

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE LOS
VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI MEDIANTE
EL PROGRAMA FLOW-3D**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MENCIÓN HIDRÁULICA**

PAÚL JAVIER CHANDI POZO
jpaul.chandi0@gmail.com

JUAN FERNANDO ESCOBAR MONTENEGRO
jfem1995@hotmail.com

DIRECTOR: MSC. ING. JORGE AUGUSTO TOAPAXI ÁLVAREZ
jorge.toapaxi@epn.edu.ec

CODIRECTOR: PHD. KHALED MOHAMED AHMED HAMAD
khaled.hamad@epn.edu.ec

QUITO, Junio 2018

DECLARACIÓN

Nosotros, Paúl Javier Chandi Pozo y Juan Fernando Escobar Montenegro, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**PAÚL JAVIER
CHANDI POZO**

**JUAN FERNANDO
ESCOBAR MONTENEGRO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Paúl Javier Chandi Pozo y Juan Fernando Escobar Montenegro, bajo mi supervisión

MSC. ING. JORGE AUGUSTO TOAPAXI ÁLVAREZ

DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional por haberme brindado una educación de la más alta calidad.

A mi director de tesis MSc. Ing. Jorge Toapaxi por el apoyo brindado en todo el desarrollo de este proyecto. Gracias por su tiempo y dedicación.

Al Centro de Investigación y Estudios de Recursos Hídricos (CIERHI) por facilitarnos el uso de la WORKSTATION para el desarrollo de este proyecto, sin su ayuda, esto no hubiese sido posible.

Un infinito agradecimiento a los MSc. Ing. Patricio Ortega y MSc. Ing. Edwin Casa por aportar con sus conocimientos desde el inicio hasta la finalización de esta investigación.

A mi compañero de tesis Juan, por brindarme su amistad, apoyo y confianza en la realización de todo este proyecto. Fue un orgullo haber compartido contigo todas las situaciones que se presentaron en el transcurso de la investigación.

A mis amigos Ángel, Carlos, Geovanny, Henry, Andrés, Jasson, Bryan y David por hacer que la vida en la universidad fuese más placentera y haber compartido momentos agradables e inolvidables. Gracias por todo muchachos.

Paúl Chandi.

DEDICATORIA

A mis abuelitos José Chandi y Rosa Maldonado.

Por ser la razón de mi vida y apoyarme en todo momento y en todo lugar. Por todos los buenos valores que me enseñaron desde pequeño y hacer que cada día quiera ser una mejor persona. Si los tengo a ustedes, lo tengo todo.

A mi padre Niederman Chandi.

Por brindarme su cariño, paciencia, apoyo incondicional en las situaciones más difíciles y ser mi ejemplo a seguir. Por siempre querer lo mejor para mí y haberme impuesto el reto de continuar mis estudios en la mejor universidad del país. Por esto y mucho más, te quiero papá.

A mi madre Adela Pozo y a mi hermano Iván Chandi.

Por su amor, consejos y recibirme siempre con los brazos abiertos en su casa. Te amo mamá. Hermano, eres mi orgullo y una bendición para la familia.

Al amor de mi vida Mary y a mi hija Camilita.

Por soportar mi ausencia cada vez que debía volver a la universidad. Por su comprensión, amor incondicional y ser la razón por la cual siempre quiero regresar a casa. Una parte de mi se quedaba a su lado, donde siempre quería estar el resto de mí.

Paúl Chandi.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional, por ser la mejor universidad del país y ponerme retos durante este tiempo que me ayudaron a exigirme cada vez más y han hecho de mí una mejor persona; y por la gran formación recibida que me ha hecho plantear grandes objetivos a futuro.

A mi director de tesis MSc. Ing. Jorge Toapaxi, por confiar en nuestras capacidades y encomendarnos el desarrollo de este gran proyecto, por su oportuna intervención en los momentos difíciles, y por todo su tiempo, conocimientos y paciencia invertida.

Al CIERHI, por darnos las facilidades para que podamos utilizar las Workstation ya que sin ellas este proyecto no se hubiera finalizado, en especial a los MSc. Ing. Patricio Ortega y MSc. Ing. Edwin Casa que colaboraron con su conocimiento.

A mi compañero de tesis Paúl por dedicarse a tiempo completo conjuntamente conmigo para finalizar este proyecto, y por siempre mostrar esfuerzo, paciencia y predisposición.

A mis amigos David, May, Cristian, Sandy, Mariuxi, Andre y Will por ser un grupo muy especial de amigos y grandes colaboradores en la EPN. A Erik por ser como un hermano y un complemento en lo académico. A todos mis amigos que desde el colegio me acompañan (Se7en), en especial a Diego, Pablo y Tamara que son como hermanos. A Kerly por ser una gran amiga y apoyarme en esta etapa.

A mis tíos Elida y Marco por darme todo lo que esté a su alcance y tratarme como un hijo los fines de semana, y a mis primos Daya, Pame, Alejo y Adil que fueron un gran soporte anímico.

A todas las personas que creyeron desde un principio en mí, que me han brindado un consejo y me han acompañado a lo largo de mi vida. Gracias totales.

Juan Fernando.

DEDICATORIA

A Dios, por darme salud, vida y fortaleza durante este tiempo universitario, por siempre darme luz y esperanza cuando todo parecía imposible, y por saber guiarme y poner grandes personas en mi vida.

A mi mami Janet Montenegro y a mi papi Héctor Escobar, que desde su juventud dejaron sus sueños a un lado y pusieron todo su tiempo y dedicación en los míos, por esforzarse día a día para que yo pueda culminar mis estudios, por estar siempre conmigo a pesar de las dificultades que nos puso la vida, por educarme, formarme, e inculcarme la honestidad, dedicación y perseverancia.

A mis hermanos Cristian Escobar y Mateo Escobar, por siempre recibirme con cariño al volver a casa, por ser mi orgullo y motivo para esforzarme día a día y darles el mejor ejemplo.

A papito Juan Montenegro, mamita Teresa Merchán, papá Medardo Escobar y mamá Rosita Hidalgo por ser mis abuelitos, y enseñarme que todo es posible con perseverancia y trabajo, por sus grandes historias de vida y su infinita sabiduría.

