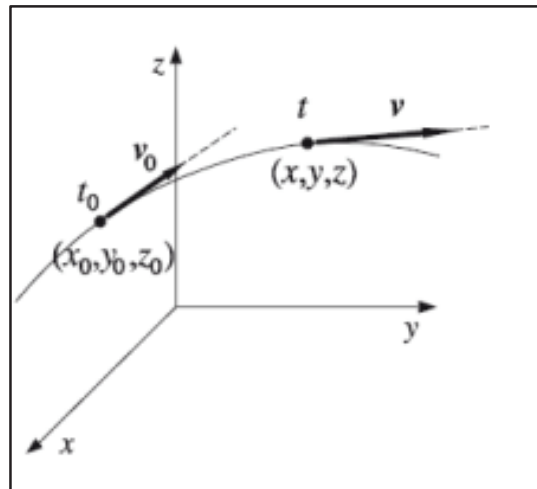
MÉTODO DE LAGRANGE.

Este método fija el análisis en una cantidad determinada de materia es decir identifica a la partícula de fluido y sigue sus desplazamientos y deformaciones durante cierto tiempo. De esta manera se obtiene su trayectoria, velocidad, presión a partir de su posición original y de cada intervalo de tiempo transcurrido desde que ocupaba tal posición.

La posición o coordenadas de las partículas dependen y se expresan como funciones del tiempo y movimiento del fluido así:

$$r = r(r_0, t) \begin{cases} x = x(x_0, y_0, z_0, t) \\ y = y(x_0, y_0, z_0, t) \\ z = z(x_0, y_0, z_0, t) \end{cases} \quad (2.1)$$

FIGURA 2.1 SISTEMA ANALIZADO EN EL MÉTODO DE LAGRANGE.



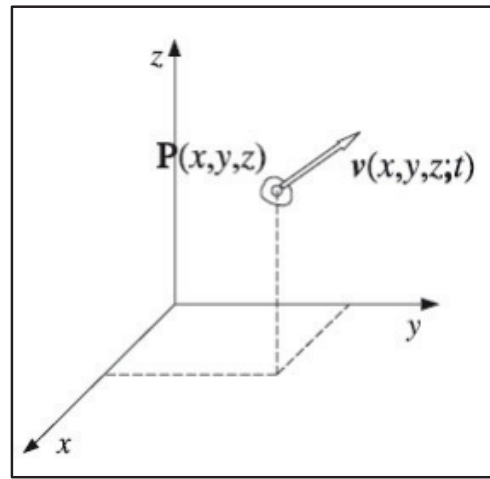
ELABORADO POR: Edwin Casa.

MÉTODO DE EULER.

Analiza un volumen arbitrario por cuyas fronteras existe intercambio de masa o de otras propiedades. Es decir este método fija e identifica un punto o una región dentro del campo de flujo y permite conocer lo que ocurre conforme pasa el tiempo.

Podemos conocer en cualquier punto P; la velocidad y la presión. La velocidad de las partículas en cada punto son variables dependientes que están dadas como función del tiempo y de las coordenadas x, y, z de cada punto, siendo estas últimas variables independientes.

$$V = f(x, y, z, t) \quad (2.2)$$

FIGURA 2.2: SISTEMA ANALIZADO EN EL MÉTODO DE EULER.

ELABORADO POR: Edwin Casa.

2.2 ECUACIÓN GENERAL DE CONSERVACIÓN¹⁸.

De manera general se obtiene una ecuación aplicable a un volumen de control (VC) partiendo del principio de conservación y considerando una variable específica ϕ sobre un volumen de control de dimensiones $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ así:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Incremento de } \phi \\ \text{en el volumen} \\ \text{de control} \\ \text{respecto al tiempo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Flujo neto de } \phi \\ \text{que entra} \\ \text{en el volumen} \\ \text{de control} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Generación neta de } \phi \\ \text{en el interior} \\ \text{del volumen de control} \\ \text{respecto al tiempo} \end{array} \right]$$

Además teniendo en cuenta los dos mecanismos fundamentales de la generación de un flujo como son: la convección, la cual asocia el fluido a nivel macroscópico y la difusión, originado a nivel molecular o microscópico podemos obtener en forma vectorial la ecuación general de movimiento como:

¹⁸ Fernández Oro J. M. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos. Barcelona: Reverté.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S \quad (2.3)$$

Dónde:

$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}$	Término temporal , variación local en el tiempo en el interior del VC.
$\nabla \cdot (\rho\vec{V}\phi)$	Término convectivo , transporte de la variable de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo
$\nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi)$	Término difusivo , fenómenos a nivel molecular, ley de newton para la difusión de cantidad de movimiento por efectos viscosos.
S	Término fuente , generación de la variable transportada.

A partir de la ecuación general de transporte o movimiento se obtiene la ecuación de continuidad y la ecuación de cantidad de movimiento.

2.3 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD¹⁹.

En base al principio de conservación de masa que dice: la masa no se crea ni se destruye, sino se conserva se obtiene la ecuación de continuidad que establece en forma general el incremento de masa en el interior de un elemento fluido es consecuencia del flujo neto de masa hacia dicho elemento. Para un fluido en general la ecuación tridimensional de continuidad no estacionaria es:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2.4)$$

La ecuación 2.4 en forma vectorial se tiene:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}) = 0 \quad (2.5)$$

¹⁹ Fernández Oro J. M. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos. Barcelona: Reverté.

Para la mayoría de los casos prácticos de ingeniería hidráulica, el fluido es incompresible y la ecuación de continuidad se simplifica obteniendo así:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.6)$$

La ecuación 2.6 también representa la divergencia del vector velocidad y esta es igual a cero.

En el programa FLOW-3D las ecuaciones de movimiento están escritas en términos de coordenadas cartesianas (x,y,z) y en coordenadas cilíndricas (r,θ,z). Además estas ecuaciones están expresadas en función de: fracciones de área y volumen, ambas independientes del tiempo si no se emplea el sub-modelo de obstáculo en movimiento.

La ecuación de continuidad de masa en el FLOW-3D es la siguiente:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial x}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2.7)$$

Dónde:

$V_F =$ Es el volumen fraccional del fluido.

$A_x, A_y, A_z =$ Área fraccional abierta a fluir según el eje de dirección.

$u, v, w =$ Componente de la velocidad en dirección de las coordenadas (x,y,z).

$\xi =$ Para geometrías cilíndricas es el término que se añade a las ecuaciones cartesianas.

$\rho =$ Densidad del fluido

$R_{DIF} =$ Término de difusión turbulenta.

$R_{SOR} =$ Fuente másica.

Para el caso práctico de ingeniería la ecuación 2.7 se simplifica considerando un fluido incompresible, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial x}(u A_x) + R \frac{\partial}{\partial x}(v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (2.8)$$

La ecuación 2.8 es la primera ecuación de movimiento a resolver para cualquier problema de ingeniería hidráulica en el paquete FLOW-3D.

2.4 ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO²⁰

A partir de la segunda ley de Newton se deduce esta ecuación e indica la variación de la cantidad de movimiento de la masa fluida por unidad de tiempo es igual a la suma de fuerzas externas que actúan sobre esa masa fluida.

La ecuación considera el efecto de la gravedad como fuerza de cuerpo, pero no toma en cuenta el efecto del esfuerzo cortante. Por tal restricción la ecuación se denomina ecuación de Euler.

$$-\frac{1}{\rho}\nabla p - g\nabla z = \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.9)$$

También de la expresión 2.9 se obtiene la ecuación de Bernoulli.

2.5 ECUACIÓN GENERAL DEL MOVIMIENTO. ECUACIÓN DE NAVIER-STOKES.

La ecuación de Navier Stokes en función de las componentes de velocidad del fluido (u,v,w) y de algunos términos adicionales que el programa FLOW-3D emplea para resolver el movimiento del fluido se indica a continuación:

²⁰ Shames I. (2005), Mecánica de Fluidos, McGRAW. HILL, Santa fé de Bogota Colombia.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\
\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\
\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s)
\end{aligned}
\tag{2.10}$$

Dónde:

$G_x, G_y, G_z =$ Aceleraciones del cuerpo.

$f_x, f_y, f_z =$ Aceleraciones viscosas.

$b_x, b_y, b_z =$ Perdidas de flujo en medios porosos.

$V_F =$ Es el volumen fraccional del fluido.

$A_x, A_y, A_z =$ Área fraccional abierta a fluir según el eje de dirección.

$u, v, w =$ Componente de la velocidad en dirección de las coordenadas (x,y,z).

$\rho =$ Densidad del fluido

$R_{SOR} =$ Fuente másica.

2.6 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.

Está basado fundamentalmente en la primera ley de la termodinámica que dice:
En una masa fluida la variación de las energías interna y cinética se produce por las fuerzas de superficie, las fuerzas másicas y al calor transferido por unidad de tiempo.

Considerando un flujo a baja velocidad, incomprensible y despreciando la disipación viscosa, la ecuación particular de la energía se describe en términos de la entalpia específica de forma:

$$\frac{\delta(\rho h)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h) = \nabla(k \nabla T) + S_h \tag{2.11}$$

Donde:

$K =$ Conductividad térmica del fluido.

$T =$ Temperatura.

$$\frac{\delta(\rho h)}{\delta t} = \text{Termino temporal.}$$

$$S_h = \text{Termino fuente.}$$

2.7 MODELO ARRASTRE DE AIRE (AIR ENTRAINMENT)²¹.

Es importante conocer el punto de inicio de la autoaireación en una rápida escalonada. El flujo turbulento genera fácilmente la introducción y transporte de aire. Entre algunas maneras para identificar el inicio de aireación tenemos:

- Visualmente en prototipo o en un modelo físico.
- Mediante perfiles de concentración de aire.
- Intersección del espesor de la capa límite con la superficie libre del agua.

La turbulencia se caracteriza por la energía cinética turbulenta (k) y la disipación del mismo (ε). La estimación del tamaño característico de los torbellinos turbulentos L_t está dado por:

$$L_t = c_u \left(\frac{3}{2}\right)^{0.50} \frac{k^{1.5}}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

Donde:

$K =$ Energía cinética turbulenta.

$\varepsilon =$ Tasas de disipación viscosa.

El sub-modelo air entrainment en FLOW 3D, evalúa un equilibrio entre la perturbación P_t (Energía turbulenta) y las fuerzas estabilizadoras P_d (Fuerza de gravedad y tensión superficial).

²¹ Lucio I., Matos J., Meireles I. (2015). "Stepped spillway flow over small embankment dams: some computational experiments". 15th FLOW-3D European users conference.

Cuando $P_t > P_d$, el aire rompe la superficie libre del flujo y es transportada en la masa de agua, formando de esta manera un flujo autoaireado.

$$P_t > P_d \quad (2.12)$$

$$\rho * k > \rho * g_n * L_t + \frac{\sigma}{L_t} \quad (2.13)$$

Dónde:

ρ = Densidad del agua.

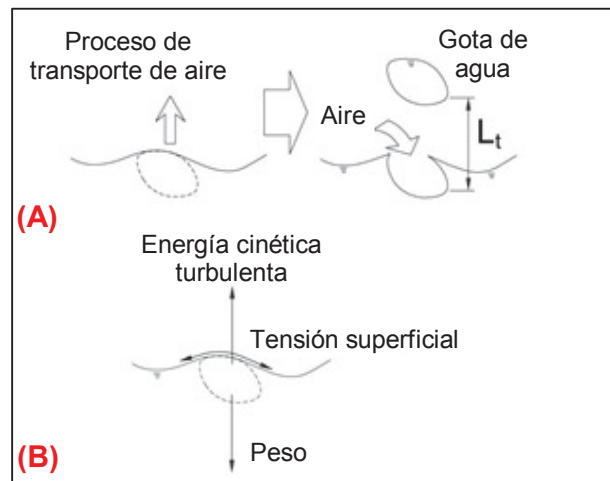
k = Energía cinética turbulenta.

σ = Coeficiente de la tensión superficial del agua.

g_n = Componente normal de la gravedad.

L_t = Altura de perturbaciones por encima del nivel medio de superficie libre.

FIGURA 2.3 MECANISMO DE LA INTRODUCCIÓN DE AIRE. (A) MODELO DE LA INTRODUCCIÓN DE AIRE. (B) FUERZAS ACTUANTES EN EL LÍQUIDO ELEMENTAL.



FUENTE: Sarfaraz M., Attari, J. and Pfister M., (2012) "Numerical Computation of Inception Point Location for Steeply Sloping Stepped Spillways.

El volumen de aire por unidad de tiempo se estima con:

$$\delta V = C_{air} A_s \sqrt{2 \frac{P_t - P_d}{\rho}} \quad (2.14)$$

Donde:

- C_{air} = Parámetro de calibración.
 A_s = Área de la superficie libre en cada celda.
 ρ = Densidad macroscópica del fluido (agua-aire).

Como primera aproximación el parámetro de calibración $C_{air} = 0.50$. La densidad macroscópica se calcula en función de la concentración de aire "C", así:

$$\rho = (1 - C) \rho_w + C \rho_a \quad (2.15)$$

Donde:

- ρ_w = Densidad del agua.
 ρ_a = Densidad del aire.

En el programa FLOW-3D el arrastre de aire se genera por la perturbación turbulenta en la superficie libre y no es necesario utilizar un modelo de turbulencia para modelar la introducción de aire (Manual, Flow Science, 2012).

2.8 MODELO DRIFT FLUX²².

En el Software FLOW 3D este sub-modelo describe dos fluidos: uno continuo y el otro disperso entre estos son: burbujas, partículas sólidas, gotas de líquidos inmiscibles, con diferentes densidades. Los flujos inmiscibles son aquellos que no se mezclan.

²² Flow Science, Inc. (2012). FLOW 3D 10.1.0 Documentation Release. Manual de Usuario, Flow-3D. Los Alamos National Laboratory. Santa Fe, New Mexico.

Se considera que el aire es transportado en forma de burbujas con un diámetro característico, las burbujas producen una fuerza de arrastre produciendo oposición al movimiento del agua.

El arrastre de las dos fases por unidad de volumen (k_p), en el programa se determina con la siguiente ecuación:

$$k_p = \frac{1}{2} A_p \rho_c \left(C_D U + 12 \frac{\mu_c}{\rho_c R_p} \right) \quad (2.13)$$

Donde:

A_p = Área de la sección transversal por unidad de volumen de la fase dispersa.

ρ_c = Densidad del fluido.

μ_c = Viscosidad dinámica.

C_D = Coeficiente de fracción, 0.50 para formas esféricas.

R_p = Tamaño medio de la partícula, componente disperso.

El sub-modelo drift-flux calcula una velocidad relativa para la mezcla agua-aire, fase continua y la fase dispersa respectivamente. La velocidad relativa se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\frac{\delta u_r}{\delta t} + u_2 \cdot \nabla u_2 - u_1 \cdot \nabla u_1 = \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \nabla P - \left(\frac{1}{f \rho_1} - \frac{1}{(1-f) \rho_2} \right) k_d u_r \quad (2.14)$$

Donde:

k_d = Coeficiente de fricción, relacionan la interacción de las dos fases.

u_r = Velocidad relativa.

2.9 BREVE INTRODUCCIÓN A LA TURBULENCIA.²³

2.9.1 TURBULENCIA.

En 1883 el científico y matemático británico Osborne Reynolds mediante el experimento que lleva su nombre permitió la visualización de las características del flujo laminar, flujo en transición y el flujo turbulento. A partir de estas observaciones constató que el tipo de flujo dependía de la variable adimensional $\frac{vD}{\nu}$, siendo v la velocidad media del flujo, D una longitud característica y ν la viscosidad cinemática.

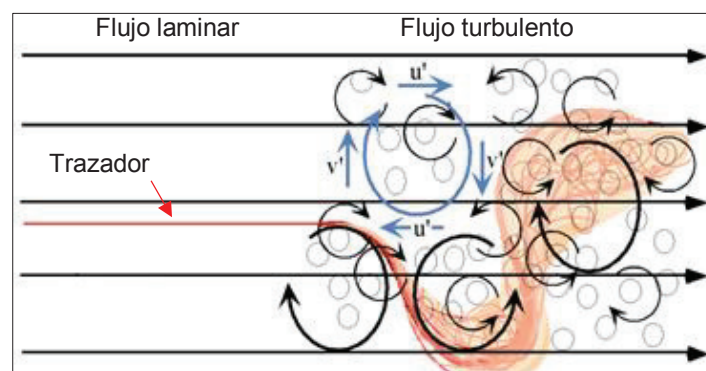
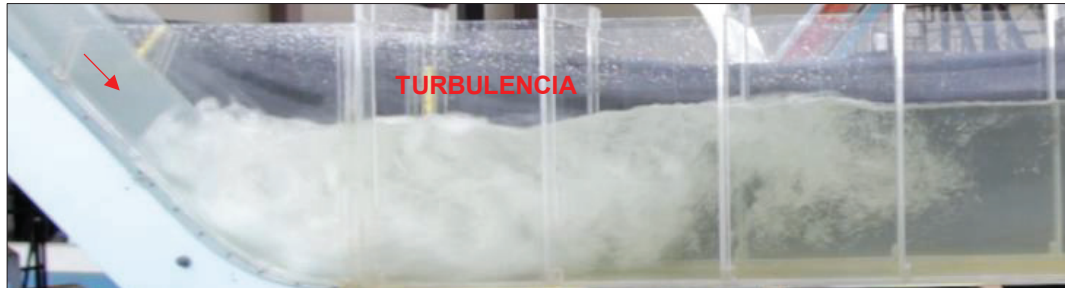
Este parámetro adimensional es conocido como el número de Reynolds y relaciona las fuerzas inercia con las fuerzas viscosas.

La turbulencia es una característica del flujo, se define como un movimiento fluctuante, desordenado, estado caótico y aleatorio. Se manifiesta por la aparición de fluctuaciones en las variables de la presión, velocidad, temperatura, en un instante a lo largo del tiempo.

Las propiedades importantes del movimiento turbulento son: La aleatoriedad o irregularidad, la vorticidad o flujo rotacional, la difusividad. Entre otras particularidades del flujo turbulento se tiene: la tridimensionalidad, la disipación y altos números de Reynolds.

²³ Fernández Oro J. M. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos. Barcelona: Reverté.

FOTOGRAFÍA 2.1 CARACTERÍSTICAS DEL TIPO DE FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

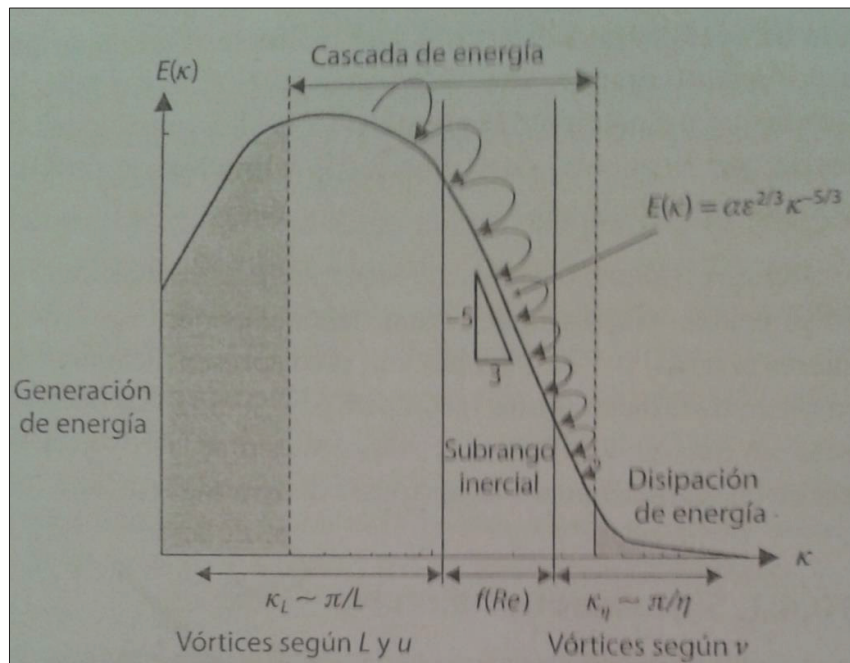
2.9.2 ESCALAS DE LA TURBULENCIA.

La turbulencia contiene un amplio espectro de escalas espaciales y temporales. Los vórtices o torbellinos grandes para su formación extraen energía del flujo, generalmente estos son inestables por la acción de los gradientes de velocidad y por efecto de corte o interacción entre ellos tiene a dividirse en torbellinos más pequeños, y así sucesivamente hasta llegar a escalas puramente disipativas. Este proceso se lo conoce como cascada de energía. La disminución del tamaño de escala permite aumentar los gradientes de velocidad y así la energía cinética turbulenta se convierte en energía térmica por efecto de la disipación viscosa.

En la cascada de energía la viscosidad no influye para números de Reynolds altos teniendo importancia en escalas más pequeñas y por la variedad de vórtices de

diferente tamaño presentes en el flujo turbulento se puede agrupar en tres escalas que son: macroescala, escala intermedia y microescala.

FIGURA 2.4 ESPECTRO DE ENERGÍA TURBULENTA (ESCALA LOGARÍTMICA, ADOPTADO POR DAVIDSON, 2004).



FUENTE: Fernández Oro J. M. (2012). "Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos".

MACROESCALA

Abarca los torbellinos más grandes y dependen de las condiciones de contorno, el flujo es anisotrópico. Caracterizan el aspecto global del movimiento. El número de Reynolds es el mismo del flujo principal. Sean U , L y T la velocidad, longitud y tiempo respectivamente asociados a los vórtices más grandes.

ESCALA INTERMEDIA

El número de Reynolds asociado a esta escala aun es grande por ello la disipación de energía es mínima o despreciable. Esta zona intermedia también se denomina de subrango inercial.

En la figura 2.4 se observa mencionada zona que se caracteriza por una tendencia lineal de pendiente $-5/3$ en escala logarítmica, según la ley universal conocida como ley de Kolmogorov (1944).

$$E(k) = \alpha \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (2.12)$$

Dónde:

α = Constante, Valor sobre 1.5

ε = Tasa de disipación viscosa

k = Numero de onda

MICROESCALA

El número de Reynolds local es semejante a 1, representa la escala más pequeña. Sea μ_η la velocidad, η la longitud y τ el tiempo, se puede obtener expresiones de todas las escalas disipativas en función de la disipación de energía, a estas expresiones se las conoce como escalas de Kolmogorov.

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad \mu_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad \tau = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (2.13)$$

Donde ν es la viscosidad cinemática. Relacionando las escalas de Kolmogorov y las de macroescala obtenemos las siguientes expresiones:

$$\frac{\eta}{L} = Re^{-3/4} \quad \frac{\mu_\eta}{U} = Re^{-1/4} \quad \frac{\tau}{T} = Re^{-1/2} \quad (2.14)$$

De estas ecuaciones podemos observar que para número de Reynolds altos, Las escalas de Kolmogorov son muy pequeñas resultando muy compleja su resolución directa. Por ello la importancia del uso de modelos de turbulencia para una simulación numérica.

CAPÍTULO 3

INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN NUMÉRICA (CFD) APLICANDO EL PROGRAMA COMPUTACIONAL FLOW-3D.

3.1 METODOLOGÍAS PARA REALIZAR LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL²⁴.

Los fluidos en movimiento o en reposo se consideran como medio continuo, pues sus partículas están en contacto las unas con las otras sin dejar espacios vacíos. En el dominio continuo la variable de velocidad, o de presión está definida en todos los puntos del espacio. Debido a la complejidad de su representación real se reemplaza por un dominio discreto, en el cual la variable del flujo está definida únicamente en los puntos finitos que discretizan el espacio.

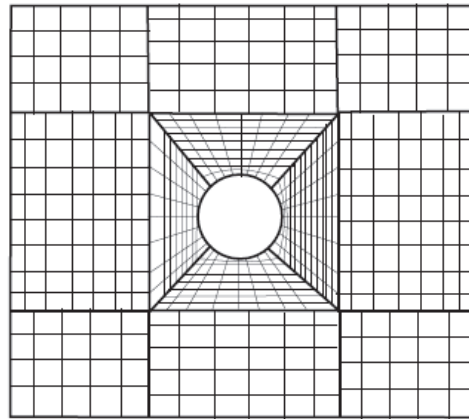
La discretización en un modelo numérico se efectúa mediante el mallado, la cual divide el dominio en un número finito de elementos, puntos, volúmenes de control.

Según el tipo de conectividad existente entre los puntos o celdas de la malla se clasifican en: mallas estructuradas y mallas no estructuradas.

MALLAS ESTRUCTURADAS

Son aquellas que generalmente están alineadas con las direcciones principales de la malla. En cierto sentido las líneas de la malla siguen a las líneas de corriente, las cuales se alinean con los contornos sólidos del dominio. En el caso bidimensional las mallas resultarían cuadriláteros y para estudios tridimensionales se tiene un mallado hexaédrico.

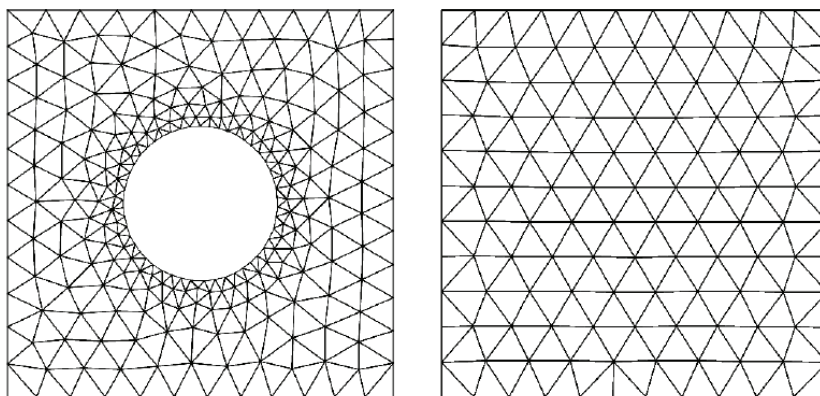
²⁴ Fernández Oro J. M. (2012). "Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos". Barcelona: Reverté.

FIGURA 3.1 EJEMPLO DE MALLA ESTRUCTURADA MULTI-BLOQUE.

ELABORADO POR: Edwin Casa.

MALLAS NO ESTRUCTURADAS

Se caracterizan por una conectividad irregular, permite cubrir y adaptar con celdas tetraédricas cualquier dominio tridimensional, ofreciendo flexibilidad en caso de geometrías complejas.

FIGURA 3.2 EJEMPLO DE MALLA NO ESTRUCTURADA.

ELABORADO POR: Edwin Casa.

3.1.1 MALLADO EN EL PROGRAMA COMPUTACIONAL FLOW-3D²⁵

FLOW-3D utiliza una malla estructurada que puede definirse ya sea en un sistema cartesiano o cilíndrico de coordenadas. En la geometría el nombre que se designa a cada bloque de malla, se da de acuerdo a lo que se ingrese progresivamente en dirección del flujo. Es conveniente reducir al mínimo el número de bloques de malla al momento de discretizar el dominio, ya que cada bloque de malla introduce nuevos límites que requieren interpolación y son posibles fuentes de errores de truncamiento.

Se debe considerar durante el mallado dos parámetros importantes para obtener resultados precisos y eficientes, según la recomendación del manual del usuario de FLOW-3D:

- La relación de tamaño entre celdas adyacentes o entre celdas de la misma dirección debe ser cercana a 1 y no superar el valor de 1.25.
- La relación de aspecto de las celdas o la relación del tamaño de celda máxima en una dirección con relación a las otras dos direcciones debe ser lo más cercano a 1 y no exceder el valor de 3.0.

La diferencia de tamaño de celdas entre bloques adyacentes o anidados, especialmente en la dirección perpendicular al contorno recomendado es de 2 a 1 para evitar la pérdida significativa de precisión inter-bloques.

Se debe evitar colocar límites inter-bloques en las zonas donde se esperan grandes gradientes de flujo, incluidas las zonas con importantes variaciones en la geometría.

²⁵ Flow Science, Inc. (2012). FLOW 3D 10.1.0 Documentation Release. Manual de Usuario, Flow-3D. Los Alamos National Laboratory. Santa Fe, New México.

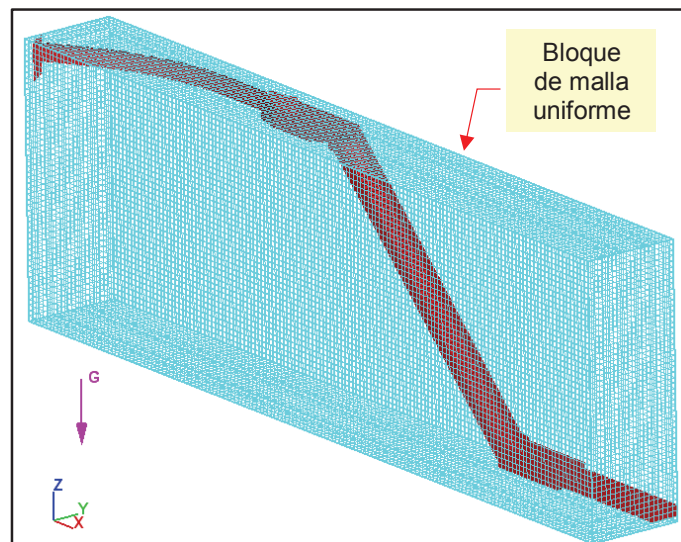
La conformación del mallado en FLOW-3D puede realizarse con mallado básico o mediante mallado multi-bloque. En breve se describe cada uno de este tipo de mallados.

3.1.1.1 Mallado básico o uniforme.

Tiene un tamaño de celda constante en todas las direcciones. Un mallado uniforme puede ser creado de dos maneras: Editando un tamaño de celda constante o mediante la edición de un número total de celdas.

En algunos casos puede ser ventajoso estirar las celdas en una dirección particular. Para ello se añade planos de malla intermedios en puntos fijos especificando el tamaño o número de celdas para adaptar la separación de las líneas de la cuadrícula.

FIGURA 3.3 MALLADO UNIFORME EN EL PROGRAMA FLOW-3D.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

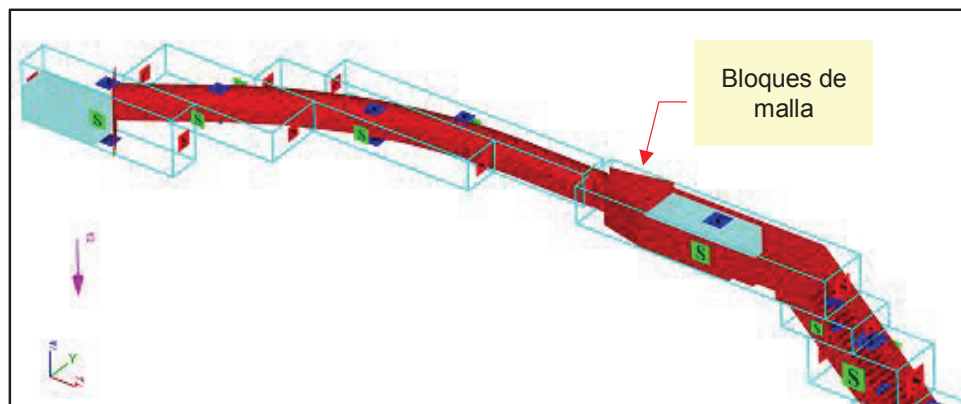
3.1.1.2 Mallado multi-bloque.

Es empleado cuando se tienen geometrías complejas; por ejemplo si se tuviese un sólo bloque de malla en un dominio complejo, ésta contendría demasiadas celdas.

Por ello el uso de varios bloques de malla puede resultar una solución eficaz para aumentar la resolución de simulación sólo en el área de interés y excluir a las regiones donde no se espera flujo o que está fuera de la geometría.

En las últimas versiones del programa FLOW-3D los bloques de malla pueden disponerse como: malla anidada y malla traslapada.

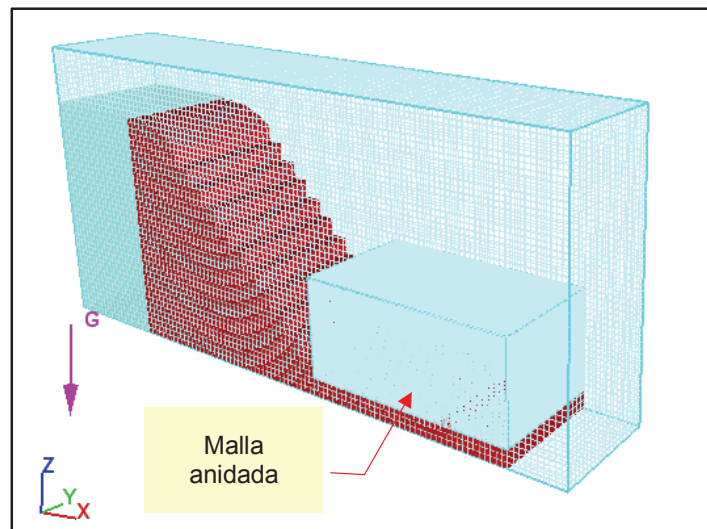
FIGURA 3.4 MALLADO MULTIBLOQUE EN EL PROGRAMA FLOW-3D.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

MALLA ANIDADA

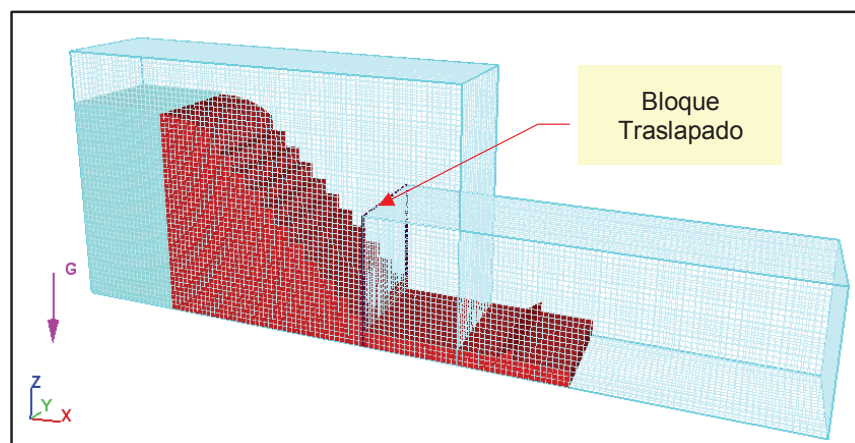
Es cuando un bloque de malla está contenido o encerrado en otro bloque de malla. La solución de las ecuaciones se produce en el tamaño de celda más pequeño. En la figura 3.5 se muestra este tipo de mallado.

FIGURA 3.5 MALLA ANIDADA. PROGRAMA FLOW-3D.

ELABORADO POR: Edwin Casa.

MALLA TRASLAPADA.

Es cuando dos bloques de malla se traslapan parcialmente entre sí. Las ecuaciones de movimiento son resueltas de forma predeterminada en el bloque de malla con un tamaño promedio de celda.

FIGURA 3.6 MALLA TRASLAPADA. PROGRAMA FLOW-3D.

ELABORADO POR: Edwin Casa.

3.1.2 REDUCCION DE LA DIMENSIONALIDAD.

En ocasiones, dependiendo del fenómeno físico a representar, es útil simplificar los problemas reduciendo el número de dimensiones para la simulación; por ejemplo, una modelación en 1 o 2 dimensiones.

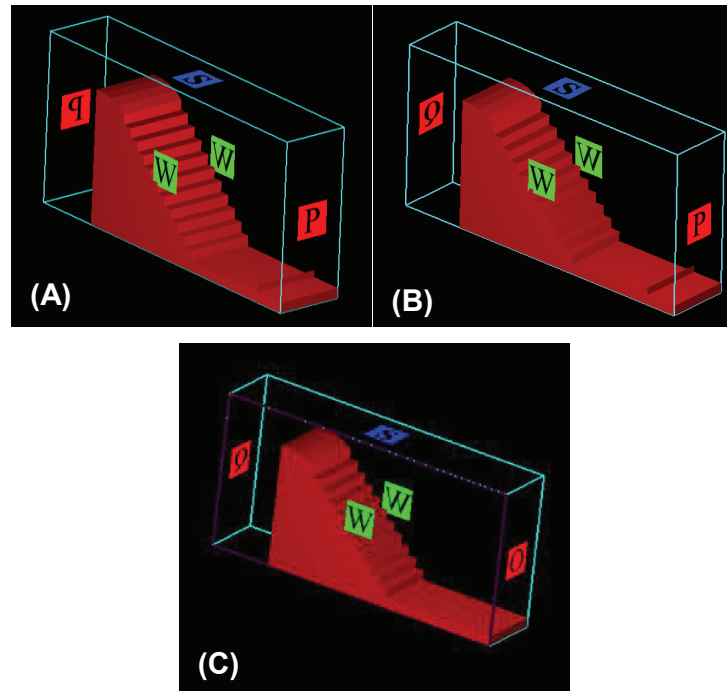
Esta puede ser creada en FLOW-3D definiendo un número de celdas para una dirección en particular de coordenadas. También existe otra opción para reducir la dimensionalidad del sistema mediante el modelo shallow water (Se basa en la hipótesis de que las longitudes de fluido son mucho mayores que la profundidad del flujo). Con ello se representa un modelo cuasi en tres dimensiones.

3.2 CONDICIONES DE FRONTERA EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

En FLOW-3D y en general en cualquier modelación CFD, el proceso de resolución del campo fluidodinámico es una extrapolación de una serie de datos fijados en las condiciones de borde, siguiendo unas leyes que responden a la ecuación general de transporte. Es importante saber que las condiciones de borde deben ser compatibles para su convergencia, caso contrario su acoplamiento puede llevar a que la simulación no converja.

Para la modelación de un flujo incompresible se tienen las combinaciones aptas en la definición del campo en la siguiente figura.

FIGURA 3.7 CONDICIONES DE CONTORNO EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA. (A) CONDICIÓN DE PRESIÓN CONSTANTE (P-P). (B) ENTRADA DE FLUJO Y AL MENOS UNA SALIDA CON PRESIÓN CONSTANTE (Q-P). (C) ENTRADA DE FLUJO Y AL MENOS UNA SALIDA DE FLUJO (Q-O).



FUENTE: Programa computacional FLOW-3D V11, 2015.

Es primordial especificar un estado de las variables del fluido en el instante $t=0$. Estas condiciones iniciales son de importancia para optimizar la convergencia de la simulación numérica.

Las condiciones de contorno que se puede seleccionar en el programa FLOW-3D son: condición de presión específica, flujo de entrada, salida de flujo y contorno de simetría, de continuidad, de pared, de onda.

A continuación se describe brevemente cada uno de estas condiciones de frontera.

CONDICIÓN DE PRESIÓN ESPECÍFICA.

Esta condición se puede especificar en los contornos donde las velocidades resultan una incógnita o no se disponen de datos confiables. Esta condición de presión puede establecerse en uno o en los dos límites de una región de cálculo.

El programa permite seleccionar dos tipos de condición de presión: La presión dinámica y la presión estática. Esta última es generalmente recomendada para la mayoría de las aplicaciones pues representa un embalse de agua.

Adicionalmente la presión queda definida por el valor del nivel del agua que se tenga en la condición de frontera, sea esta al ingreso o a la salida. También se registra el valor de la presión a la que está sometida el agua; por ejemplo, para flujos a superficie libre, se tiene la presión atmosférica a nivel del mar igual a 101 325 Pa y sobre los 2800 msnm, la presión atmosférica llega a ser igual a 71 910 Pa.

CONDICIÓN DE FLUJO EN EL INGRESO.

Esta condición permite especificar un valor de caudal en la sección transversal límite de entrada, en unidades del sistema internacional.

CONDICIÓN DE SALIDA DE FLUJO.

Para fluidos incompresibles a superficie libre, el gradiente de velocidad es diferente de cero en este límite o frontera. El flujo presenta alteraciones en forma de onda que se propagan hacia el límite o la salida.

CONDICIÓN DE SIMETRÍA

En caso de disponer bloques de mallas adyacentes y unidas con la condición de frontera de simetría, esta permite un intercambio de datos para continuar con la solución de las ecuaciones de movimiento.

Cuando la condición de simetría está aislada, se considera un deslizamiento libre del agua en los contornos. Generalmente se usa para la simulación de paredes laterales y el esfuerzo cortante en la pared es igual a cero.

CONDICIÓN DE CONTORNO PARA CONTINUIDAD.

Cuando el flujo es incompresible y presenta velocidades bajas, perturbaciones introducidas en la frontera de salida puede tener efecto en todo el dominio computacional. En este caso la condición más simple y comúnmente utilizado en un contorno de salida de flujo es un "límite de continuidad". Este contorno establece una condición de gradiente de velocidad igual a cero, con lo que representa una continuación suave del movimiento del agua a través de esta frontera.

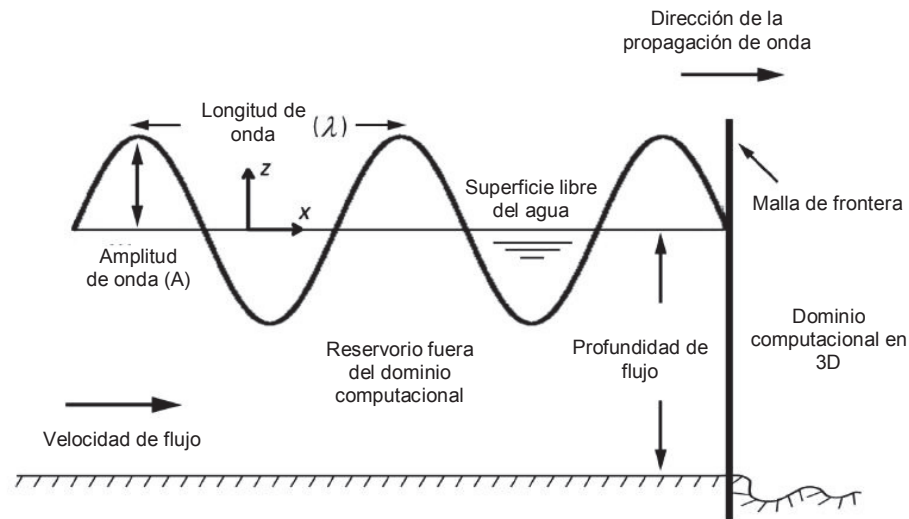
CONDICIÓN DE CONTORNO DE PARED.

La condición de pared no permitir el desplazamiento, es decir no existe traslación en la frontera. De igual modo se postula la condición de velocidad cero perpendicular al contorno.