Juan Fernando.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
CONTENIDO	VII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XXIV
RESUMEN.....	XXV
ABSTRACT	XXVI
PRESENTACIÓN	XXVII
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN.....	1
1.2 APROVECHAMIENTO TOACHI – ALLURIQUÍN	3
1.2.1 PRESA TOACHI Y OBRAS ANEXAS	3
1.2.1.1 Presa Toachi.....	3
1.2.1.2 Minicentral Toachi.....	3
1.2.1.3 Vertederos de excesos	3
1.2.1.4 Desagües de fondo	4
1.2.2 OBRAS DE CONDUCCIÓN.....	4
1.2.2.1 Túnel de presión Toachi Alluriquín	4
1.2.2.2 Tubería de presión Alluriquín	4
1.2.2.3 Chimenea de equilibrio superior Alluriquín	4
1.2.3 CASA DE MÁQUINAS ALLURIQUÍN	4
1.2.4 OBRAS DE DESCARGA	5

1.2.4.1 Chimenea de equilibrio inferior Alluriquín	5
1.2.4.2 Túnel y estructura de descarga	5
1.2.4.3 Subestación Alluriquín	5
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.3.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	5
1.3.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	6
1.3.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	6
1.4 ALCANCE	7
1.5 OBJETIVOS	7
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	7
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
CAPÍTULO II	8
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	8
2.1 OBRAS DE EXCEDENCIA	8
2.1.1 GENERALIDADES	8
2.1.2 COMPONENTES PRINCIPALES DE UN VERTEDERO DE EXCESOS	8
2.1.2.1 Canal de aproximación	8
2.1.2.2 Estructura de entrada	9
2.1.2.3 Estructura de control	9
2.1.2.4 Canal de desagüe	9
2.1.2.5 Estructura terminal	9
2.1.2.6 Canal de salida	10
2.1.3 TIPOS DE ALVIADEROS	10
2.1.3.1 De caída libre (pared vertical)	10
2.1.3.2 Laterales	11
2.1.3.3 En laberinto	11
2.1.3.4 De canal abierto	12
2.1.3.5 De conducto cerrado o túnel	12
2.1.3.6 Circulares o “morning glory”	13
2.1.3.7 Dentados	14
2.1.3.8 De alcantarilla	14
2.1.3.9 De perfil de lámina vertiente (cimacio)	14

2.1.4 CONTROL DEL FLUJO SOBRE VERTEDEROS TIPO CIMACIO	15
2.1.4.1 Vertederos no controlables	15
2.1.4.2 Vertederos controlables	16
2.1.5 DESCRIPCIÓN DEL FLUJO HOMOGÉNEO Y FLUJO AGUA – AIRE SOBRE EL CIMACIO DE UNA PRESA	17
2.1.5.1 Flujo homogéneo	19
2.1.5.2 Flujo agua-aire sobre la cresta de una presa	26
2.1.6 CAPA LÍMITE.....	29
2.1.7 CAVITACIÓN.....	31
2.1.7.1 Índice de cavitación.....	31
2.1.7.2 Daño por cavitación	33
2.1.7.3 Cavitación en superficies de vertederos	34
2.1.7.4 Prevención de daños por cavitación.....	35
2.1.7.5 Medidas correctivas y reparaciones	37
2.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA	37
2.2.1 ANTECEDENTES DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	37
2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA	39
2.2.2.1 Modelación Física	39
2.2.2.2 Modelación Numérica	44
2.2.3 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).....	54
2.2.3.1 Reseña histórica acerca de la cfd	54
2.2.3.2 Campos de aplicación de la CFD	57
2.2.3.3 Ventajas de la CFD	60
2.2.3.4 Inconvenientes de la CFD	60
2.2.3.5 Secuencia y estructura de la CFD.....	61
2.2.3.6 Estrategias para el empleo de códigos CFD	62
La Figura 2.46 indica las estrategias para el empleo de códigos CFD	62
2.2.3.7 Métodos de solución de un código CFD	64
2.2.3.8 Solución de CFD: generación del mallado	65
2.2.3.9 Solución de la CFD: Condiciones de Borde	68
2.2.3.10 Estado actual de la CFD	68
2.3 TURBULENCIA.....	69
2.3.1 ESCALAS DE TURBULENCIA	70

2.3.1.1 MACROESCALA.....	71
2.3.1.2 ESCALA INTERMEDIA.....	71
2.3.1.3 MICROESCALA.....	71
2.3.2 APROXIMACIONES PARA DAR SOLUCIÓN A LAS ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL FLUJO TURBULENTO.....	72
2.3.2.1 Simulación numérica directa (DNS)	72
2.3.2.2 Simulación de grandes remolinos (LES)	73
2.3.2.3 Ecuaciones de Navier Stokes promediado de Reynolds (RANS)	74
2.3.3 ESTADO ACTUAL DEL ESTUDIO DE LA TURBULENCIA.....	79
2.4 ESTADO DEL ARTE.....	80
CAPÍTULO III	83
3. METODOLOGÍA.....	83
3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	83
3.2 MODELO FÍSICO EXISTENTE.....	83
3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL DISEÑO FINAL PLANTEADO PARA LAS ESTRUCTURAS	85
3.2.1.1 Vertederos de excesos	85
3.2.1.2 Cuenco de disipación de energía	88
3.2.1.3 Transición hacia el río	89
3.2.2 MAGNITUDES DERIVADAS EN EL MODELO BAJO LA LEY DE SIMILITUD DE FROUDE	90
3.2.3 CAUDALES ENSAYADOS EN EL MODELO FÍSICO CON ESCALA 1:50	91
3.2.4 PRESIONES ADIMENSIONALES SOBRE EL PERFIL DEL VERTEDERO DE EXCESOS	91
3.2.5 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LOS CHORROS DESCARGADOS POR LOS VERTEDEROS DE EXCESOS	99
3.2.6 RESULTADOS DE CALADOS SOBRE CADA VERTEDERO DE EXCESOS	100
3.2.7 COORDENADAS DE LAS LECTURAS PIEZOMÉTRICAS A EMPLEARSE EN EL MODELO NUMÉRICO	102
3.3 INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) CON EL PROGRAMA FLOW-3D	102
3.3.1 MALLADO EN EL PROGRAMA FLOW-3D	103
3.3.1.1 Mallado básico	105