CONDICIÓN DE CONTORNO DE ONDA.

Permite generar una onda periódica lineal o una onda de Stokes en la superficie libre del agua. Esta condición de frontera se aplica a un campo de velocidades asociado con el tipo de onda requerida.

FIGURA 3.8 ESQUEMA DE LA CONDICIÓN DE FRONTERA. ONDA LINEAL PERIÓDICA.



FUENTE: Manual FLOW-3D, 2012

3.3 MODELIZACIÓN DE LA TURBULENCIA: USOS Y RESTRICCIONES²⁶.

Los flujos turbulentos tienen la característica de presentar cambios aleatorios en la presión y velocidad tanto en el tiempo como en el espacio. Estas fluctuaciones del flujo generan torbellinos, cada vez más pequeños, en forma de cascada de energía hasta que se disipan en forma de calor por la acción de la viscosidad. Por tal razón la solución numérica de la turbulencia puede realizarse con cierto detalle.

Entonces la representación en modelo numérico de la turbulencia está en función del número de escalas de turbulencia que se quiera resolver o de la energía cinética turbulenta que se vaya a transportar en las ecuaciones constitutivas.

²⁶ Fernández Oro J. M. (2012). "Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos". Barcelona: Reverté.

La resolución de las ecuaciones de gobierno en flujo turbulento se puede realizar aplicando tres aproximaciones, que se describen a continuación.

3.3.1 SIMULACIÓN NUMÉRICA DIRECTA (DNS).

Resuelve todas las escalas de la turbulencia (desde la macroescala hasta las disipativas o microescala). Para la modelación numérica se requiere de una malla extremadamente fina.

Las simulaciones DNS son útiles para la investigación de la turbulencia y realizables computacionalmente en supercomputadoras para números de Reynolds bajos (hasta 10^3).

Para Números de Reynolds altos, el tamaño de las escalas de Kolmogorov son muy pequeñas y estimando el dominio para la resolución espacial y temporal de la turbulencia, resulta que la capacidad computacional requerida para una simulación DNS excede enormemente las posibilidades de resolución de los computadores más potentes.

3.3.2 SIMULACIÓN TÉCNICAS (LES).

La técnica LES resulta una alternativa entre la DNS y la RANS. Este método simplifica la complejidad de las ecuaciones. Resuelve el intercambio energético entre las fluctuaciones de gran escala, o sea de las conformadas por vórtices grandes, y se modela únicamente el efecto de pequeñas escalas en la turbulencia.

Para considerar el efecto de corte en el borde de los contornos sólidos, es necesario realizar un mallado fino. Esto implica capacidades de cálculo muy altas ya que resuelve los torbellinos grandes que transportan entre el 50 % y 80% de toda la energía turbulenta.

3.3.3 ECUACIONES DE NAVIER-STOKES PROMEDIADAS POR REYNOLDS (RANS).

Realmente la variación de las variables fluido-dinámicas en un punto en el espacio están conformadas por una serie de fluctuaciones de distintas escalas, razón por la cual prácticamente el análisis de la turbulencia se realiza desde el punto de vista estadístico o sea con valor medio de la velocidad e intensidad promediada de las fluctuaciones “promedios de Reynolds.”

Para obtener las ecuaciones de movimiento de las variables estadísticas a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, se aplica un operador estadístico según corresponda. Esto puede ser un promedio temporal o filtro espacial. Sin embargo el procedimiento hace que aparezcan más incógnitas que número de ecuaciones para la resolución.

A esta situación se lo conoce como “problema de cierre” y aparece como consecuencia del término no lineal difusivo o como las tensiones de Reynolds en la ecuación de general del movimiento.

La expresión general del tensor de Reynolds es:

$$\tau_{ij} = -\rho u_i' u_j' \quad (3.4)$$

La ecuación 3.4 abarca las fluctuaciones de velocidades en todas las direcciones. El producto es un momento de orden superior, está en función de las velocidades medias y sus derivadas. La semisuma de la diagonal principal del tensor se denomina la “energía cinética turbulenta”.

El objeto de la simulación numérica, en cuanto al problema de cierre, es considerar una hipótesis y modelar aproximadamente el comportamiento físico de la turbulencia.

Para la modelación de la turbulencia, se tienen modelos algebraicos simples y modelos que aplican viscosidad artificial. Entre estos se tienen: la longitud de mezcla, modelo K-epsilon, modelo K-omega y modelo de cierre completo.

La resolución de las ecuaciones del movimiento en flujo turbulento se puede realizar aplicando un modelo de turbulencia una vez realizada el promedio temporal (RANS) o filtrado espacial (LES) de las ecuaciones.

3.3.4 MODELOS DE TURBULENCIA DISPONIBLES EN EL PROGRAMA FLOW 3D²⁷.

El programa FLOW-3D ofrece ocho opciones de modelos de turbulencia, que se mencionan a continuación:

EL MODELO DE LONGITUD DE MEZCLA DE PRANDTL.

Es uno de los primeros intentos de describir los efectos de turbulencia tridimensional. Es un modelo menos complejo, y ya no se utiliza en forma amplia.

FLOW-3D incluye principalmente este modelo para su utilidad en estudios académicos.

EL MODELO DE UNA ECUACIÓN.

Es también un esfuerzo temprano para representar a la turbulencia. Calcula la energía cinética turbulenta (k) promediada en el tiempo y requiere un valor conocido como “longitud de mezcla turbulenta (L_T)” en todas las localidades. Este modelo de una sola ecuación no es adecuado para modelar flujos complejos.

²⁷ Flow Science, Inc. (2012). FLOW 3D 10.1.0 Documentation Release. Manual de Usuario, Flow-3D. Los Alamos National Laboratory. Santa Fe, New México.

EL MODELO “K-ε” ESTÁNDAR (HARLOW Y NAKAYAMA 1967).

Es un modelo de dos ecuaciones que calcula tanto la energía cinética turbulenta (k), la tasa de disipación (ϵ), y calcula dinámicamente la longitud de mezcla turbulenta (L_T). Se ha encontrado útil para representar una amplia gama de flujos (Rodi, 1980).

EL MODELO “K-ε RNG”. GRUPO RENORMALIZADO (YAKHOT Y ORSZAG 1986, YAKHOT & SMITH 1992).

Es una versión más robusta del modelo de dos ecuaciones (k - ϵ), y se recomienda para la mayoría de los problemas industriales. Su aplicación resulta adecuada en flujos transitoriamente turbulentos, flujos en curvas, transferencia de calor a la pared, y de transferencia de masa.

EL MODELO DE DOS ECUACIONES “K- ω ” (WILCOX 1988, 1998, 2008).

Define la segunda variable como $\omega = \epsilon / k$ (Kolmogorov 1942). Wilcox ha mejorado el modelo de dos ecuaciones (k - ω) desde 1988; y en 1998 introdujo nuevos coeficientes que mejoraron significativamente la exactitud del modelo en flujo de corte libre. El modelo de dos ecuaciones “ k - ω ” en FLOW-3D es por lo tanto adecuado para el modelado de corte libre en flujos con gradientes de presión en sentido de la corriente.

EL MODELO LES.

No utiliza escalares para representar la energía cinética turbulenta media, sino más bien se resuelve la mayor parte de las fluctuaciones turbulentas en forma directa. Requiere resolución de malla mucho más fina que los modelos de dos ecuaciones y proporciona series estadísticas más extensas del flujo turbulento.

EL MODELO DE TURBULENCIA PARA AGUAS POCO PROFUNDAS 2-D.

Supone una velocidad totalmente turbulenta con distribución logarítmica. Asume un “ C_D ” coeficiente de arrastre constante en el tiempo, que puede variar espacialmente.

EL SEGUNDO MODELO DE TURBULENCIA PARA AGUAS POCO PROFUNDAS DE 2-D.

Hace que el “ C_D ” coeficiente de arrastre sea una función dinámica de la profundidad del fluido y de la rugosidad de la superficie espacialmente variable.

3.4 MODELIZACIÓN DEL FENÓMENO FÍSICO ACERCA DEL FLUJO RASANTE EN UNA RÁPIDA ESCALONADA Y CONDICIONES INICIALES DE LA SIMULACION NUMÉRICA.

Una representación adecuada en modelo numérico del flujo rasante sobre una rápida escalonada, se consigue combinando parámetros numéricos y físicos afines al fenómeno a simular. En el programa computacional FLOW-3D para la simulación del flujo rasante se debe considera los siguientes aspectos.

- Flujo incompresible y a superficie libre
- Propiedades del agua y aire, medios continuo y disperso respectivamente.
- Fuerza de gravedad.
- Modelo de turbulencia y viscosidad.
- Inicio de introducción y transporte de aire activando el sub modelo “air entrainment”
- Emulsión de agua-aire activando el sub-modelo “Drift flux”
- Algoritmo VOF.
- Evaluación de la densidad.

La simulación numérica en tres dimensiones (3D) del flujo rasante en una rápida escalonada permite visualizar las curvaturas transversales de la superficie libre y ondas constantes.

El modelo numérico identifica correctamente cuando el aire se incorpora al flujo. Sin embargo es más complejo seguir el arrastre de aire y el modelado de difusión; por lo que los resultados de investigaciones numéricas reportan resultados no muy precisos en el transporte de aire y el aumento de volumen del flujo mixto en la zona uniforme. La limitación radica en considerar el arrastre de aire como un escalar, donde la condición de contorno en la superficie libre es $C=100\%$ es decir aireado al 100%.

Cuando consideramos un flujo con concentración de aire al 90% se tiene una profundidad de flujo bifásico " y_{90} ". Sin embargo realmente en algunos casos la concentración de aire resulta menor al 90% y el programa asume como frontera a la superficie libre una concentración de aire al 90% y es así como ocurren errores en la superficie libre representando un aumento de volumen del flujo autoaireado.²⁸.

3.5 RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DEL MOVIMIENTO. PROGRAMA FLOW-3D.

El método de las diferencias finitas es el método numérico más sencillo y más antiguo para obtener soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales (Euler 1768). Está basado en las propiedades de los desarrollos de Taylor y en la definición de la derivada. Requiere un alto grado de regularidad de la malla (mallado estructurado).

²⁸ Valero, D., Bung, D., (2015), "Hybrid investigation of air transport processes in moderately sloped stepped spillway flows", E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands.

En mallas estructuradas se combinan el método de volúmenes finitos y diferencias finitas; como por ejemplo, para el tratamiento de las condiciones de contorno y la discretización de los flujos viscosos. Ambos métodos son el núcleo de aproximación numérica en el programa FLOW-3D.

En ingeniería hidráulica, por lo general, la resolución del campo fluido dinámico calcula las variables de transporte: presión, velocidad, aplicando la ecuación de cantidad de movimiento y la ecuación de continuidad conjuntamente. Es de importancia en este procedimiento el empleo de un algoritmo de acoplamiento entre estas dos ecuaciones con el fin de tener igual número de ecuaciones e incógnitas permitiendo así la resolución del campo, que en principio es desconocido.

En un campo fluido dinámico la ecuación de conservación de momento para un flujo incompresible se muestra en la ecuación 3.1:

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = \nabla(\mu\nabla\vec{v}) - \nabla p + \rho\vec{g} \quad (3.1)$$

Esta ecuación vectorial en las tres direcciones del espacio, queda expresado en términos de la velocidad, presión y fuerzas másicas.

Por otro lado la ecuación de continuidad para el caso particular del flujo incompresible, es la ecuación 3.2:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3.2)$$

Como se puede notar en la ecuación 3.1 y 3.2 aparecen las componentes de velocidad y el problema radica en resolver la presión ya que esta variable no existe en la ecuación de continuidad. Por este motivo resulta complejo conformar el sistema algebraico de ecuaciones.

Para afrontar este problema el programa resuelve mediante un algoritmo de acoplamiento presión-velocidad. Entre los algoritmos de acople para la resolución

de forma iterativa en FLOW-3D tenemos: Método SOR, método SADI y el método de solución compresible y solucionador de presión-velocidad GMRES.

Este último es un método altamente preciso y eficiente para una amplia gama de problemas, posee buena convergencia y simetría. El solucionador GMRES no utiliza ningún tipo de sobre o sub relajación.

3.5.1 MÉTODOS ITERATIVOS DE RESOLUCIÓN.

En general para resolver el campo fluido-dinámico, se plantea las ecuaciones discretas en cada uno de las celdas que discretizan el dominio.

Para las celdas correspondientes a los límites del dominio se tendrá una combinación de las ecuaciones discretas con valores conocidos en la condición de frontera. Al final se obtendrá un nuevo sistema de ecuaciones algebraico no lineal a resolver, que origina una solución muy compleja. Para ello es necesario introducir un proceso iterativo con el objeto de:

- Resolver el problema de la no linealidad de las ecuaciones de transporte.
- Garantizar una eficiente inversión de las matrices con una gran reducción de gasto computacional.

Durante el proceso iterativo aparece la necesidad de satisfacer el criterio de convergencia, con el cual el valor de la convergencia es del orden 10^{-9} ; mientras que el error de truncamiento es de 10^{-1} . En general ambos errores deben ser semejantes y menores que el nivel máximo aceptable por el usuario.

Es importante conocer de antemano las condiciones, que garanticen que una simulación va a converger, antes de poner a resolver el modelo numérico. Se dice que un método numérico es estable cuando el proceso iterativo converge; mientras que se conoce como inestable cuando no hay convergencia.

El paso temporal depende principalmente del tamaño de la celda en el mallado. Se pueden establecer dos clases de esquemas numéricos: los explícitos y los implícitos.

El esquema explícito evalúa flujos y fuente usando valores del paso temporal anterior. El paso temporal se puede implementar de manera directa y sencilla; para que sea estable la simulación debe cumplir la relación denominada número de Courant (CFL).

$$\text{CFL} = \frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (3.3)$$

Donde:

- c= Velocidad de onda.
- Δt = Paso temporal máximo.
- Δx = Tamaño máximo de celda.

El esquema implícito evalúa flujos y termino fuente en el mismo instante en el que se pretende conocer las variables (Valores en el paso temporal actual).

La ventaja principal de los métodos implícitos en comparación de los explícitos es que puede emplearse pasos de tiempos más largos, sin que esto afecte a la estabilidad del proceso de integración. Además son métodos más robustos y de mayor velocidad de convergencia en el caso de ecuaciones de sistemas rígidos; esto hace que los esquemas implícitos sean los más utilizados.²⁹

²⁹ CARDESA, J., "Notas sobre Dinámica de fluidos computacional (CFD).", Universidad Politécnica de Madrid, 2014.

3.6 CONCLUSIONES.

Las ecuaciones de movimiento son ecuaciones integrales continuas y complejas. Para su solución se discretiza en ecuaciones algebraicas lineales discretas. El programa FLOW-3D aplica y resuelve las ecuaciones discretizadas en el campo fluido-dinámico para ello previamente es necesario formular el problema, plantear las ecuaciones que lo gobiernan, establecer las condiciones de frontera, generar el mallado y por último iniciar la corrida del modelo. Finalmente se analizan los resultados de la solución de las ecuaciones en cada nudo de la malla. Obteniendo valores de variables del campo en las tres direcciones como: la presión, la velocidad, densidad, etc.

FLOW 3D utiliza el método de las diferencias finitas para obtener soluciones numéricas de las ecuaciones del movimiento. Para esto requiere un mallado regular o mallado estructurado.

Un mallado con multi-bloque para los casos de geometrías complejas es una buena alternativa en el programa FLOW-3D. Se reduce la capacidad de almacenamiento y se puede aumentar la resolución de la malla en áreas de interés, excluyendo el mallado en regiones donde no se espera flujo.

CAPITULO 4

CASO DE APLICACIÓN DEL PAQUETE COMPUTACIONAL FLOW-3D AL FLUJO SOBRE LA RÁPIDA ESCALONADA-EL BATÁN.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE DISEÑO ORIGINAL DEL CASO DE APLICACIÓN³⁰.

En épocas del año ocurren precipitaciones intensas que generan crecidas extraordinarias, con lo cual la red de alcantarillado ha sido insuficiente para evacuar los caudales más importantes. La Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable de Quito (EMAAP-Q) construyó la prolongación del colector Iñaquito que va desde la plaza Argentina hasta la quebrada Batán. En la figura 4.1 se muestra, en la imagen google earth, el sistema de descarga con rápida escalonada y lisa de las aguas combinadas hacia el cuerpo receptor.

El colector Iñaquito drena las aguas servidas y lluvias de gran parte del norte de Quito. El caudal de diseño de la prolongación del túnel emisario y rápida escalonada es de 150 m³/s, que corresponde a un periodo de retorno de 25 años.

En la figura 4.2 se presenta la implantación general y ubicación del caso de aplicación para la modelación numérica, que corresponde a la estructura de descarga con rápida escalonada.

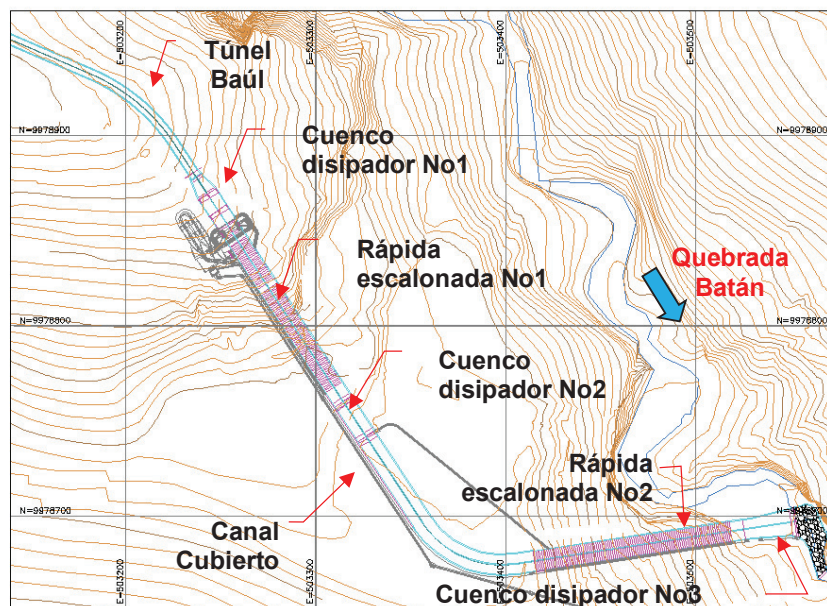
³⁰ EMAAP-Q, (2005), Diseños definitivos para el control de la escorrentía con la prolongación del colector Iñaquito desde la plaza Argentina hasta el río Machángara.

FIGURA 4.1 UBICACIÓN DEL SISTEMA DE DESCARGA DE LAS AGUAS COMBINADAS CON RÁPIDA ESCALONADA Y LISA HACIA LA QUEBRADA EL BATÁN.



FUENTE: Imagen Google Earth, 2016.

FIGURA 4.2 IMPLANTACIÓN GENERAL DE LA DESCARGA CON RÁPIDA ESCALONADA EN LA QUEBRADA EL BATÁN.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

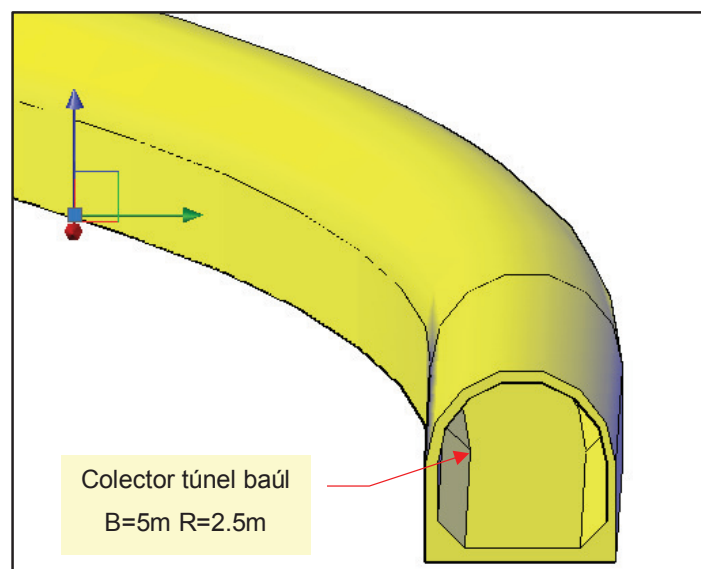
La prolongación del colector Iñaquito que ayuda a la restitución de las aguas combinadas hacia la quebrada Batán por su margen derecha, se complementa con las siguientes estructuras hidráulicas: Cuenco disipador de energía 1, rápida escalonada 1, cuenco disipador de energía 2, Canal rectangular cubierto, rápida escalonada 2 y cuenco disipador de energía 3.

A continuación se describe brevemente cada una de estas estructuras:

4.1.1 COLECTOR PRINCIPAL O TÚNEL DE CONDUCCIÓN.

La prolongación del túnel se conecta con el colector Iñaquito (Túnel sección herradura) en las coordenadas N 9'979.169,739 y E 502.726,545. La sección del túnel de prolongación es de tipo baúl, el caudal de diseño es de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, el ancho y altura del túnel es de 5 m. Tiene una longitud de 590.617 m que va desde la intersección con el colector Iñaquito hasta la entrada al cuenco disipador 1.

FIGURA 4.3 VISTA EN TRES DIMENSIONES DE LA PROLONGACIÓN DEL COLECTOR CUYA SECCIÓN ES UN TÚNEL BAÚL.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

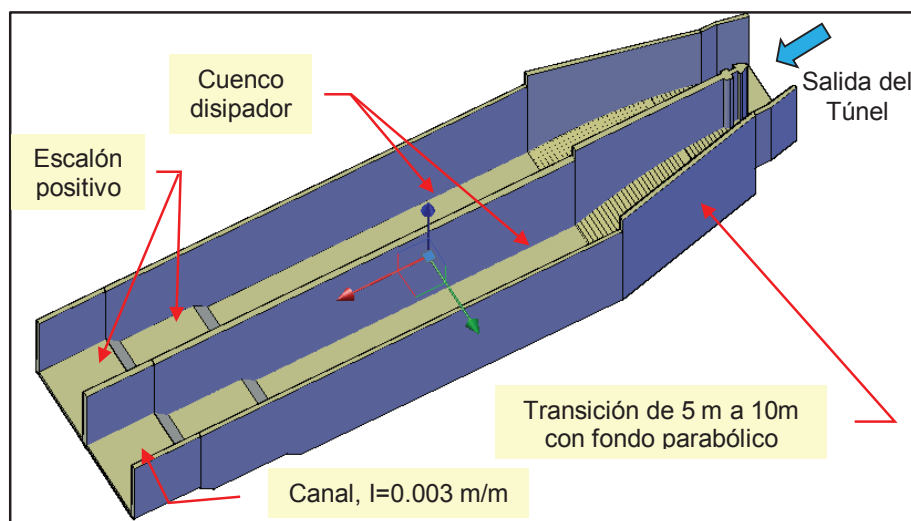
4.1.2 PRIMER CUENCO DISIPADOR (CUENCO 1).

El cuenco disipador de energía 1 se encuentra ubicado seguido del portal de salida del túnel de conducción. En la entrada al cuenco disipador el ancho es de 5 m y a la salida el ancho es de 10 m. Al inicio del cuenco, éste se divide en dos cámaras simétricas de 5m de ancho, con el propósito de facilitar el mantenimiento y limpieza de la estructura. El caudal de diseño de cada cámara es de $75 \text{ m}^3/\text{s}$.

El cuenco en el inicio dispone de rieles para la colocación de compuertas planas de control, seguido de una transición cuyo fondo es una parábola hidrodinámica con el fin de impedir que el flujo se desprege de la solera.

La longitud del cuenco es de 20 m, En el tramo final del cuenco se tienen dos escalones positivos. Y a la salida del cuenco se tiene un canal cuya pendiente es del 0.3 %. Los componentes mencionados se visualizan en la figura 4.4.

FIGURA 4.4 VISTA EN TRES DIMENSIONES DEL PRIMER CUENCO DE DISIPACIÓN.



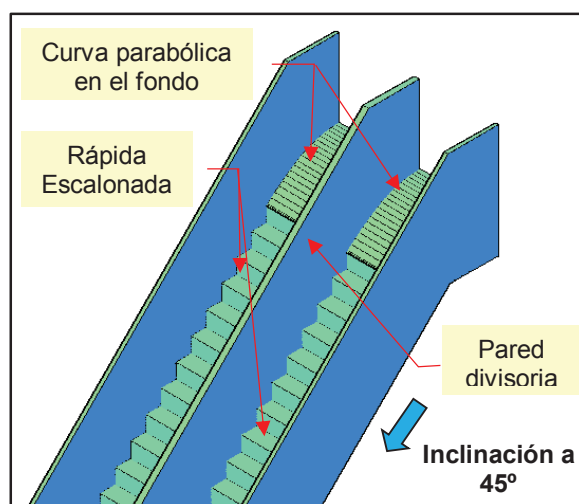
ELABORADO POR: Edwin Casa.

4.4.3 RÁPIDA ESCALONADA 1.

La primera rápida escalonada vence un desnivel de 92.27 m. La altura y el ancho del escalón es 1m valor reportado y recomendado en la literatura técnica en casos de alturas considerables, por facilidad constructiva y por mantenimiento³¹. Al inicio de la rápida se tiene una curva parabólica como se observa en la figura 4.5.

Para caudales bajos el agua circula con el criterio de nappe flow o flujo de escalón en escalón, esto ocurre para caudales de hasta 8 m³/s. Para caudales mayores a 8 m³/s teóricamente se consigue la formación del skimming flow o flujo rasante.

FIGURA 4.5 VISTA EN 3D DE LA RÁPIDA ESCALONADA A MODELAR.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

Desde el inicio del cuenco disipador 1 hasta la restitución de las aguas en la quebrada el Batán se ha colocado una pared intermedia que divide en dos cámaras idénticas, esto con la finalidad de facilitar las tareas de operación y mantenimiento.

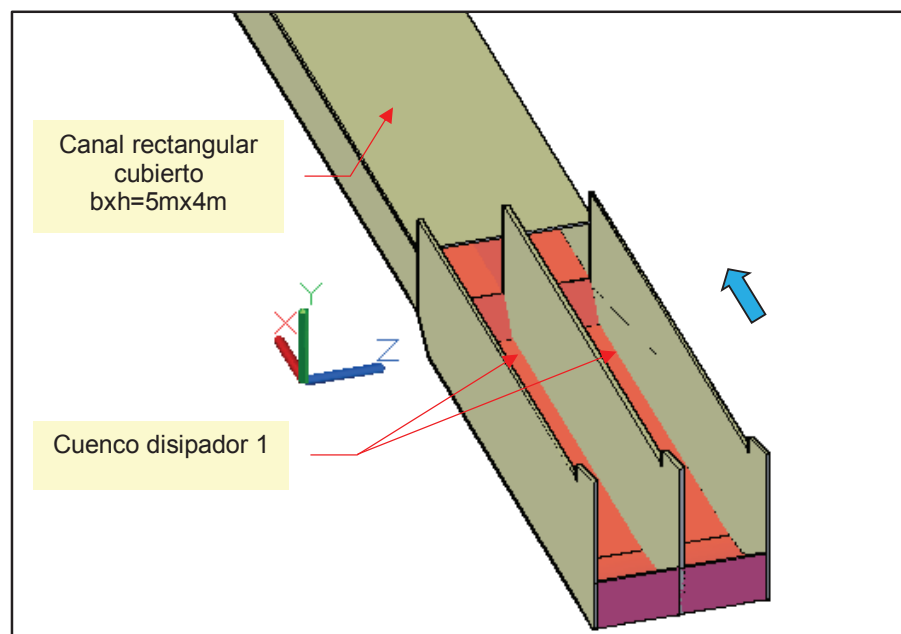
³¹ EMAAP-Q, (2005), Diseños definitivos para el control de la escorrentía con la prolongación del colector Iñaquito desde la plaza Argentina hasta el río Machángara.

4.1.4 SEGUNDO CUENCO DISIPADOR.

El cuenco disipador 2 se ubica al pie de la rápida escalonada 1, inicia con una curva cóncava que empata con la rápida, tiene una longitud de 25m. A la salida del cuenco presenta una grada positiva de 2.0 m aproximadamente. Posteriormente el flujo continúa por un canal rectangular cubierto de sección $b \times h$ igual a 5m x 4m, hasta llegar a la segunda estructura de descarga con rápida escalonada.

En la figura 4.6 se observa una vista en perspectiva de la estructura anteriormente descrita.

FIGURA 4.6 VISTA EN TRES DIMENSIONES DEL CUENCO DISIPADOR No 2, UBICADO AL PIE DE LA RÁPIDA 1.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

La segunda rápida escalonada vence un desnivel de 100m aproximadamente y tiene un cuenco disipador de energía ubicado al pie. Finalmente las aguas combinadas descargan en la quebrada Batán.

Luego de una breve descripción de los elementos que conforma la estructura de descarga a continuación se presenta los objetivos planteados para la simulación numérica del caso de aplicación.

4.2 OBJETIVO GENERAL DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.

El objetivo general es el análisis del flujo rasante en una rápida escalonada, con la ayuda de la simulación numérica utilizando el programa computacional FLOW-3D.

4.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.

Los objetivos específicos de la tesis de grado, sobre la base de la modelación numérica para el caso de aplicación de una rápida escalonada son los siguientes:

- Revisar los lineamientos básicos de diseño de una rápida escalonada.
- Revisar la base teórica de la simulación numérica con metodología CFD.
- Analizar las características del flujo rasante en la rápida escalonada para un rango de caudales de operación.
- Analizar y validar los resultados de la simulación numérica del flujo rasante.
- Evaluar el grado de disipación de energía alcanzado al pie de la rápida escalonada para un rango de caudales de operación.
- Contribuir con nuevos criterios de diseño hidráulico para rápidas escalonadas.

4.4 REPRESENTACIÓN DE LA GEOMETRÍA. CASO DE APLICACIÓN EN EL MODELO NUMÉRICO.

El presente trabajo de titulación desarrolla la simulación numérica del flujo rasante en la rápida escalonada el Batán, con ayuda del programa computacional FLOW-3D. El modelo numérico se realiza con las dimensiones del modelo físico a escala 1:20 de la rápida escalonada construido en el Laboratorio del Centro de investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador.

CUADRO 4.1 DIMENSIONES EN PROTOTIPO Y EN MODELO.

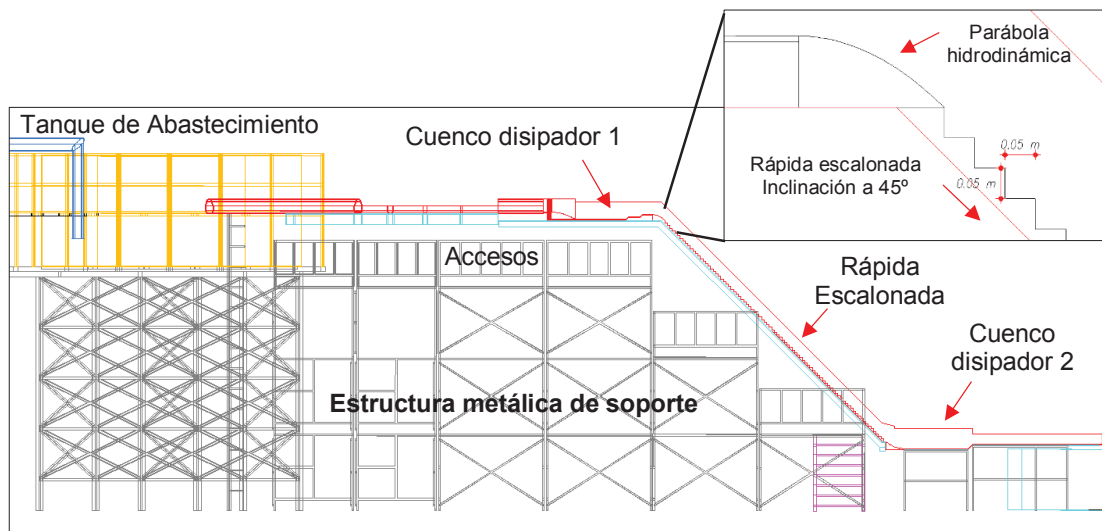
RÁPIDA ESCALONADA				
Estructura	Descripción	Unidad	Prototipo	Modelo 1:20
Túnel	Diámetro	m	5.00	0.250
	Longitud	m	99.11	4.955
	Caudal	m ³ /s	150.00	0.084
Cuenca disipador No1. (ingreso) Una cámara	Longitud	m	38.67	1.934
	Ancho	m	5.00	0.250
	Altura	m	6.87	0.344
	Caudal	m ³ /s	75.00	0.042
Canal (Una cámara)	Longitud	m	4.00	0.200
	Ancho	m	5.00	0.250
	Altura	m	6.87	0.344
	Caudal	m ³ /s	75.00	0.042
Rápida escalonada (Una cámara)	Longitud	m	98.85	4.943
	Altura	m	92.26	4.613
	Ancho	m	5.00	0.250
	Huella	m	1.00	0.050
	Contrahuella	m	1.00	0.050
	Caudal	m ³ /s	75.00	0.042
Cuenca disipador No 2. (al pie) Una cámara	Longitud	m	25.00	1.250
	Ancho	m	5.00	0.250
	Altura	m	8.00	0.400
	Caudal	m ³ /s	75.00	0.042

ELABORADO POR: Edwin Casa.

En el cuadro 4.1 se describen las principales dimensiones en modelo y prototipo de la rápida escalonada, túnel de conducción y cuencos de disipación de energía.

A continuación en la figura 4.7 se muestra del modelo físico construido en el laboratorio del CIERHI a escala 1:20.

FIGURA 4.7 PERFIL LONGITUDINAL DEL MODELO FÍSICO A ESCALA 1:20. DE LA RÁPIDA ESCALONADA.

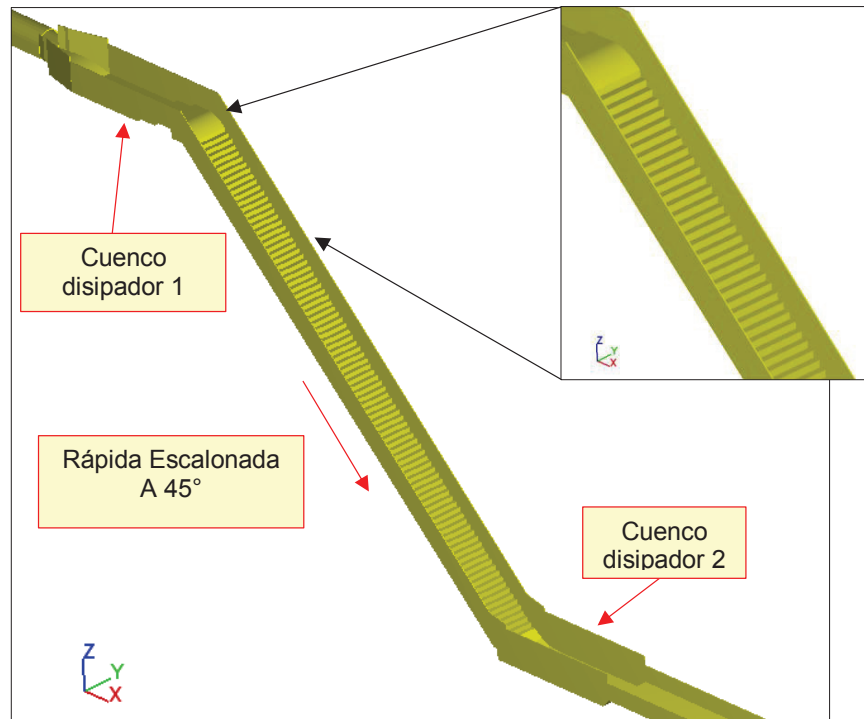


ELABORADO POR: Edwin Casa.

Para empezar con la modelación numérica en el programa comercial FLOW-3D primero se requiere disponer de la geometría de la rápida escalonada. En base a las dimensiones más relevantes presentadas en cuadro 4.1, se procede a configurar el dibujo en tres dimensiones utilizando el programa AutoCAD

En la figura 4.8 se muestra la geometría creada y tiene las características de un sólido tridimensional.

FIGURA 4.8 GEOMETRÍA DE LA RÁPIDA ESCALONADA GENERADA EN EL PROGRAMA AUTOCAD.

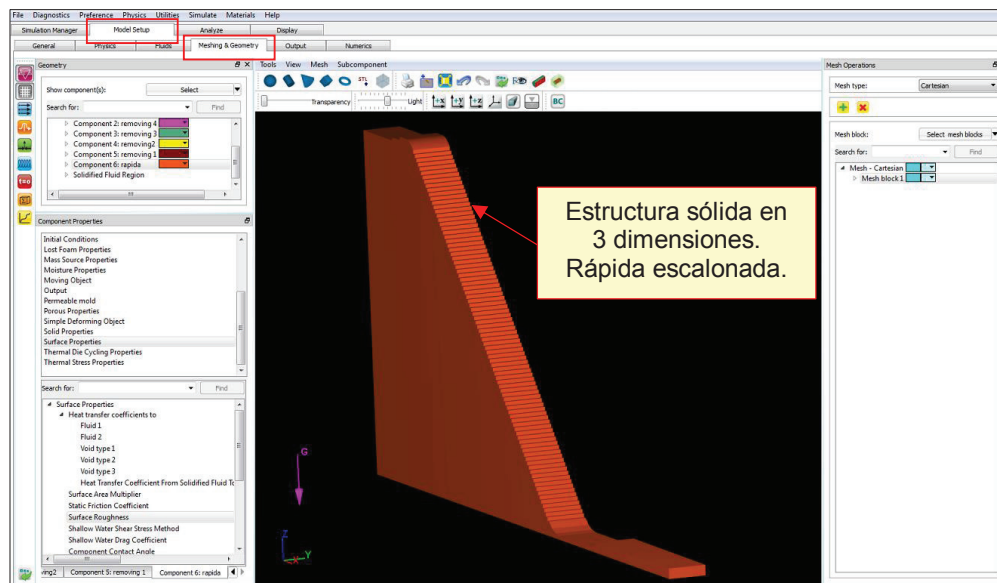


ELABORADO POR: Edwin Casa.

El archivo creado en AutoCAD se guarda con formato de estereolitografía cuya extensión es “stl”, para posteriormente ingresar la geometría sólida en el programa computacional FLOW-3D. El procedimiento a seguir en el programa es el siguiente:

- Ir al icono model setup → meshing & geometry,
- Clic en el icono importar archivo de geometría “STL”
- Aparece una sub ventana, en donde se debe añadir un nuevo componente con características de un sólido como se muestra en la Figura 4.9.

FIGURA 4.9 GEOMETRÍA IMPORTADA AL PROGRAMA FLOW-3D.



FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

4.4.1 MALLADO PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

El mallado consiste en identificar la región de interés del problema y discretizar el espacio continuo. En esta región se resuelve numéricamente las ecuaciones que gobiernan el fenómeno hidráulico.

En FLOW-3D el mallado divide el espacio físico con celdas rectangulares. Las celdas utilizan sus nodos y caras para almacenar valores de las incógnitas como: presión, velocidad.

Algunas consideraciones importantes acerca del mallado se mencionan a continuación:

- Un mallado fino proporciona una mejor representación de la realidad del fenómeno, sin embargo un mallado demasiado fino ralentiza la corrida pues

el paso de tiempo también disminuye y además se necesita una enorme memoria de almacenamiento.

- Es recomendable afinar el mallado en zonas donde se prevé una mayor gradiente en las variables de flujo.

En el programa FLOW-3D, una vez desarrollado el mallado, la geometría a simular se puede visualizarlo dando clic en con el ícono FAVOR. Renderizado la estructura se verifica que el tamaño de mallado empleado abarque todos los detalles de la geometría.

En la figura 4.10 observamos como el algoritmo Favor resuelve la geometría del modelo numérico con dimensiones del modelo físico a escala 1:20, para un tamaño de mallado de 5 mm.

FIGURA 4.10 A) MALLADO ORTOGONAL CONSTANTE CON TAMAÑO IGUAL A 5 mm. B) RENDERIZADO DE LA REGIÓN MALLADA.

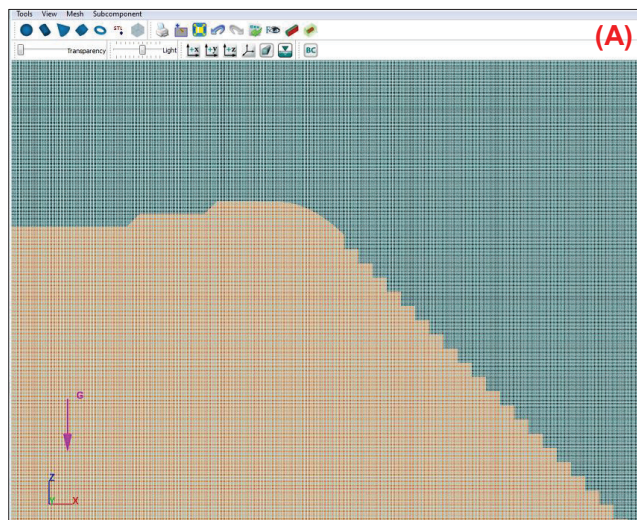
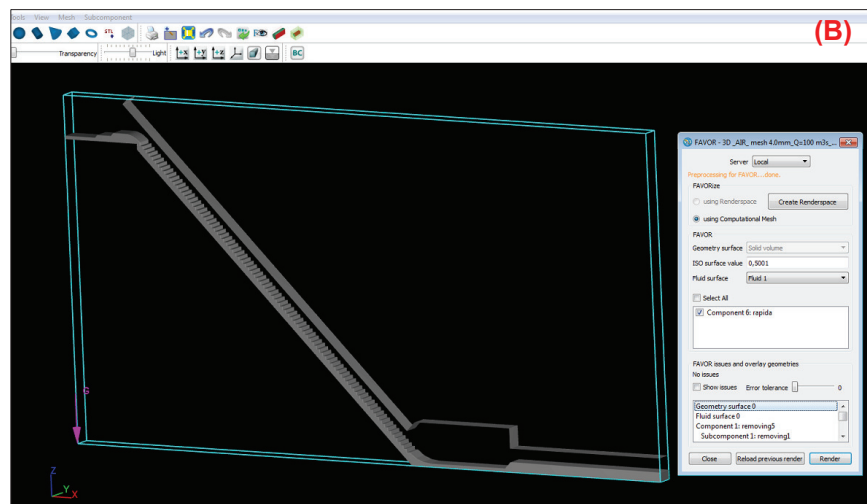


FIGURA 4.10 CONTINUACIÓN.



FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

4.4.2 CONDICIONES DE BORDE DEL MODELO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.

Las condiciones de frontera se establecen en los límites del bloque de malla colocados en la geometría de la rápida escalonada. Se tiene algunas opciones que se pueden combinar como condición de frontera estos son: Caudal de entrada (Q), salida del flujo (O), simetría (S), pared (W), presión (P).

Para el caso de aplicación, en la simulación numérica de la rápida escalonada se compara una serie de combinaciones en la condición de contorno con el fin de analizar como el programa resuelve el fenómeno físico y para qué condiciones se tiene una buena convergencia de la solución.

En el cuadro 4.2 se describe la condición de contorno en las direcciones X, Y que resulta aplicable de acuerdo a los datos obtenidos en el modelo físico³² de la rápida

³² CIERHI, EPN TECH., (2016). “Estudio experimental en modelo físico de las rápidas con perfil escalonado y liso de la quebrada el Batán. Fase I y Fase II”. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.

escalonada y principalmente esta combinación de condiciones de frontera ayuda a la estabilidad y convergencia numérica fácil y rápidamente.

CUADRO 4.2 CONDICIONES DE FRONTERA PARA EL CASO DE APLICACIÓN.

Símbolo	Condición de contorno	Dirección	Observaciones
Q	Caudal entrada	Xmín	Ingreso de caudal (Sl; m ³ /s). Se establece el nivel de agua al ingreso del sistema.
S	Simetría	Ymín, Ymáx	En la superficie del sólido, el fluido tiene libertad de deslizamiento. Las superficies tienen tensiones tangenciales nulas.
O	Salida de flujo	Xmáx.	En el límite de la salida de flujo, la gradiente de velocidad es diferente de cero.

FUENTE: Manual de FLOW-3D 10.1.

ELABORADO POR: Edwin Casa.

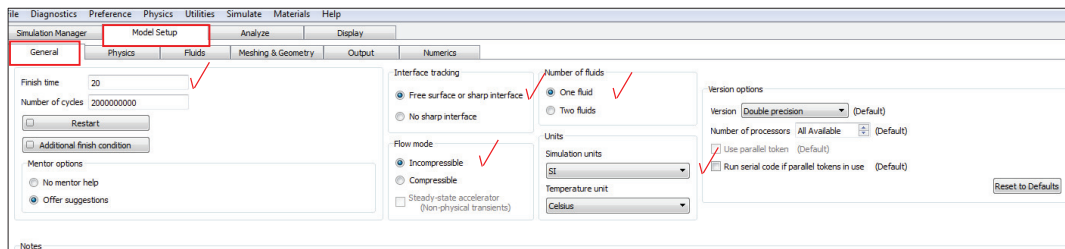
4.4.3 PARÁMETROS INICIALES, FÍSICOS Y NUMÉRICOS DE LA MODELACIÓN EN FLOW-3D.

4.4.3.1 Parámetros iniciales.

El tiempo establecido para que la simulación numérica converja, generalmente se estima considerando el tiempo que se demora el flujo en entrar y salir del sistema más un tiempo adicional para que la solución numérica llegue a un equilibrio o se estabilice tanto en masa como en la energía cinética.

Para la modelación de la rápida escalonada se ha considerado un tiempo de 20s, un fluido incompresible, flujo a superficie libre. Estos parámetros se ingresa en FLOW-3D en el icono model setup→general, como se visualiza en la figura 4.11.

FIGURA 4.11 PARÁMETROS GENERALES PARA LA SIMULACIÓN. PROGRAMA FLOW-3D.



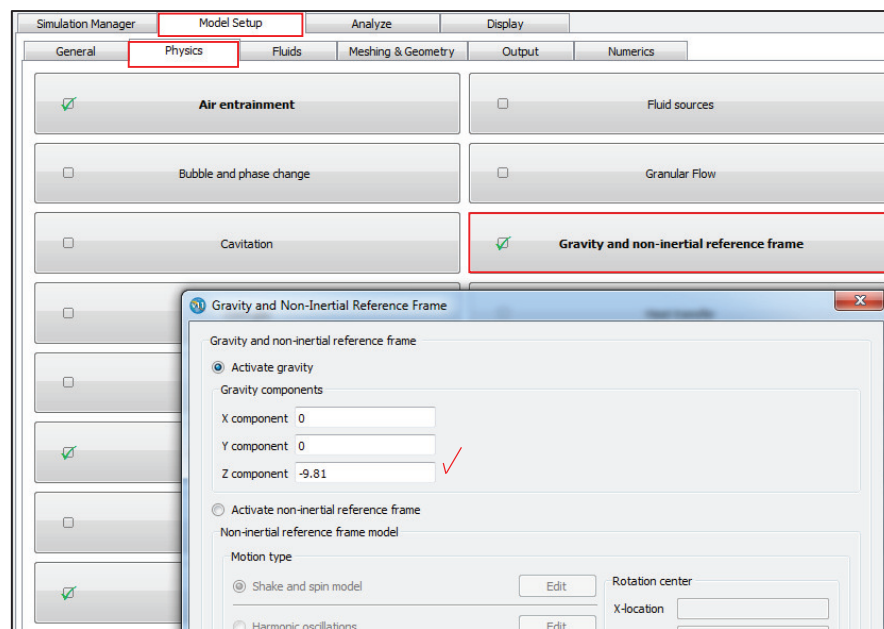
FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

4.4.3.2 Parámetros físicos.

El flujo a superficie libre en una rápida escalonada principalmente depende de los efectos de la gravedad y viscosidad. En la simulación numérica la gravedad se activa en model setup→physics→gravity and non-inertial refernece frame.

De acuerdo a las coordenadas de nuestra la sólida, el valor de la gravedad se edita en la dirección Z con el signo negativo como se muestra en la figura 4.12.

FIGURA 4.12 ACTIVACIÓN DE LA GRAVEDAD. PROGRAMA FLOW-3D.

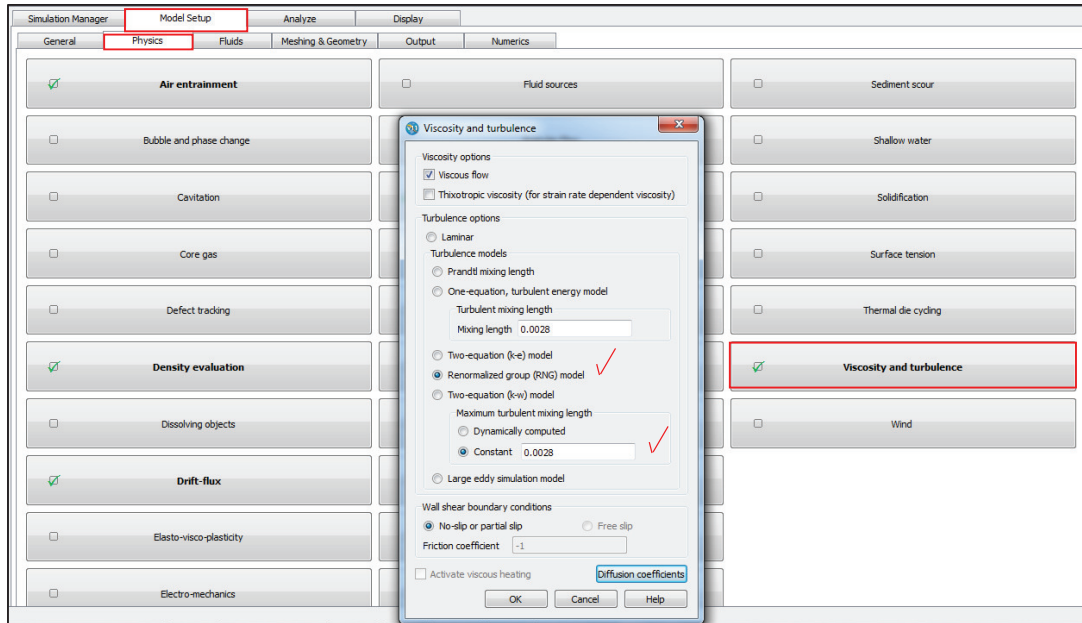


FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

El modelo de turbulencia seleccionado para una representación adecuada de la turbulencia en el flujo rasante de una rápida escalonada según la literatura técnica con se describió en el numeral 1.4 puede hacerse aplicando el modelo K- ϵ , K- ϵ RNG y el modelo LES.

Dependiendo del nivel de estudio a la que se pretende llegar. Este parámetro es activado en el programa FLOW-3D en: model setup→physics→viscosity and turbulence.

FIGURA 4.13 ACTIVACIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA. PROGRAMA FLOW-3D.



FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

La presencia de los escalones altera el flujo en la superficie libre generando turbulencia hasta el punto de introducción y arrastre de aire. Por tal motivo para este estudio, se debe considerar un fluido bifásico.

El programa FLOW-3D dispone de dos modelos o algoritmos para representar la aireación y el esponjamiento en la frontera agua-aire.

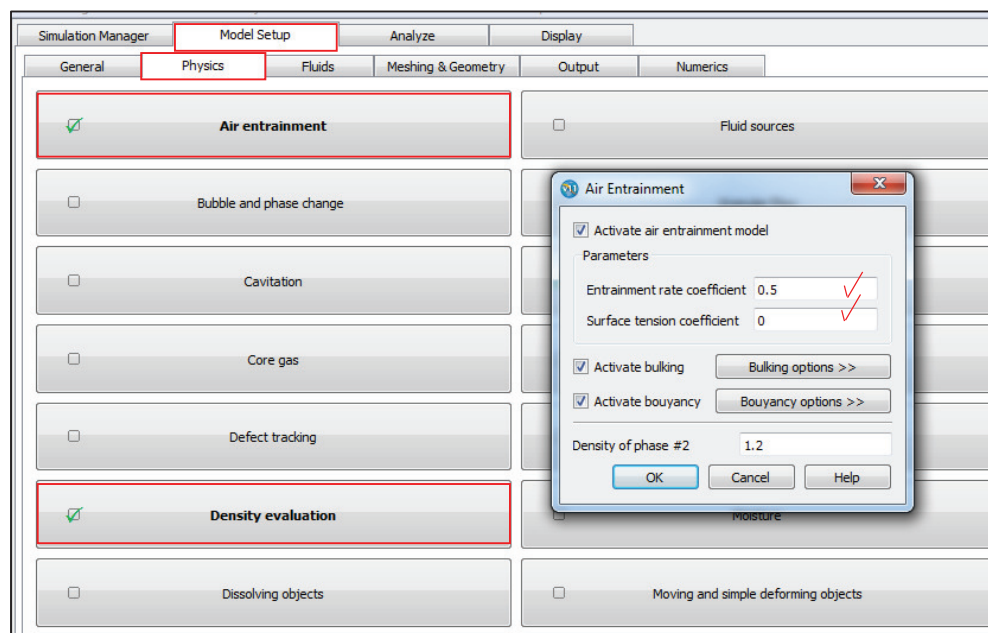
En cuanto al modelo de aireación existe un coeficiente de transporte. Este parámetro tiene un valor 0.50 por default, que resulta adecuado para la mayoría de los casos. Y un coeficiente de tensión superficial que es opcional y puede ser definido según sea el caso de presencia de los efectos de la tensión superficial.

El coeficiente de tensión superficial depende del equilibrio de fuerzas que definen la cantidad de aireación en el flujo.

Estos valores y el de la densidad del aire (1.2 kg/m^3 .) se edita en: model setup→physics→air entrainment, como se puede observar en la figura 4.14.

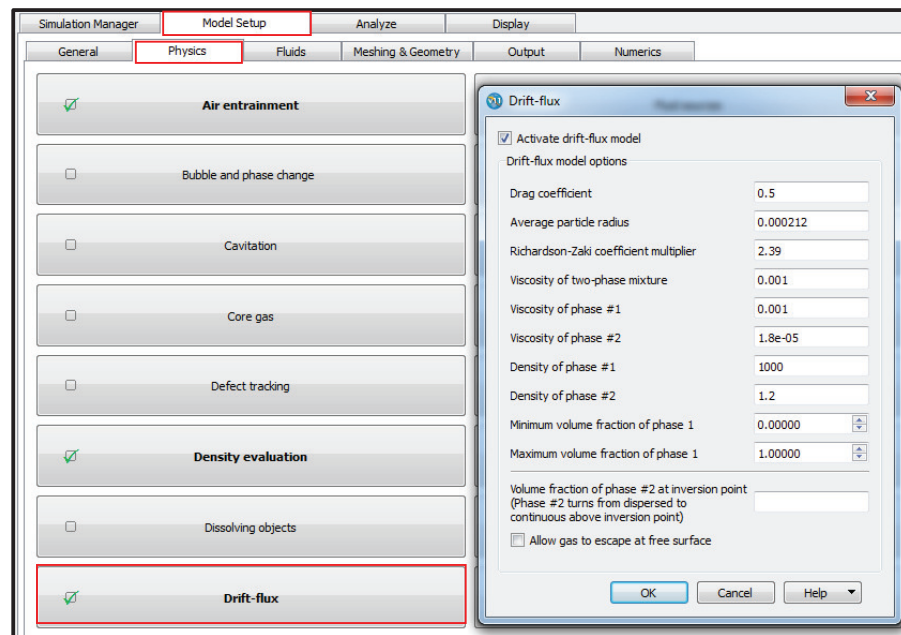
Además se debe tomar en cuenta los cambios de la densidad debido a la introducción de aire en: model setup→physics→density evaluation.

FIGURA 4.14 ACTIVACIÓN DEL MODELO DE AIREACIÓN EN EL FLUJO. PROGRAMA FLOW-3D.



FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

El modelo de esponjamiento en la frontera agua-aire (drift flux), se activa para simular la mezcla agua/aire y representar de alguna manera las burbujas de aire que se mueven en el flujo debido a la diferencia de densidades. En el programa se sigue los siguientes pasos para activar el modelo drift flux: Model setup→physics→drift flux.

FIGURA 4.15 ACTIVACIÓN DEL MODELO DRIFT FLUX. PROGRAMA FLOW-3D.

FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

4.4.3.3 Parámetros numéricos³³.

El software FLOW-3D emplea el tradicional método de volumen Fluido (VOF) para lograr una buena aproximación o representación de la superficie libre del agua. En las últimas versiones de FLOW-3D se ha implementado el método TruVOF (Unsplit lagrangian method, split lagrangian method) con el fin de conseguir un seguimiento más preciso de la superficie del líquido para capturar las olas y resaltos hidráulicos.

El programa resuelve numéricamente las ecuaciones utilizando el método de diferencias finitas. Los términos de las ecuaciones se evalúan de manera explícita e implícita generando un esquema computacional simple y eficiente, pero esto requiere el uso de un tamaño de paso de tiempo limitado para mantener los resultados computacionalmente estables y precisos.

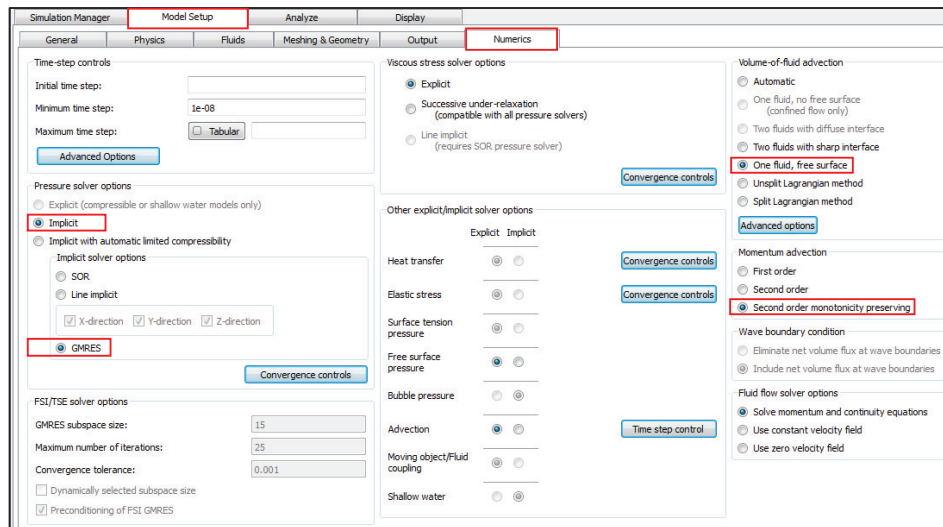
³³ Flow Science, Inc. (2012). FLOW 3D 10.1.0 Documentation Release. Manual de Usuario, Flow-3D. Los Alamos National Laboratory. Santa Fe, New México.

La presión y velocidad se acopla de forma implícita, es decir el uso de presiones en un tiempo adelantado en la ecuación de momento y la velocidad en un tiempo adelantado en la ecuación de continuidad.

La precisión del modelo numérico puede variar según se seleccione el grado para resolver la ecuación de momento. En FLOW-3D se tiene las siguientes opciones: Primer orden, segundo orden, segundo orden monotonicidad (Método de diferencias de upwind - preservación de monotonicidad).

En el programa estos parámetros numéricos ingresamos en: Model setup→numerics, como se puede observar en la figura 4.16.

FIGURA 4.16 INGRESO DE PARÁMETROS NUMÉRICAS. PROGRAMA FLOW-3D.



FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

4.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Es primordial disponer de la geometría en tres dimensiones (x,y,z) de la estructura hidráulica que se va a simular. Para ello es conveniente crear el archivo de geometría en programas gráficos de diseño que permitan una mejor facilidad constructiva y de esta manera, solo tener que exportarlo en formato "stl" como componente sólido en el programa FLOW-3D.

El mallado estructurado en la región de interés debe satisfacer con la relación de adyacente y relación de aspecto recomendado por la literatura técnica; caso contrario las resolución numérica se torna imprecisa y en algunos casos dificultará la estabilidad y convergencia de la solución. En geometrías complejas resulta conveniente colocar bloques de malla lo cual permite disminuir el número de celdas. Adicionalmente se recomienda realizar un refinado de la malla en lugares donde la geometría presenta características particulares que podrían incidir directamente en el comportamiento hidráulico del flujo. La verificación de la adecuada representación de la geometría discretizada en nuestra simulación se lo hace utilizado el algoritmo FAVOR. Este permite visualizar, con el renderizado, la geometría alcanzada de acuerdo al tamaño de malla considerado.

Conociendo las diferentes opciones sobre las condiciones de borde que posee el programa, se iniciaron corridas realizando combinaciones para determinar las condiciones de frontera compatibles. Según el análisis se ha llegado a la conclusión que para obtener una buena convergencia y estabilidad de la solución, considerando las condiciones iniciales, físicas y numéricas del fenómeno físico en estudio, la simulación numérica en dos dimensiones de la rápida escalonada debe tener como condiciones de frontera en las direcciones X, Y lo siguientes: X_{\min} = caudal de ingreso y nivel establecido de agua. X_{\max} = Salida del flujo. Y_{\min} , Y_{\max} = Condición de simetría.

La representación del fenómeno físico de la aireación y el aumento de volumen en la frontera agua aire es posible representarlas numéricamente pero con ciertos límites. Para ello se debe activar el modelo de aireación (air entrainment) y el modelo de esponjamiento (Drift flux).

CAPITULO 5

CALIBRACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA CON AYUDA DEL MODELO FÍSICO.

5.1 BREVE DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO³⁴.

El modelo hidráulico físico de la rápida escalonada construido a escala 1:20 es de importancia al momento de calibrar el modelo numérico con el objeto de obtener resultados confiables. Las condiciones de fronteras y algunos parámetros hidráulicos del estudio experimental son usados como datos de partida en la simulación numérica.

A continuación se describe brevemente el modelo físico de la rápida escalonada.

5.1.1 CRITERIOS DE SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA.

El modelo físico de la rápida escalonada tiene una escala geométrica 1:20. La escala seleccionada se ajusta adecuadamente a la disponibilidad de espacio del laboratorio del CIERHI y a la facilidad para el manejo de los caudales de operación. A si mismo se ha considerado la semejanza de Froude como base para las transformaciones de las variables físicas que intervienen en el proceso.

Al no poder lograr una similitud hidráulica perfecta se trata de alcanzar una similitud restringida o particular, en el cual sea posible alcanzar físicamente la fuerza más importante que condiciona el fenómeno hidráulico en el prototipo y representarla en el modelo a través de la identidad de un solo de los parámetro, sea Froude, Reynolds, Weber, Mach.

³⁴ CIERHI, EPN TECH., (2016). "Estudio experimental en modelo físico de las rápidas con perfil escalonado y liso de la quebrada el Batán. Fase I y Fase II". Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.

En el presente caso de estudio el movimiento del agua a superficie libre principalmente se desarrolla por la acción de la gravedad, razón por la cual el modelo físico sigue los lineamientos del criterio o semejanza de Froude³⁵.

Para cumplir con la similitud dinámica restringida de Froude se debe asegurar que el número de Froude en modelo sean igual al de prototipo. En un modelo froudiano se debe asegurar adicionalmente que el efecto de la tensión superficial y de la viscosidad en el movimiento del fluido sea mínimas. Esto se cumple teniendo mediciones de profundidades de agua mayores a 2cm y número de Reynolds mayor a 2×10^4 respectivamente³⁶.

5.1.2 MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA CON PERFIL ESCALONADO.

El modelo físico de la rápida con solera escalonada instalado en el laboratorio del CIERHI principalmente se compone de tres zonas bien definidas que son:

ZONA DE INGRESO.

Comprende las siguientes estructuras: Sistema de tuberías para el abastecimiento del caudal, tanque elevado de abastecimiento y pantalla para la uniformización del flujo de aproximación al modelo propiamente dicho.

MODELO FÍSICO.

Está conformada por las siguientes estructuras: Túnel de aproximación tipo baúl, cuenco disipador 1, rápida escalonada, cuenco disipador 2 y canal rectangular cubierto.

³⁵ HIDALGO, Marcelo. "Introducción a la teoría de los Modelos Hidráulicos y Aplicaciones básicas". Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador. 2007. 62 p

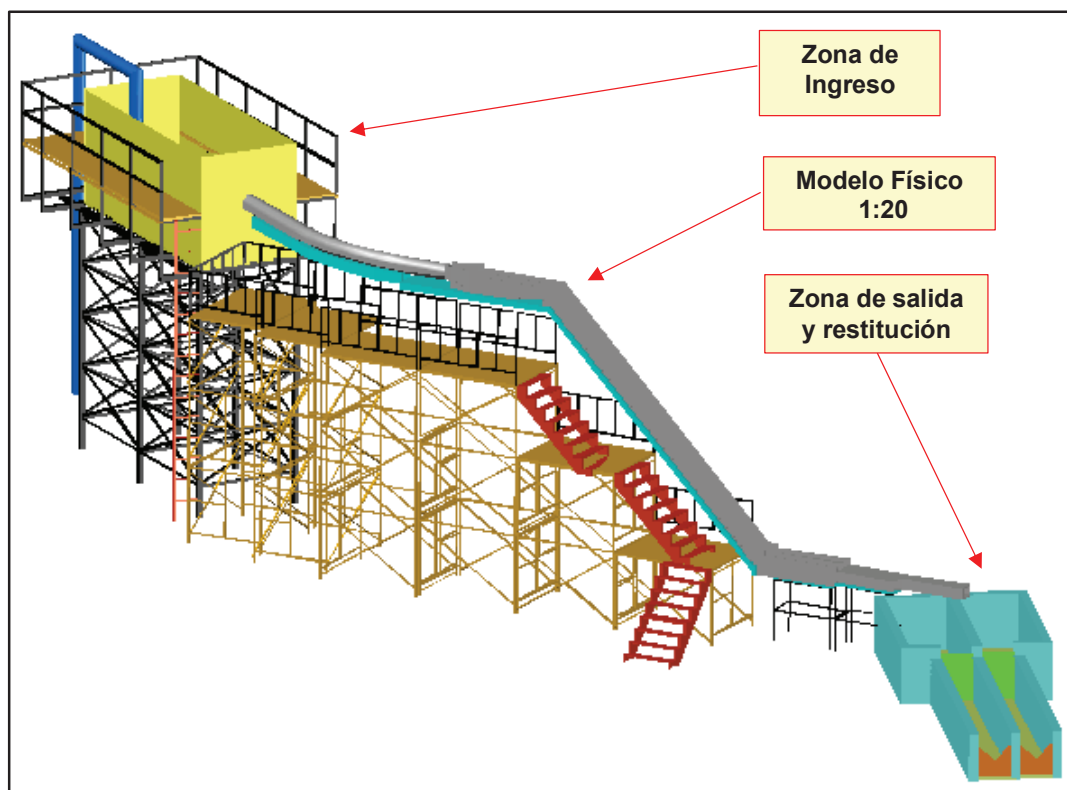
³⁶ CASTRO, Marco. "Análisis Dimensional y Modelación física en Hidráulica". Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador. 50 p.

ZONA DE SALIDA Y RESTITUCIÓN

Está conformado por las siguientes estructuras: Tanque de mampostería para la descarga del caudal, canal de restitución del caudal al sistema de recirculación del laboratorio, pantalla uniformizadora del flujo de aproximación al vertedero triangular de aforo.

En la Figura 5.1 y Fotografía 5.1, se muestra las tres zonas mencionadas anteriormente y que componen el modelo físico de la rápida escalonada construida en el laboratorio del CIERHI a escala 1:20.

FIGURA 5.1 ESQUEMA EN TRES DIMENSIONES (3D) DEL MODELO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

FOTOGRAFÍA 5.1 MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA CONSTRUIDA A ESCALA 1:20.



FUENTE: Estudio experimental del modelo de la rápida escalonada a escala 1:20. CIERHI 2015-2106.

5.2 CONSIDERACIONES IMPORTANTES PARA LA CALIBRACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

La modelación de la rápida escalonada es compleja ya que es necesario analizar el desarrollo de la lámina libre del agua en los escalones y la cantidad de autoaireación que se presenta en el flujo rasante. En el presente capítulo, la calibración de la simulación numérica usando el paquete comercial FLOW-3D se basa en analizar la sensibilidad de los resultados para cuatro diferentes tamaños de mallado (5mm, 4mm, 3mm, 2mm) y seleccionar el modelo de turbulencia más apropiado para representar el fenómeno físico. Para este último enunciado se debe analizar aspectos desde el punto de vista ingenieril tales como:

- Física del fluido y dinámica de la turbulencia.
- Capacidad computacional disponible.
- Plazo de tiempo disponible para las simulaciones
- Detalle y precisión de la soluciones.

Lo ideal sería poder simular todo el espectro de las fluctuaciones turbulentas, con las ecuaciones de masa y cantidad de movimiento (Simulaciones directas DNS). Esto sería posible si la resolución de la malla es suficiente para capturar todos esos detalles. Sin embargo, hoy en día, no es posible debido a las limitaciones de memoria del ordenador y tiempo de procesamiento. Por ello se recurre a la modelización simplificada que describe los efectos de la turbulencia sobre las características medias del flujo³⁷.

En FLOW-3D la simulación de la turbulencia más cercana a la realidad se puede realizar mediante aproximaciones o técnicas LES o por medio de modelos RANS.

Las simulaciones LES proporcionan soluciones no estacionarias, fluctuantes y muy ricas desde el punto de vista de la física. Mientras que las RANS resuelven valores promediados estadísticos.

A continuación en el numeral 5.3 y 5.4, se realiza el análisis de los resultados de la simulación numérica de la rápida escalonada según la influencia del tamaño de malla y modelo de turbulencia.

³⁷ Flow Science, Inc. (2012). FLOW 3D 10.1.0 Documentation Release. Manual de Usuario, Flow-3D. Los Alamos National Laboratory. Santa Fe, New Mexico.

5.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE MALLA.

Es importante establecer un tamaño de malla adecuado, ya que éste influye directamente en la aproximación de la solución real de la modelación numérica.

Para éste análisis se considera cuatro tamaños de celdas uniformes que son: 5mm, 4mm, 3mm y 2mm. El caudal asociado a este análisis es de 50 m³/s en prototipo que equivale a 27.95 l/s en el modelo físico a escala 1:20.

Estudios experimentales demuestran que generalmente el flujo rasante o flujo sobre el fondo virtual en una rápida escalonada, es un flujo plano en canales anchos³⁸. Es decir las variables hidrodinámicas son constantes en el ancho b .

Por tal motivo y en base a la capacidad del ordenador disponible, el presente trabajo de titulación analiza el flujo rasante de una rápida escalonada, con el desarrollo de la simulación numérica dos dimensiones (2D). En esta región se resuelven las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS), usando el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ RNG para el cierre del sistema de ecuaciones.

El modelo de turbulencia empleado exige la necesidad de limitar los valores de la disipación de energía turbulenta a un valor mínimo. Para ello se debe calcular la escala de longitud máxima turbulenta (TLEN). De esta manera evitaremos obtener valores anómalos o muy altos de la viscosidad turbulenta.

El valor de TLEN en el análisis de la influencia del tamaño de malla se designa con un valor calculado automáticamente por el programa computacional FLOW-3D.

³⁸ Bombardelli, F.A., Meireles, I. and Matos, J., (2010), "Laboratory measurement and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways", *Environ Fluid Mechanics*.

También para este análisis se activan en cada simulación, el modelo de introducción de aire y el modelo drift flux con el objeto de representar el transporte de aire y la mezcla agua-aire con aumento de volumen. El valor promedio del tamaño de la partícula del componente disperso (aire) se asume un valor de 0.001m.

En el cuadro 5.1 se describen en resumen las simulaciones numéricas planteadas para el análisis de la influencia del tamaño de malla.

CUADRO 5.1 PLAN DE SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA EL ANÁLISIS DEL TAMAÑO DE MALLA.

Simulación	Tamaño de mallado	Total celdas	Modelo Turbulencia	TLEN
-	m	No	-	m
S0	0.005	1 440 000	k-ε RNG	Automático
S1	0.004	2 301 375	k-ε RNG	Automático
S2	0.003	4 090 200	k-ε RNG	Automático
S3	0.002	18 405 900	k-ε RNG	Automático

ELABORADO POR: Edwin Casa.

En cuanto a la descripción de las dimensiones más relevantes de la geometría de la rápida escalonada tenemos: Inclinación a 45°, altura total de 4.61m, 87 escalones longitud y altura del escalón igual a 0.05m.

Desde el inicio de la cresta de la rápida hasta el final de los escalones al pie de la rápida se tiene una longitud desarrollada de 6.42m.

5.3.1 RESULTADOS NUMÉRICOS SEGÚN LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE MALLA.

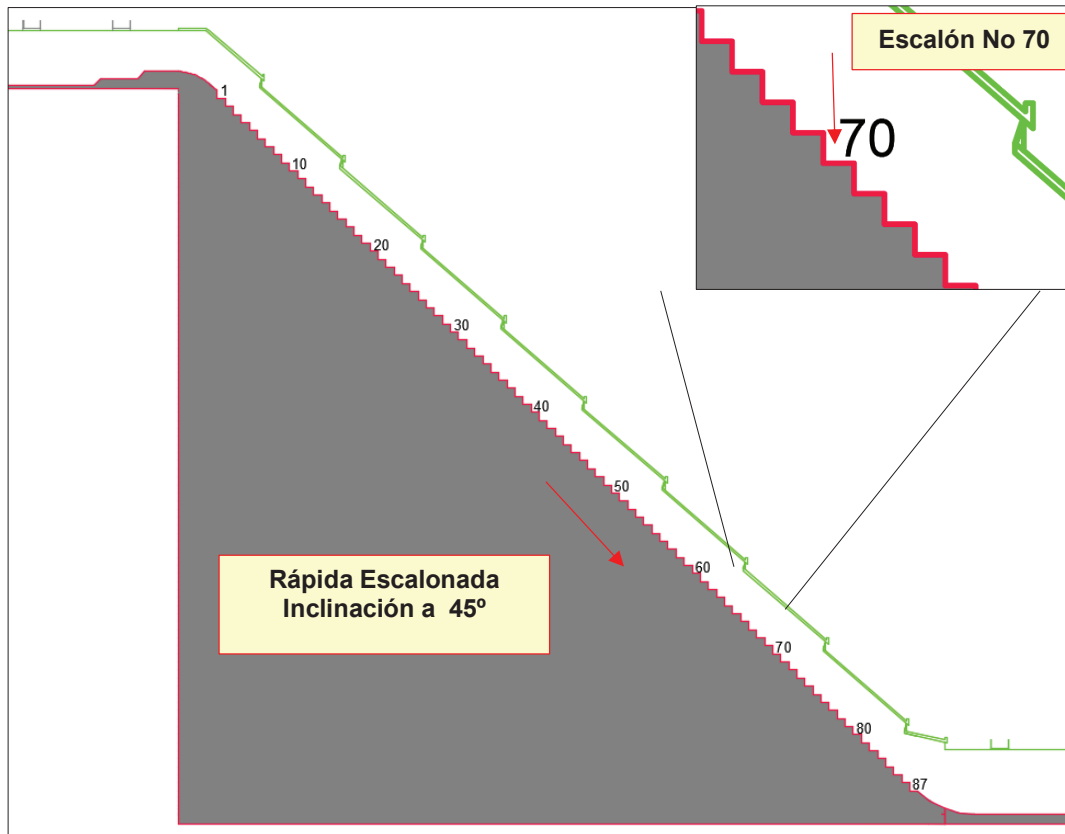
La primera comparación de resultados para los cuatro diferentes tamaños de celdas uniformes se realiza observando como varía la velocidad del flujo en la profundidad del flujo, medida perpendicular al fondo virtual formado por la recirculación del flujo en las cavidades de los escalones.

El análisis de la distribución de la velocidad en el flujo rasante se realiza en un escalón que se ubica en la zona donde se presenta flujo uniforme es decir un flujo completamente autoaireado.

Se escoge el escalón No 70 ubicado en el tramo final de la rápida escalonada a 5.19 m medido desde el inicio de la cresta de la rápida.

En la figura 5.2 se muestra el número total de escalones que tiene la rápida escalonada. A cada escalón se designa con una numeración ascendente desde aguas arriba hacia aguas abajo.

FIGURA 5.2 MODELO DE LA RÁPIDA ESCALONADA A 45°. IDENTIFICACIÓN DEL NÚMERO TOTAL DE ESCALONES.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

En el cuadro 5.2 se indica el tiempo de simulación y duración en tiempo real de las corridas usando un ordenador cuyas características son: Una memoria RAM de 16GB y con un procesador Intel® Core™ i7 3.69 GHz.

La estabilidad numérica se alcanza de acuerdo al paso temporal, que está en función del tamaño de celda. Es recomendable verificar la estabilidad del parámetro de la energía cinética turbulenta para satisfacer el equilibrio y convergencia de la resolución numérica.

CUADRO 5.2 TIEMPO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

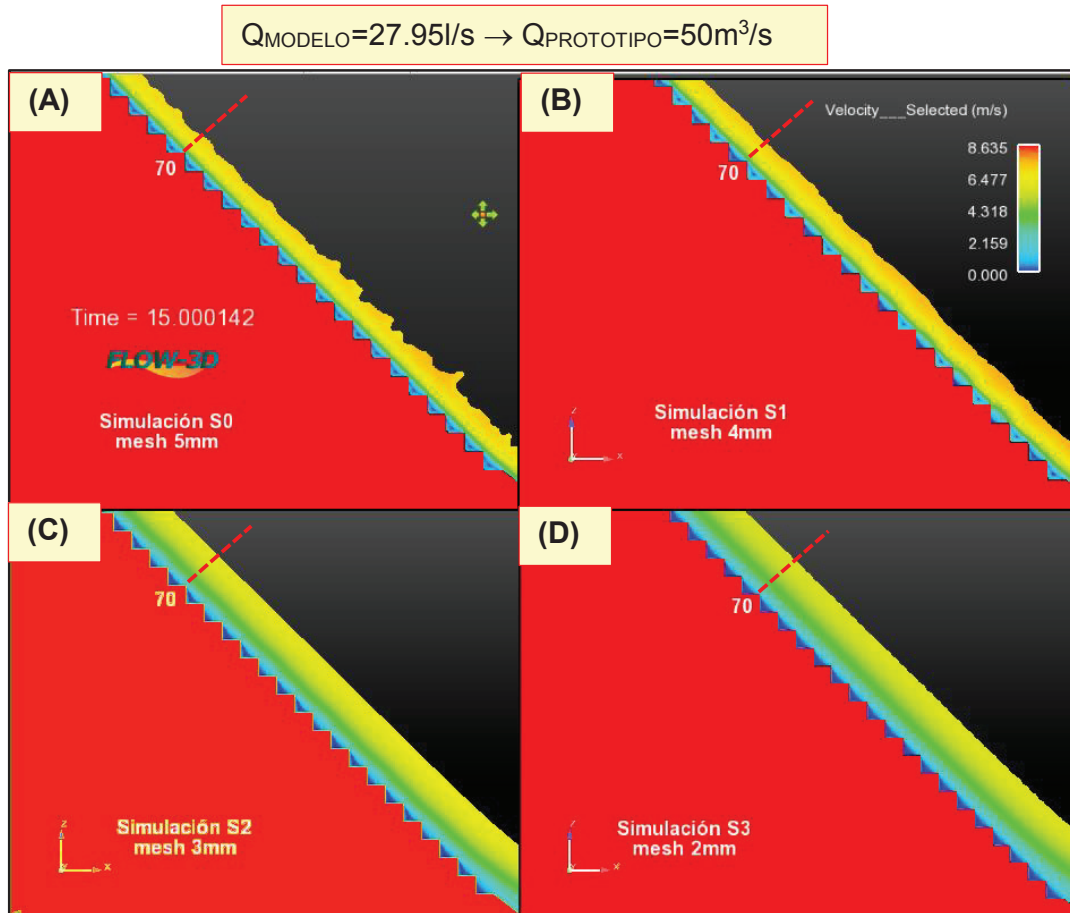
Simulación	Tiempo de Simulación	Duración de corrida	Observaciones
-	s	horas/días	-
S0	11.6	2:54 h	Simulación estable
S1	15.0	6: 07 h	Simulación estable
S2	6.6	23:32 h	Tiempo simulado muy corto
S3	4.7	4 días 0:10 h	Tiempo simulado muy corto

ELABORADO POR: Edwin Casa.

En la figura 5.3 se indica con líneas entrecortadas la sección donde se ubica el escalón No 70.

La figura muestra el perfil de la lámina de agua sobre la rápida escalonada junto con la variable de la velocidad del flujo en simbología de colores. Se visualiza la formación del tipo de flujo rasante en las cuatro simulaciones con diferente tamaño de malla, para el caudal de 27.95l/s.

FIGURA 5.3 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD A LO LARGO DE LA RÁPIDA. (A) SIMULACIÓN “S0”, TAMAÑO DE MALLA IGUAL A 5mm. (B) SIMULACIÓN “S1”, TAMAÑO DE MALLA IGUAL A 4mm (C) SIMULACIÓN “S2”, TAMAÑO DE MALLA IGUAL A 3mm (D) SIMULACIÓN “S3”, TAMAÑO DE MALLA IGUAL A 2mm.



FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D

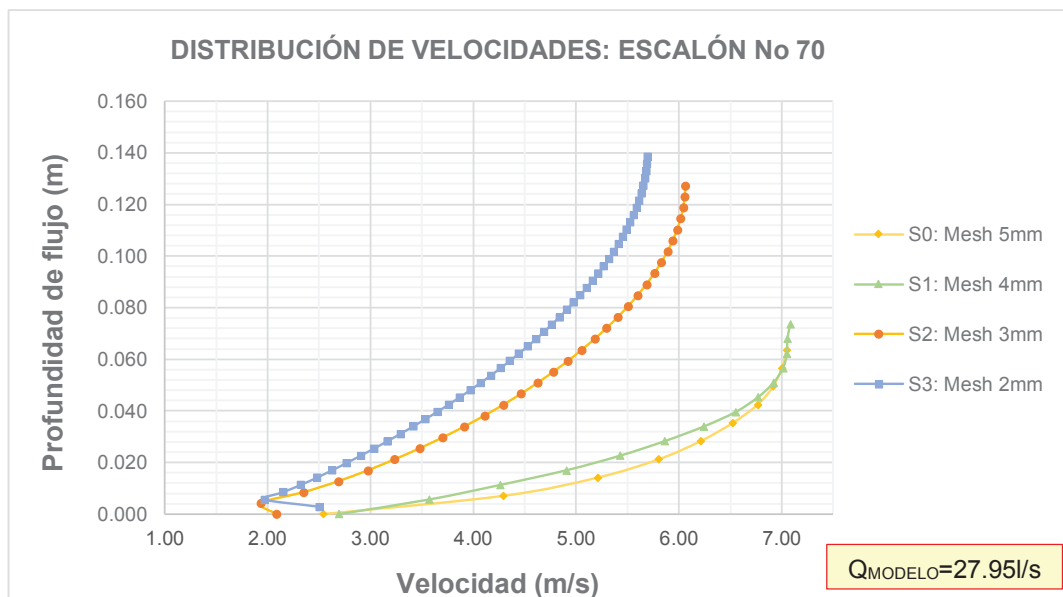
El gráfico 5.1, indica la variación de la velocidad del flujo versus la profundidad del flujo perpendicular al fondo virtual en el escalón No 70. Se puede observar que el tamaño uniforme de las celdas tiene una importante influencia en el perfil de velocidades.

La tendencia de las curvas para las simulaciones “S0” y “S1” correspondientes al tamaño de celdas de 5mm y 4mm respectivamente, muestra una semejanza entre

sí. Se observa que la velocidad máxima del flujo tiene un valor aproximado de 7 m/s, mientras la profundidad de flujo alcanza un valor cercano de 0.07m.

La tendencia de las curvas para las simulaciones “S2” y “S3” correspondientes al tamaño de celdas de 3mm y 2mm respectivamente, presenta una pendiente más pronunciada en comparación a la tendencia de las curvas “S0” y “S1”. La velocidad máxima del flujo rasante esta del orden de los 5.9 m/s, siendo este valor inferior al obtenido con tamaño de malla más grueso. Las simulaciones “S2” y “S3” muestran una desviación porcentual media del 10% en el valor obtenido de la velocidad máxima. La profundidad del flujo en el escalón No 70, ubicado en la zona del flujo completamente autoaireado es del orden de los 13 cm, este valor es casi el doble de la profundidad alcanzado con tamaño de malla más grueso.