3.3.1.2	Mallado Multi-Bloque.....	106
3.3.1.3	Malla Vinculada.....	106
3.3.1.4	Malla Superpuesta	106
3.3.1.5	Malla Anidada	107
3.3.1.6	Mallas de dimensionalidad reducida	107
3.3.2	Algoritmo FAVOR	108
3.3.3	CONDICIONES DE CONTORNO EN FLOW-3D	109
3.3.4	MODELOS DE TURBULENCIA EN FLOW-3D	111
3.3.4.1	Modelo de Longitud de Mezcla de Prandtl	111
3.3.4.2	Modelo de una ecuación	112
3.3.4.3	Modelo k- ϵ	112
3.3.4.4	Modelo RNG	112
3.3.4.5	Modelo k- ω	113
3.3.4.6	Modelo LES (Large Eddy Simulation)	113
3.3.5	APROXIMACIONES NUMÉRICAS EN FLOW-3D	113
3.3.6	APROXIMACIONES DE ADVECCIÓN DE LA INTERFAZ FLUIDA (VOF).....	115
3.4	GUÍA METODOLÓGICA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS	116
3.4.1	CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA.....	116
3.4.2	INGRESO DE PARÁMETROS PARA LA MODELACIÓN EN EL PROGRAMA FLOW-3D	117
3.4.2.1	Configuración General	117
3.4.2.2	Parámetros Físicos	118
3.4.2.3	Fluidos	121
3.4.2.4	Mallado del Dominio Computacional	122
3.4.2.5	Parámetros de salida de la simulación y selección de resultados a obtenerse.....	141
3.4.2.6	Métodos numéricos empleados para el cálculo.....	142
3.4.2.7	Revisión del modelo, previo a su simulación	145
3.4.2.8	Simulación del modelo numérico.....	148
3.4.2.9	Visualización de resultados en Flowsight.....	150
	CAPÍTULO IV.....	165
	4. SIMULACIÓN NUMÉRICA Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	166

4.1 CONSIDERACIONES PARA LA CALIBRACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	166
4.1.1 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE CELDA.....	166
4.1.1.1 Resultados de la simulación según la influencia del tamaño de celda de malla.....	168
4.1.2 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MODELO DE TURBULENCIA	172
4.1.2.1 Resultados de la simulación según la influencia del modelo de turbulencia	172
CAPÍTULO V	176
5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO Y COMPARACIÓN CON LOS DEL MODELO FÍSICO	177
5.1 RESULTADOS DE CALADOS DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS PARA CADA UNO DE LOS CAUDALES ENSAYADOS	177
5.2 RESULTADOS DE PRESIONES MEDIDAS A LO LARGO DEL PERFIL DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS PARA CADA UNO DE LOS CAUDALES ENSAYADOS	181
5.3 RESULTADOS DE LOS ALCANCES MÁXIMOS DE LOS CHORROS DE DESCARGA PROVENIENTES DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS PARA CADA UNO DE LOS CAUDALES ENSAYADOS	185
5.4 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS PARA DISTINTAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	187
CAPÍTULO VI.....	191
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	192
6.1 CONCLUSIONES	192
6.2 RECOMENDACIONES	196
BIBLIOGRAFÍA.....	198
ANEXOS.....	202

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Variación de presión y coeficiente de descarga sobre vertederos.....	24
Tabla 2.2 Leyes de similitud: Geométrica, Cinemática y Dinámica	42
Tabla 2.3 Campos de aplicación de la CFD	57
Tabla 2.4 Estado del arte	80
Tabla 3.1 Magnitudes principales en el modelo 1:50.....	85
Tabla 3.2 Dimensiones en modelo de los vertederos de excesos	86
Tabla 3.3 Coordenadas del perfil de los vertederos de excesos, Plano: MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013.....	87
Tabla 3.4 Dimensiones principales del cuenco de disipación de energía	89
Tabla 3.5 Dimensiones principales de la transición hacia el cauce natural	89
Tabla 3.6 Magnitudes derivadas en el modelo bajo criterio de similitud según Froude.....	90
Tabla 3.7 Serie de caudales de ingreso según el código de prueba	91
Tabla 3.8 Lecturas Piezométricas a lo largo del eje del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos. Descarga simultánea por ambos vertederos, $Q= 1200\text{m}^3/\text{s}$	92
Tabla 3.9 Lecturas Piezométricas a lo largo del eje del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos. Descarga simultánea por ambos vertederos, $Q= 1000\text{m}^3/\text{s}$	93
Tabla 3.10 Lecturas Piezométricas a lo largo del eje del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos. Descarga simultánea por ambos vertederos, $Q= 700\text{m}^3/\text{s}$	95
Tabla 3.11 Lecturas Piezométricas a lo largo del eje del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos. Descarga simultánea por ambos vertederos, $Q= 500\text{m}^3/\text{s}$	96
Tabla 3.12 Lecturas Piezométricas a lo largo del eje del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos. Descarga simultánea por ambos vertederos, $Q= 250\text{m}^3/\text{s}$	97
Tabla 3.13 Resultados obtenidos en el modelo con respecto al alcance de los chorros	99
Tabla 3.14 Resultados obtenidos en el modelo con respecto a la altura de los chorros	100
Tabla 3.15 Mediciones de calados en el modelo, $Q= 0.06863 \text{ m}^3/\text{s}$	100
Tabla 3.16 Mediciones de calados en el modelo, $Q= 0.05651 \text{ m}^3/\text{s}$	100
Tabla 3.17 Mediciones de calados en el modelo, $Q= 0.04021 \text{ m}^3/\text{s}$	101
Tabla 3.18 Mediciones de calados en el modelo, $Q= 0.02826 \text{ m}^3/\text{s}$	101

Tabla 3.19 Mediciones de calados en el modelo, $Q= 0.01495 \text{ m}^3/\text{s}$	101
Tabla 3.20 Coordenadas de los piezómetros en modelo CAD-3D, MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013. Vertedero de excesos derecho	102
Tabla 3.21 Coordenadas de los piezómetros en modelo CAD-3D, MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013. Vertedero de excesos izquierdo.....	102
Tabla 3.22 Presiones obtenidas en los 10 puntos del perfil del vertedero derecho.....	154
Tabla 3.23 Presiones obtenidas en los 10 puntos del perfil del vertedero izquierdo	158
Tabla 3.24 Coordenadas de saltos en esquí y deflectores en donde se determinarán los calados	162
Tabla 3.25 Resultados del modelo numérico de calados en deflectores y saltos en esquí.....	164
Tabla 4.1 Plan de simulaciones numéricas para el análisis de influencia del tamaño de celda.....	167
Tabla 4.2 Tiempo de simulación y duración de corrida de las distintas simulaciones	168
Tabla 4.3 Plan de simulaciones numéricas para el análisis de influencia del modelo de turbulencia	172
Tabla 4.4 Tiempo de simulación y duración de corrida de las distintas simulaciones	173
Tabla 5.1 Resultados de calados para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.06863 \text{ [m}^3/\text{s]}$	177
Tabla 5.2 Resultados de calados para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.06863 \text{ [m}^3/\text{s]}$	178
Tabla 5.3 Resultados de calados para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.05651 \text{ [m}^3/\text{s]}$	178
Tabla 5.4 Resultados de calados para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.05651 \text{ [m}^3/\text{s]}$	178
Tabla 5.5 Resultados de calados para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.04021 \text{ [m}^3/\text{s]}$	179
Tabla 5.6 Resultados de calados para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.04021 \text{ [m}^3/\text{s]}$	179
Tabla 5.7 Resultados de calados para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.02826 \text{ [m}^3/\text{s]}$	179
Tabla 5.8 Resultados de calados para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.02826 \text{ [m}^3/\text{s]}$	180
Tabla 5.9 Resultados de calados para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.01495 \text{ [m}^3/\text{s]}$	180
Tabla 5.10 Resultados de calados para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.01495 \text{ [m}^3/\text{s]}$	180
Tabla 5.11 Resultados de presiones para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.06863 \text{ [m}^3/\text{s]}$	181

Tabla 5.12 Resultados de presiones para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.06863$ [m ³ /s].....	182
Tabla 5.13 Resultados de presiones para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.05651$ [m ³ /s].....	182
Tabla 5.14 Resultados de presiones para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.05651$ [m ³ /s].....	182
Tabla 5.15 Resultados de presiones para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.04021$ [m ³ /s].....	183
Tabla 5.16 Resultados de presiones para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.04021$ [m ³ /s].....	183
Tabla 5.17 Resultados de presiones para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.02826$ [m ³ /s].....	183
Tabla 5.18 Resultados de presiones para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.02826$ [m ³ /s].....	184
Tabla 5.19 Resultados de presiones para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.01495$ [m ³ /s].....	184
Tabla 5.20 Resultados de presiones para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.01495$ [m ³ /s].....	184
Tabla 5.21 Alcance máximo de los chorros de descarga provenientes de los vertederos de excesos para cada caudal ensayado. Modelo Físico y Modelo Numérico.....	185
Tabla 5.22 Alcance máximo de los chorros de descarga provenientes de los vertederos de excesos para cada caudal ensayado. Fórmula de Elevatorsky y Modelo Numérico.....	186
Tabla 5.23 Índice de cavitación para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.06863$ [m ³ /s]	188
Tabla 5.24 Índice de cavitación para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.06863$ [m ³ /s]	188
Tabla 5.25 Índice de cavitación para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.05651$ [m ³ /s]	188
Tabla 5.26 Índice de cavitación para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.05651$ [m ³ /s]	189
Tabla 5.27 Índice de cavitación para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.04021$ [m ³ /s]	189
Tabla 5.28 Índice de cavitación para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.04021$ [m ³ /s]	189
Tabla 5.29 Índice de cavitación para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.02826$ [m ³ /s]	190
Tabla 5.30 Índice de cavitación para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.02826$ [m ³ /s]	190
Tabla 5.31 Índice de cavitación para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.01495$ [m ³ /s]	190
Tabla 5.32 Índice de cavitación para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.01495$ [m ³ /s]	191

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación del Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón	2
Figura 1.2 Esquema de la estructura del Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón.....	2
Figura 2.1 Componentes principales de un vertedero	10
Figura 2.2 Vertedero de caída libre.....	10
Figura 2.3 Vertedero lateral	11
Figura 2.4 Vertedero en laberinto.....	11
Figura 2.5 Vertedero de canal abierto (superficie escalonada)	12
Figura 2.6 Vertedero en túnel	13
Figura 2.7 Vertedero circular (morning glory).....	13
Figura 2.8 Vertedero dentado	14
Figura 2.9 Resumen de tipo de vertederos	15
Figura 2.10 Partes de un vertedero tipo cimacio	17
Figura 2.11 Tipo de flujo sobre la cresta	18
Figura 2.12 Coeficiente de descarga en función de la profundidad de aproximación	20
Figura 2.13 Coeficiente de descarga para distintas cargas	21
Figura 2.14 Coeficiente de descarga en función de la pendiente del paramento vertical aguas arriba.....	21
Figura 2.15 Coeficiente de descarga en función del nivel del canal aguas abajo.....	22
Figura 2.16 Coeficiente de descarga en función del grado de sumergencia	22
Figura 2.17 Presiones sobre la cresta de un vertedero sin control	23
Figura 2.18 Presiones sobre la cresta de vertederos de rebose WES altos	23
Figura 2.19 Coeficiente de descarga para distintas aberturas de compuerta.....	25
Figura 2.20 Presiones sobre la cresta de un vertedero con compuerta.....	26
Figura 2.21 Desarrollo de la aireación sobre el vertedero	27
Figura 2.22 Estructura vertical del ingreso de aire	28
Figura 2.23 Aire atrapado y arrastrado por el flujo de agua.....	28
Figura 2.24 Desarrollo de la capa límite en un canal abierto	29
Figura 2.25 Superficie hidráulicamente lisa.....	30
Figura 2.26 Superficie hidráulicamente rugosa	31
Figura 2.27 Índice de cavitación incipiente para distintas rugosidades	32
Figura 2.28 Índice de cavitación incipiente para protuberancias inclinadas	33