GRÁFICO 5.1 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES, SEGÚN EL TAMAÑO DE MALLA.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

Uno de las causas para las variaciones de la distribución de velocidades en la profundidad del flujo aireado según el tamaño de mallado es:

- El valor de TLEN seleccionado en forma automática, depende del tamaño de celda, por lo que puede existir la necesidad de calibrar este valor si se observan valores erróneos de la viscosidad turbulenta (ν_T) ya que podría tenerse valores muy bajos de la disipación energía turbulenta (ϵ_T).

Los escenarios “S2” y “S3” al tener tamaño de malla más fino necesitan más tiempo de simulación hasta alcanzar la estabilidad, pues el paso temporal en el cual se resuelven el sistema de ecuaciones también resulta demasiado pequeño.

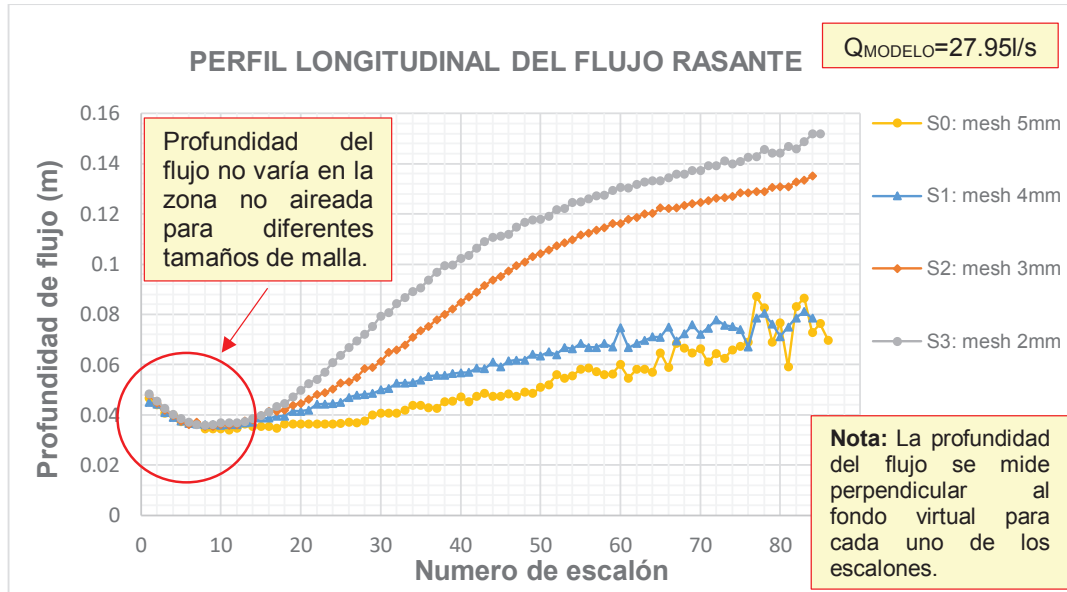
Los resultados presentados para el escenario con tamaño de malla de 3mm y 2 mm corresponden a tiempos de simulación muy cortos 6.6s y 4.7s respectivamente, con se observa en el cuadro 5.2.

El gráfico 5.2 analiza la profundidad del flujo en cada escalón y a lo largo de la rápida escalonada. Se nota claramente que el tamaño de malla no influye en la profundidad del flujo en la zona no aireada, es decir en los primeros 14 escalones.

En la zona del flujo completamente autoaireado se observa para la simulación con tamaño de malla grande “S0” niveles de agua inferiores que para la simulación con tamaño de malla más fino “S3”.

La sobreelevación de las profundidades del flujo en la zona completamente autoaireada, con el tamaño de celda más pequeño puede corresponder a la mayor precisión con que se resuelve el flujo, además se puede visualizar un mayor efecto del modelo Drift flux o modelo de esponjamiento en la frontera agua aire. Esto hace que aumente el volumen en la zona uniforme del flujo rasante y se produzca profundidades de flujo mayores a los registrados en el modelo físico.

GRÁFICO 5.2 PROFUNDIDAD DEL FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

Los escenarios "S2" y "S3" muestran profundidades de flujo autoaireado superiores a los registrados en el modelo físico. Es de considerar que se necesita mayor tiempo de simulación para que se establezca la simulación numérica.

Tomando en consideración el tiempo que demora cada simulación numérica (modelo en dos dimensiones) en función del tamaño de malla, se elige el tamaño de malla de 4mm para las simulaciones donde se analiza la influencia del modelo de turbulencia y cuyos resultados se presentan a continuación.

5.4 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MODELO DE TURBULENCIA.

Como se mencionó en el numeral 5.2 el paquete comercial FLOW 3D dispone de modelos de turbulencia RANS y el modelo LES.

Los modelos RANS son las ecuaciones promediadas de Reynolds, constan de dos ecuaciones que son la energía cinética turbulenta (K_T) y la disipación de energía turbulenta (ϵ_T). El programa posee el modelo clásico K- ϵ (Harlow-Nakayama-1967), el modelo K- ϵ (RNG) el cual tiene mayor precisión en simular flujos en regiones de fuerte corte y flujos de alta turbulencia y el modelo K- ω que presenta una mejora en la simulación del comportamiento del flujo en las paredes.

Un modelo RANS, trabajan con la viscosidad turbulenta, por lo tanto se debe verificar los valores de la longitud de mezcla turbulenta (TLEN), para no tener valores erróneos de disipación de energía turbulenta.

Se puede limitar el valor de la disipación de energía turbulenta a un valor mínimo (ϵ_{Tmin}), la misma que correspondería un valor de escala de longitud turbulenta máxima (TLEN_{máx}) con el fin de contrarrestar posibles errores en los resultados de las variables fluido dinámicas.

El programa FLOW-3D puede calcular el valor de TLEN automáticamente. Este valor lo determina como el 7% del tamaño de celda más pequeño. Sin embargo no es aconsejable, lo más habitual y recomendable es adoptar el valor de TLEN como el 7% a 15% del diámetro hidráulico o del tirante de agua en un canal (y)³⁹, según se ajuste con la calibración del modelo numérico.

También en FLOW-3D se tiene el modelo Large Eddy Simulation (LES). Este modelo calcula directamente todas las estructuras del flujo turbulento que se pueda

³⁹ Flow Science, Inc. (2012). FLOW 3D 10.1.0 Documentation Release. Manual de Usuario, Flow-3D. Los Alamos National Laboratory. Santa Fe, New Mexico.

resolver por la malla computacional y solo aproxima las características que son demasiado pequeñas para ser resuelto. Utilizando LES cabe destacar que la simulación debe ser tridimensional y va a depender del tiempo.

En base a la anterior descripción se plantean las siguientes simulaciones numéricas descritas en el cuadro 5.3, con el objeto de analizar la influencia del modelo de turbulencia en el comportamiento del flujo rasante en una rápida escalonada.

CUADRO 5.3 PLAN DE SIMULACIONES NUMÉRICAS SEGÚN EL MODELO DE TURBULENCIA.

Simulación	Caudal modelo	Tamaño mallado	Modelo de Turbulencia	TLEN
-	l/s	m	m	m
S1	27.95	0.004	k- ϵ (RNG)	Automático
S4		0.004		0.0028
S5		0.004	K- ω	Automático
S6		0.004		0.0028
S7		0.001	LES	-

ELABORADO POR: Edwin Casa.

Las características del ordenador empleado son: una memoria RAM de 16GB, y un procesador Intel® Core™ i7 3.69 GHz. En la ejecución del plan de simulaciones empleando el modelo RANS, estas alcanzan la estabilidad numérica con un paso temporal de 2×10^{-4} s. Otros parámetros que ayudan a verificar el estado estable de la simulación son: la energía cinética turbulenta, la disipación turbulenta, la masa total y la energía del fluido.

En el cuadro 5.4 se muestran los tiempos de cada simulación hasta alcanzar la estabilidad y convergencia de la solución.

CUADRO 5.4 TIEMPO Y DURACIÓN EN TIEMPO REAL DE LA CORRIDA PREVIO EL ALCANCE DE LA ESTABILIDAD Y CONVERGENCIA.

Simulación	Caudal modelo	Tiempo Simulación	Duración de corrida	Observaciones
-	l/s	s	horas/días	-
S1	27.95	11.6	2:54 h	Estable
S4		15.0	6:09 h	Estable
S5		15.0	8:38 h	Estable
S6		8.14	15:22 h	Estable
S7		9.04	16 días 20h	Separación de flujo

ELABORADO POR: Edwin Casa.

5.4.1 RESULTADOS NUMÉRICOS SEGÚN LA INFLUENCIA DEL MODELO DE TURBULENCIA.

El gráfico 5.3 presenta la distribución de velocidades en el escalón No 70. Como resultados muestran que las tendencias de las curvas para las simulaciones “S1” (TLEN automático) y “S4” (TLEN=0.0028) correspondientes al modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ RNG tiene una tendencia similar, sin embargo la curva “S4” se encuentra ligeramente desplazada hacia abajo. La velocidad alcanza un valor uniforme en la profundidad de flujo autoaireado cerca de la superficie entre 0.05 m y 0.07 m.

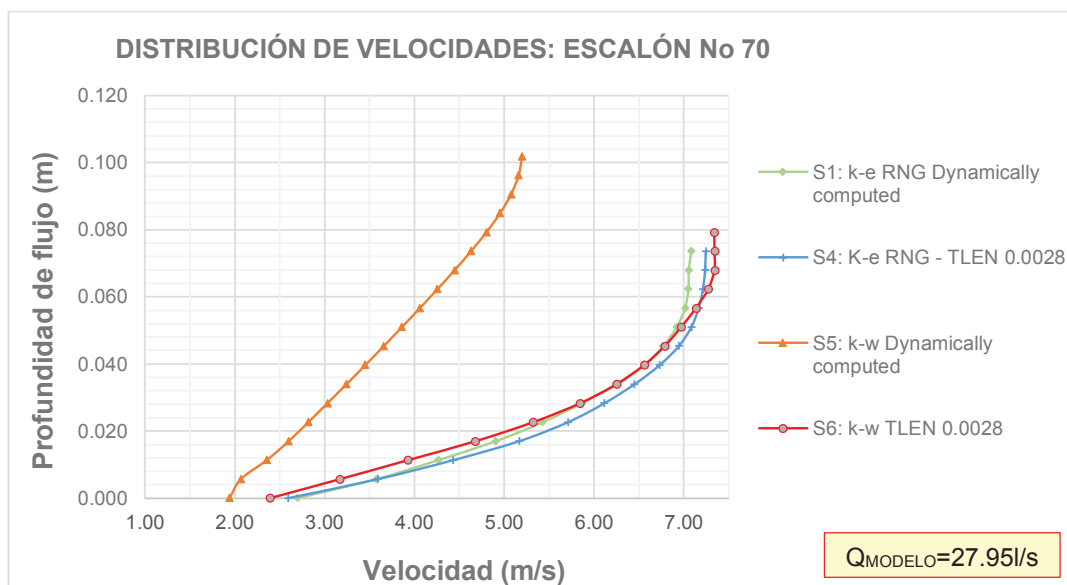
Los resultados de las tendencias de las curvas en los escenarios de simulación “S5” (TLEN automático) y “S6” (TLEN=0.0028), correspondientes al modelo de turbulencia $K-\omega$ muestran una gran diferencia entre sí.

La profundidad de flujo mixto en el escalón No 70 para la simulación “S5” presenta un valor aproximado de 0.10m, siendo este valor mayor a los obtenidos para las

simulaciones “S1”, “S4” y “S6”. En base al principio de conservación de masa como se tiene una mayor profundidad del flujo en comparación con los demás escenarios, entonces la velocidad disminuye hasta un valor de 5.2 m/s como se indica en el gráfico 5.3.

Las simulaciones “S1”, “S4” y “S6” presentan valores muy cercanos en cuanto a la profundidad del flujo autoaireado y la velocidad media como se reporta en la gráfica 5.3. La profundidad del flujo mixto se encuentra alrededor de 8.0 cm a 7.5 cm y la velocidad media oscila entre 7.0 m/s a 7.4 m/s.

GRÁFICO 5.3 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DEL FLUJO SEGÚN LA INFLUENCIA DEL MODELO DE TURBULENCIA.



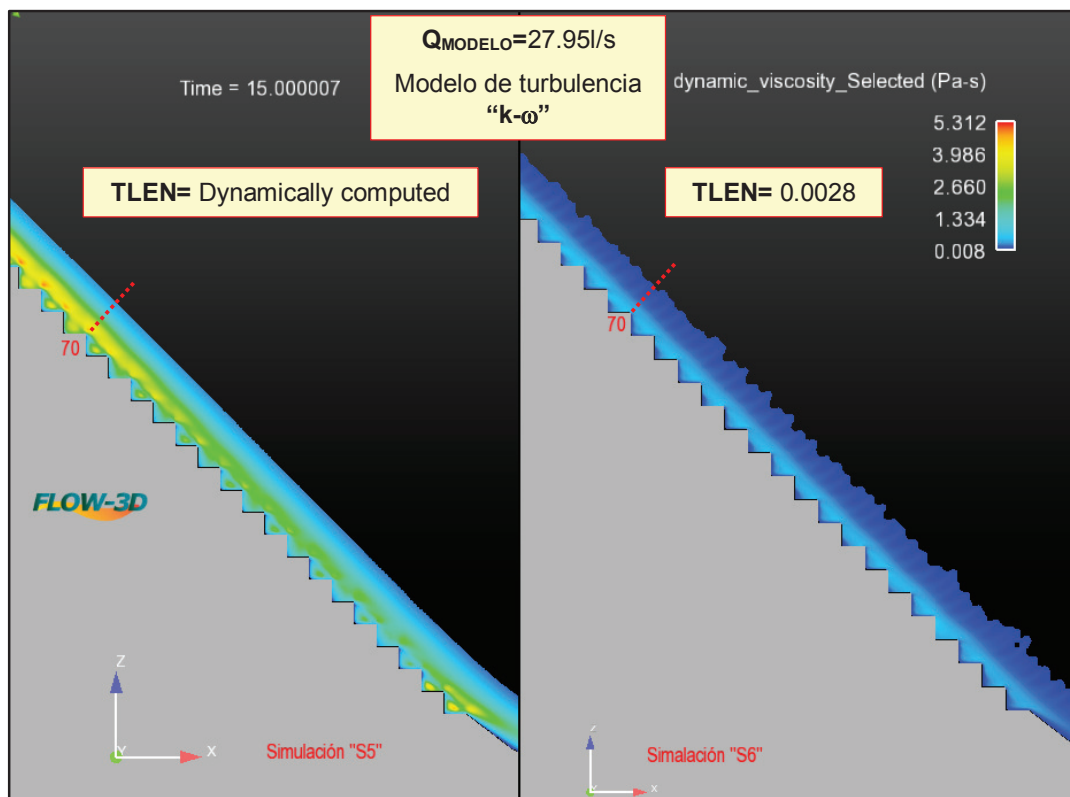
ELABORADO POR: Edwin Casa.

El escenario “S5”, presenta una diferente curva de distribución de velocidades. Para analizar este comportamiento se verifica si la viscosidad dinámica presenta valores cercanos a la realidad caso contrario se tendría resultados anómalos y se ratificaría las recomendaciones de la literatura técnica, en el cual se recomienda calibrar el

valor de la longitud máxima turbulenta (TLEN)⁴⁰ para la obtención de una mayor precisión al momento de analizar la introducción de aire y la mezcla agua-aire.

En la figura 5.4 se reporta los resultados de la viscosidad dinámica en el tramo final de la rápida (región uniforme). La simulación “S5” y la simulación “S6”, presentan valores máximos de la viscosidad dinámica en el orden de los 3.90 Pa.s y 1.33 Pa.s respectivamente. Estos valores máximos se localizan cerca del fondo virtual.

FIGURA 5.4 RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA VISCOSIDAD DINÁMICA.



FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

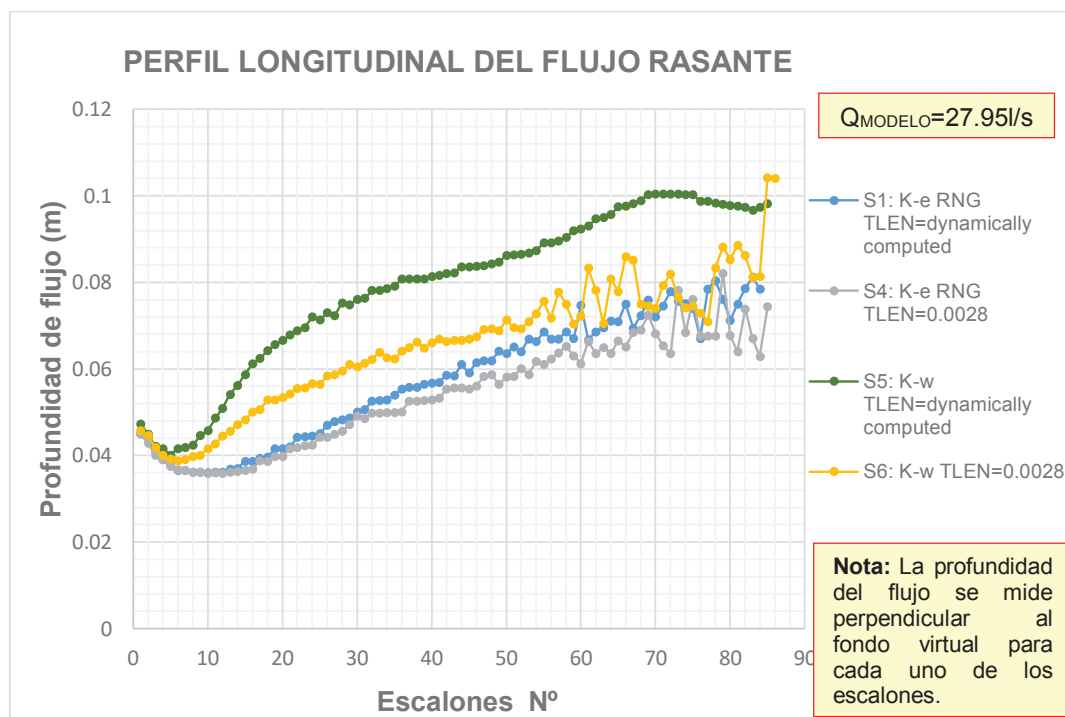
⁴⁰ ARAGUA. (2013). “Modelación numérica y experimental de flujos aire-agua en caídas en colectores.”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P. Av do Brasil 101 • 1700-066 Lisboa

Un valor alto de la viscosidad dinámica físicamente representa una mayor resistencia de las partículas del fluido al movimiento, por tal motivo se genera velocidades de flujo menores y sobrelevaciones del nivel de flujo en la estructura.

De esta manera se puede explicar la necesidad de calibrar el parámetro TLEN y ayuda a comprender el comportamiento de la forma particular de la curva “S5” acerca de la distribución de velocidades presentada en el gráfico 5.3.

El gráfico 5.4, muestra las profundidades del flujo en la rápida escalonada según el modelo de turbulencia empleado. Se reporta para las simulaciones “S1” TLEN=dinámicamente computado y “S4” TLEN=0.0028, en el cual se combina el modelo de turbulencia K- ϵ RNG con el sub-modelo de aireación y el sub-modelo drift flux que la influencia del valor de TLEN no influye en la zona no aireada del flujo rasante, reportando profundidades de agua similares hasta el escalón No 14.

GRÁFICO 5.4 INFLUENCIA DEL MODELO DE LA TURBULENCIA EN LA PROFUNDIDAD DEL FLUJO RASANTE.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

Posteriormente la turbulencia en el flujo se intensifica hasta alcanzar un flujo completamente autoaireado y fluctuante como se visualiza en las curvas “S1” y “S4”.

Aguas abajo del punto de inicio de la autoaereación se observa inestabilidad de la superficie libre de agua debido a la gran turbulencia formada y al alto porcentaje de concentración de aire en el flujo, teniendo así un flujo de mezcla agua-aire.

Comparando los resultados de las simulaciones “S5” TLEN automático y “S6” TLEN=0.0028 que son la combinación del modelo de turbulencia $k-\omega$ con el sub-modelo de aireación y drift flux se nota excesivos valores de la profundidades de flujo rasante para la simulación “S5”.

Se evidencia nuevamente en el escenario de simulación “S5”, el efecto de modelar con un valor de TLEN automático, sin realizar la debida calibración correspondiente, dando como resultados parámetros hidráulicos que no son cercanos a la realidad.

5.4.1 ESCENARIO S7, MODELO LES.

La simulación numérica de la rápida escalonada empleando el modelo de turbulencia LES (Large eddy simulation) resulta complicada por los siguientes aspectos:

- La correcta aplicación del modelo LES requiere la simulación numérica en tres dimensiones, pues la viscosidad varía en las tres direcciones.
- El tamaño de malla para representar la macroturbulencia debe ser muy fino y sumado la tridimensionalidad, la solución requerirá más tiempo para alcanzar la estabilidad y convergencia. Como consecuencia también se necesita una gran capacidad de almacenamiento en el ordenador.

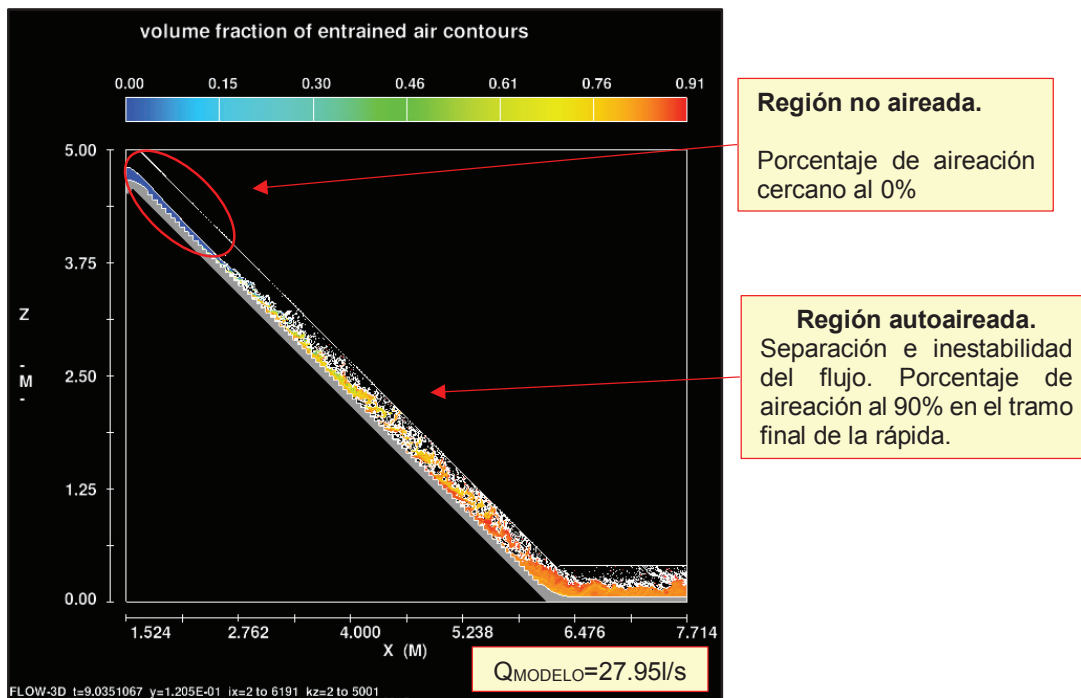
Para el caso de aplicación de la rápida escalonada el Batán se realizó una simulación activando el modelo de turbulencia LES. Debido a las limitaciones de

equipo se procedió a simular en dos dimensiones (2D) para en lo posible analizar los resultados obtenidos. El tamaño de celda para la región de interés es de 1mm, obteniendo un total de 30 950 000 celdas. El valor promedio del paso temporal es de 2.5×10^{-5} s.

El tiempo de simulación en el cual se resuelve el sistema de ecuaciones discretizadas es 9.04s, el mismo que demora en tiempo real en procesar con el ordenador disponible 16 días 20 horas. Las características del ordenador se describieron en el numeral 5.3.

Se efectuó la simulación con el caudal de prototipo de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ equivalente a 27.95 l/s en el modelo físico y/o numérico. Este caudal ingresa al sistema por la cara del bloque de malla $X_{\text{mín}}$ y sale por la cara $X_{\text{máx}}$ cuya condición de borde se establece como Outflow. Además se activa el algoritmo VOF (one fluid) para resolver la superficie libre del flujo y adicionalmente se activa el modelo de aireación (air entrainment) y el modelo drift flux.

FIGURA 5.5 PERFIL DEL FLUJO RASANTE Y PORCENTAJE DE CONCENTRACIÓN DE AIRE A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.

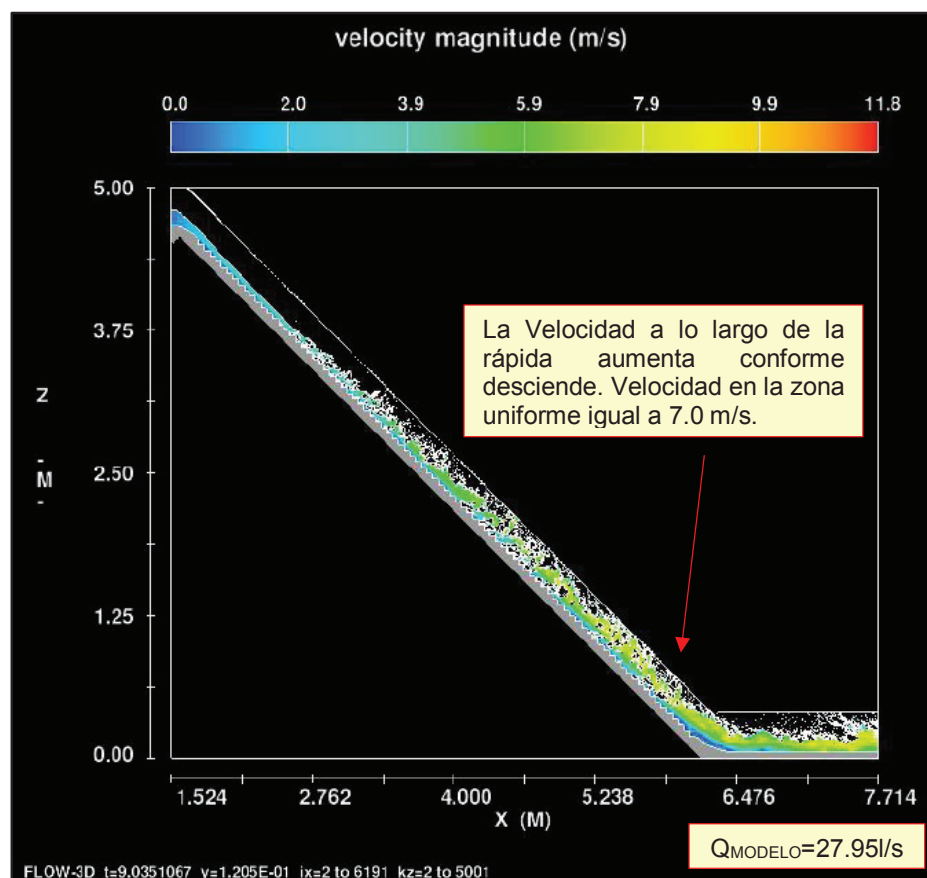


FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

En La figura 5.5 se presenta el perfil del flujo sobre la rápida escalonada, la simbología de colores indica el porcentaje de aireación el flujo. Como resultados de la simulación se visualiza que no existe separación de flujo en la zona donde no se inicia la introducción de aire es decir en el tramo inicial de la rápida.

Hacia aguas abajo se presenta discontinuidad del flujo es decir hay separación de flujo y mucha inestabilidad del mismo.

FIGURA 5.6 PERFIL DEL FLUJO RASANTE Y VELOCIDADES DEL FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.



FUENTE: Paquete computacional FLOW-3D.

En La figura 5.6 se indica el perfil del flujo sobre la rápida escalonada, la simbología de colores indica la variación de la velocidad a lo largo de la rápida escalonada. La

solución del flujo en la zona completamente autoaireada no se efectúa correctamente, se evidencia salpicaduras, separación e inestabilidad de flujo

La distribución de la velocidad al pie de la rápida, en la región uniforme varía desde 4.0 m/s hasta los 7.0 m/s en la profundidad medida perpendicular al fondo virtual.

5.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Analizado y verificado la influencia del tamaño de malla (2mm, 3mm, 4mm, 5mm), la influencia del modelo de turbulencia (modelo “k- ϵ RNG”, “k- ω ”, “LES”) y la variación de algunos parámetros iniciales, físicos y numéricos en el programa FLOW 3D, se tienen las siguientes conclusiones para modelar numéricamente la rápida con fondo escalonada del Batán, cumpliendo con la debida calibración realizada del modelo físico construido en el laboratorio del CIERHI de la Escuela Politécnica Nacional.

- Del análisis de la influencia del tamaño de mallado se determina que la discretización del dominio de la rápida escalonada para la simulación numérica es apropiada hacerse en un solo bloque de malla con tamaño de celda uniforme de 5mm. El mallado seleccionado se ajusta adecuadamente a los contornos o esquinas del escalón ya que es submúltiplo de la altura y longitud de los escalones que miden 0.05m en escala modelo. De esta manera se ha conseguido una geometría idéntica para todos los escalones y evitar resultados erróneos debido a la representación de escalones con diferente geometría.



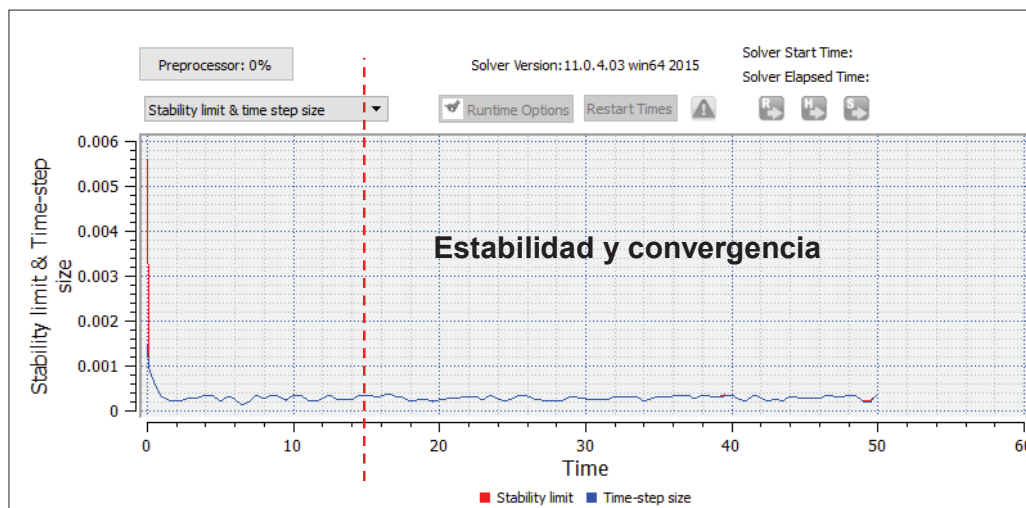
- La activación del modelo de aireación permitió representar de una manera favorable la introducción de aire o autoaereación en el flujo sobre la rápida escalonada dando valores de porcentaje de aireación en la zona uniforme del flujo rasante alrededor del 90% para todos los escenarios de simulación. Se obtuvo buenos resultados considerando los siguientes parámetros que indica el programa FLOW-3D. El coeficiente de arrastre de aire establecido por el programa de 0.50, el coeficiente de la tensión superficial igual a cero y la densidad del medio disperso es decir del aire igual a 1.20 Kg/m^3 . Para la evaluación de la densidad se considera una aproximación numérica de segundo orden, lo cual permite una mayor precisión en la representación del fenómeno.
- La activación del modelo de esponjamiento en la frontera del agua con el aire (Drift flux) representa un aumento del volumen del flujo dando valores de profundidad del flujo aireado al 90% muy cercanos a los registrados en el modelo físico, esto se consiguió adoptando un valor de tamaño del medio disperso para cada descarga y además se obtuvo buenos resultados combinando los siguientes parámetros que posee el programa FLOW-3D como: Viscosidad dinámica del agua igual a 0.001 kg/(m.s) , viscosidad dinámica del flujo mixto igual a 0.001 kg/(m.s) , viscosidad dinámica del aire igual a $1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/(m.s)}$, coeficiente de arrastre dado por "default" por el

programa igual 0.50. El radio promedio de la partícula del componente disperso (burbuja de aire) se ha establecido desde un valor de 0.025mm hasta 1.0 mm, según la descarga para cada escenario, esta variación ayudó a obtener resultados de profundidades de agua con porcentajes de aireación del 90% semejante a los registrados en el modelo experimental.

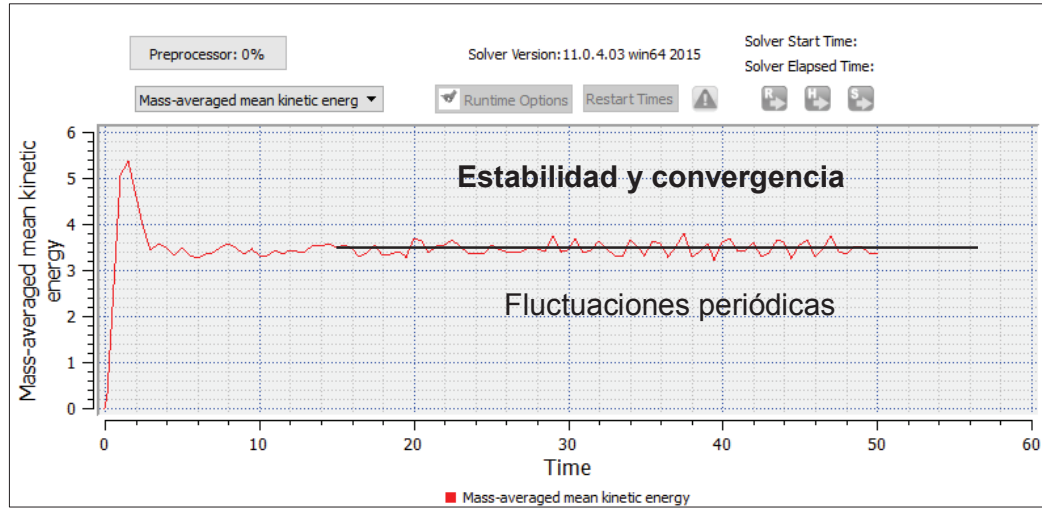
- Del análisis de la influencia del modelo de turbulencia, en cuanto a los modelos de turbulencia RANS analizados, el que presenta mejores resultados según la variación del parámetro TLEN es el modelo k- ϵ renormalizado (RNG). La comparación de las simulaciones con el valor de TLEN automático vs las simulaciones con el valor de TLEN igual a 0.028 (7% de la profundidad del flujo) dan como resultados pequeñas diferencias en los reportes numéricos acerca de los parámetros hidráulicos del flujo rasante entregados por el programa FLOW-3D.
- El modelo LES debido a la tridimensionalidad en el que se ejecuta la simulación y al no disponer de un potente ordenador, se descarta como una opción para simular la turbulencia en el flujo rasante sobre la rápida escalonada. Además para fines prácticos de la ingeniería hidráulica resulta conveniente emplear modelos de turbulencia RANS.
- La resolución o el seguimiento de la superficie libre del flujo en FLOW-3D se realizó aplicando el método VOF (one fluid, free surface) y el método TRUVOF (Unsplit, Split lagrangian method), para comparar resultados. La activación del algoritmo TRUVOF para el caso de la simulación numérica de la rápida escalonada dio como resultados un mayor aumento del volumen del flujo autoaireado sobre la rápida escalonada, lo que no reflejaba la realidad del modelo físico. La activación del algoritmo VOF permitió obtener resultados de profundidad de flujo en la zona uniforme más cercanos a los registrados experimentalmente. Si bien es cierto el algoritmo TRUVOF representa flujos más complejos como formación de resaltos hidráulicos y ondas en la superficie libre, en el presente caso particular, la simulación

numérica sobre la rápida escalonada ha alcanzado resultados más realistas usando el algoritmo VOF.

- La estabilidad y convergencia de la simulación numérica del flujo sobre la rápida escalonada en dos dimensiones (2D), se alcanza cuando la variación de los pasos temporales llegan a ser aproximadamente mínimos o llegan a un valor constante. En el caso de aplicación se ha observado que desde el tiempo simulado de 15 segundos el modelo alcanza el equilibrio como se puede observar en la siguiente figura.



- La variación del parámetro de la energía cinética turbulenta llega a tener frecuencias periódicas esto debido a que el flujo rasante resulta ser intermitente y desciende en forma de series por la rápida escalonada. Este comportamiento hidráulico es constante y se puede considerar un equilibrio de la energía cinética turbulenta al tener fluctuaciones pequeñas.



Dadas estas consideraciones se concluye que el tiempo de simulación hasta el cual el modelo alcanza la estabilidad y convergencia numérica es de 15 segundos en adelante.

CAPÍTULO 6.

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA MODELACIÓN NUMÉRICA PARA EL CASO DE APLICACIÓN DE LA RÁPIDA EL BATÁN.

Definidos los parámetros numéricos para la simulación del flujo rasante en la rápida escalonada usando el paquete FLOW-3D y calibrados conforme el modelo experimental de la rápida escalonada de la quebrada el Batán, en el presente capítulo se ejecuta un plan de simulaciones con el objetivo de analizar y evaluar los resultados numéricos de las variables hidrodinámicas más relevantes del flujo rasante sobre la rápida escalonada como:

- Distribución de presiones en el escalón.
- Distribución de velocidades en el escalón.
- Variación de la velocidad del flujo en toda la longitud de la rápida escalonada.
- Ubicación de la región del flujo uniforme.
- Profundidades de flujo a lo largo de la rápida escalonada.
- Concentración de aire y cálculo del factor de fricción de Darcy- Weisbach.
- Disipación de energía al pie de la rápida.

Y finalmente se compara los resultados obtenidos numéricamente con los resultados cuantitativos y cualitativos registrados en el modelo experimental de la rápida escalonada. Como resultados de este análisis se obtendrá la comparación de:

- El flujo de aproximación hacia la rápida escalonada.

- Ubicación del punto de inicio de la autoaireación en el flujo rasante.
- Porcentaje de autoaireación en el flujo sobre la rápida.

Las simulaciones numéricas se plantean para un rango de caudales de operación en una cámara, donde la rápida escalonada tiene un ancho efectivo de 5m en prototipo y 0.25 m en escala modelo. Los caudales van desde 25 m³/s hasta el caudal de diseño correspondiente a 75 m³/s.

A continuación en el cuadro 6.1 se muestra el plan de simulaciones numéricas aplicando el programa computacional FLOW-3D.

CUADRO 6.1 PLAN DE SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA EL ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

Simulación	Caudal prototipo	Caudal modelo	Observaciones
	Qp	Qm	
-	m ³ /s	l/s	-
S8	25	13.97	Flujo rasante
S9	40	22.36	Flujo rasante
S10	50	27.95	Flujo rasante
S11	75	41.92	Flujo rasante

ELABORADO POR: Edwin Casa.

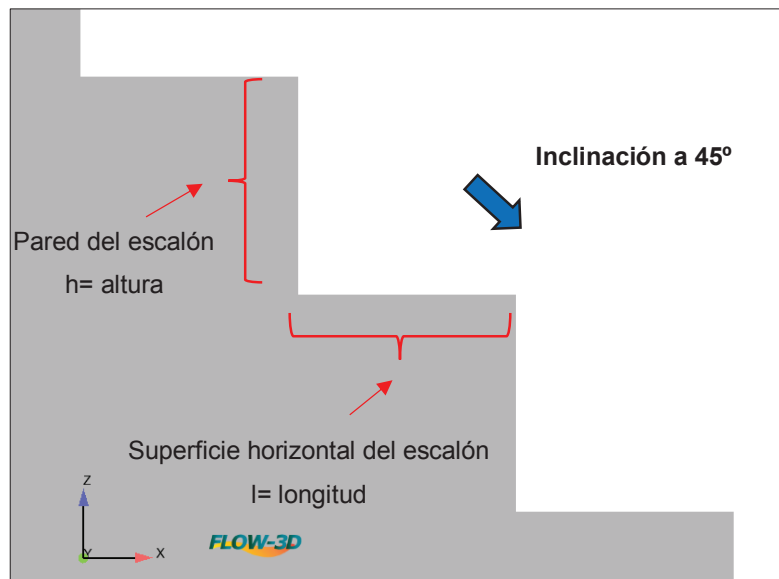
6.1 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO RASANTE CON GEOMETRÍA DEL DISEÑO ORIGINAL.

6.1.1 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL ESCALÓN.

El análisis de la distribución de presiones en los escalones permite conocer de alguna manera el posible riesgo de cavitación en la rápida escalonada. Es importante este estudio con el objeto de garantizar la estabilidad de la estructura hidráulica.

La rápida tiene una inclinación a 45° y la dimensión de altura y longitud del escalón es de 0.05 m respectivamente. A continuación en la figura 6.1 se observa la configuración de los escalones en la rápida escalonada.

FIGURA 6.1 GEOMETRÍA DE LOS ESCALONES.



FUENTE: Programa computacional FLOW-3D.

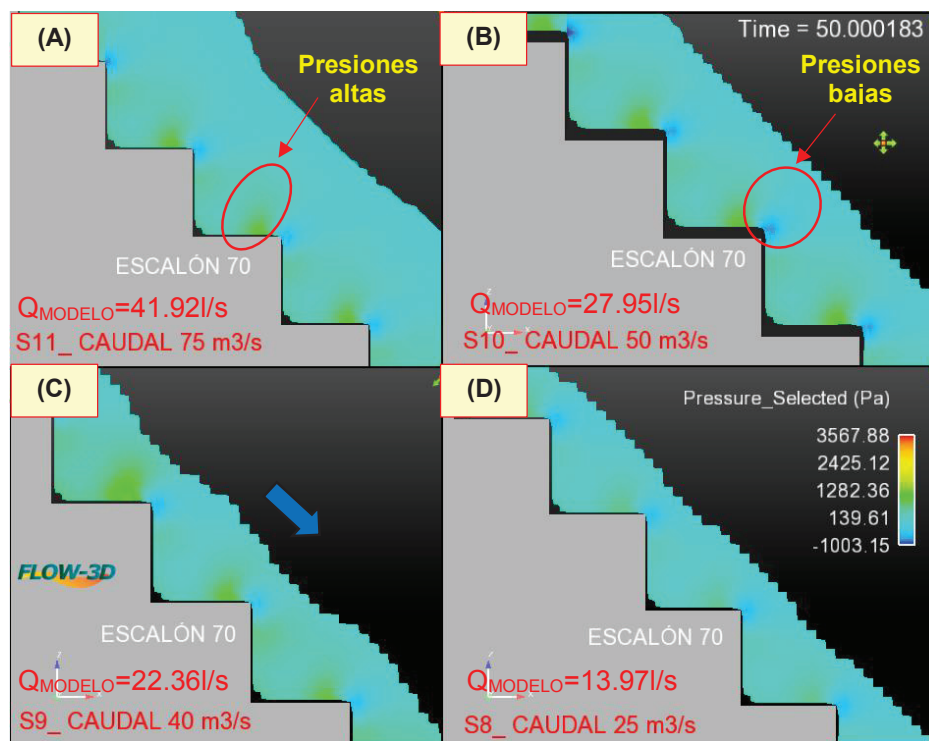
ELABORADO POR: Edwin Casa.

En la figura 6.2 se muestra la distribución de presiones en el escalón No 70 ubicado en la región del flujo uniforme. Esta figura indica las zonas donde se presentan valores mínimos y máximos de presión.

Las presiones mínimas o bajas se ubican en la parte superior de la pared vertical del escalón, es decir en las esquinas por donde pasa una línea imaginaria que forma el fondo virtual.

El reporte de resultados de la figura 6.2 indica claramente una distribución de presiones semejante para cada escalón en la región uniforme del flujo rasante.

FIGURA 6.2 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL ESCALÓN No 70.



FUENTE: Programa computacional FLOW-3D

ELABORADO POR: Edwin Casa.

La pendiente fuerte de la rápida escalona (1:1) y las características no viscosas del fluido producen separación de flujo principalmente en la esquina de cada escalón como se visualiza en la figura anterior. De esta manera genera valores bajos de

presión pero que no son lo suficientes como para dañar la estructura por el efecto de cavitación.

El proceso de recirculación de flujo en cada escalón y el flujo sobre el pseudo fondo inducen la introducción y transporte de aire. Este flujo autoaireado turbulento de alta velocidad produce disminución de la presión en las zonas de color celeste como se puede visualizar en la figura 6.2.

Los valores máximos de presión se localiza en la superficie horizontal del escalón, esto producto del fuerte impacto del flujo en dicha superficie específicamente de la capa inferior del flujo rasante.

6.1.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN EL ESCALÓN.

La magnitud del vector velocidad crece desde el fondo virtual hacia la superficie libre. La distribución de la velocidad en la zona del flujo rasante presenta una tendencia potencial, siguiendo la forma de la ecuación No 6.1⁴¹.

$$\frac{u}{u_{90}} = \left(\frac{y}{y_{90}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6.1)$$

Dónde:

u_{90} = Velocidad máxima del flujo libre.

y_{90} = Profundidad de flujo aireado al 90%, medida perpendicular al pseudo fondo.

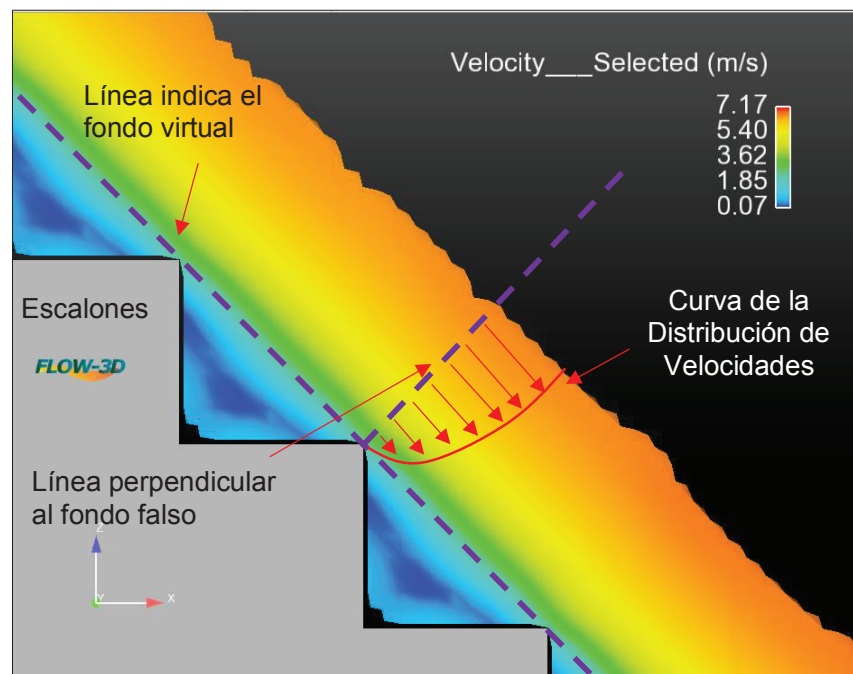
u, y = Coordenadas de la velocidad y profundidad del flujo. Inicio desde el pseudo fondo.

n = Valor del exponente, según investigaciones experimentales y varía de (3.5 a 6).

⁴¹ Khatsuria, R.M., (2005), Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. Department of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta.

La figura 6.3 muestra en simbología de colores la variación de velocidad en la dirección perpendicular al fondo virtual. Se visualiza en forma esquemática de la curva exponencial típica de la distribución de velocidades en línea continua de color rojo.

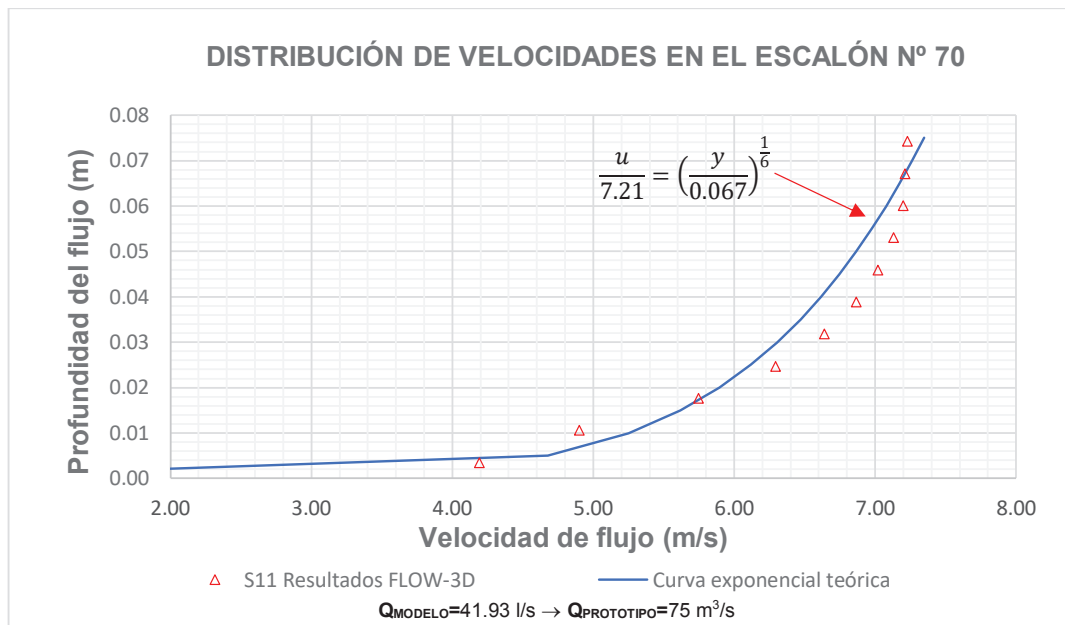
FIGURA 6.3 ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES.



FUENTE: Programa computacional FLOW-3D

ELABORADO POR: Edwin Casa.

En el gráfico 6.1 se compara la distribución de velocidades del flujo obtenido de la simulación numérica "S11" que corresponde al caudal de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ equivalente a 41.93 l/s en modelo, con la curva que resulta de la ecuación No 6.1. La curva que más se ajusta a los valores numéricos obtenidos del programa FLOW-3D, tiende a seguir una distribución a la sexta potencia es decir con exponente 6 como se puede ver a continuación en el siguiente gráfico.

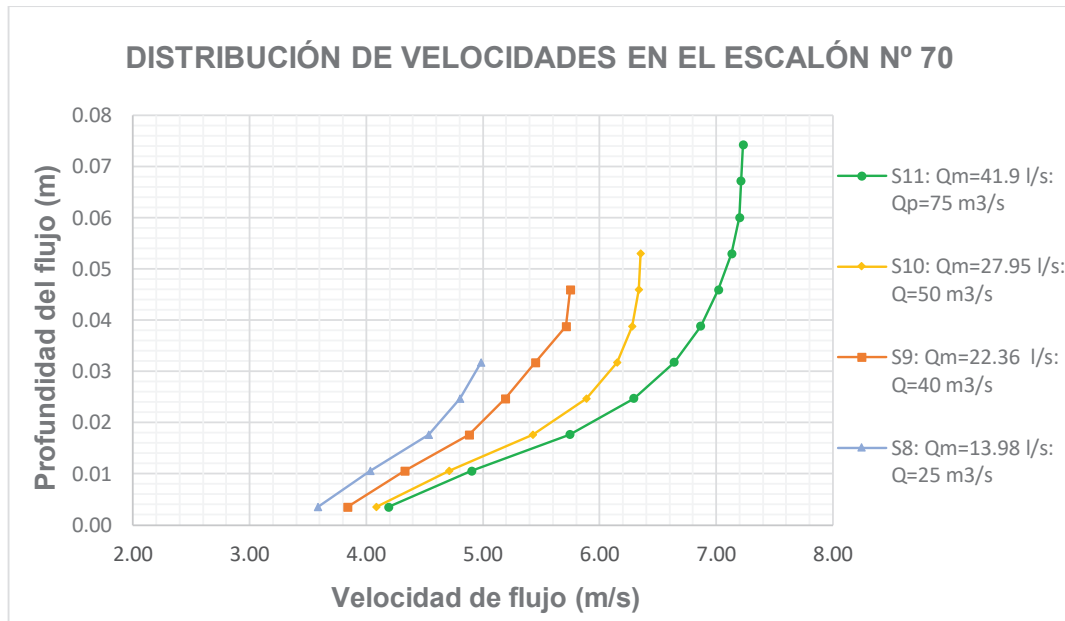
GRÁFICO 6.1 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES. TEÓRICO Y NUMÉRICO

ELABORADO POR: Edwin Casa.

Para el resto escenarios del plan de pruebas planteado y ejecutado también se verifica que las curvas correspondientes a la distribución de velocidad en el escalón No 70, presentan la tendencia potencial como se indica en el gráfico 6.2.

En función de la magnitud de la descarga por la rápida escalonada se observa que la velocidad del flujo en la región uniforme oscila entre 4.9 m/s a 7.4 m/s. Mientras que la profundidad del flujo rasante esta del orden de los 3 cm a 7.5 cm.

GRÁFICO 6.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES. PLAN DE SIMULACIONES NUMÉRICAS.



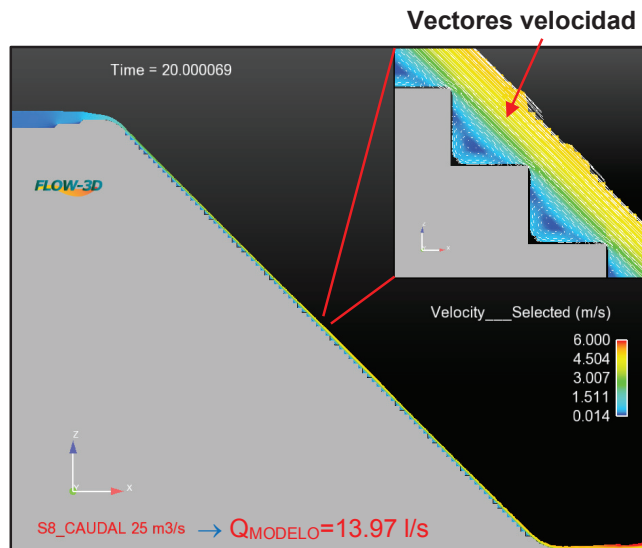
ELABORADO POR: Edwin Casa.

6.1.3 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA. LOCALIZACIÓN DE LA REGIÓN UNIFORME.

Por el efecto de la gravedad, la velocidad del flujo aumenta conforme desciende por la rápida escalonada hasta una cierta región donde la velocidad tiende a un valor constante. Esta zona se la conoce como la región de flujo uniforme. El aire transportado reduce la fricción del flujo en las paredes a lo largo de la rápida.

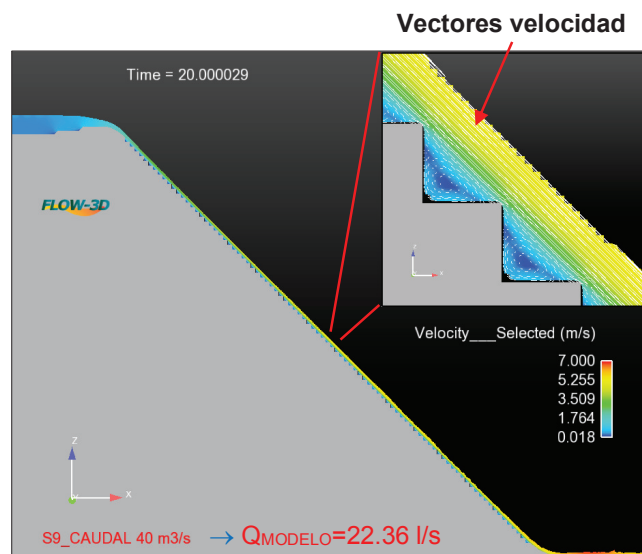
Las Figuras 6.4: 6.5; 6.6 y 6.7, muestran las velocidades reportadas de la simulación numérica del flujo a lo largo de la rápida escalonado para los caudales en escala modelo de: 13.97 l/s, 22.26 l/s, 27.95 l/s y 41.92 l/s correspondientes a caudales en prototipo de 25 m³/s, 40 m³/s, 50 m³/s y 75 m³/s, respectivamente.

FIGURA 6.4 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO EN LA RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{\text{MODELO}} = 13.97 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}} = 25 \text{ m}^3/\text{s}$.



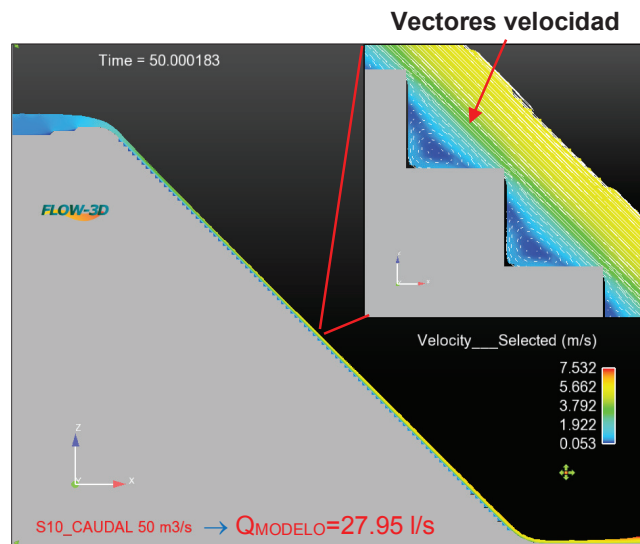
FUENTE: Programa computacional FLOW-3D

FIGURA 6.5 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO EN LA RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{\text{MODELO}} = 22.36 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$.



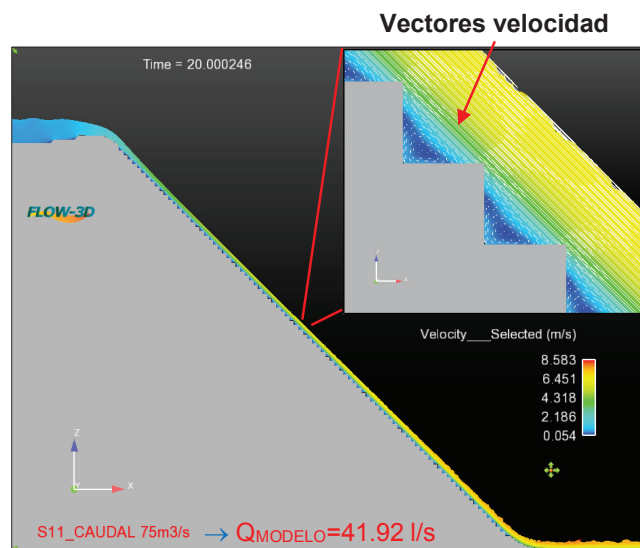
FUENTE: Programa computacional FLOW-3D

FIGURA 6.6 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO EN LA RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{\text{MODELO}} = 27.95 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$.



FUENTE: Programa computacional FLOW-3D

FIGURA 6.7 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO EN RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{\text{MODELO}} = 41.92 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}} = 75 \text{ m}^3/\text{s}$.



FUENTE: Programa computacional FLOW-3D

A partir de la figuras anteriores (Figuras 6.4: 6.5; 6.6 y 6.7), podemos ubicar aproximadamente la región de flujo uniforme. La distancia a lo largo de la rápida

escalonada desde la cresta del mismo hasta la localización de la sección donde se presentan velocidades de flujo cuasi-uniformes lo nombraremos distancia (L_r).

Definida la longitud (L_r) para las diversas descargas establecidas en el plan de pruebas y considerando el parámetro adimensional (dc/h) que relaciona la profundidad crítica (dc) de la sección de la rápida respecto a la altura del escalón (h), en el Gráfico 6.3 se indica la tendencia de la curva obtenida.

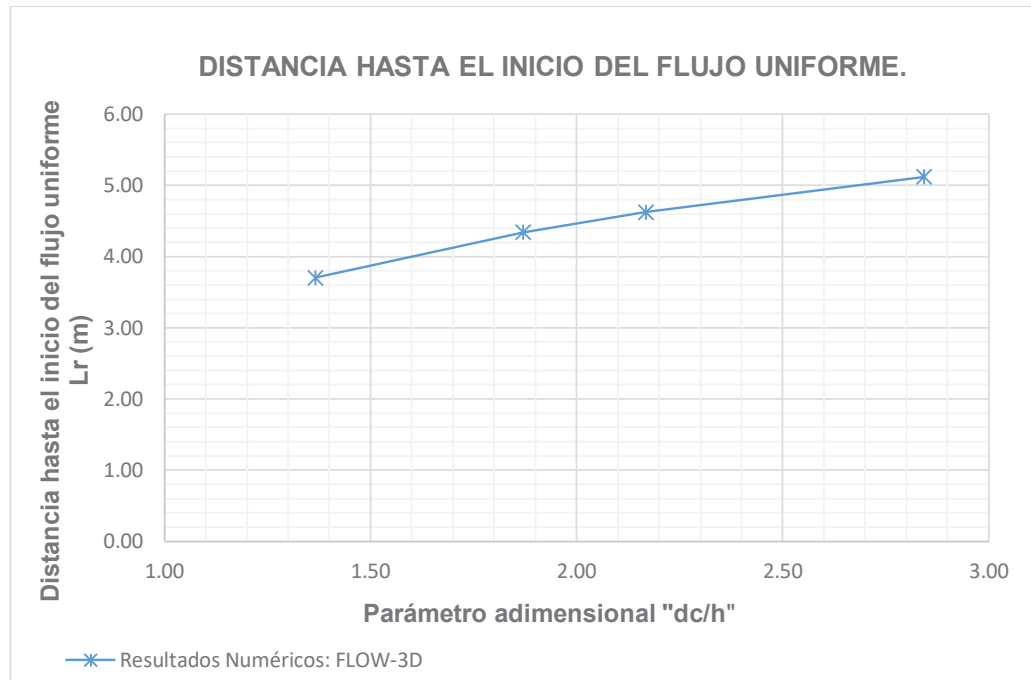
Los valores del gráfico 6.3 se reportan el Cuadro 6.2. Las dos últimas columnas del cuadro indican los valores de las velocidades máximas y medias del flujo para cada caudal a escala modelo. Para los escenarios analizados, el rango de la velocidad máxima del flujo rasante oscila entre 5.3 m/s a 7.8 m/s y la velocidad media varía entre 4.5 m/s a 6.4 m/s. Las velocidades del flujo en la estructura hidráulica para caudales altos cercanos al de diseño son altas y pueden de alguna manera desgastar el material componente de la rápida.

CUADRO 6.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL FLUJO RASANTE.

-	Caudal modelo	Altura escalón	Profundidad crítica	Parámetro adimensional	Distancia hasta la formación de la zona uniforme	Velocidad	
						Máxima	Media
Nº	Q_m	h	dc	dc/h	L_r	$V_{m\acute{a}x}$	V_m
-	l/s	m	m	-	m	m/s	m/s
S8	13.97	0.05	0.0683	1.37	3.70	5.32	4.54
S9	22.36	0.05	0.0935	1.87	4.34	5.98	5.30
S10	27.95	0.05	0.1084	2.17	4.62	6.22	5.50
S11	41.92	0.05	0.1421	2.84	5.12	7.78	6.40

ELABORADO POR: Edwin Casa.

GRÁFICO 6.3 PARÁMETRO ADIMENSIONAL " d_c/h " vs DISTANCIA HASTA EL INICIO DE LA REGIÓN UNIFORME " L_r ".



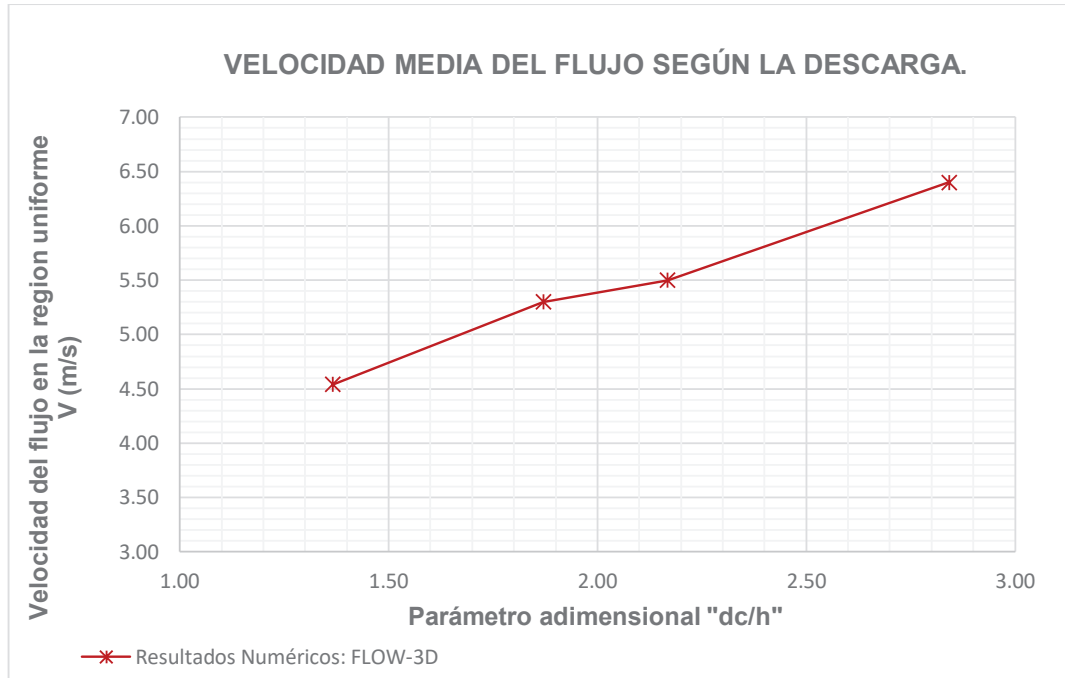
ELABORADO POR: Edwin Casa.

Del Gráfico 6.3 se puede concluir que a medida que la profundidad crítica del flujo aumenta, la posición de la región del flujo uniforme se desplaza hacia aguas abajo de la rápida escalonada.

Desde el inicio de la cresta de la rápida hasta el final de los escalones, la rápida tiene una longitud desarrollada de 6.42 m. Para el caudal inferior correspondiente a 13.97 l/s, la localización de la región uniforme se presenta en el 58% de la longitud de la rápida. Mientras para el caudal de diseño correspondiente a 41.92 l/s, la localización de la región uniforme se desarrolla en el último cuarto de la rápida escalonada (80 % de la longitud desarrollada).

El Gráfico 6.4 muestra la relación entre el parámetro adimensional (d_c/h) vs la velocidad media del flujo en la región uniforme. La tendencia indica que a medida que se incrementa la profundidad crítica del flujo, la velocidad de flujo también aumenta.

GRÁFICO 6.4 PARÁMETRO ADIMENSIONAL (dc/h) VS VELOCIDAD MEDIA DEL FLUJO.



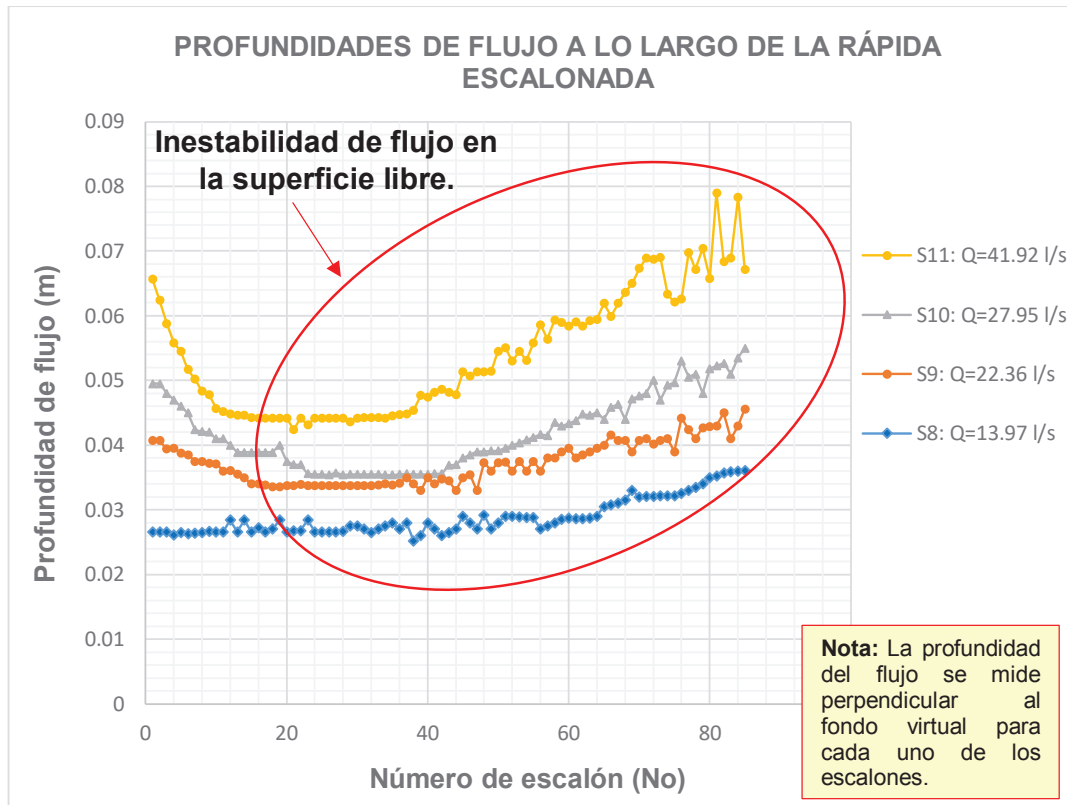
ELABORADO POR: Edwin Casa.

6.1.4 PROFUNDIDADES DEL FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.

Los resultados obtenidos de la simulación numérica acerca de la profundidad de agua en toda la longitud de la rápida y en particular en la región del flujo uniforme (flujo aireado al 90%) es semejante a los valores medidos y registrados en el modelo físico de la rápida escalonada.

El Gráfico 6.5 reporta los resultados numéricos de la profundidad del flujo en cada escalón para el rango de caudales analizados. Existe inestabilidad en la superficie libre aguas abajo del inicio de la autoaireación para todo el rango de caudales como se muestra a continuación.

GRÁFICO 6.5 PROFUNDIDADES DE FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

6.1.5 CONCENTRACIÓN DE AIRE Y DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH, EN LA REGIÓN UNIFORME DEL FLUJO RASANTE.

La región uniforme del flujo rasante considera una concentración de aire del 90 %. Con fines de calcular el factor de fricción (f_e) entre el fondo virtual y el flujo que pasa por encima del pseudo fondo, se determina previamente la profundidad de agua

clara en la región uniforme y la concentración media de aire, en base a las siguientes expresiones⁴²:

$$d = \int_0^{y_{90}} (1 - C) * dy \quad (6.2)$$

$$d_e = (1 - C_{\text{mean}}) * y_{90} \quad (6.3)$$

$$C_{\text{mean}} = 0.80 * \text{sen } \theta \quad (6.4)$$

$$f_e = \frac{8 * g * \text{sen } \theta * d_e^3}{q_w^2} \quad (6.5)$$

Donde:

- d_e = Profundidad de agua clara en la región uniforme.
 C_{mean} = Concentración media de aire en régimen de equilibrio.
 y_{90} = Profundidad de agua con el 90% de concentración de aire.
 f_e = Factor de fricción de Darcy-Weisbach.
 q_w = Caudal unitario.

En el cuadro 6.3 se reportan los cálculos de la concentración media de aire y el factor de fricción en base a los resultados numéricos obtenidos.

CUADRO 6.3 CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE Y EL FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH.

Caudal modelo	Ancho rápida	Caudal unitario	Ángulo	Concentración media de aire	Profundidad aireado al 90%	Profundidad de agua clara	Factor de fricción
Qm	b	q	θ	C_{mean}	y_{90}	d_e	f_e
l/s	m	(m ³ /s)/m	°	-	m	m	-
13.97	0.25	0.056	45	0.57	0.032	0.018	0.105
22.36	0.25	0.089	45	0.57	0.046	0.026	0.122
27.95	0.25	0.112	45	0.57	0.053	0.030	0.120
41.92	0.25	0.168	45	0.57	0.074	0.042	0.148

ELABORADO POR: Edwin Casa.

⁴² CHANSON, H. (1993). "Stepped Spillway Flows and Air Entrainment." Can. JI of Civil Eng., Vol. 20, No. 3, June, pp. 422-435 (ISSN 0315-1468).

El valor de la concentración media de aire depende principalmente del ángulo de inclinación de la rápida escalonada. Para el caso de aplicación, la rápida escalonada presenta una inclinación a 45° con un valor de $C_{\text{mean}} = 0.57$.

El factor de fricción en el flujo rasante no está únicamente en función del caudal y la geometría de los escalones (Chanson 2006). Los resultados obtenidos para el rango de caudales analizados es coherente con los valores reportados en la literatura técnica en el cual el valor de f_e es equivalente a 0.11, 0.17 y 0.30, resultados determinados experimentalmente bajo las siguientes condiciones: $\theta > 10^\circ$, $h > 0.02$ m y $Re > 1 \times 10^5$.

El cuadro 6.4 presenta los valores de la rugosidad absoluta de la rápida escalonada, debido a la disposición de los escalones y del diámetro hidráulico (D_H). Como se analiza una sección prismática este último parámetro es igual a 4 radios hidráulicos (R_H).

CUADRO 6.4 RUGOSIDAD ABSOLUTA DE LA RAPIDA ESCALONADA Y LA RELACIÓN ADIMENSIONAL k/D_H .

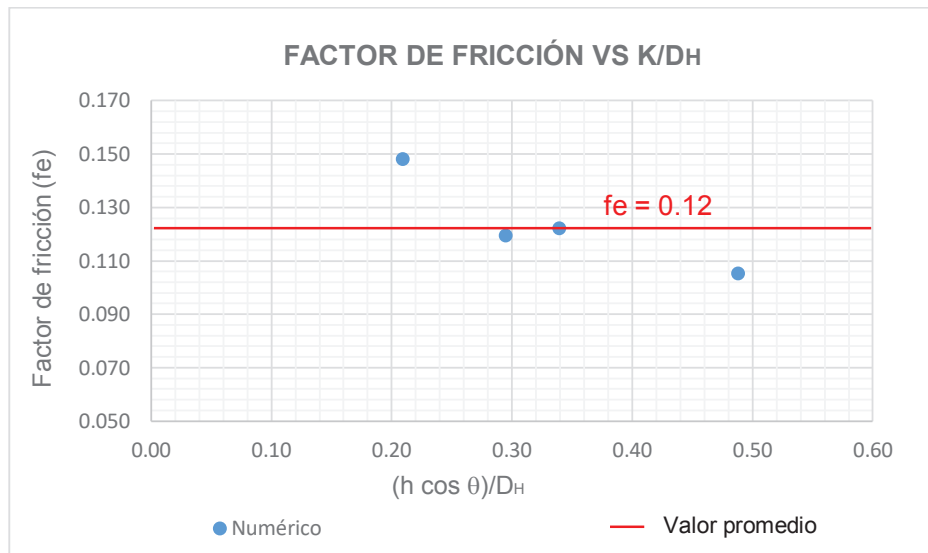
ÁNGULO	ALTURA DEL ESCALÓN	DIÁMETRO HIDRÁULICO	RUGOSIDAD ESCALONES	RELACIÓN k/D_H
θ	h	D_H	k	$(h \cdot \cos\theta)/D_H$
$^\circ$	m	m	m	-
45	0.05	0.072	0.0354	0.49
45	0.05	0.104	0.0354	0.34
45	0.05	0.120	0.0354	0.29
45	0.05	0.169	0.0354	0.21

ELABORADO POR: Edwin Casa.

En el gráfico 6.6 se observa en el eje de la abscisa los valores del parámetro adimensional " k/D_H ", donde relaciona la rugosidad absoluta en el fondo de la rápida escalonada con el diámetro hidráulico. Y en el eje de las ordenadas se tiene el valor del factor de fricción en la región uniforme del flujo rasante. Según la distribución

de los puntos obtenidos para varios caudales se tiene un valor promedio del factor de fricción igual a 0.12 como se muestra a continuación en la figura.

GRÁFICO 6.6 PARAMETRO ADIMENSIONAL “ k/D_H ” - FACTOR DE FRICCIÓN



ELABORADO POR: Edwin Casa.

6.1.5 DISIPACIÓN DE ENERGÍA AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA.

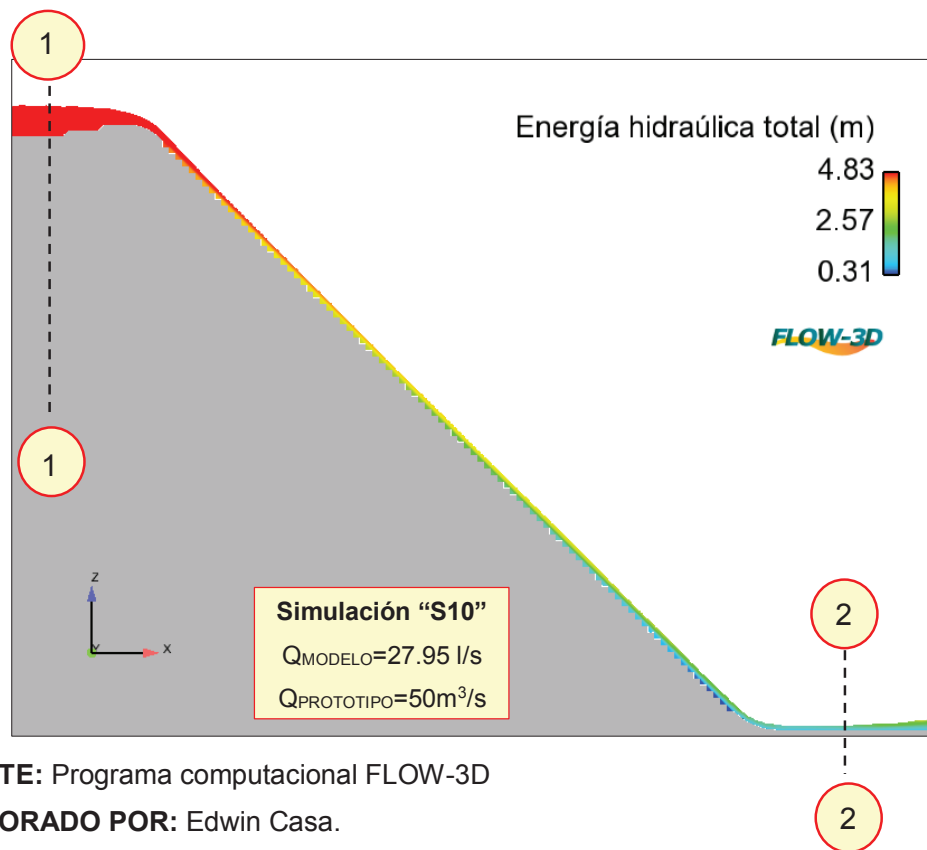
Los porcentajes de disipación de energía en la rápida escalonada para los cuatro caudales simulados se determinan fácilmente una vez que se conocen la velocidad del flujo y la profundidad de agua al pie de la rápida. Para este análisis se ubican dos secciones de control en el sistema de la rápida escalonada:

- Sección 1.- Ubicada aguas arriba de la rápida escalonada en el cuenco disipador 1, en esta zona se determina la energía hidráulica total, la misma que es igual a la carga de posición (z_1) más la carga de presión (p_1/γ) y más la carga de velocidad ($V_1^2/2g$).

- Sección 2.- Está ubicada al pie de la rápida escalonada en el cuenco disipador 2, de igual manera se determina en este sitio la energía hidráulica total que es igual a: $z_2 + p_2/\gamma + V_2^2/2g$.

La figura 6.8 muestra la ubicación de las dos secciones de control establecidas para el análisis y la determinación del porcentaje de disipación de energía al pie de la rápida escalonada.

FIGURA 6.8 ENERGÍA HIDRÁULICA TOTAL A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.



FUENTE: Programa computacional FLOW-3D

ELABORADO POR: Edwin Casa.

Los cálculos del porcentaje de disipación de energía al pie de la rápida para los caudales de 13.97 l/s, 22.36 l/s, 27.95 l/s y 41.92 l/s correspondientes a caudales en prototipo de 25 m³/s, 40 m³/s, 50 m³/s y 75 m³/s respectivamente, se reportan en el cuadro 6.5.

CUADRO 6.5 DISIPACIÓN DE ENERGÍA AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA PARA LA SERIE DE CAUDALES DEL PLAN DE SIMULACIONES.

-	Caudal modelo	SECCION 1				SECCION 2				Porcentaje de Disipación de energía
		Energía 1 Carga de posición + carga de presión + Carga de velocidad				Energía 2 Carga de posición + carga de presión + Carga de velocidad				
Nº	Qm	z ₁	y ₁	V ² /2g	E ₁	z ₂	y ₂	V ² /2g	E ₂	(E ₁ -E ₂)/E ₁
-	l/s	m	m	m	m	m	m	m	m	%
S8	13.97	4.576	0.187	0.005	4.768	0.05	0.012	1.032	1.094	77.0
S9	22.36	4.576	0.222	0.011	4.809	0.05	0.017	1.432	1.499	68.8
S10	27.95	4.576	0.242	0.017	4.835	0.05	0.020	1.542	1.612	66.7
S11	41.92	4.576	0.287	0.025	4.888	0.05	0.026	2.088	2.164	55.7

ELABORADO POR: Edwin casa.

Los resultados del cuadro anterior reportan que la disipación de la energía al pie de la rápida es baja para el rango de caudales altos y está en el orden de los 55.7% al 68.8%. Mientras para el caudal bajo simulado que corresponde a 13.97 l/s el porcentaje de disipación de energía al pie se efectúa alrededor del 77%.

La velocidad al pie de la rápida es alta para caudales altos debido a la descarga misma y a la gran altura que desciende el flujo (4.61 m en escala modelo), esta situación produce aceleración del flujo por efecto de la gravedad, generando así cargas de velocidad muy altas que dificultan la disipación de energía en el cuenco disipador ubicado al pie del mismo.

Resultado de la gran cantidad de energía cinética que se tiene al pie de la rápida es evidente que el cuenco disipador de energía es insuficiente para sostener el resalto hidráulico. Para toda la serie de caudales simulados se presenta un resalto hidráulico rechazado, cuyas características hidráulicas no son aceptables tendiendo en consideración que este flujo se aproxima hacia la segunda rápida escalonada.

El flujo en el cuenco dissipador 2 es un flujo supercrítico que presente perturbaciones, ondas e inestabilidad en la superficie libre del agua. El comportamiento y la aproximación del flujo hacia la rápida escalonada No 2 son inaceptable y requiere la necesidad de modificaciones en la geometría del cuenco dissipador que ayuden a sostener el resalto hidráulico.

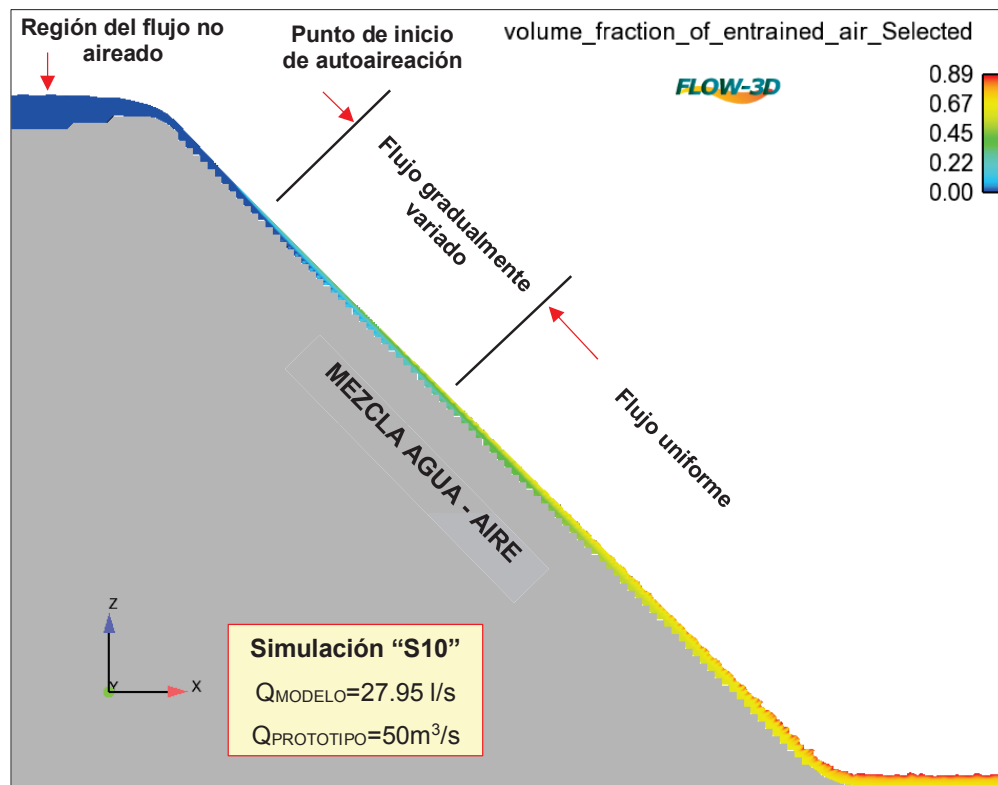
6.2 COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA MODELACIÓN NUMÉRICA Y LA MODELACIÓN FÍSICA ACERCA DEL FLUJO RASANTE EN LA RÁPIDA ESCALONADA EL BATÁN.