Figura 2.29 Colapso de una burbuja	34
Figura 2.30 Daño por cavitación debido a una curvatura brusca.....	34
Figura 2.31 Daño por cavitación debido a ranura transversal	35
Figura 2.32 Rugosidades aisladas comunes y probable lugar de daño.....	35
Figura 2.33 Separación de flujo debido a funcionamiento asimétrico de compuertas	36
Figura 2.34 Ejemplo de prototipo (Presa Toachi)	41
Figura 2.35 Ejemplo de modelo físico (Presa Toachi).....	41
Figura 2.36 Ventajas y desventajas del modelo físico.....	44
Figura 2.37 Dominio de solución de una Ecuación en derivadas parciales de variable espacio-temporal. a) Dominio de solución continuo, b) Dominio de solución discretizado.....	46
Figura 2.38 Factores que definen la precisión de los modelos numéricos.....	46
Figura 2.39 Etapas de una simulación numérica.....	48
Figura 2.40 Etapas del desarrollo de un paquete computacional	48
Figura 2.41 Ejemplo de modelación numérica unidimensional	49
Figura 2.42 Ejemplo de modelación numérica bidimensional.....	50
Figura 2.43 Ejemplo de modelación numérica tridimensional.....	51
Figura 2.44 Ventajas y desventajas de la modelación numérica	52
Figura 2.45 Códigos comerciales de la CFD.....	56
Figura 2.46 Estrategias para el empleo de códigos CFD	63
Figura 2.47 Discretización espacial. a) 2D, b) 3D	63
Figura 2.48 Mallado estructurado: a) Cuadrilátero, b) Hexaédrico	66
Figura 2.49 Mallado de bloques múltiples: a) Descomposición inicial, b) Malla final	66
Figura 2.50 Mallado no estructurado: a) Cuadrilátero, b) Hexaédrico	67
Figura 2.51 Condiciones de contorno	68
Figura 2.52 Fenómeno de Turbulencia	69
Figura 2.53 Flujo Laminar y Flujo Turbulento.....	69
Figura 2.54 Espectro de energía para un flujo turbulento.....	70
Figura 3.1 Vista en planta del modelo físico de la Presa Toachi, Plano: MPT4-01 entregado el 7 de febrero del 2013.....	84
Figura 3.2 Modelo físico de la Presa Toachi, escala 1:50	84
Figura 3.3 Ubicación de los vertederos de excesos	85
Figura 3.4 Corte transversal vertederos de excesos y desagües de fondo del modelo, Plano: MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013	87
Figura 3.5 Perfil de los vertederos de excesos, Plano MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013	88
Figura 3.6 Estructuras complementarias situadas aguas abajo de la Presa Toachi.....	90
Figura 3.7 Localización de piezómetros a lo largo del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos, Plano: MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013.....	92

Figura 3.8 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos derecho. $Q = 1200\text{m}^3/\text{s}$, ($600\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)	93
Figura 3.9 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos izquierdo. $Q = 1200\text{m}^3/\text{s}$, ($600\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)	93
Figura 3.10 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos derecho. $Q = 1000\text{m}^3/\text{s}$, ($500\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)	94
Figura 3.11 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos izquierdo. $Q = 1000\text{m}^3/\text{s}$, ($500\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero).....	94
Figura 3.12 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos derecho. $Q = 700\text{m}^3/\text{s}$, ($350\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)	95
Figura 3.13 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos izquierdo. $Q = 700\text{m}^3/\text{s}$, ($350\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)	96
Figura 3.14 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos derecho. $Q = 500\text{m}^3/\text{s}$, ($250\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)	97
Figura 3.15 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos izquierdo. $Q = 500\text{m}^3/\text{s}$, ($250\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)	97
Figura 3.16 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos derecho. $Q = 250\text{m}^3/\text{s}$, ($125\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)	98
Figura 3.17 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos izquierdo. $Q = 250\text{m}^3/\text{s}$, ($125\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)	98
Figura 3.18 Características dinámicas de los chorros	99
Figura 3.19 Componentes principales de un bloque de malla	103
Figura 3.20 Notación de las dimensiones de celdas de bloques distintos de malla	104
Figura 3.21 Plano de malla faltante en bloque de malla 2 vinculado	105
Figura 3.22 Mallado básico en FLOW-3D	105
Figura 3.23 Bloques de malla vinculados en FLOW-3D	106
Figura 3.24 Bloque de malla superpuesta en FLOW-3D	107
Figura 3.25 Bloque de malla anidado en FLOW-3D	107
Figura 3.26 Mallado bidimensional X-Y en FLOW-3D	108
Figura 3.27 Mallado unidimensional X en FLOW-3D.....	108
Figura 3.28 Visualización de objetos luego de aplicar el algoritmo FAVOR	109

Figura 3.29 Esquema de condición de contorno de Onda Linear Periódica	111
Figura 3.30 Geometría en tres dimensiones de la presa Toachi en el programa AutoCAD.....	116
Figura 3.31 Interfaz del programa para la configuración general	117
Figura 3.32 Interfaz del programa para la configuración de parámetros físicos	118
Figura 3.33 Activación del modelo de arrastre de aire	119
Figura 3.34 Activación del modelo de evaluación de densidad	119
Figura 3.35 Activación de la fuerza de gravedad	120
Figura 3.36 Activación del modelo de turbulencia	121
Figura 3.37 Interfaz del programa para la configuración de propiedades de los fluidos.....	121
Figura 3.38 Interfaz del programa para cargar propiedades al fluido	122
Figura 3.39 Propiedades del agua a 20°C	122
Figura 3.40 Serie de pasos para importar la geometría de la Presa Toachi en FLOW-3D.....	123
Figura 3.41 Valor de la rugosidad superficial del modelo establecido	126
Figura 3.42 Condiciones iniciales del modelo numérico.....	127
Figura 3.43 Procedimiento para realizar el mallado de la estructura	128
Figura 3.44 Elementos “Domain Removing” a incorporarse en el modelo numérico.....	129
Figura 3.45 Procedimiento para añadir un elemento “Domain Removing” al modelo numérico.....	130
Figura 3.46 Coordenadas del elemento “Domain Removing” establecidas	131
Figura 3.47 Coordenadas de los demás elementos “domain removing”	131
Figura 3.48 Geometría de la Presa Toachi con bloques de malla y los 4 elementos “domain removing” añadidos	131
Figura 3.49 Elección de elemento “Box” a incorporar en el modelo numérico.....	132
Figura 3.50 Coordenadas de los elementos “Box” establecidas.....	133
Figura 3.51 Geometría de la Presa Toachi con bloques de malla y todos los elementos “domain removing”	134
Figura 3.52 Condición de contorno “Volume flow rate” establecida para el “Mesh Block 1”	135
Figura 3.53 Condición de contorno “Symmetry” establecida para el “Mesh Block 1”.....	136
Figura 3.54 Condición de contorno “Wall” establecida para el “Mesh Block 1”	136
Figura 3.55 Condición de contorno “Specified pressure” establecida para el “Mesh Block 1”	137
Figura 3.56 Condición de contorno “Outflow” establecida para el “Mesh Block 2”.....	138