En el presente ítem se compara los resultados de las mediciones experimentales y registros fotográficos obtenidos del modelo físico con los resultados de las simulaciones numéricas usando el programa FLOW-3D para el plan de simulaciones establecido en este capítulo.

Generalmente cuando en una rápida escalonada se presenta el tipo de flujo rasante se puede identificar las siguientes cuatro regiones principales.

1. Región del flujo no aireado (Ver Figura 6.9, el flujo de color azul representa introducción del 0% de aire).
2. Punto de inicio de la autoaereación (Ver Figura 6.9, el flujo de color celeste indica inicio de la autoaereación con porcentaje bajos de aire).
3. Flujo gradualmente variado (Ver Figura 6.9, varia el porcentaje de autoaereación del 0% al 70%).
4. Flujo uniforme (Ver Figura 6.9, presencia de una concentración de aire en el flujo alrededor del 90%).

FIGURA 6.9 REGIONES PARTICULARES EN EL FLUJO RASANTE.



FUENTE: Programa computacional FLOW-3D

ELABORADO POR: Edwin Casa.

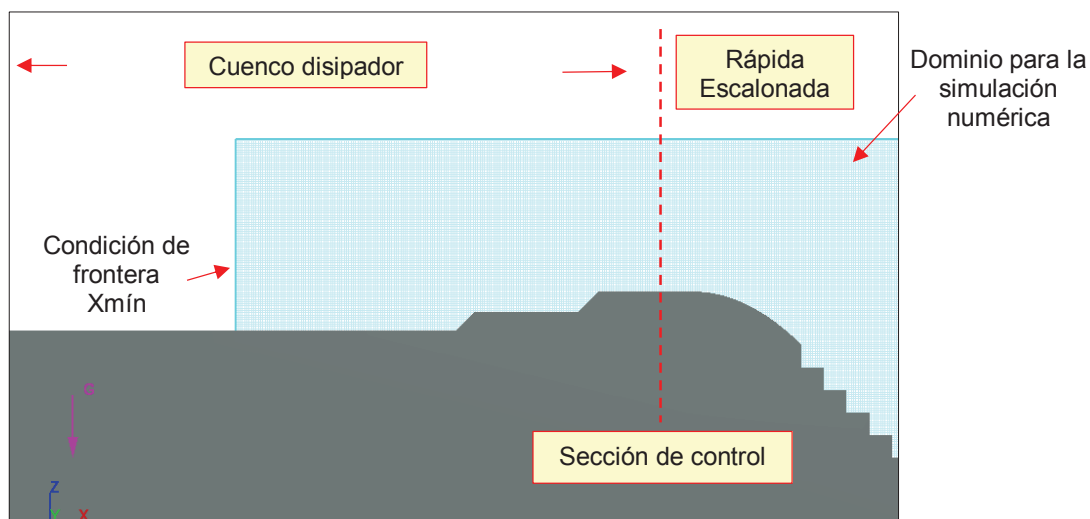
6.2.1 COMPARACIÓN DEL FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA.

Inmediatamente aguas arriba de la rápida escalonada se tiene un cuenco disipador de energía, esta estructura disipa energía y entrega un flujo subcrítico y uniformizado hacia la rápida escalonada. En el modelo físico se tiene el registro del nivel de agua en el cuenco disipador. Este parámetro hidráulico se utiliza como condición de frontera para la simulación numérica en dos dimensiones (2D) de la rápida escalonada usando el paquete FLOW-3D.

El inicio del dominio de la simulación numérica se considera desde la mitad del cuenco disipador de energía. En esta sección el flujo de agua no presenta ondulaciones considerables y es factible la medición de la profundidad de agua.

La figura 6.10 muestra el mallado en la región donde se desarrolla la simulación numérica, además se marca con línea entrecortada de color rojo la sección de control ubicada al inicio de la rápida escalonada.

FIGURA 6.10 CUENCO DISIPADOR DE ENERGÍA AGUAS ARRIBA DE LA RÁPIDA ESCALONADA.



FUENTE: Programa computacional FLOW-3D

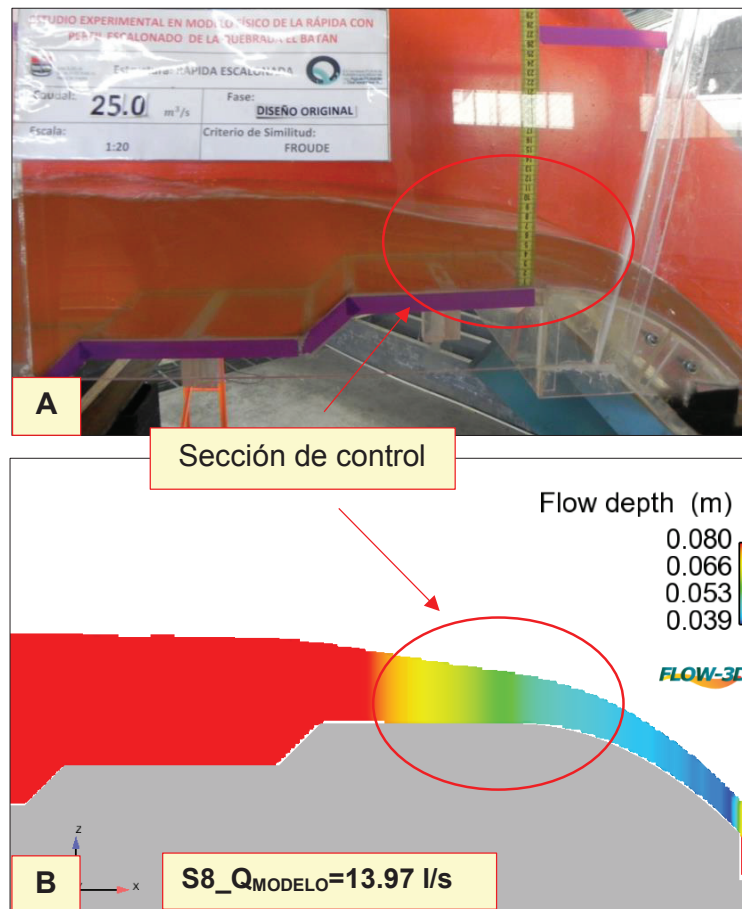
ELABORADO POR: Edwin Casa.

El parámetro hidráulico de comparación y verificación entre el modelo físico y la simulación numérica es la profundidad de agua en la sección de control. Es decir se compara los valores de la profundidad crítica en la entrada de la rápida escalonada tanto en modelo físico como en el modelo numérico.

En la Fotografía 6.1 (A), observamos en el modelo físico el flujo de aproximación hacia la rápida escalonada para el caudal de 13.97 l/s. Se registra una profundidad de agua en la sección de control entre 6.2 cm a 7.0 cm. El valor empleado para

realizar la comparación con el resultado numérico corresponde a una profundidad de flujo promedio que es igual a 6.6 cm.

FOTOGRAFÍA 6.1 FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA. (A) PRUEBA EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.

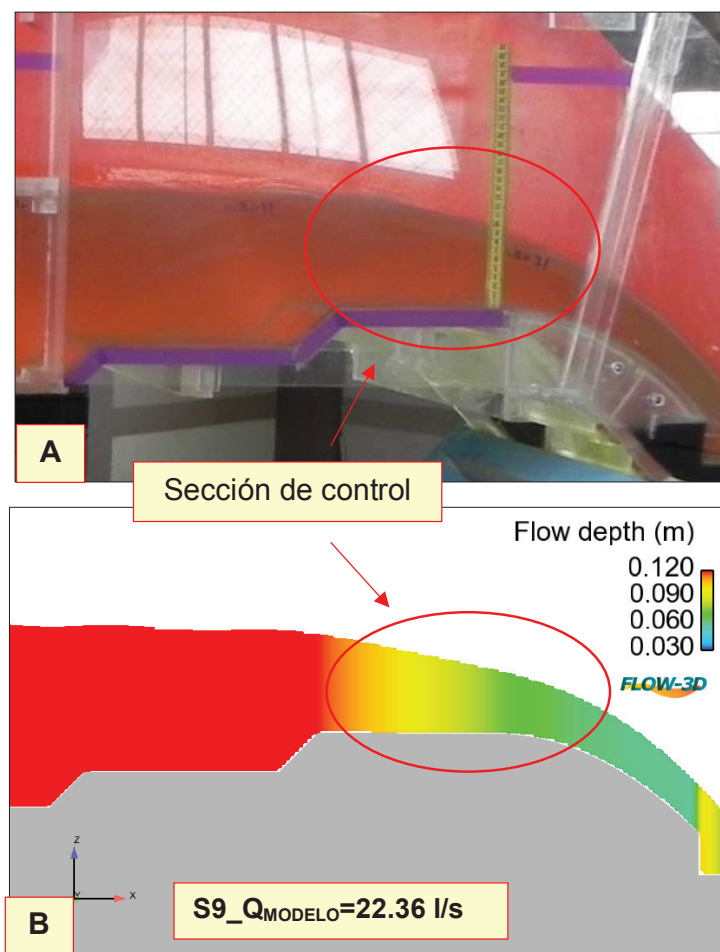


FUENTE: Laboratorio del CIERHI. Programa computacional FLOW-3D.

En la Fotografía 6.1 (B) se observa el resultado de la simulación numérica. El valor de la profundidad de agua en la sección de control es de 6.7 cm. La comparación de los valores de profundidad de agua entre modelo físico y modelo numérico en la sección de control y que corresponde a la profundidad crítica muestran una desviación del 1.5%.

La Fotografía 6.2 (A) presenta el flujo de aproximación hacia la rápida escalonada en el modelo físico para el caudal de 22.36 l/s. En la sección de control se registra una profundidad de agua que oscila entre 9.0 cm a 9.5 cm y del cual resulta un valor promedio de 9.3 cm para la comparación con el resultado numérico.

FOTOGRAFÍA 6.2 FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA. (A) PRUEBA EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.

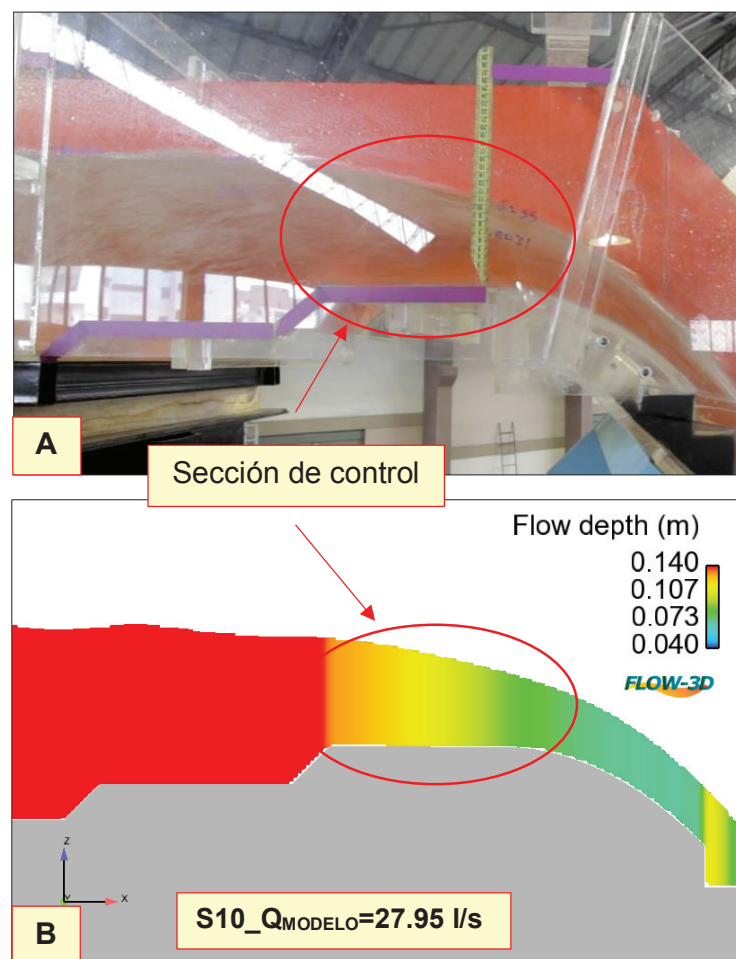


FUENTE: Laboratorio del CIERHI. Programa computacional FLOW-3D.

Los resultados de la simulación numérica se visualizan en la Fotografía 6.2 (B). El valor de la profundidad de agua en la sección de control es de 9.5 cm. Se tiene una desviación del 2.1% al comparar los resultados numéricos con los experimentales.

En la Fotografía 6.3 (A), se visualiza el flujo de aproximación hacia la rápida escalonada en el modelo físico para el caudal de 27.95 l/s. En la sección de control se registra una profundidad de agua entre 10.5 cm a 11.5 cm. El valor promedio para comparar con el resultado numérico es de 11 cm.

FOTOGRAFÍA 6.3 FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA. (A) PRUEBA EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.



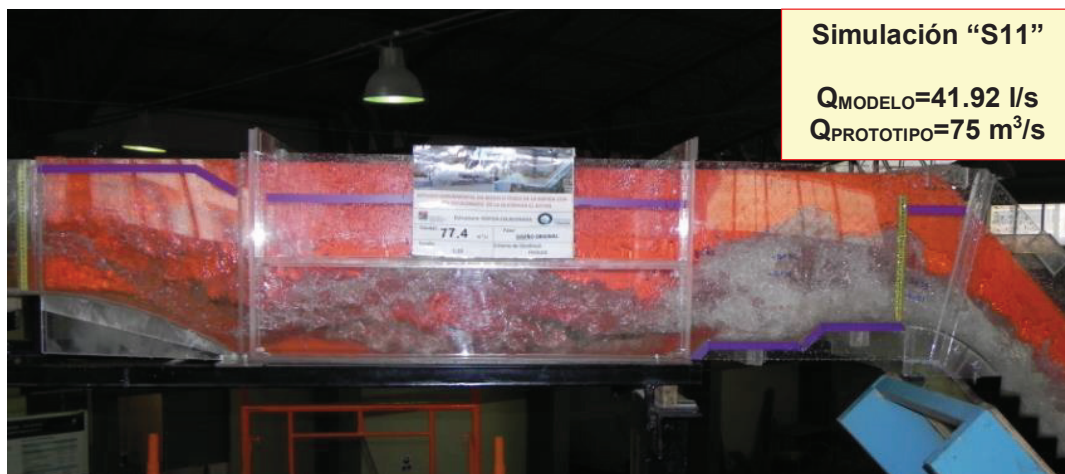
FUENTE: Laboratorio del CIERHI. Programa computacional FLOW-3D.

La Fotografía 6.3 (B) presenta el resultado de la simulación numérica del flujo de aproximación a la rápida escalonada y el valor de la profundidad de agua en la sección de control es de 10.7cm. La comparación de los resultados de la

profundidad de agua en la sección de control (profundidad crítica) muestran una desviación del 2.8%.

Finalmente la Fotografía 6.4, presenta en el modelo físico el flujo de aproximación hacia la rápida escalonada para el caudal de diseño de la estructura que corresponde a 41.92 l/s, el mismo que equivalente al caudal en prototipo de 75 m³/s. Los resultados experimentales revelan que el cuenco disipador de energía 1 es insuficiente para sostener el resalto hidráulico como se observa a continuación.

FOTOGRAFÍA 6.4 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA.



FUENTE: Estudio experimental del modelo de la rápida escalonada. CIERHI., 2016.

Las características del flujo indican un resalto hidráulico rechazado en el cuenco disipador de energía 1. Se observa un régimen supercrítico de manera desordenada y caótica. La modelación numérica en dos dimensiones para este caudal y con estas condiciones de ingreso no se desarrolló debido a la dificultad para determinar exactamente los parámetros iniciales y condición de frontera con el fin de representar de forma real el modelo numérico.

El cuadro 6.6 resume los valores obtenidos de manera teórica, experimental y numérica de la profundidad de agua en la sección de control. También se presenta

en la última columna las desviaciones porcentuales entre las mediciones experimentales y los resultados numéricos obtenidos del programa FLOW-3D.

CUADRO 6.6 COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LOS RESULTADO DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

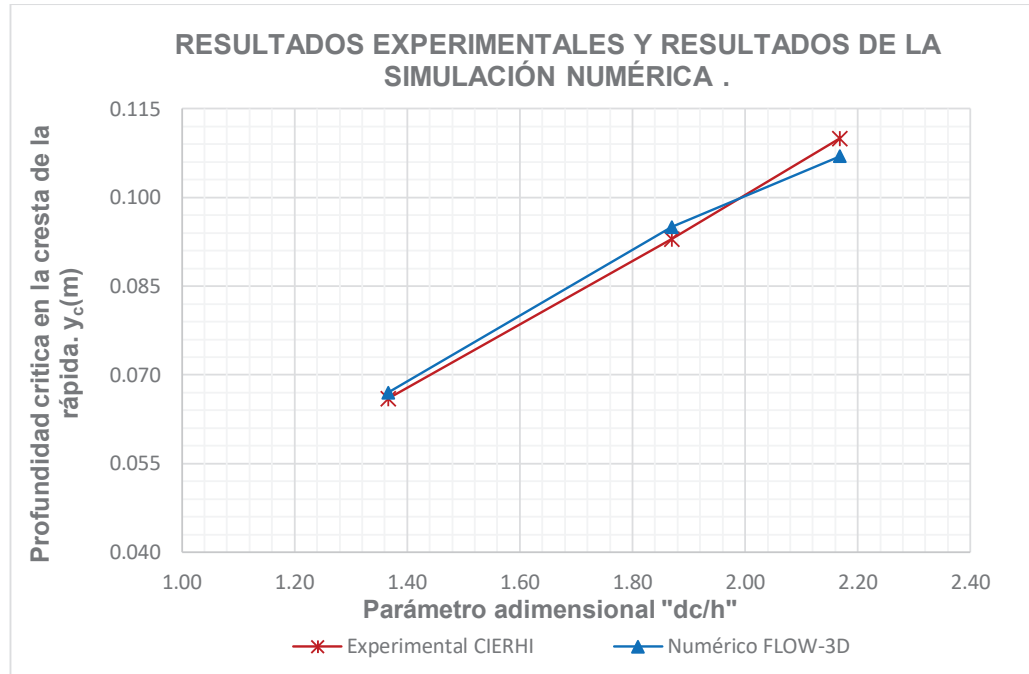
PROFUNDIDAD DE AGUA EN LA CRESTA DE LA RÁPIDA ESCALONADA						
Escenario	Caudal modelo	Parámetro adimensional	Teórico	Experimental CIERHI	Numérico FLOW-3D	Diferencia experimental y numérico
Nº	Qm	dc/h	*yc	*yc	*yc	Desviación
-	l/s	-	m	m	m	%
S8	13.97	1.37	0.068	0.066	0.067	1.5
S9	22.36	1.87	0.094	0.093	0.095	2.1
S10	27.95	2.17	0.108	0.110	0.107	2.8
S11	41.92	2.84	0.142	Flujo caótico	-	-

*yc= Profundidad crítica en la cresta de la rápida escalonada. Punto de control.

ELABORADO POR: Edwin Casa.

En el grafico 6.7 se muestra los resultados experimentales y numéricos sobre el parámetro adimensional “ d_c/h ” vs la profundidad de flujo en la sección de control.

GRÁFICO 6.7 PARÁMETRO ADIMENSIONAL “ d_c/h ” VS PROFUNDIDAD CRÍTICA EN LA CRESTA DE LA RÁPIDA ESCALONADA.



ELABORADO POR: Edwin Casa.

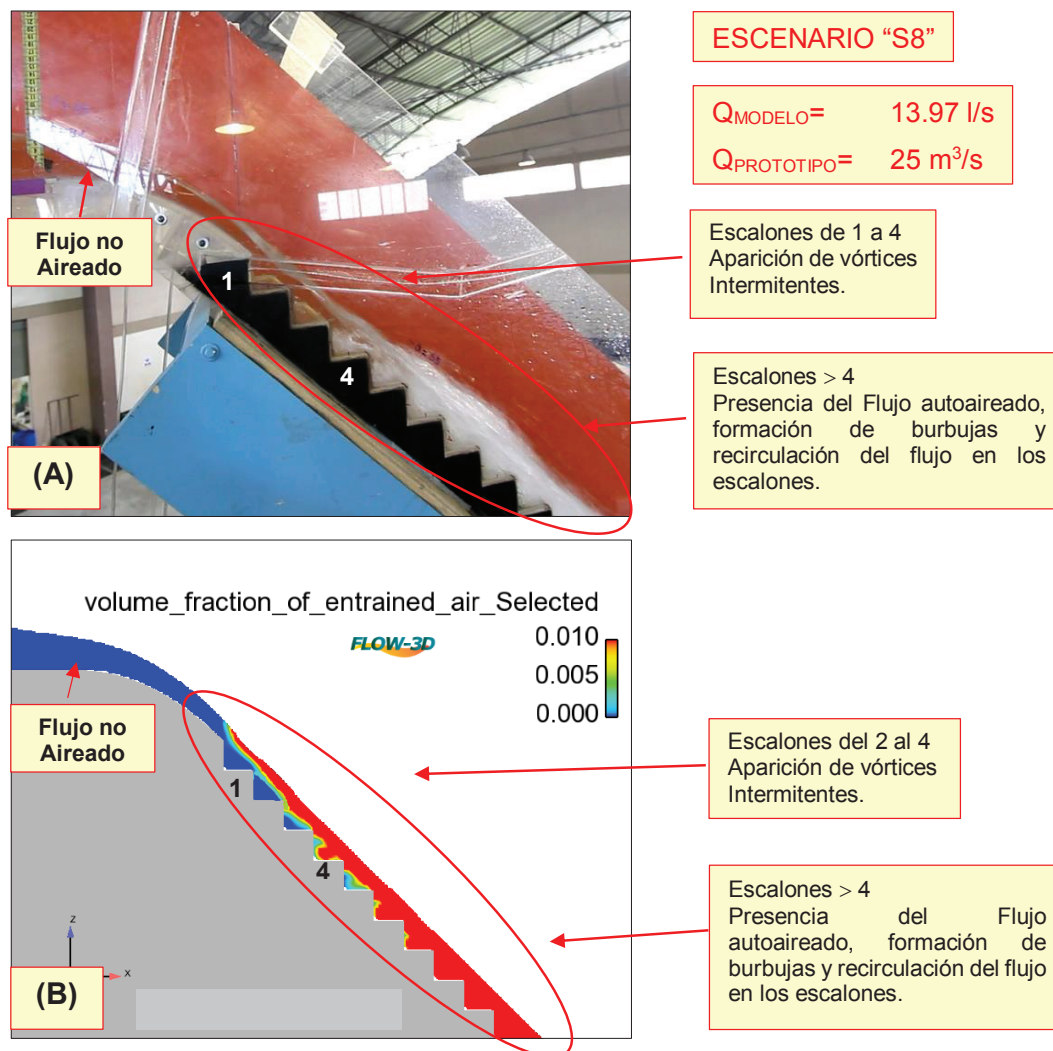
6.2.2 UBICACIÓN DEL PUNTO DE INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN.

La localización del punto de inicio de la autoaireación se determina siguiendo el desarrollo de la capa límite. Cuando la capa límite llega hasta la superficie libre del flujo se encuentra el llamado punto de inicio de la autoaireación. Inmediatamente hacia aguas debajo de este punto la turbulencia generada introduce y transporta el aire durante el descenso del flujo por la rápida escalonada. También se presenta flujos rotacionales constante en las cavidades de los escalones.

A continuación en base al registro fotográfico y visual sobre el inicio de la presencia de vórtices constantes en los escalones, se localiza de forma aproximada la ubicación del punto de inicio de la autoaireación.

La introducción de aire en el escenario “S8”, para el caudal modelado de 13.97 l/s correspondiente al caudal en prototipo de 25 m³/s, inicia con la presencia constante de recirculación del flujo en los escalones a partir del escalón 4, como se puede observar en la fotografía 6.5. Hacia aguas abajo se presenta un flujo bifásico (agua-aire) cuya concentración de aire va en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada.

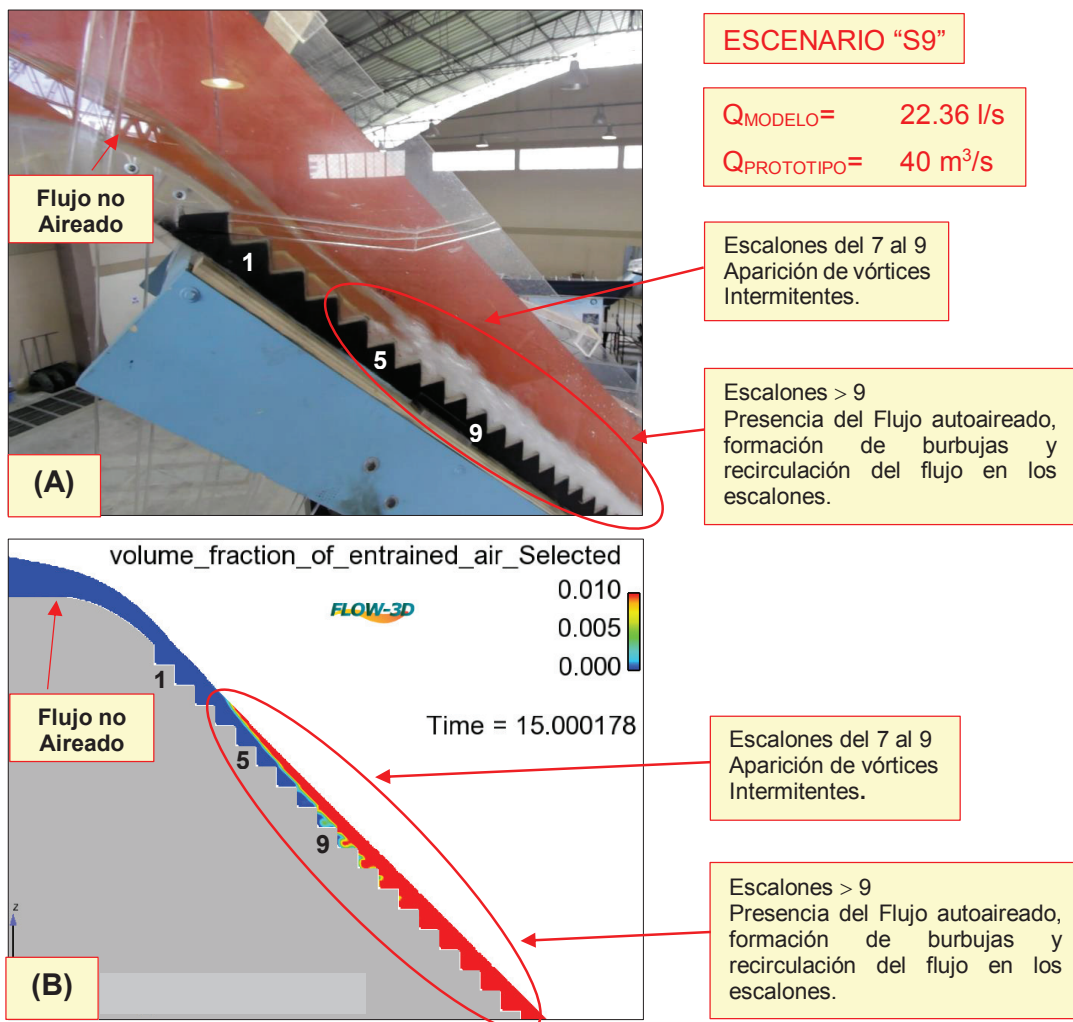
FOTOGRAFÍA 6.5 INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN DEL FLUJO EN UNA RÁPIDA ESCALONADA. (A) MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.



FUENTE: Laboratorio del CIERHI. Programa computacional FLOW-3D.

Para el caudal en modelo de 22.36 l/s equivalente a 40 m³/s en prototipo se observa en la fotografía 6.6 que a partir del escalón 9 se inicia el flujo rotacional constante en los escalones. De aquí hacia aguas abajo se presenta un flujo con mezcla agua aire, cuyos valores de concentración de aire aumenta conforme desciende por la rápida escalonada.

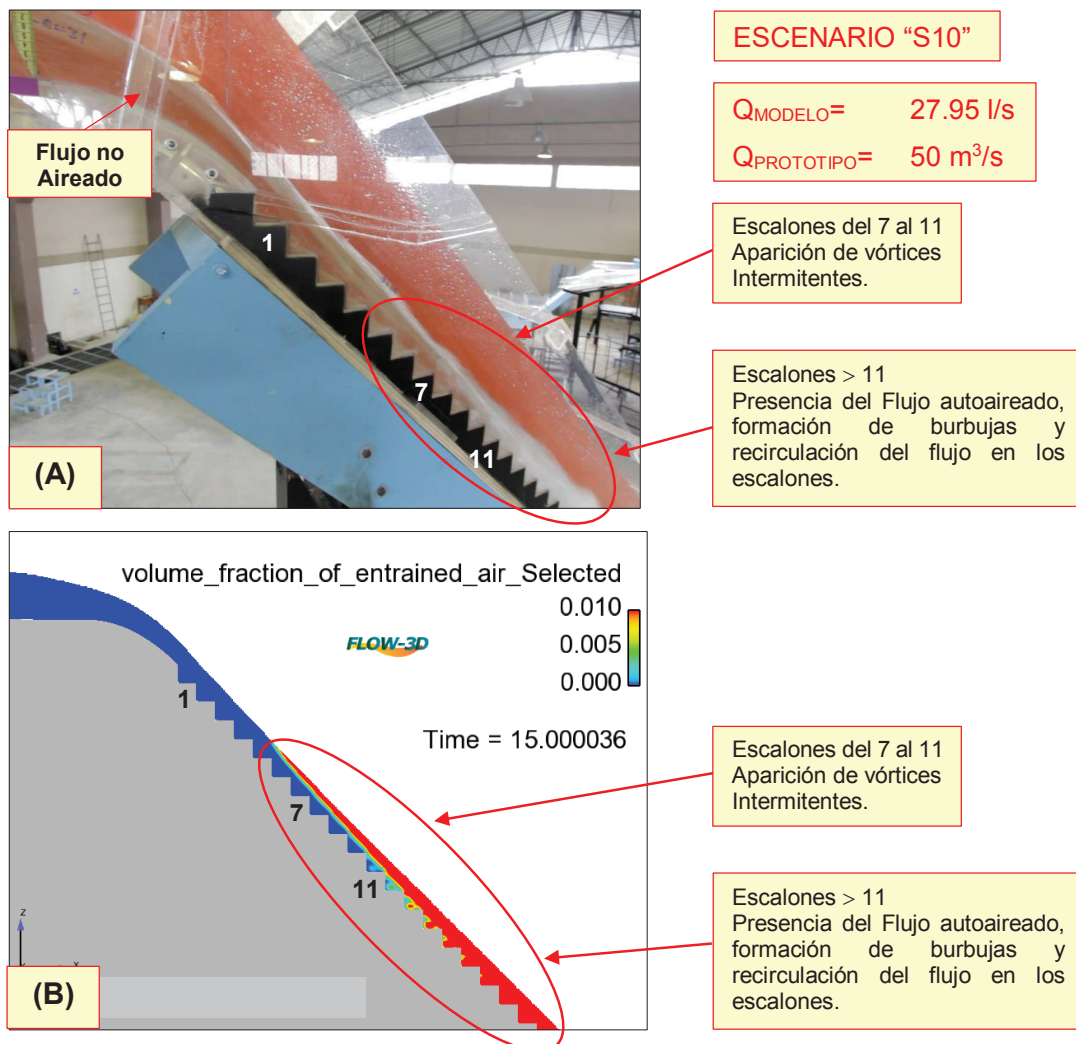
FOTOGRAFÍA 6.6 INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN DEL FLUJO EN UNA RÁPIDA ESCALONADA. (A) MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.



FUENTE: Laboratorio del CIERHI. Programa computacional FLOW-3D.

Y en la fotografía 6.7 se reporta los resultados para el caudal en modelo de 27.95 l/s equivalente a 50 m³/s en prototipo. La aparición constante de vórtices en los escalones se produce a partir del escalón 11. Desde esta posición hacia aguas abajo se presenta un flujo bifásico, con concentraciones de aire que van en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada.

FOTOGRAFÍA 6.7 INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN DEL FLUJO EN UNA RÁPIDA ESCALONADA. (A) MODELO FÍSICO. (B) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D.



FUENTE: Laboratorio del CIERHI. Programa computacional FLOW-3D.

El cuadro 6.7 resume los resultados experimentales y numéricos mencionados anteriormente y el cálculo en base a las expresiones experimentales encontradas en la literatura técnica acerca de la longitud de inicio del punto de la autoaireación y de la profundidad del flujo en este punto.

CUADRO 6.7 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO FÍSICO, MODELO NUMÉRICO Y EXPRESIONES TEÓRICAS.

PUNTO DE INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN.									
Escenario	Caudal modelo	Según literatura técnica				Experimental		Numérico	
		CHANSON (1994-a)		BOES AND MINOR (2002)		CIERHI		FLOW-3D	
Nº	Qm	*Li	**yi	*Li	**yi	*Li	Escalón	*Li	Escalón
-	l/s	m	m	m	m	m	No	m	No
S8	13.97	0.597	0.029	0.697	0.029	0.310	4	0.239	3
S9	22.36	0.834	0.038	1.015	0.039	0.593	8	0.664	9
S10	27.95	0.978	0.043	1.213	0.045	0.805	11	0.805	11

*Li = Distancia al punto de inicio de la autoaireación.

**yi = Profundidad del flujo en el punto de inicio de la autoaireación.

ELABORADO POR: Edwin Casa.

Los cálculos teóricos de la distancia al punto de inicio de la autoaireación utilizando la expresión experimental según Boes y Minor 2002 dan como resultados valores superiores a los obtenidos con las expresiones de Chanson 1994-a, para todo el rango de caudales simulados. En la comparación de la profundidad del agua en el punto de autoaireación se obtienen desviaciones menores al 4.5%. Según las expresiones recomendadas por ambos autores, los resultados muestran valores semejantes con desviaciones mínimas como se muestra en el cuadro 6.5.

Los resultados obtenidos en el modelo físico y los resultados numéricos reportados por el paquete computacional FLOW-3D, presentados en el cuadro 6.5. Presenta valores semejantes, lo que indica que el modelo numérico representa

adecuadamente del fenómeno de inicio de introducción de aire producido por el crecimiento de la capa límite hasta la superficie libre del agua.

6.2.3 PORCENTAJE DE CONCENTRACIÓN DE AIRE EN EL FLUJO RASANTE.

Agua abajo del punto de inicio de la autoaireación Matos (1999) comprobó experimentalmente que en la zona inicial del proceso de aireación las líneas de corriente presentan una curvatura convexa lo que favorece la aireación del flujo. Posteriormente las líneas de corriente con curvas cóncavas con aparición notoria del movimiento ascensional de las burbujas de aire.

La zona del flujo gradualmente variado se caracteriza por una variación gradual de los valores de concentración media de aire, velocidad y profundidad del flujo hasta alcanzar las condiciones de equilibrio del flujo uniforme.

La región uniforme se alcanza a una distancia alejada de la cresta de la rápida, donde se establece el equilibrio entre las fuerzas de gravedad y fricción. En esta zona se mantiene constantes las características del flujo como concentración media de aire, velocidad y profundidad del flujo.

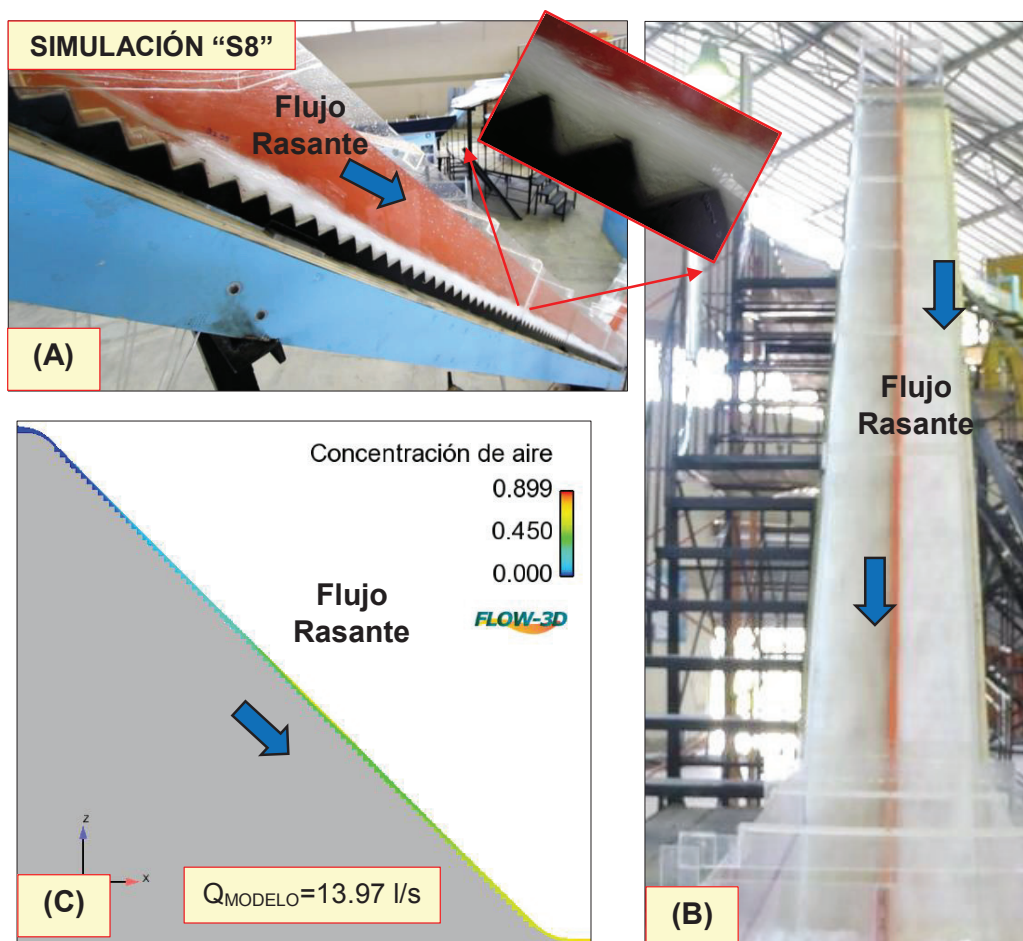
La concentración media del aire (C_{mean}) en la región uniforme depende únicamente de la pendiente de la rápida escalonada.

En la simulación numérica del flujo rasante los resultados de la concentración de aire se basa en analizar los valores de la fracción volumétrica de aire en las celdas. Es decir en forma de resultados gráficos con simbología de colores se puede observar que cantidad de aire se mezcla con el agua, formando de esta manera un flujo mixto o bifásico.

Las fotografías 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11, muestran la comparación de los resultados obtenidos del flujo rasante sobre la rápida escalonada entre el modelación física con la modelación numérica.

La fotografía 6.8 (A) y (B) presenta el caudal en modelo de 13.97 l/s. En la región de equilibrio o flujo uniforme, se puede visualizar aproximadamente una concentración de aire alrededor del 90%. La profundidad del flujo rasante oscila entre 3 cm a 4 cm, dando un valor promedio igual a 3.5 cm. Los resultados de la modelación numérica como se puede observar en la fotografía 6.8 (C), presenta un profundidad del flujo aireado al 90% igual a 3.2 cm. Comparando el valor promedio experimental con el valor obtenido de la simulación numérica se tiene una diferencia porcentual del 9.4%.

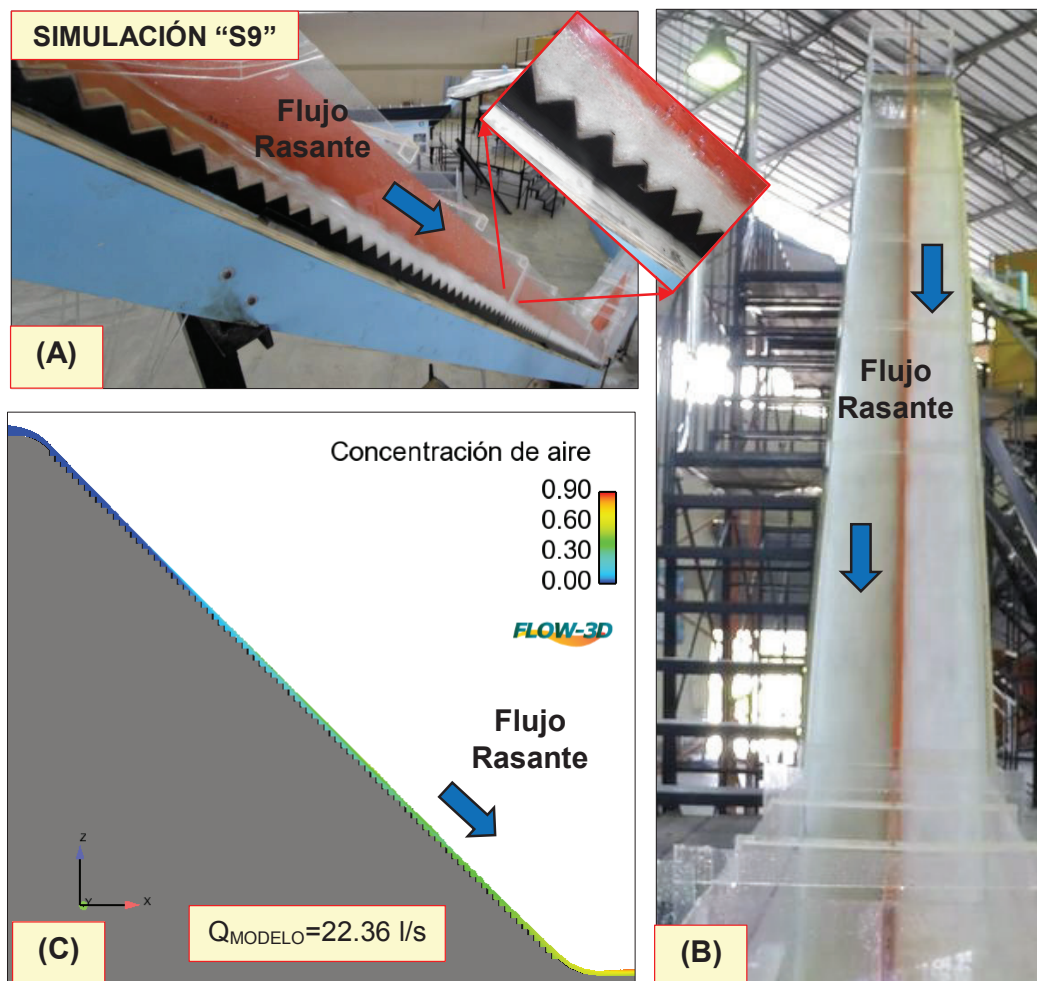
FOTOGRAFÍA 6.8 FLUJO RASANTE. CONCENTRACIÓN DE AIRE. (A) MODELO FÍSICO, VISTA LATERAL (B) MODELO FÍSICO, VISTA FRONTAL (C) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D, VISTA LATERAL.



FUENTE: Laboratorio del CIERHI. Programa computacional FLOW-3D.

La fotografía 6.9 (A) y (B) presenta el caudal simulado de 22.36 l/s. En la región de equilibrio o flujo uniforme, se puede visualizar aproximadamente una concentración de aire alrededor del 90%. La profundidad del flujo rasante oscila entre 4 cm a 5 cm, dando un valor promedio igual a 4.5 cm. Los resultados de la modelación numérica como se puede observar en la fotografía 6.9 (C), presenta un profundidad del flujo aireado al 90% igual a 4.6 cm. Comparando el valor promedio experimental con el valor obtenido de la simulación numérica se tiene una diferencia porcentual del 2.2%.

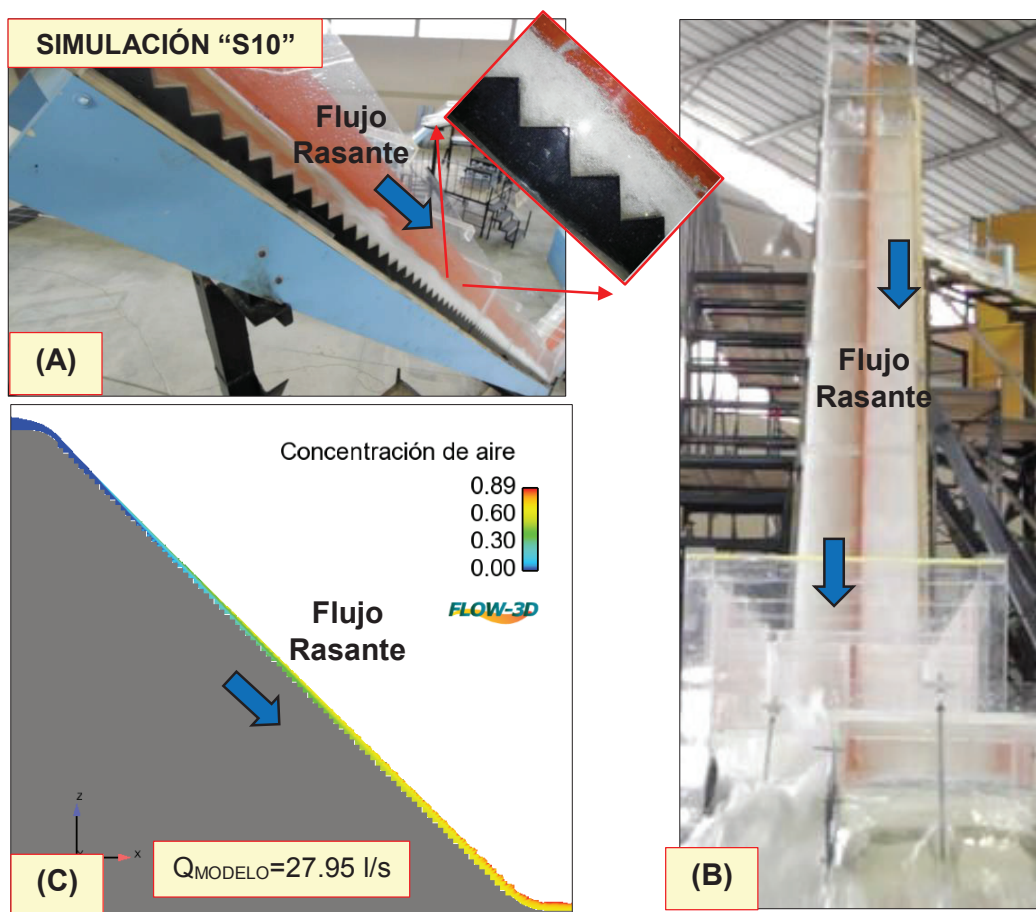
FOTOGRAFÍA 6.9 FLUJO RASANTE. CONCENTRACIÓN DE AIRE. (A) MODELO FÍSICO, VISTA LATERAL (B) MODELO FÍSICO, VISTA FRONTAL (C) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D, VISTA LATERAL.



FUENTE: Laboratorio del CIERHI. Programa computacional FLOW-3D.

La fotografía 6.10 (A) y (B) presenta el caudal simulado de 27.95 l/s. En la región de equilibrio o flujo uniforme, se puede visualizar aproximadamente una concentración de aire alrededor del 90%. La profundidad del flujo rasante oscila aproximadamente entre 5 cm a 6 cm, dando un valor promedio igual a 5.5 cm. Los resultados de la modelación numérica como se puede observar en la fotografía 6.9 (C), presenta un profundidad del flujo aireado al 90% igual a 5.3 cm. Comparando el valor promedio experimental con el valor obtenido de la simulación numérica se tiene una diferencia porcentual del 3.8%.

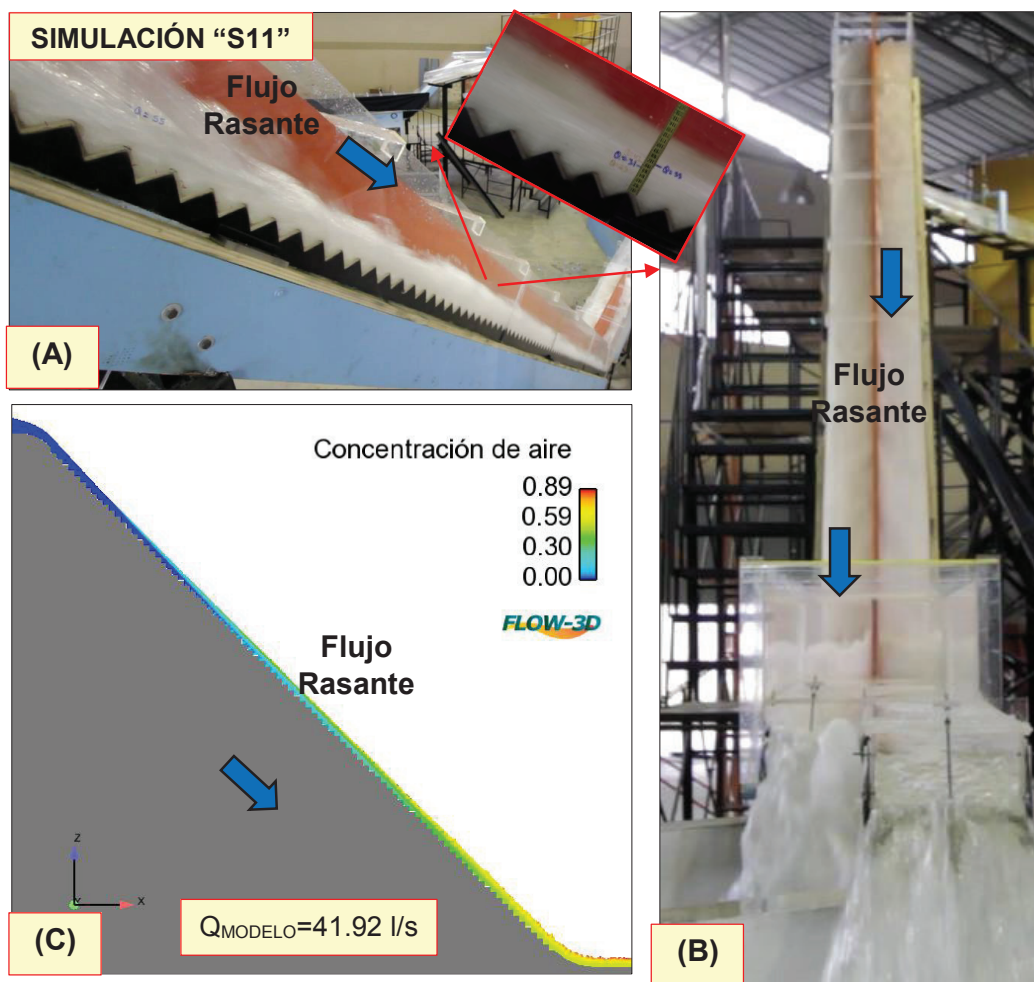
FOTOGRAFÍA 6.10 FLUJO RASANTE. CONCENTRACIÓN DE AIRE. (A) MODELO FÍSICO, VISTA LATERAL (B) MODELO FÍSICO, VISTA FRONTAL (C) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D, VISTA LATERAL.



FUENTE: Laboratorio del CIERHI. Programa computacional FLOW-3D.

La fotografía 6.11 (A) y (B) presenta el caudal simulado de 41.92 l/s. En la región de equilibrio o flujo uniforme, se puede visualizar aproximadamente una concentración de aire alrededor del 90%. La profundidad del flujo rasante oscila entre 7 cm a 8 cm, dando un valor promedio igual a 5.5 cm. Los resultados de la modelación numérica como se puede observar en la fotografía 6.9 (C), presenta un profundidad del flujo aireado al 90% igual a 7.4 cm. Comparando el valor promedio experimental con el valor obtenido de la simulación numérica se tiene una diferencia porcentual del 1.4%.

FOTOGRAFÍA 6.11 FLUJO RASANTE. CONCENTRACIÓN DE AIRE. (A) MODELO FÍSICO, VISTA LATERAL (B) MODELO FÍSICO, VISTA FRONTAL (C) MODELACIÓN NUMÉRICO EN FLOW-3D, VISTA LATERAL.



FUENTE: Laboratorio del CIERHI. Programa computacional FLOW-3D.

En el cuadro 6.8 se resumen los resultados sobre la profundidad del flujo mixto para la serie de caudales simulados y las diferencias porcentuales existentes entre los resultados obtenidos en el estudio experimental en modelo físico con los obtenidos en la simulación numérica utilizando el paquete comercial FLOW-3D.

CUADRO 6.8 RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL MODELO FÍSICO, MODELO NUMÉRICO, EXPRESIÓN TEÓRICA.

PROFUNDIDAD DE AGUA CON CONCENTRACION DE AIRE AL 90%						
Escenario	Caudal modelo	Parámetro adimensional	Teórico Boes and Minor (2002)	Experimental CIERHI	Numérico FLOW-3D	Diferencia experimental y numérico
Nº	Q_m	dc/h	* y_{90}	* y_{90}	* y_{90}	Desviación
-	l/s	-	m	m	m	%
S8	13.97	1.37	0.037	0.035	0.032	9.4
S9	22.36	1.87	0.049	0.045	0.046	2.2
S10	27.95	2.17	0.056	0.055	0.053	3.8
S11	41.92	2.84	0.071	0.075	0.074	1.4

* y_{90} = Profundidad del flujo con concentración de aire al 90% en la región del flujo uniforme.

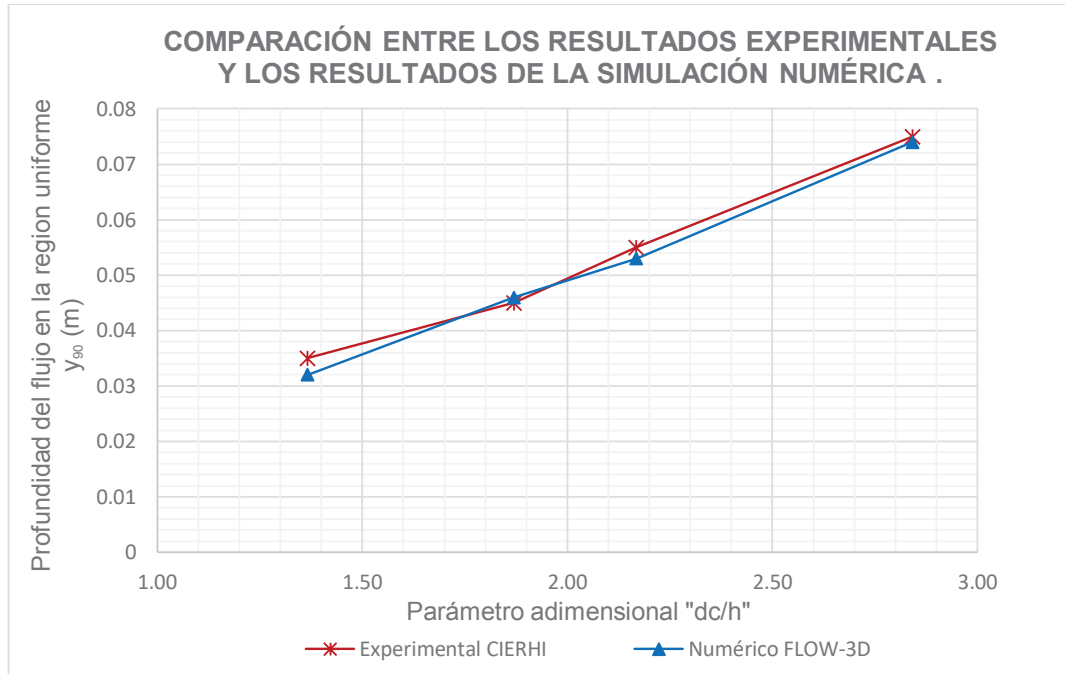
ELABORADO POR: Edwin Casa.

Los resultados obtenidos mediante el cálculo teórico, estudio experimental y modelación numérica sobre la profundidad de flujo aireado en la región de equilibrio para la serie de caudales muestran una semejanza entre sí. Estos resultados presentan una desviación inferior al 10 %.

Finalmente en el gráfico 6.8 las tendencias de los valores registrados en el cuadro 6.8. El gráfico reporta en el eje de las abscisas el parámetro adimensional “dc/h” y en el eje de las ordenadas la profundidad del flujo con concentración de aire al 90% “ y_{90} ”.

Las dos curvas obtenidas tienen una similar tendencia. Se puede visualizar que a medida aumenta la descarga en la rápida escalonada la profundidad del flujo mixto también aumenta.

GRÁFICO 6.8 PARÁMETRO ADIMENSIONAL (dc/h) VS PROFUNDIDAD DEL FLUJO EN LA REGIÓN UNIFORME.

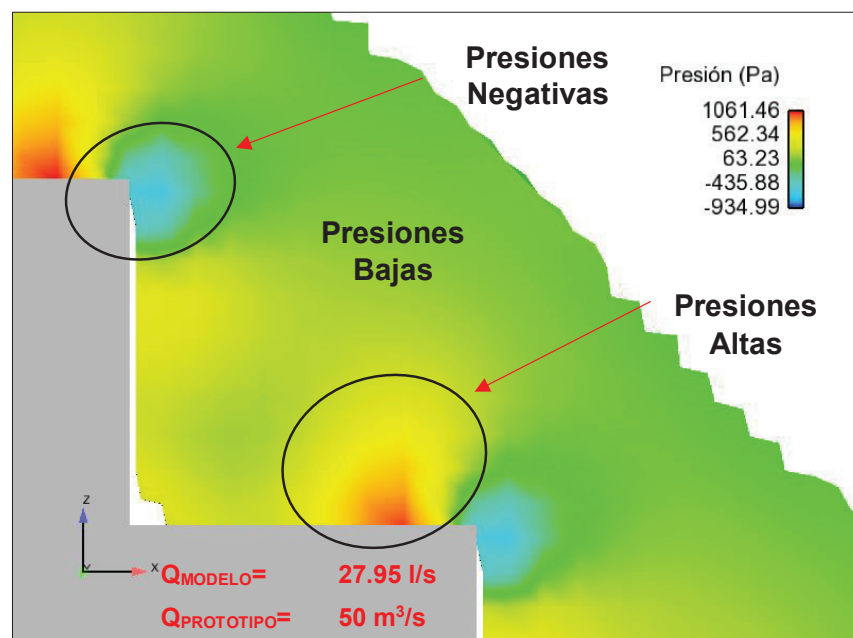


ELABORADO POR: Edwin Casa.

6.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS DEL FLUJO RASANTE SOBRE LA RAPIDA ESCALONADA EL BATÁN.

Las conclusiones del análisis y comparación entre los resultados experimentales del modelo físico y la simulación numérica del flujo rasante en la rápida escalonada el Batán se describen a continuación:

- Los resultados de la distribución de presiones en el escalón indican un mayor valor de presión en el tercio final de la superficie horizontal a la salida del escalón. Mientras en la esquina del escalón, las presiones tiene valores negativos, debido a la existencia de la separación del flujo. Sin embargo los descensos de presión en este punto no dañan a la estructura por los efectos de cavitación, porque el valor de la presión en el cual el agua pasa al estado de vapor está por debajo de los valores obtenidos. En la zona de las cavidades de los escalos donde se genera la recirculación del flujo y en la capa superior del flujo rasante las presiones son bajas debido a la alta aireación que adquiere el flujo por el descenso hasta el cuenco dissipador de energía.



- La distribución de velocidades en la profundidad del flujo autoaireado para el rango de caudales simulados, sigue la tendencia de la ecuación 6.1. Los valores numéricos obtenidos de la velocidad del flujo vs la profundidad del flujo rasante se ajustan a la curva de potencia con exponente igual a $(1/6)$. Donde el valor de $n = 6$, pertenece al rango (3.5 a 6) reportado según investigaciones experimentales sobre la variación del valor de n .
Para la serie de caudales presentados en el plan de simulaciones numéricas., la velocidad máxima del flujo rasante en la zona uniforme varía desde 5.3 m/s para el caudal bajo hasta un valor de 7.8m/s para el caudal más alto. Y la velocidad media del flujo en la zona uniforme oscila desde 4.5 m/s hasta 6.4 m/s.
- La simulación numérica del flujo sobre la rápida escalonada con caudales de operación en prototipo igual a 25 m³/s, 40 m³/s, 50 m³/s y 75 m³/s dan como resultado un tipo de flujo rasante o skimming flow sobre la rápida escalonada, el aire es incorporado al flujo por causa del aumento de velocidad y turbulencia que actúa en la emulsión agua-aire. Cuando el borde exterior de la capa límite llega hasta la superficie libre se inicia la introducción y transporte de aire. Aguas abajo del punto de inicio de la autoaireación, el flujo sobre el fondo virtual es gradualmente variado hasta la zona donde alcanza el equilibrio. Posteriormente el flujo es uniforme y las características hidráulicas como la velocidad, la profundidad del flujo bifásico y la concentración de aire alrededor del 90% se mantienen constantes. Parte de la energía cinética se disipa por la transferencia de momento entre el flujo rasante y los remolinos formado en el interior de los escalones, durante el descenso.
- En la región autoaireada se visualiza inestabilidad del flujo rasante en la superficie libre y salpicaduras de agua. Para todo el rango de caudales simulado, se evidencia un flujo que desciende por la rápida escalonada con la presencia de pequeñas descargas periódicas sobre el flujo rasante hasta el cuenco disipador 2 ubicado al pie de la misma. El efecto del descenso en series del flujo produce ondulaciones en la superficie libre del agua en el

cuenco dissipador 2, posteriormente este comportamiento del flujo avanza hacia aguas abajo por el canal cubierto de $b \times h = 5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$.

- Para la serie de caudales simulados numéricamente, el porcentaje de disipación de energía va desde el 77.0 % para el caudal de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo igual al caudal de 13.97 l/s en modelo físico y numérico, hasta el 55.7 % para el caudal de diseño de la rápida que es de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo igual a 41.92 l/s en modelo físico y numérico. Las secciones de control para el análisis de la disipación de energía se localizan en la longitud media de los cuencos disipación de energía 1 y 2. Del análisis de resultados se obtiene que el porcentaje de disipación de energía obtenida en general es baja debido principalmente a que el cuenco dissipador de energía 2 ubicado al pie de la rápida es insuficiente para controlar el resalto hidráulico. Para todo el rango de caudales simulado en FLOW-3D se presenta en el cuenco dissipador 2 un resalto hidráulico rechazado.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1 CONCLUSIONES SOBRE EL TRABAJO DE TITULACIÓN.

- El presente trabajo de titulación se utilizó el paquete comercial FLOW-3D, el mismo que es un código CFD fácil de manejar conociendo los criterios básicos para desarrollar y analizar una modelación numérica. El programa resuelve las características hidrodinámicas del flujo rasante sobre la una rápida escalonada, previo a un análisis donde se define las combinaciones de las condiciones iniciales, físicas y numéricas necesarias para representar en lo posible el fenómeno físico.
- La modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada se desarrolló en dos dimensiones (2D). Debido a que el flujo por encima del fondo virtual es considerado como un flujo plano en canales anchos, es decir las variables hidrodinámicas del flujo en el ancho b permanecen constantes. Una modelación tridimensional es necesario si se requiere analizar el comportamiento del flujo en las cavidades de los escalones o en la formación de ondas cruzadas en la sección transversal de la rápida. De esta manera se justifica la simulación numérica en dos dimensiones de la rápida escalonada el Batán donde se analizó las características principales del flujo rasante como velocidad, profundidad del flujo mixto y concentración media del aire en la región de equilibrio.
- La investigación bibliográfica acerca del conocimiento de los criterios existentes para el diseño de una rápida escalonada y la recopilación de información de investigaciones realizadas en el campo de la simulación numérica del flujo rasante resultaron ventajosos al momento de implementar el modelo numérico. Cumpliendo satisfactoriamente con el análisis de los resultados proporcionados por el paquete comercial FLOW-3D.

- El modelo numérico permitió analizar la estabilidad del flujo rasante para diferentes descargas sobre la rápida escalonada. La obtención de resultados como la velocidad y la presión ayudaron a observar el comportamiento hidráulico del flujo rasante. En base de este análisis se recomienda posibles modificaciones con el fin de mejorar el funcionamiento hidráulico del flujo de la rápida escalonada.
- Los resultados numéricos obtenidos en este trabajo revelan que el software FLOW-3D es una herramienta útil para simular el flujo bifásico (agua-aire). El diseño y la optimización hidráulica de una rápida escalonada se complementa con la modelación numérica una vez calibrada con el modelo físico.

7.2 CONCLUSIONES GENERALES SOBRE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Los resultados numéricos obtenidos del programa computacional FLOW-3D se compararon con los datos experimentales registrados en el modelo físico construido en el Laboratorio del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional. La comparación de resultados se basa en tres aspectos que son: Localización del inicio del punto de inicio de autoaireación, profundidad del fluido autoaireado alrededor del 90% y la localización de la región uniforme para la cual se verifica que la velocidad del flujo es aproximadamente constante. Sobre la base de los resultados numéricos obtenidos se concluye los siguientes enunciados:

- La combinación del modelo de turbulencia K- ϵ renormalizado con el algoritmo VOF más el sub-modelo de aireación y el sub-modelo de emulsionamiento de aire, representa adecuadamente el flujo rasante sobre una rápida escalonada. Incluyendo la introducción espontánea de aire así como el movimiento del flujo sobre un fondo virtual.

- En la región de equilibrio o del flujo uniforme las características hidrodinámicas fueron calculadas con una buena precisión en el modelo numérico utilizando el código CFD, ya que los resultados obtenidos se asemejan a los registrados en el modelo físico.
- Si se incrementa el caudal de descarga en la rápida directamente también se incrementa la velocidad del flujo rasante. Este comportamiento genera un desplazamiento hacia aguas abajo la ubicación del punto de inicio de la autoaireación y la ubicación de la región del flujo uniforme.
- La rápida escalonada operando con el caudal de diseño correspondiente a 41.93 l/s en modelo y equivale a 75 m³/s en prototipo, presenta un porcentaje de disipación de energía del 56%. Este valor resulta bajo debido a la gran altura que desciende el flujo y al caudal de descarga produciendo aceleraciones altas, estas condiciones al pie de la rápida desarrollan un incremento considerable de la energía cinética turbulenta.
- Para toda la gama de caudales simulados, al pie de la rápida escalonada se tiene la formación de un resalto hidráulico rechazado. Por tal motivo se requiere la construcción de un cuenco dissipador de energía con una mayor capacidad o que posea estructuras adicionales que genere fuerzas externas que ayudan a controlar y sostener el resalto hidráulico. El proceso de disipación de energía en el cuenco dissipador se produce debido a las recirculaciones de flujo en la masa de agua que van desde la formación de la macroturbulencia hasta reducirse a microturbulencia o escalas disipativas.
- El avance en la investigación sobre la modelación numérica de la turbulencia en la superficie libre y el mejoramiento de los sub modelos de transporte de aire y emulsiónamiento de agua-aire proporcionan herramientas de trabajo útiles. En la actualidad la línea de investigación acerca de flujos bifásicos es un reto debido a los efectos de escala significativas presentes en el modelo físico y limitaciones en el modelo numérico.

7.3 RECOMENDACIONES

- Es recomendable, iniciado la corrida de una modelación numérica, controlar los parámetros numéricos en la pestaña gestión de la simulación en la ventana principal del programa FLOW-3D. Se puede verificar los parámetros como: el paso temporal más pequeño que condiciona el cálculo del sistema ecuaciones, la estabilidad, la convergencia, el estado de masa, el estado de la energía cinética turbulenta, etc. También se debe tener en cuenta los mensajes de advertencia que aparecen cuando se produce algún error en la resolución del sistema de ecuaciones que describen el movimiento del fluido debido a problemas de mallado o a la no compatibilidad de las condiciones de frontera.
- Es primordial realizar una correcta discretización del contorno sólido mediante un mallado adecuado que represente en lo posible la geometría a modelar especialmente en regiones complejas como curvas o cambios de dirección. Caso contrario la mala representación de la geometría reproducirá cambios bruscos en las gradientes de presión y de la velocidad que no corresponde a la realidad de las características del flujo.
- Se recomienda con el fin de alcanzar más rápido la estabilidad y convergencia numérica de la modelación de una rápida escalonada, ubicar en el tiempo $t=0s$ un volumen de agua inicial en toda la longitud de la rápida. Esta acción ayuda en la disposición de un flujo continuo a lo largo de la rápida escalona sin presencia de separación o rompimiento del flujo y salpicadura excesiva de agua en la superficie libre. La solución no converge fácilmente si se presenta las características de flujo antes mencionadas y genera errores que impiden continuar con el cálculo de la simulación numérica.

- Ejecutar la modelación numérica del flujo al pie de la rápida escalonada, con las posibles modificaciones en el cuenco disipador de energía. Con el fin de analizar la estabilidad del resalto hidráulico para caudales superiores a 25 m³/s.
- Ejecutar la simulación numérica del flujo rasante sobre la rápida escalonada en tres dimensiones (3D). Analizar las variables fluido dinámicas del flujo rasante en el ancho “b” de la rápida escalonada. Y analizar el comportamiento de la recirculación de eje horizontal del flujo en las cavidades de los escalones.

CAPITULO 8

BIBLIOGRAFÍA

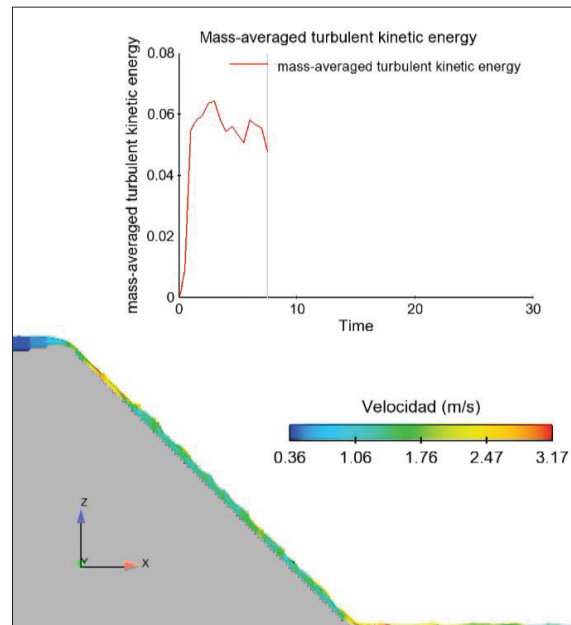
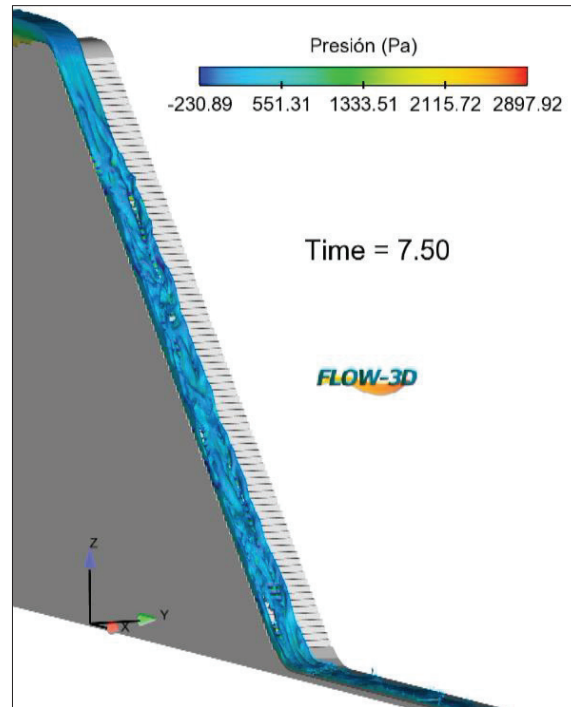
- ARAGUA. (2013). "Modelación numérica y experimental de flujos aire-agua en caídas en colectores.", Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, I. P. Av do Brasil 101 • 1700-066 Lisboa.
- Andrade A., Schulz H., Jahara R., Melo P. (2012), "Stepped Spillways: Theoretical, experimental and numerical studies". Universidad de Sao Paulo., Brazil.
- Bombardelli, F.A., Meireles, I. and Matos, J., (2010), "Laboratory measurement and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways", Environ Fluid Mechanics.
- Castro, Marco. "Análisis Dimensional y Modelación física en Hidráulica". Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador. 50 p.
- CARDESA, J., "Notas sobre Dinámica de fluidos computacional (CFD).", Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- Chanson H., D. B. Bung., J. Matos (2015). "Stepped spillways and cascades". IAHR Monograph. School of Civil Engineering, University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Chanson, H. (1993). "Stepped Spillway Flows and Air Entrainment." Can. JI of Civil Eng., Vol. 20, No. 3, June, pp. 422-435 (ISSN 0315-1468).

- CIERHI., EPN TECH., (2016). “Estudio experimental en modelo físico de las rápidas con perfil escalonado y liso de la quebrada el Batán Fase I y Fase II”. Escuela Politécnica Nacional., Quito Ecuador.
- EPMAPS. (2005). “Informe final. Diseños definitivos para el control de la escorrentía con la prolongación del colector Iñaquito desde la plaza Argentina hasta el río Machángara”. Quito-Ecuador.
- Fernández Oro J. M. (2012)., “Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos”. Barcelona: Reverté.
- Flores A. W., (2015), “Comportamiento del flujo en vertederos escalonados con descarga convergente”. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Flow Science, Inc. (2012). “FLOW 3D 10.1.0 Documentation Release. Manual de Usuario”, Los Alamos National Laboratory. Santa Fe, New México
- Hidalgo, Marcelo., (2007). “Introducción a la teoría de los Modelos Hidráulicos y Aplicaciones básicas”. Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador. 62 p.
- J. Antonio Maza Álvarez. (1984)., “Hidrodinámica, Bases para hidráulica fluvial”.
- Khatsuria, R.M., (2005)., “Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators”. Department of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta.
- Lucio I., Matos J., Meireles I. (2015). “Stepped spillway flow over small embankment dams: some computational experiments”. 15th FLOW-3D European users conference.

- Rendón. R., G., (2011), "Diseño Hidráulico de vertederos escalonados". Instituto Politécnico Nacional., México D.F.
- Sarfaraz, M. and Attari, J. (2011), "Numerical Simulation of Uniform Flow Region over a Steeply Sloping Stepped Spillway", 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
- Shames I. (2005), "Mecánica de Fluidos", McGRAW. HILL, Santa fé de Bogota Colombia.
- Streeter Victor., (2000), "Mecánica de fluidos", Novena edición, Editorial Mc Graw-Hill Interamericana, S. A, Avenida de las América 46ñ41. Santa Fé de Bogotá Colombia.

ANEXOS

ANEXO A

RESULTADOS NUMÉRICOS OBTENIDOS DEL PAQUETE
FLOW-3D.

ANEXO A1

DATOS PROCESADOS PARA EL GRÁFICO DEL PERFIL DE VELOCIDADES DEL FLUJO EN EL ESCALÓN No 70. SIMULACIONES: S0; S1; S2; S3;- S4; S5; S6; S7; S8; S9; S10; S11.

CUADRO 1 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S0 (mesh 5mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s $\rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k- ϵ RNG: TLEN dynamically computed)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso	Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m	-	m/s	m
1	2.54	0.000	6	6.52	0.03536
2	4.29	0.00707	7	6.77	0.04243
3	5.21	0.01414	8	6.92	0.04950
4	5.80	0.02121	9	7.00	0.05657
5	6.21	0.02828	10	7.05	0.06364

CUADRO 2 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S1 (mesh 4mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s $\rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k- ϵ RNG: TLEN dynamically computed)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso	Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m	-	m/s	m
1	2.70	0.000	8	6.55	0.03960
2	3.57	0.00566	9	6.77	0.04525
3	4.26	0.01131	10	6.92	0.05091
4	4.90	0.01697	11	7.01	0.05657
5	5.43	0.02263	12	7.05	0.06223
6	5.86	0.02828	13	7.05	0.06788
7	6.24	0.03394	14	7.08	0.07354

CUADRO 3 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S2 (mesh 3mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s → $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k-ε RNG: TLEN dynamically computed)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso	Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m	-	m/s	m
1	2.09	0.000	16	5.05	0.06364
2	1.93	0.00424	17	5.18	0.06788
3	2.35	0.00849	18	5.30	0.07212
4	2.69	0.01273	19	5.41	0.07637
5	2.97	0.01697	20	5.51	0.08061
6	3.23	0.02121	21	5.60	0.08485
7	3.48	0.02546	22	5.68	0.08910
8	3.70	0.02970	23	5.76	0.09334
9	3.91	0.03394	24	5.83	0.09758
10	4.11	0.03818	25	5.89	0.10182
11	4.29	0.04243	26	5.94	0.10607
12	4.47	0.04667	27	5.98	0.11031
13	4.63	0.05091	28	6.02	0.11455
14	4.78	0.05515	29	6.04	0.11879
15	4.92	0.05940	30	6.06	0.12304
			31	6.06	0.12728

CUADRO 4 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S3 (mesh 2mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s → $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k-ε RNG: TLEN dynamically computed)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso	Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m	-	m/s	m
1	1.37	0.000	26	4.69	0.07071
2	2.50	0.00283	27	4.77	0.07354
3	1.97	0.00566	28	4.84	0.07637
4	2.15	0.00849	29	4.91	0.07920
5	2.32	0.01131	30	4.98	0.08202
6	2.48	0.01414	31	5.04	0.08485
7	2.63	0.01697	32	5.10	0.08768
8	2.77	0.01980	33	5.16	0.09051
9	2.91	0.02263	34	5.22	0.09334

10	3.04	0.02546	35	5.27	0.09617
11	3.17	0.02828	36	5.32	0.09899
12	3.29	0.03111	37	5.37	0.10182
13	3.42	0.03394	38	5.41	0.10465
14	3.53	0.03677	39	5.45	0.10748
15	3.65	0.03960	40	5.49	0.11031
16	3.76	0.04243	41	5.53	0.11314
17	3.87	0.04525	42	5.56	0.11597
18	3.97	0.04808	43	5.59	0.11879
19	4.07	0.05091	44	5.61	0.12162
20	4.17	0.05374	45	5.63	0.12445
21	4.27	0.05657	46	5.65	0.12728
22	4.36	0.05940	47	5.67	0.13011
23	4.44	0.06223	48	5.68	0.13294
24	4.53	0.06505	49	5.69	0.13576
25	4.61	0.06788	50	5.69	0.13859

CUADRO 5 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S4 (mesh 4mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s $\rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k- ϵ RNG: TLEN=7%*d)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso	Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m	-	m/s	m
1	2.5918	0.0000	8	6.7288	0.0396
2	3.5902	0.0057	9	6.9420	0.0453
3	4.4298	0.0113	10	7.0823	0.0509
4	5.1648	0.0170	11	7.1643	0.0566
5	5.7086	0.0226	12	7.2119	0.0622
6	6.1155	0.0283	13	7.2365	0.0679
7	6.4503	0.0339	14	7.2430	0.0735

CUADRO 6 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S5 (mesh 4mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s → $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k- ω : TLEN= dynamically computed)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso	Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m	-	m/s	m
1	1.9408	0.0000	11	4.0581	0.0566
2	2.0664	0.0057	12	4.2543	0.0622
3	2.3539	0.0113	13	4.4452	0.0679
4	2.5994	0.0170	14	4.6282	0.0735
5	2.8172	0.0226	15	4.7994	0.0792
6	3.0308	0.0283	16	4.9522	0.0849
7	3.2425	0.0339	17	5.0750	0.0905
8	3.4511	0.0396	18	5.1601	0.0962
9	3.6562	0.0453	19	5.1996	0.1018
10	3.8585	0.0509			

CUADRO 7 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S6 (mesh 4mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s → $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k- ω : TLEN=7%*d)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso	Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m	-	m/s	m
1	2.3904	0.0000	9	6.7847	0.0453
2	3.1683	0.0057	10	6.9682	0.0509
3	3.9243	0.0113	11	7.1317	0.0566
4	4.6780	0.0170	12	7.2699	0.0622
5	5.3200	0.0226	13	7.3402	0.0679
6	5.8437	0.0283	14	7.3419	0.0735
7	6.2505	0.0339	15	7.3377	0.0792
8	6.5552	0.0396			

CUADRO 8 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S7 (mesh 1mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s → $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, LES)

Rompimiento y salpicadura del flujo, discontinuidad en el flujo rasante

CUADRO 9 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S8 (mesh 5mm, $Q_{\text{MODELO}}=13.97$ l/s → $Q_{\text{PROTOTIPO}}=25$ m³/s, k-ε RNG: TLEN=7%*d)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m
1	0.000	0.000
2	3.584	0.004
3	4.033	0.011
4	4.532	0.018
5	4.802	0.025
6	4.984	0.032

CUADRO 10 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S9 (mesh 5mm, $Q_{\text{MODELO}}=22.36$ l/s → $Q_{\text{PROTOTIPO}}=40$ m³/s, k-ε RNG: TLEN=7%*d)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m
1	0.000	0.000
2	3.840	0.004
3	4.330	0.011
4	4.879	0.018
5	5.190	0.025
6	5.450	0.032
7	5.711	0.039
8	5.750	0.046

CUADRO 11 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S10 (mesh 5mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s → $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k-ε RNG: TLEN=7%*d)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m
1	0.000	0.000
2	4.088	0.004
3	4.708	0.011
4	5.429	0.018
5	5.888	0.025
6	6.149	0.032
7	6.279	0.039
8	6.335	0.046
9	6.350	0.053

CUADRO 12 Resultados numéricos del perfil de velocidades en el escalón No 70, perpendicular al fondo virtual. Simulación S11 (mesh 5mm, $Q_{\text{MODELO}}=41.92$ l/s → $Q_{\text{PROTOTIPO}}=75$ m³/s, k-ε RNG: TLEN=7%*d)

Punto	Velocidad	Profundidad perpendicular al fondo falso
-	m/s	m
1	0.000	0.000
2	4.190	0.004
3	4.902	0.011
4	5.745	0.018
5	6.294	0.025
6	6.639	0.032
7	6.866	0.039
8	7.020	0.046
9	7.132	0.053
10	7.199	0.060
11	7.212	0.067
12	7.230	0.074

ANEXO A2

DATOS PROCESADOS PARA EL GRÁFICO DEL PERFIL DEL FLUJO A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA, SIMULACIONES: S0; S1; S2; S3;- S4; S5; S6; S7; S8; S9; S10; S11.