Figura 3.57 Condiciones de contorno establecidas para cada bloque de malla	139
Figura 3.58 Renderización del modelo numérico	140
Figura 3.59 Visualización del modelo numérico al aplicar el algoritmo “FAVOR”	140
Figura 3.60 Tiempo de reinicio del intervalo de datos establecido	141
Figura 3.61 Intervalo de tiempo para presentación de resultados definido	142
Figura 3.62 Datos de salida adicionales seleccionados	142
Figura 3.63 Paso de tiempo inicial definido	144
Figura 3.64 Opciones para controlar la solución de las tensiones viscosas en el fluido	144
Figura 3.65 Alternativas de advección de volumen de fluido y de momento.....	145
Figura 3.66 “Pre check” del modelo numérico.....	146
Figura 3.67 Planos de malla faltantes en el “Mesh Block 2” añadidos.....	146
Figura 3.68 Comprobación de planos de malla faltantes en el “Mesh Block 3”	147
Figura 3.69 Verificación de calidad del mallado “Mesh Quality”	147
Figura 3.70 Comparación de planos de malla iniciales y finales para el modelo numérico	148
Figura 3.71 Pre-proceso de la simulación en la pestaña “Simulation Manager”	148
Figura 3.72 Correr la simulación en la pestaña “Simulation Manager”	149
Figura 3.73 Gráfica de límite de estabilidad y paso de tiempo	149
Figura 3.74 Selección de la modelación numérica a visualizar en la interfaz FLOWSIGHT.....	150
Figura 3.75 Modelación numérica cargada en FLOWSIGHT	150
Figura 3.76 Creación en formato “CSV” de las coordenadas de los puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero derecho	151
Figura 3.77 Importación del archivo “CSV” de las coordenadas de los puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero derecho	151
Figura 3.78 Visualización de puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero derecho.....	152
Figura 3.79 Gráfico de resultados de presiones para el vertedero derecho “Presión vs Distancia de Spline”	152
Figura 3.80 Selección de la variable “Pressure” a determinarse en el perfil del vertedero derecho	153
Figura 3.81 Resultados de presiones del perfil del vertedero derecho en formato “CSV”	154

Figura 3.82 Creación en formato “CSV” de las coordenadas de los puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero izquierdo	155
Figura 3.83 Importación del archivo “CSV” de las coordenadas de los puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero izquierdo	155
Figura 3.84 Visualización de puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero izquierdo	156
Figura 3.85 Gráfico de resultados de presiones para el vertedero izquierdo “Distancia de Spline vs Presión”	156
Figura 3.86 Selección de la variable “Pressure” a determinarse en el perfil del vertedero izquierdo	157
Figura 3.87 Resultados de presiones del perfil del vertedero izquierdo en formato “CSV”	157
Figura 3.88 Ubicación de las coordenadas para determinar la carga sobre la cresta del vertedero derecho:.....	158
Figura 3.89 Archivo de resultados de la carga sobre la cresta del vertedero derecho.....	159
Figura 3.90 Ubicación de las coordenadas para determinar la carga sobre la cresta del vertedero izquierdo	159
Figura 3.91 Archivo de resultados de la carga sobre la cresta del vertedero izquierdo	160
Figura 3.92 Ubicación de las coordenadas para determinar la carga sobre el perfil del vertedero derecho.....	160
Figura 3.93 Archivo de resultados de la carga sobre el perfil del vertedero derecho.....	161
Figura 3.94 Ubicación de las coordenadas para determinar la carga sobre el perfil del vertedero izquierdo	161
Figura 3.95 Archivo de resultados de la carga sobre el perfil del vertedero izquierdo	162
Figura 3.96 Ubicación en modelo numérico de los puntos en donde se establecerán los calados en saltos en esquí y deflectores	163
Figura 3.97 Coordenadas en donde se determinará el calado en un salto en esquí (S1) del vertedero de excesos derecho (V.D).....	163
Figura 3.98 Archivo de resultados del calado en el primer salto en esquí (S1) del vertedero de excesos derecho (V.D)	164
Figura 3.99 Medición en modelo numérico del alcance máximo del chorro de descarga	165
Figura 4.1 Perfil de presiones a lo largo del vertedero derecho para las simulaciones S1, S2, S3 y S4	169
Figura 4.2 Perfil de presiones de la simulación S1 con tamaño de celda 1.75 cm.....	170
Figura 4.3 Perfil de presiones de la simulación S2 con tamaño de celda 1.50 cm.....	170

Figura 4.4 Perfil de presiones de la simulación S3 con tamaño de celda 1.00 cm.....	171
Figura 4.5 Perfil de presiones de la simulación S4 con tamaño de celda 0.70 cm.....	171
Figura 4.6 Perfil de presiones a lo largo del vertedero derecho para las simulaciones S2, S5 y S6	174
Figura 4.7 Perfil de presiones de la simulación S2 con modelo de turbulencia RNG	175
Figura 4.8 Perfil de presiones de la simulación S5 con modelo de turbulencia k-w.....	175
Figura 4.9 Perfil de presiones de la simulación S6 con modelo de turbulencia k-e	176
Figura 5.1 Nomenclatura empleada en la literatura técnica para la evaluación del alcance de los chorros de descarga	186

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: ELABORACIÓN DEL MALLADO	203
ANEXO 2: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA.....	207

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar la modelación numérica tridimensional de los vertederos de excesos de la Presa Toachi para los distintos caudales ensayados en el estudio experimental en modelo hidráulico de la Presa Toachi y sus Obras Complementarias a escala 1:50 construido en el CIERHI (Centro de Investigaciones y Estudios de Recursos Hídricos) de la EPN, mediante la aplicación de la dinámica de fluidos computacional con el paquete FLOW-3D, con el fin de validar los resultados de la modelación física y crear una guía metodológica entorno a la modelación de este tipo de estructura.

Para desarrollar la modelación numérica en FLOW-3D, se revisó las principales características del programa y del flujo sobre vertederos de excesos, para identificar los mecanismos físicos que se presentan e incluirlos en el cálculo a través de los distintos modelos que ofrece el programa, luego se realizó una guía con los principales pasos a seguir en la modelación de este tipo de estructuras, para finalmente realizar la calibración en la que se determinó el tamaño de celda y modelo de turbulencia adecuado para que los resultados sean aproximados a los registros de la modelación física.