CUADRO 13 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación S0 (mesh 5mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k-ε RNG: TLEN dynamically computed)

Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.0468	31	0.0408	61	0.0547
2	0.044	32	0.0407	62	0.0581
3	0.0408	33	0.0418	63	0.0581
4	0.0399	34	0.0438	64	0.0571
5	0.0374	35	0.0437	65	0.0647
6	0.0366	36	0.0429	66	0.0589
7	0.0363	37	0.0427	67	0.0686
8	0.0345	38	0.0452	68	0.0666
9	0.0345	39	0.0454	69	0.0647
10	0.0344	40	0.0472	70	0.0663
11	0.0341	41	0.0452	71	0.061
12	0.0346	42	0.0474	72	0.0645
13	0.0363	43	0.0485	73	0.0625
14	0.0355	44	0.0473	74	0.0659
15	0.0355	45	0.0473	75	0.0673
16	0.0355	46	0.0484	76	0.069
17	0.0346	47	0.0474	77	0.0871
18	0.0364	48	0.049	78	0.0826
19	0.0364	49	0.0486	79	0.0689
20	0.0364	50	0.051	80	0.0767
21	0.0364	51	0.052	81	0.0591
22	0.0364	52	0.056	82	0.083
23	0.0365	53	0.0545	83	0.0865
24	0.0365	54	0.0555	84	0.0727
25	0.0367	55	0.0582	85	0.0764
26	0.0371	56	0.0586	86	0.0696
27	0.0368	57	0.0572		
28	0.0376	58	0.056		
29	0.0401	59	0.0563		
30	0.0408	60	0.06		

CUADRO 14 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación. S1 (mesh 4mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k- ϵ RNG: TLEN dynamically computed)

Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.045	30	0.05	59	0.067
2	0.0444	31	0.0506	60	0.0747
3	0.0409	32	0.0526	61	0.0668
4	0.039	33	0.0527	62	0.0685
5	0.0375	34	0.0529	63	0.0696
6	0.0366	35	0.0539	64	0.0711
7	0.0365	36	0.0554	65	0.0709
8	0.0361	37	0.0557	66	0.075
9	0.0362	38	0.0557	67	0.0694
10	0.036	39	0.0564	68	0.0723
11	0.0362	40	0.0568	69	0.0759
12	0.0361	41	0.0569	70	0.0721
13	0.0368	42	0.0586	71	0.0746
14	0.037	43	0.0584	72	0.0779
15	0.0387	44	0.061	73	0.0757
16	0.0387	45	0.0591	74	0.0751
17	0.0394	46	0.0615	75	0.074
18	0.0396	47	0.0619	76	0.0671
19	0.0415	48	0.0619	77	0.0785
20	0.0415	49	0.0641	78	0.0804
21	0.042	50	0.0635	79	0.0761
22	0.0442	51	0.0651	80	0.0712
23	0.0443	52	0.064	81	0.075
24	0.0445	53	0.0669	82	0.0786
25	0.045	54	0.0663	83	0.0812
26	0.047	55	0.0685	84	0.0785
27	0.0478	56	0.0669		
28	0.0482	57	0.0669		
29	0.0486	58	0.0685		

CUADRO 15 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación S2 (mesh 3mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k- ϵ RNG: TLEN dynamically computed)

Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.0479	29	0.0589	57	0.1136
2	0.0448	30	0.0612	58	0.1145
3	0.0418	31	0.0648	59	0.1161
4	0.0398	32	0.0659	60	0.1162
5	0.0375	33	0.0678	61	0.1179
6	0.0362	34	0.0708	62	0.1187
7	0.0372	35	0.0735	63	0.12
8	0.0355	36	0.0751	64	0.1202
9	0.0355	37	0.0779	65	0.1224
10	0.0361	38	0.0801	66	0.1221
11	0.0358	39	0.0821	67	0.1224
12	0.0362	40	0.0849	68	0.1234
13	0.0377	41	0.087	69	0.1242
14	0.038	42	0.0889	70	0.1245
15	0.0397	43	0.0915	71	0.1252
16	0.0415	44	0.0937	72	0.1263
17	0.0415	45	0.0951	73	0.1264
18	0.0419	46	0.0972	74	0.127
19	0.0439	47	0.0994	75	0.1284
20	0.0446	48	0.1009	76	0.1285
21	0.0461	49	0.1031	77	0.1289
22	0.0481	50	0.1043	78	0.1289
23	0.0488	51	0.1056	79	0.1306
24	0.0504	52	0.1073	80	0.1309
25	0.0526	53	0.1085	81	0.1309
26	0.0531	54	0.1096	82	0.1327
27	0.0548	55	0.1116	83	0.1334
28	0.0585	56	0.1124	84	0.1351

CUADRO 16 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación S3 (mesh 2mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k- ϵ RNG: TLEN dynamically computed)

Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.0483	30	0.0793	59	0.1293
2	0.0455	31	0.0807	60	0.1305
3	0.0426	32	0.0842	61	0.1304
4	0.0402	33	0.0866	62	0.1317
5	0.0385	34	0.0892	63	0.1328
6	0.0372	35	0.0906	64	0.1331
7	0.0361	36	0.0937	65	0.1333
8	0.036	37	0.0968	66	0.1345
9	0.0362	38	0.0994	67	0.1359
10	0.0369	39	0.0997	68	0.1359
11	0.0369	40	0.1023	69	0.1373
12	0.0369	41	0.1035	70	0.1373
13	0.0374	42	0.1064	71	0.1391
14	0.0385	43	0.109	72	0.1391
15	0.0398	44	0.1106	73	0.141
16	0.0413	45	0.1112	74	0.14
17	0.0433	46	0.1119	75	0.1409
18	0.0445	47	0.1147	76	0.1425
19	0.0471	48	0.1167	77	0.1428
20	0.0497	49	0.1177	78	0.1456
21	0.0525	50	0.1179	79	0.1443
22	0.0542	51	0.1191	80	0.1442
23	0.0571	52	0.1218	81	0.1469
24	0.0609	53	0.1221	82	0.1458
25	0.0638	54	0.1246	83	0.1487
26	0.0668	55	0.1249	84	0.1518
27	0.0694	56	0.126	85	0.152
28	0.072	57	0.1271		
29	0.0752	58	0.1274		

CUADRO 17 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación. Simulación S4 (mesh 4mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s → $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k-ε RNG: TLEN=7%*d)

Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.0449	29	0.0471	57	0.0637
2	0.0428	30	0.0491	58	0.0652
3	0.04	31	0.0485	59	0.063
4	0.039	32	0.0498	60	0.0612
5	0.0375	33	0.0498	61	0.0663
6	0.0367	34	0.0499	62	0.0636
7	0.0365	35	0.0499	63	0.065
8	0.0361	36	0.0501	64	0.0636
9	0.0362	37	0.0526	65	0.0665
10	0.0359	38	0.0525	66	0.0651
11	0.036	39	0.0527	67	0.0684
12	0.0359	40	0.0529	68	0.069
13	0.0362	41	0.0532	69	0.0724
14	0.0363	42	0.0553	70	0.0682
15	0.0365	43	0.0556	71	0.0654
16	0.0369	44	0.0556	72	0.0635
17	0.0388	45	0.0554	73	0.0782
18	0.0387	46	0.0561	74	0.0684
19	0.0397	47	0.0582	75	0.0761
20	0.0397	48	0.0587	76	0.0676
21	0.0416	49	0.0564	77	0.0676
22	0.0418	50	0.0581	78	0.0676
23	0.0423	51	0.0583	79	0.0821
24	0.0424	52	0.0601	80	0.0677
25	0.0442	53	0.0587	81	0.064
26	0.0442	54	0.0617	82	0.0739
27	0.0449	55	0.061	83	0.067
28	0.0456	56	0.0623	84	0.0629
				85	0.0744

CUADRO 18 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación. Simulación S5 (mesh 4mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, $k-\omega$: TLEN= dynamically computed)

Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.0473	29	0.0748	57	0.0896
2	0.0449	30	0.0761	58	0.0904
3	0.0421	31	0.0763	59	0.092
4	0.0416	32	0.0781	60	0.0923
5	0.0401	33	0.0782	61	0.093
6	0.0416	34	0.0786	62	0.0947
7	0.0419	35	0.0791	63	0.095
8	0.0424	36	0.0808	64	0.0957
9	0.0446	37	0.0808	65	0.0975
10	0.0457	38	0.0808	66	0.0977
11	0.0486	39	0.0808	67	0.0982
12	0.0509	40	0.0813	68	0.0989
13	0.0541	41	0.0817	69	0.1003
14	0.0562	42	0.082	70	0.1004
15	0.0587	43	0.0822	71	0.1004
16	0.0612	44	0.0836	72	0.1004
17	0.0624	45	0.0836	73	0.1004
18	0.0642	46	0.0837	74	0.1003
19	0.0656	47	0.0839	75	0.1003
20	0.0666	48	0.0843	76	0.0987
21	0.0678	49	0.0847	77	0.0987
22	0.0689	50	0.0863	78	0.0983
23	0.0696	51	0.0864	79	0.098
24	0.072	52	0.0865	80	0.0978
25	0.0713	53	0.0868	81	0.0976
26	0.073	54	0.0874	82	0.0974
27	0.0723	55	0.0891	83	0.0966
28	0.0753	56	0.0892	84	0.0974
				85	0.0982

CUADRO 19 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación. Simulación S6 (mesh 4mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, $k-\omega$: TLEN=7%*d)

Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.0457	29	0.0611	57	0.0778
2	0.0446	30	0.0605	58	0.075
3	0.0418	31	0.0613	59	0.0704
4	0.04	32	0.0622	60	0.0722
5	0.0392	33	0.0639	61	0.0833
6	0.0388	34	0.0626	62	0.0781
7	0.0391	35	0.0623	63	0.0705
8	0.0397	36	0.0641	64	0.0808
9	0.04	37	0.065	65	0.0779
10	0.0416	38	0.0662	66	0.0859
11	0.0427	39	0.0648	67	0.0851
12	0.0445	40	0.0661	68	0.0749
13	0.0456	41	0.0669	69	0.0745
14	0.0472	42	0.0664	70	0.074
15	0.0483	43	0.0666	71	0.0793
16	0.05	44	0.0666	72	0.0819
17	0.0506	45	0.0669	73	0.0765
18	0.0528	46	0.0675	74	0.0741
19	0.0528	47	0.0691	75	0.0746
20	0.0534	48	0.0692	76	0.0729
21	0.0543	49	0.0688	77	0.0709
22	0.0555	50	0.0713	78	0.0833
23	0.0556	51	0.0696	79	0.0882
24	0.0566	52	0.0693	80	0.0852
25	0.0565	53	0.0709	81	0.0886
26	0.0584	54	0.0728	82	0.0862
27	0.0587	55	0.0756	83	0.0811
28	0.0595	56	0.0717	84	0.0814
				85	0.1042
				86	0.1041

CUADRO 20 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación. Simulación S7 (mesh 1mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, LES)

Rompimiento y salpicadura del flujo, discontinuidad en el flujo rasante

CUADRO 21 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación. Simulación S8 (mesh 5mm, $Q_{\text{MODELO}}=13.97$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=25$ m³/s, k- ϵ RNG: TLEN=7%*d)

Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.0266	30	0.0275	59	0.0285
2	0.0266	31	0.027	60	0.0287
3	0.0266	32	0.0265	61	0.0286
4	0.0261	33	0.027	62	0.0286
5	0.0265	34	0.0275	63	0.0287
6	0.0263	35	0.028	64	0.029
7	0.0264	36	0.027	65	0.0305
8	0.0265	37	0.028	66	0.0308
9	0.0267	38	0.0252	67	0.031
10	0.0266	39	0.026	68	0.0315
11	0.0266	40	0.028	69	0.033
12	0.0284	41	0.027	70	0.032
13	0.0266	42	0.026	71	0.0321
14	0.0284	43	0.0265	72	0.0321
15	0.0266	44	0.027	73	0.0322
16	0.0272	45	0.029	74	0.0322
17	0.0266	46	0.028	75	0.0322
18	0.027	47	0.027	76	0.0325
19	0.0284	48	0.0292	77	0.033
20	0.0266	49	0.027	78	0.0335
21	0.0268	50	0.028	79	0.034
22	0.0268	51	0.029	80	0.035
23	0.0284	52	0.029	81	0.0352
24	0.0266	53	0.0289	82	0.0357
25	0.0266	54	0.0288	83	0.0359
26	0.0266	55	0.0288	84	0.036
27	0.0266	56	0.027	85	0.0361
28	0.0267	57	0.0275		
29	0.0275	58	0.028		

CUADRO 22 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación. Simulación S9 (mesh 5mm, $Q_{\text{MODELO}}=22.36$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=40$ m³/s, k- ϵ RNG: TLEN=7%*d)

Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.0407	30	0.0337	59	0.039
2	0.0407	31	0.0337	60	0.0395
3	0.039398	32	0.0337	61	0.038
4	0.0395	33	0.0338	62	0.0385
5	0.0388	34	0.034	63	0.039
6	0.0385	35	0.0338	64	0.0395
7	0.0375	36	0.0341	65	0.04
8	0.0375	37	0.035	66	0.0416
9	0.0372	38	0.034	67	0.0407
10	0.0371	39	0.033	68	0.0407
11	0.036	40	0.035	69	0.039
12	0.0361	41	0.034	70	0.0407
13	0.0355	42	0.0348	71	0.041
14	0.035	43	0.0345	72	0.0402
15	0.034	44	0.033	73	0.0407
16	0.034	45	0.035	74	0.041
17	0.0338	46	0.0354	75	0.039
18	0.0336	47	0.033	76	0.0442
19	0.0336	48	0.0373	77	0.0424
20	0.0337	49	0.036	78	0.041
21	0.0337	50	0.0373	79	0.0427
22	0.0339	51	0.0374	80	0.0429
23	0.0337	52	0.036	81	0.043
24	0.0337	53	0.0375	82	0.045
25	0.0337	54	0.036	83	0.041
26	0.0337	55	0.0375	84	0.043
27	0.0337	56	0.036	85	0.0456
28	0.0337	57	0.038		
29	0.0337	58	0.038		

CUADRO 23 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación. Simulación S10 (mesh 5mm, $Q_{\text{MODELO}}=27.95$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=50$ m³/s, k- ϵ RNG: TLEN=7%*d)

Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.0495000	29	0.0355000	57	0.0415000
2	0.0495000	30	0.0355000	58	0.0435000
3	0.0480000	31	0.0355000	59	0.0429143
4	0.0470000	32	0.0355000	60	0.0433381
5	0.0460000	33	0.0355000	61	0.0437619
6	0.0450000	34	0.0354000	62	0.0448000
7	0.0424000	35	0.0354000	63	0.0446095
8	0.0421000	36	0.0355000	64	0.0450333
9	0.0420000	37	0.0356000	65	0.0440000
10	0.0410000	38	0.0355000	66	0.0458810
11	0.0410000	39	0.0355000	67	0.0463048
12	0.0400000	40	0.0355000	68	0.0440000
13	0.0389000	41	0.0356000	69	0.0471524
14	0.0389000	42	0.0356000	70	0.0475762
15	0.0389000	43	0.0369000	71	0.0480000
16	0.0389000	44	0.0370000	72	0.0500000
17	0.0389000	45	0.0380000	73	0.0470000
18	0.0389000	46	0.0385000	74	0.0492714
19	0.0400000	47	0.0390000	75	0.0496952
20	0.0375000	48	0.0390000	76	0.0530000
21	0.0370000	49	0.0391000	77	0.0505429
22	0.0370000	50	0.0391000	78	0.0509667
23	0.0356000	51	0.0395238	79	0.0480000
24	0.0355000	52	0.0399476	80	0.0518143
25	0.0355000	53	0.0403714	81	0.0522381
26	0.0354000	54	0.0407952	82	0.0526619
27	0.0357000	55	0.0412190	83	0.0510000
28	0.0354000	56	0.0416429	84	0.0535095
				85	0.0550000

CUADRO 24 Resultados numéricos del perfil del flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada. Simulación. Simulación S11 (mesh 5mm, $Q_{\text{MODELO}}=41.92$ l/s \rightarrow $Q_{\text{PROTOTIPO}}=75$ m³/s, k- ϵ RNG: TLEN=7%*d)

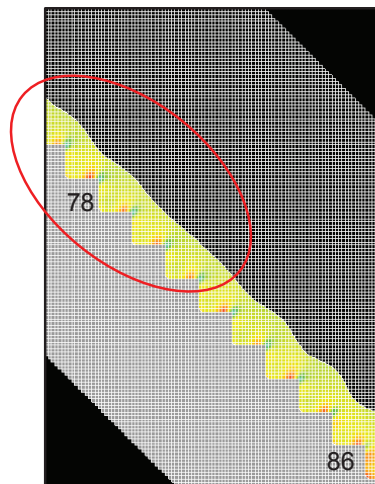
Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso	Escalón	Profundidad perpendicular al fondo falso
No	m	No	m	No	m
1	0.0657	29	0.0436	57	0.0564
2	0.0624	30	0.0442	58	0.0593
3	0.0588	31	0.0443	59	0.059
4	0.0558	32	0.0443	60	0.0584
5	0.0545	33	0.0443	61	0.0591
6	0.0517	34	0.0442	62	0.0584
7	0.0502	35	0.0445	63	0.0592
8	0.0484	36	0.0447	64	0.0594
9	0.0478	37	0.0448	65	0.0619
10	0.0457	38	0.0454	66	0.0599
11	0.0452	39	0.0477	67	0.0619
12	0.0448	40	0.0474	68	0.0636
13	0.0446	41	0.0482	69	0.065
14	0.0446	42	0.0486	70	0.0673
15	0.0443	43	0.0482	71	0.0689
16	0.0442	44	0.0478	72	0.0687
17	0.0442	45	0.0513	73	0.069
18	0.0442	46	0.0507	74	0.0633
19	0.0442	47	0.0513	75	0.0621
20	0.0442	48	0.0513	76	0.0626
21	0.0424	49	0.0514	77	0.0698
22	0.0442	50	0.0545	78	0.0672
23	0.0431	51	0.0551	79	0.0704
24	0.0442	52	0.053	80	0.0658
25	0.0442	53	0.0545	81	0.079
26	0.0442	54	0.0531	82	0.0684
27	0.0442	55	0.0558	83	0.0689
28	0.0442	56	0.0586	84	0.0783
				85	0.0672

ANEXO A3

DATOS DE LAS VARIABLES HIDRODINÁMICAS ENTREGADOS DIRECTAMENTE DEL PROGRAMA FLOW-3D PARA LAS SIMULACIONES: S8; S9; S10; S11.

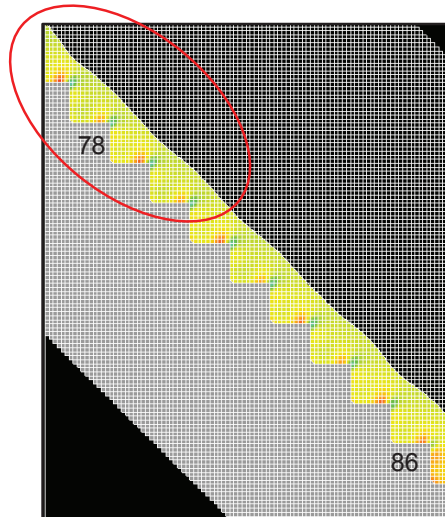
CUADRO 25. Simulación S8 $Q_{\text{MODELO}}=13.97 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}=25 \text{ m}^3/\text{s}$. Resultados numéricos: Presión, energía turbulenta, Número de Froude, energía hidráulica total, concentración de aire.

x	y	z	Presión	Energía turbulenta	Froude	Energía hidráulica total	Fracción de volumen concentración de aire
m	m	m	Pa	J/kg	-	m	-
5.587	0.123	0.724	107.925	0.156	3.910	1.518	0.673
5.592	0.123	0.724	104.100	0.151	4.179	1.572	0.674
5.597	0.123	0.724	114.089	0.136	4.459	1.626	0.675
5.602	0.123	0.724	124.769	0.119	4.771	1.687	0.675
5.607	0.123	0.724	124.927	0.103	5.152	1.767	0.675
5.612	0.123	0.724	111.267	0.088	5.626	1.874	0.676
5.617	0.123	0.724	89.635	0.076	3.082	1.324	0.676
5.622	0.123	0.724	70.973	0.066	3.088	1.310	0.677
5.627	0.123	0.724	61.663	0.059	3.285	1.350	0.679
5.632	0.123	0.724	59.563	0.053	3.550	1.413	0.681
5.637	0.123	0.724	53.241	0.050	3.846	1.486	0.685
5.642	0.123	0.724	40.998	0.047	4.172	1.569	0.688
5.647	0.123	0.724	-14.287	0.044	4.547	1.621	0.691
5.652	0.123	0.724	47.323	0.042	4.951	1.708	0.696



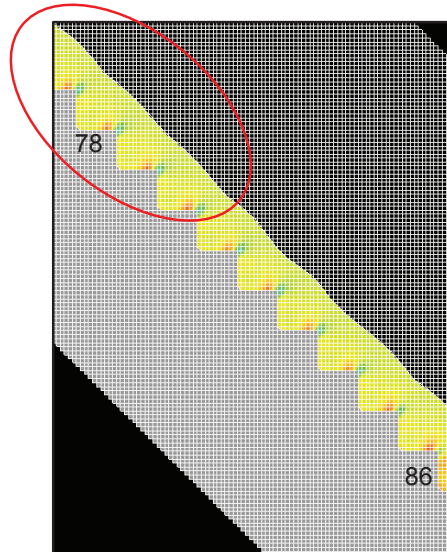
CUADRO 26. Simulación S9. $Q_{\text{MODELO}}=22.36 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}=40 \text{ m}^3/\text{s}$. Resultados numéricos: Presión, energía turbulenta, Número de Froude, energía hidráulica total, concentración de aire.

x	y	z	Presión	Energía turbulenta	Froude	Energía hidráulica total	Fracción de volumen concentración de aire
m	m	m	Pa	J/kg	-	m	-
5.587	0.123	0.724	322.429	0.126	3.844	1.451	0.433
5.592	0.123	0.724	344.481	0.118	4.186	1.527	0.429
5.597	0.123	0.724	388.142	0.105	4.571	1.613	0.426
5.602	0.123	0.724	424.145	0.091	5.052	1.671	0.424
5.607	0.123	0.724	428.620	0.079	5.617	1.788	0.423
5.612	0.123	0.724	394.707	0.068	6.277	1.940	0.423
5.617	0.123	0.724	314.464	0.060	3.174	1.268	0.423
5.622	0.123	0.724	224.828	0.053	3.153	1.244	0.423
5.627	0.123	0.724	110.211	0.048	3.341	1.277	0.424
5.632	0.123	0.724	42.960	0.044	3.592	1.317	0.424
5.637	0.123	0.724	-35.699	0.040	3.879	1.371	0.425
5.642	0.123	0.724	93.936	0.038	4.196	1.431	0.428
5.647	0.123	0.724	-37.373	0.036	4.502	1.537	0.429
5.652	0.123	0.724	-27.655	0.035	4.859	1.607	0.431



CUADRO 27. Simulación S10. $Q_{\text{MODELO}}=27.95 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}=50 \text{ m}^3/\text{s}$.
Resultados numéricos: Presión, energía turbulenta, Número de Froude, energía hidráulica total, concentración de aire.

x	y	z	Presión	Energía turbulenta	Froude	Energía hidráulica total	Fracción de volumen concentración de aire
m	m	m	Pa	J/kg	-	m	-
5.587	0.123	0.724	207.540	0.134	4.331	1.646	0.376
5.592	0.123	0.724	204.295	0.127	4.657	1.708	0.377
5.597	0.123	0.724	226.539	0.114	5.006	1.784	0.381
5.602	0.123	0.724	246.962	0.099	5.386	1.887	0.387
5.607	0.123	0.724	242.469	0.086	5.868	1.981	0.395
5.612	0.123	0.724	207.230	0.074	6.464	2.132	0.406
5.617	0.123	0.724	155.547	0.064	3.408	1.385	0.421
5.622	0.123	0.724	109.079	0.056	3.438	1.377	0.439
5.627	0.123	0.724	76.196	0.049	3.695	1.434	0.459
5.632	0.123	0.724	53.146	0.044	4.019	1.514	0.480
5.637	0.123	0.724	28.248	0.040	4.362	1.598	0.502
5.642	0.123	0.724	-43.830	0.037	4.710	1.680	0.519
5.647	0.123	0.724	4.393	0.036	5.070	1.775	0.533



CUADRO 28. Simulación S11. $Q_{\text{MODELO}}=41.92 \text{ l/s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}}=75 \text{ m}^3/\text{s}$.
Resultados numéricos: Presión, energía turbulenta, Número de Froude, energía hidráulica total, concentración de aire.

x	y	z	Presión	Energía turbulenta	Froude	Energía hidráulica total	Fracción de volumen concentración de aire
m	m	m	Pa	J/kg	-	m	-
5.587	0.123	0.724	234.235	0.174	4.676	2.070	0.453
5.592	0.123	0.724	234.341	0.170	4.970	2.165	0.458
5.597	0.123	0.724	256.969	0.155	5.276	2.263	0.464
5.602	0.123	0.724	275.427	0.137	5.612	2.372	0.471
5.607	0.123	0.724	268.881	0.120	5.997	2.511	0.479
5.612	0.123	0.724	234.768	0.105	6.437	2.686	0.486
5.617	0.123	0.724	188.513	0.092	3.903	1.811	0.493
5.622	0.123	0.724	151.618	0.081	3.943	1.831	0.498
5.627	0.123	0.724	131.807	0.072	4.152	1.897	0.503
5.632	0.123	0.724	131.638	0.064	4.411	1.988	0.507
5.637	0.123	0.724	108.350	0.058	4.693	2.100	0.517
5.642	0.123	0.724	81.461	0.052	4.979	2.224	0.543
5.647	0.123	0.724	66.723	0.047	5.257	2.353	0.598
5.652	0.123	0.724	49.083	0.043	5.551	2.457	0.657
5.657	0.123	0.724	29.994	0.039	5.876	2.573	0.704
5.662	0.123	0.724	-6.448	0.037	6.237	2.721	0.718
5.667	0.123	0.724	8.111	0.035	3.926	1.869	0.688
5.672	0.123	0.724	21.979	0.033	3.951	1.877	0.630
5.677	0.123	0.724	-32.879	0.033	4.135	1.901	0.614



ANEXO B

PRUEBAS DE VISUALIZACIÓN Y REGISTRO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO PARA CAUDALES DE OPERACIÓN (MAYORES A DE 25 m³/s) EN EL SISTEMA DE OBRAS QUE CONFORMA LA RAPIDA ESCALONADA.



Como parte de trabajo de investigación se realiza el registro fotográfico y de video de las características más importantes del comportamiento del flujo para caudales altos de operación del sistema de obras denominado rápida escalonada:

- cuenco de disipación de energía antes de la rápida conformado por dos cámaras.
- rápida escalonada conformada por dos cámaras, Cada una de ellas incluye el cimacio y los escalones que descienden una altura total de 100 m en prototipo con un ángulo de 45 grados con la horizontal.
- cuenco de disipación de energía residual al pie de la rápida escalonada, conformado por dos cámaras.

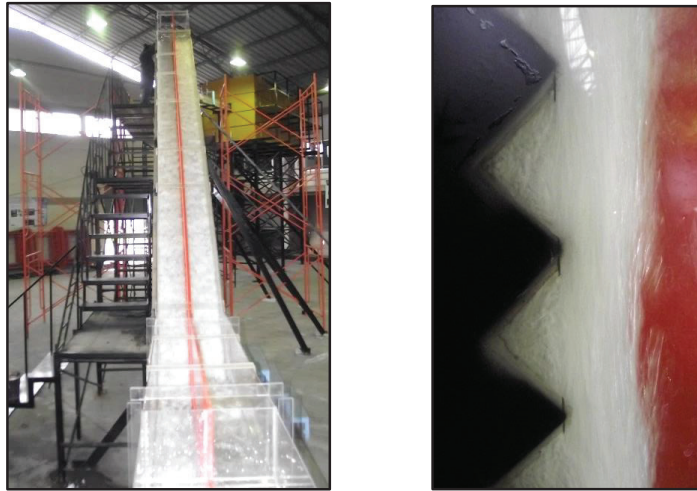
A continuación se muestran una serie de fotografías que describen el comportamiento del flujo en el cuenco disipador de energía ubicado aguas arriba y al pie de la rápida escalonada así como las características del flujo en la propia rápida escalonada.

PRUEBA 1- SIMULACIÓN S8: $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 25.0 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow Q_{\text{MODELO}} = 13.97 \text{ l/s}$.

Fotografía 1 Perfil del flujo en la transición de entrada y en el cuenco de disipación de energía, aguas arriba de la rápida escalonada. Se observa la formación del resalto hidráulico para el caudal de operación cercano a $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa la calidad del flujo a la salida del cuenco caracterizado por ondulaciones al inicio de la rápida.



Fotografía 2 Se observa la formación del flujo rasante en las dos cámaras para el caudal total de operación de $50 \text{ m}^3/\text{s}$. En cada cámara circula aproximadamente un caudal cercano a los $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que el flujo rasante no se inicia en la misma abscisa para las dos cámaras. Aguas abajo de la sección donde se forma el flujo rasante, se observa que existe fuerte aireación del flujo. La coloración del flujo es blanquecina como resultado de la intensa autoaireación, característica del flujo rasante que llega hasta el pie de la rápida.



Fotografía 3 Vista lateral del comportamiento del flujo al pie de la rápida escalonada. Se observa que en el cuenco de disipación construido al pie de esta obra no se logra estabilizar el resalto. El flujo ingresa al cuenco con alta velocidad, el resalto se rechaza para el caudal total de operación de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir en cada cámara circulan aproximadamente $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que a la salida del cuenco el flujo de alta velocidad es deflectado por el chaflán y choca contra la tapa del canal de salida. El comportamiento observado no es admisible.



PRUEBA 2- SIMULACIÓN S9: $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 40.0 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow Q_{\text{MODELO}} = 22.36 \text{ l/s}$.

Fotografía 4 Perfil del flujo en la transición de entrada y en el cuenco de disipación de energía, aguas arriba de la rápida escalonada. Se observa la formación del resalto hidráulico para el caudal de operación cercano a $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa la calidad del flujo a la salida del cuenco caracterizado por ondulaciones al inicio de la rápida.



Fotografía 5 Se observa la formación del flujo rasante en las dos cámaras para el caudal total de operación de $80 \text{ m}^3/\text{s}$. En cada cámara circula aproximadamente un caudal cercano a los $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que el flujo rasante no se inicia en la misma abscisa para las dos cámaras. Aguas abajo de la sección donde se forma el flujo rasante, se observa que existe fuerte aireación del flujo. La coloración del flujo es blanquecina como resultado de la intensa autoaereación, característica del flujo rasante que llega hasta el pie de la rápida.

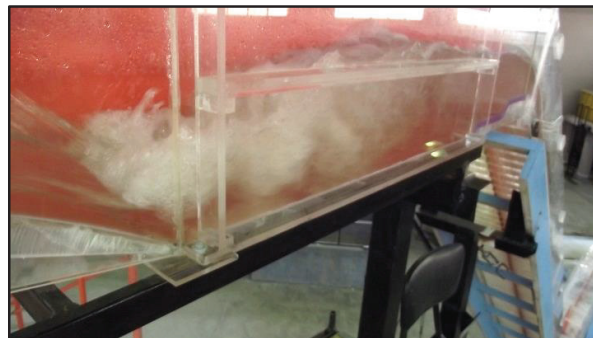


Fotografía 6 Vista lateral del comportamiento del flujo al pie de la rápida escalonada. Se observa que el cuenco de disipación construido al pie de la rápida no logra estabilizar el resalto. El flujo ingresa al cuenco con alta velocidad, el resalto se rechaza para el caudal total de operación de $80\text{m}^3/\text{s}$, es decir en cada cámara circulan aproximadamente $40\text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que a la salida del cuenco el flujo de alta velocidad es deflectado por el chaflán y choca contra la tapa del canal de salida. El comportamiento observado no es admisible.

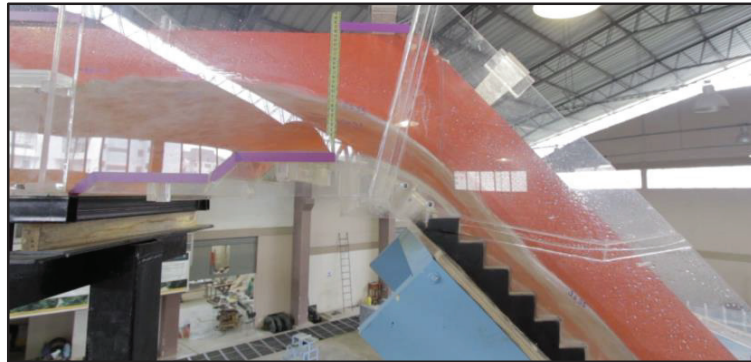


PRUEBA 3- SIMULACIÓN S10: $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 50\text{ m}^3/\text{s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}} = 27.95\text{ l/s}$.

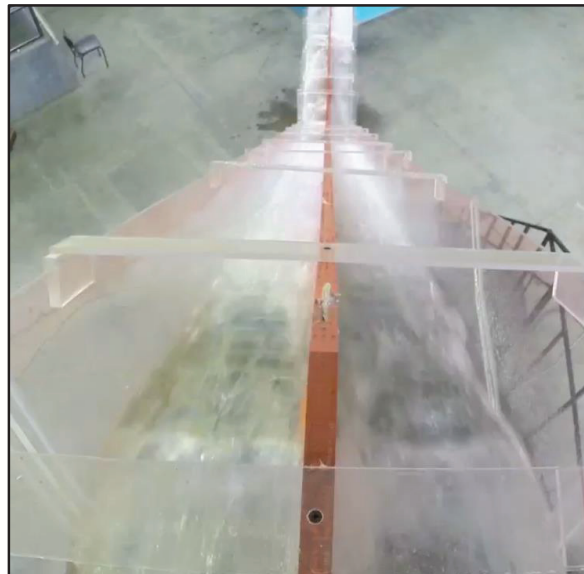
Fotografía 7 Perfil del flujo en la transición de entrada y en el cuenco de disipación de energía, aguas arriba de la rápida escalonada. Se observa la formación del resalto hidráulico para el caudal de operación cercano a $50\text{ m}^3/\text{s}$. Se observa la calidad del flujo a la salida del cuenco caracterizado por ondulaciones fuertes al inicio de la rápida.



Fotografía 8 Perfil del flujo en la curva que une el cuenco de disipación de energía y la rápida escalonada que se desarrolla con una inclinación de 45° . Se observa que no existe separación de flujo. No se presenta el flujo rasante en los primeros escalones. Se observa un perfil de flujo algo ondulado sobre los primeros escalones de la rápida.



Fotografía 9 Se observa la formación del flujo rasante en las dos cámaras para el caudal total de operación de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. En cada cámara circula aproximadamente un caudal cercano a los $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que el flujo rasante no se inicia en la misma abscisa para las dos cámaras. Aguas abajo de la sección donde se forma el flujo rasante, se observa que existe fuerte aireación del flujo. La coloración del flujo es blanquecina como resultado de la intensa autoaireación, característica del flujo rasante que llega hasta el pie de la rápida.



Fotografía 10 Vista lateral del comportamiento del flujo al pie de la rápida escalonada. Se observa que en el cuenco de disipación construido al pie de esta obra no se logra estabilizar el resalto. El flujo ingresa al cuenco con alta velocidad, el resalto se rechaza para el caudal total de operación de $100\text{ m}^3/\text{s}$, es decir en cada cámara circulan aproximadamente $50\text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que a la salida del cuenco el flujo de alta velocidad es deflectado por el chaflán y choca contra la tapa del canal de salida. El comportamiento observado no es admisible.

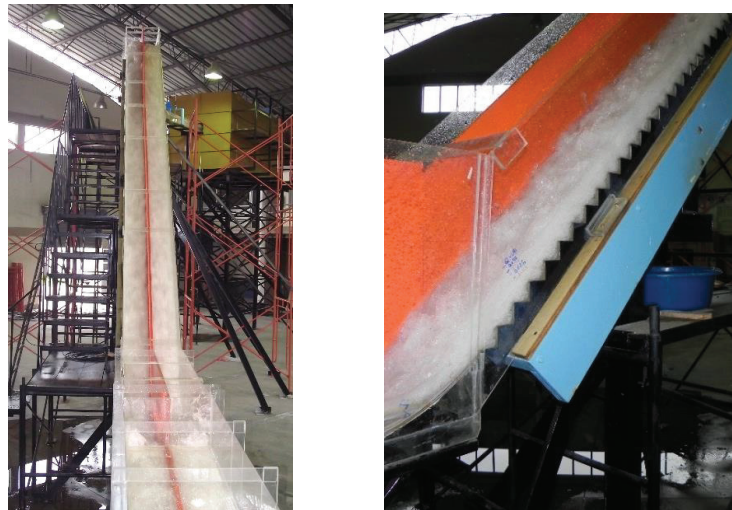


PRUEBA 4 - SIMULACIÓN S11: $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 75\text{ m}^3/\text{s} \rightarrow Q_{\text{PROTOTIPO}} = 41.92\text{ l/s}$.

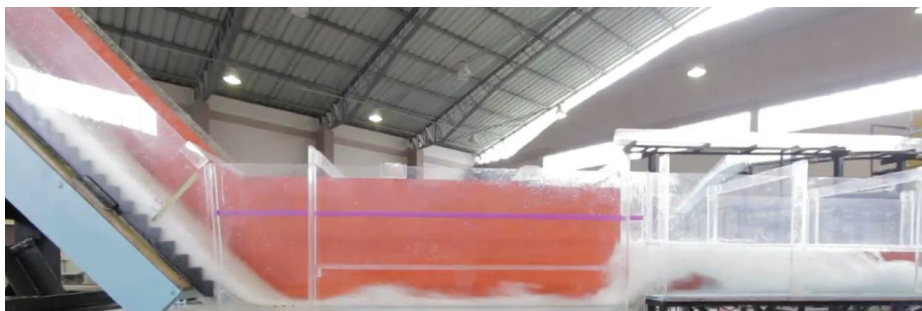
Fotografía 11 Perfil del flujo en la transición de entrada y en el cuenco de disipación de energía, aguas arriba de la rápida escalonada. Se observa la formación del resalto hidráulico para el caudal de operación cercano a $75\text{ m}^3/\text{s}$. Se observa la calidad del flujo a la salida del cuenco caracterizado por ondulaciones fuertes al inicio de la rápida.



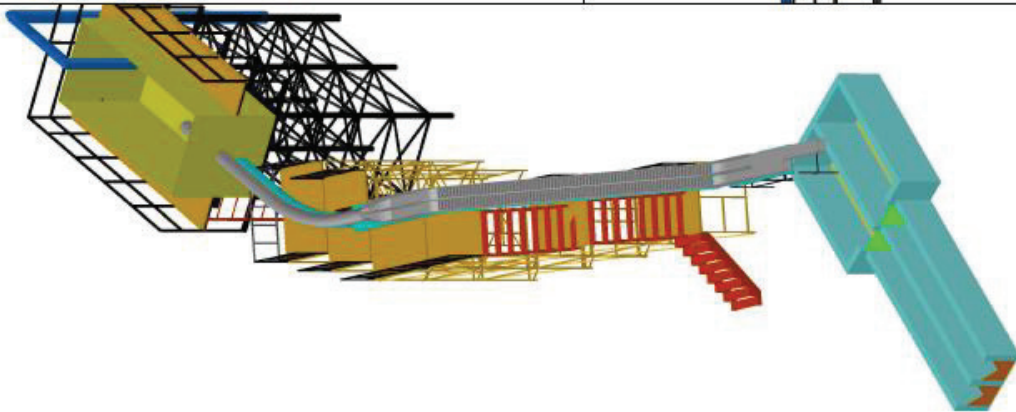
Fotografía 12 Se observa la formación del flujo rasante en las dos cámaras para el caudal total de operación de $150 \text{ m}^3/\text{s}$. En cada cámara circula aproximadamente un caudal cercano a los $75 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que el flujo rasante no se inicia en la misma abscisa para las dos cámaras. Aguas abajo de la sección donde se forma el flujo rasante, se observa que existe fuerte aireación del flujo. La coloración del flujo es blanquecina como resultado de la intensa autoaireación, característica del flujo rasante que llega hasta el pie de la rápida



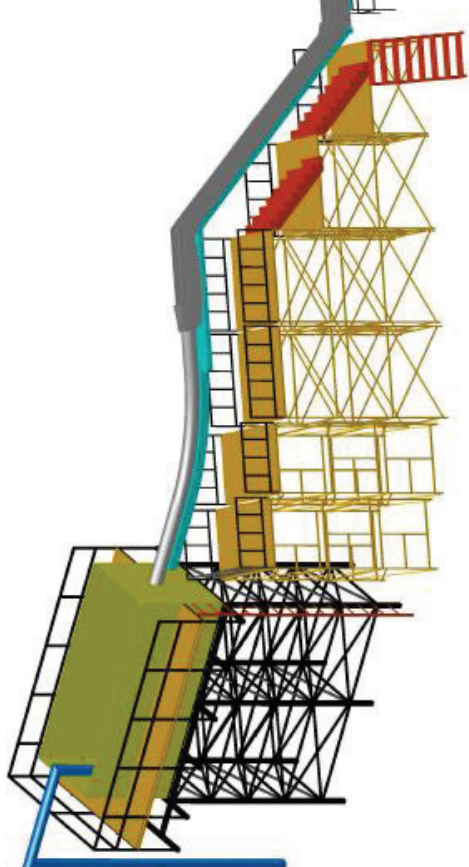
Fotografía 13 Vista lateral del comportamiento del flujo al pie de la rápida escalonada. Se observa que en el cuenco de disipación construido al pie de esta obra no se logra estabilizar el resalto. El flujo ingresa al cuenco con alta velocidad, el resalto se rechaza para el caudal total de operación de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir en cada cámara circulan aproximadamente $75 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que a la salida del cuenco el flujo de alta velocidad es deflectado por el chaflán y choca contra la tapa del canal de salida. El comportamiento observado no es admisible.



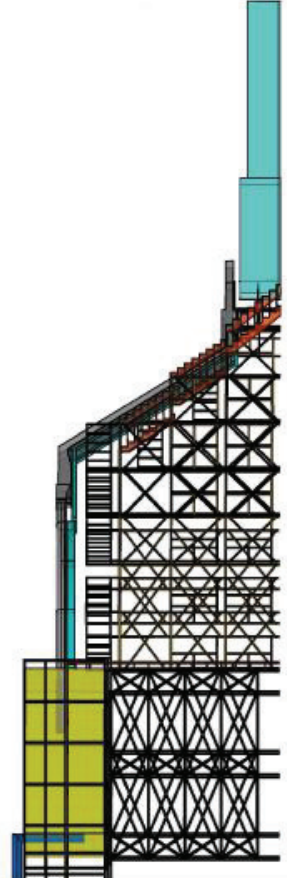
ANEXO C
PLANOS



VISTA SUPERIOR
ESCALA: 1:125



VISTA SUPERIOR DEL MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
ESCALA: 1:100



PERFIL DE LA RÁPIDA ESCALONADA
ESCALA: 1:125

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HUMANOS MODELO NUMÉRICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA EL BAYAN			
RÁPIDA ESCALONADA ESCALA 1:20 VISTA EN PERSPECTIVA DE LA RÁPIDA ESCALONADA 3D			
PROYECTO:	UBICACIÓN:	FECHA:	ESCALA:
2018-04-13	QUITO, GUAYAS	15/04/2018	1:20
Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	No. Límite:
Codege-Pinar	MFRS-PH-CI	Andrés	01/01