Una vez calibrada la modelación numérica, se procedió a simular los caudales de 68.63 l/s, 56.51 l/s, 40.21 l/s, 28.26 l/s y 14.95 l/s, correspondientes a 1200 m³/s (Tr= 1000 años), 1000 m³/s, 700 m³/s (Tr= 100 años), 500 m³/s y 260 m³/s (Tr= 1 año) en prototipo. Presentándose los resultados de la modelación numérica y de la modelación física, y realizando un análisis del porcentaje de error, además de un análisis del riesgo de cavitación existente sobre los vertederos para los distintas caudales.

ABSTRACT

The objective of this study is to develop the three-dimensional numerical modeling of Toachi Dam excess dumps for the different flows tested in the experimental study in the hydraulic model of the Toachi Dam and its Complementary Works at scale 1:50 built in the CIERHI (Center for Research and Studies of Water Resources) of the EPN, through the application of computational fluid dynamics with the FLOW-3D software, in order to validate the results of physical model and create a methodological guide around the modeling of this type of structure.

To develop numerical modeling in FLOW-3D, we reviewed the main characteristics of the program and the flow over landfills of excesses, to identify the physical mechanisms that are presented and include them in the calculation through the different models offered by the program, then a guide was made with the main steps to follow in the modeling of this type of structures, to finally perform the calibration in which the appropriate cell size and turbulence model was determined so that the results are approximate to the records of the modeling physical.

Once the numerical modeling was calibrated, we proceeded to simulate the flows of 68.63 l / s, 56.51 l / s, 40.21 l / s, 28.26 l / s and 14.95 l / s, corresponding to 1200 m³ / s (Tr = 1000 years) , 1000 m³ / s, 700 m³ / s (Tr = 100 years), 500 m³ / s and 260 m³ / s (Tr = 1 year) in prototype. Presenting the results of numerical modeling and physical modeling, and performing an analysis of the percentage of error, in addition to an analysis of the risk of existing cavitation on landfills for the different flows.

PRESENTACIÓN

La modelación numérica tridimensional de los vertederos de excesos de la presa Toachi mediante el programa FLOW-3D se desarrolló en cinco capítulos del presente proyecto de titulación.

En el Capítulo I, se realiza una breve descripción del proyecto, se describen las características técnicas de las principales estructuras y de las obras anexas, además se presenta el alcance, la justificación teórica, metodológica y práctica, también el objetivo general y los objetivos específicos.

En el Capítulo II, se detalla el tipo de obras de excedencia y sus componentes principales, enfocándose principalmente en el flujo presente sobre estos y los principales fenómenos que pueden ocurrir; también se exponen los antecedentes y clasificación de la modelación hidráulica; las ventajas y desventajas de la dinámica de fluidos computacional; además se analiza el fenómeno de la turbulencia y las aproximaciones usadas para su resolución, y por último el estado del arte.

En el Capítulo III, se presenta la información acerca de la geometría del modelo físico existente, la metodología de ensayo y resultados de las variables medidas, luego se da una pequeña introducción a la modelación en FLOW-3D presentando sus principales características para finalizar con una guía metodológica de la modelación numérica de vertederos de excesos.

En el Capítulo IV, se realizan los análisis de sensibilidad de tamaño de celda de malla y de modelo de turbulencia, comparando resultados de presiones del modelo numérico con el modelo físico para determinar el mejor tamaño de celda y modelo de turbulencia a utilizar en las simulaciones de los vertederos de excesos.

En el Capítulo V, se muestran los resultados de presiones, calados y alcances máximos de los chorros para los distintos caudales simulados.

En el Capítulo VI se presentan las conclusiones de la modelación numérica de vertederos de excesos en el programa FLOW-3D y las recomendaciones a seguir en futuras modelaciones similares.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN

El Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón se encuentra ubicado en el límite tres provincias: 1) cantón Mejía, provincia de Pichincha, 2) cantón Santo Domingo de los Tsáchilas, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, 3) cantón Sigchos, provincia de Cotopaxi (Ver Figura 1.1).

El proyecto se encuentra plantado en las cuencas de los ríos Toachi y Pilatón, los cuales tiene un caudal medio anual estimado de 41.30 m³/s y 28.65 m³/s respectivamente. La cuenca del río Pilatón, antes de la unión con el río Toachi, tiene una longitud aproximada de 40 km y un ancho promedio de 20 km, con un área de drenaje de 521 km² hasta la zona de captación en la cota 1099 msnm. La cuenca del río Toachi se extiende en un área de aproximadamente 85 km de longitud y un ancho medio de 20 km, con una superficie de drenaje de 1476 km² hasta el sitio de la presa ubicada aguas debajo de la confluencia del río Sarapullo en la cota 914 msnm. Estas cuencas nacen en la zona occidental de la cordillera de los Andes y forman parte de la hoya del río Esmeraldas, el cual recorre la cota norte del país y desemboca en el Océano Pacífico.

Ya prácticamente culminada la construcción, el proyecto comprende dos aprovechamientos en cascada, Pilatón – Sarapullo y Toachi – Alluriquín. La central de generación Sarapullo aprovechará una caída de 149 m y un caudal máximo de 40 m³/s, tiene instalada tres turbinas de eje vertical tipo Francis de 16.3 MW en su casa de máquinas subterránea con un total de 49 MW potencia instalada. La central Alluriquín se beneficia de una caída de 235 m y un caudal máximo de 100 m³/s, en su casa de máquinas subterránea tiene 3 turbinas Francis de eje vertical de 68 MW, generando un total de 204 MW. Además, turbinará el caudal ecológico (4.14 m³/s)

mediante una minicentral a pie de presa que genera 1.4 MW, dando un total de 254.4 MW de potencia instalada (Ver Figura 1.2).

La ubicación en la vertiente de drenaje del Pacífico y sus características energéticas, colocan a este proyecto dentro de los proyectos emblemáticos del Ecuador, puesto que generará 1120 GWh/año que evitarán la emisión de 568 mil Ton/año de CO₂, equivalente a la emisión que genera la circulación de 300 mil vehículos durante un año.

Figura 1.1 Ubicación del Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón



(Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014)

Figura 1.2 Esquema de la estructura del Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón



(Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014)

1.2 APROVECHAMIENTO TOACHI – ALLURIQUÍN

1.2.1 PRESA TOACHI Y OBRAS ANEXAS

La presa del Toachi, como todas las presas de hormigón, fue construida en bloques separados, ésta en particular consta de 9 bloques verticales estructuralmente firmes para soportar la presión del embalse.

1.2.1.1 Presa Toachi

La presa del Toachi consta de una pantalla de hormigón a gravedad de 60 m de altura asentada en la cota 914 msnm, con una longitud de 157.00 m y anchos de 12.00 m y 22.00 m en la corona a la cota 973 msnm, es atravesada por una galería de 3.50 x 5.60 m desde el túnel de descarga Sarapullo hasta el túnel de presión Toachi – Alluriquín. Sus paramentos son inclinados, aguas arriba con pendiente (V: H) 1: 0.3 y aguas abajo 1: 0.7. Aguas arriba se embalsan 8.5 hm³, con un volumen de regulación diaria entre las cotas 970.00 msnm y 965.00 msnm de 2.00 hm³. El transporte de sedimentos en el embalse se estima que es de 0.86 hm³ al año.

1.2.1.2 Minicentral Toachi

Esta minicentral que aprovecha el caudal ecológico de 4.14 m³/s del río Toachi y la caída bruta de 41 m del embalse, se encuentra en el bloque 5 y consta de una turbina de eje vertical tipo Francis que genera 1.4 MW.

1.2.1.3 Vertederos de excesos

Los dos vertederos de excesos que tiene la presa se ubican por separado en los bloques 3 y 4, su punto más alto es la cota 962.50 m, contienen compuertas radiales de B: 14 m y H: 7.50 m que controlan el nivel máximo de operación las que completamente abiertas forman parte del perfil del vertedero.

Los vertederos permiten descargar 1000 m³/s que es el caudal de crecida para un periodo de retorno de 1000 años, por medio de saltos en esquí con su labio en la cota 942.25 msnm, que además cuentan con deflectores que permiten la aireación de los chorros y disipar la energía de los chorros de agua antes del impacto con el estanque aguas debajo de la presa.

1.2.1.4 Desagües de fondo

Son dos desagües de fondo ubicados en los bloques 3 y 4 con capacidad para descargar 500 m³/s, controlan el desfogue del agua mediante compuertas radiales accionadas por servomotores, la cresta de los desagües se ubica en la cota 927 msnm.

1.2.2 OBRAS DE CONDUCCIÓN

1.2.2.1 Túnel de presión Toachi Alluriquín

Túnel de sección libre circular de 5.60 m de diámetro con capacidad para transportar un caudal máximo de 100 m³/s. Inicia en la cota 952 msnm al final de la galería de interconexión y recorre una longitud de 8.75 km transportando las aguas que provienen del embalse de la presa Toachi más las aguas de la central Sarapullo y termina en la cota 779.50 msnm en la central Alluriquín en el inicio del blindaje de acero de la tubería de presión.

1.2.2.2 Tubería de presión Alluriquín

Es una tubería de acero de espesor 15 mm y diámetro interno de 4.70 y recubierta de hormigón de 0.60 m de espesor, que se divide en tres ramales de diámetro de 2.70 m para empatar con la válvula mariposa en la casa de máquinas.

1.2.2.3 Chimenea de equilibrio superior Alluriquín

Esta estructura regula las presiones del agua que van a la casa de máquinas y amortigua las fuertes presiones provocadas por golpe de ariete debido a la interrupción abrupta de las turbinas, transformando la energía cinética en energía potencial

1.2.3 Casa de máquinas Alluriquín

Es una estructura de hormigón de varios niveles subterránea construida en la margen izquierda del río Toachi, consta de tres turbinas tipo Francis con una potencia nominal de 68 MW y un caudal de diseño de 33.33 m³/s para cada una, tres válvulas de guardia tipo mariposa de 2.40 m de diámetro, entre otras estructuras.

1.2.4 OBRAS DE DESCARGA

1.2.4.1 Chimenea de equilibrio inferior Alluriquín

Se encuentra ubicada de manera paralela a la casa de máquinas, su función es la de asegurarla sumergencia de las turbinas Francis para evitar que se produzcan presiones negativas en el caso de cierre de las turbinas en el sistema casa de máquinas-descarga.

1.2.4.2 Túnel y estructura de descarga

Túnel de descarga de diámetro interno de 5.60 m revestido de hormigón armado de 0.30 m que empieza desde la chimenea de equilibrio inferior hasta llegar al río donde se produce la devolución del agua al cauce natural.

1.2.4.3 Subestación Alluriquín

Se encuentra cerca de la salida de la descarga, tipo SF6 de doble barra y 245kV, sirve para recibir la energía generada en la central Sarapullo y transferirla junto con la producida en la Central Alluriquín al Sistema Nacional Interconectado.

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

El uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para la modelación de todo tipo de fenómenos y flujos, empezó aproximadamente en los años 50. En la actualidad la CFD ha ganado terreno respecto a otros métodos debido a la existencia de modernos computadores que nos permiten resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, que gobiernan la Mecánica de Fluidos, mediante procesos iterativos. De esta manera la CFD se ha transformado en una herramienta que complementa los estudios teóricos y los experimentales (Fernández, 2012).

El aporte que brindará la presente investigación está enfocado en la identificación de los parámetros hidráulicos más sensibles en el flujo sobre los vertederos de excesos tipo cimacio considerando diferentes escenarios de simulación.

1.3.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

Algunos investigadores han desarrollado ecuaciones empíricas para determinar las características hidrodinámicas del flujo sobre los vertederos, las cuales dan como resultado una aproximación a valores obtenidos mediante modelos físicos.

Como afirma Mateos (2000) una de las propiedades del modelo físico es el empleo de una réplica a escala del prototipo. El problema fundamental consiste en realizar el modelo con las escalas convenientes para poder representar un comportamiento semejante al del prototipo.

Para la construcción del modelo físico se deben tener en cuenta algunas características del laboratorio en el cual se desarrollará dicho modelo; tales como personal especializado para su construcción y correspondiente operación, espacio disponible y equipos de medida. En algunas ocasiones las escalas consideradas como apropiadas implican ciertas dimensiones que sobrepasan la capacidad del laboratorio (Mateos, 2000).

El fenómeno por simular es de tipo tridimensional, por lo que es necesario la aplicación de un modelo que cumpla con la tipología descrita anteriormente, y permita a la vez aproximarse de una mejor manera a la realidad. Para lograr esto se empleará un paquete computacional CFD, el cual será FLOW 3D. La metodología seleccionada optimiza tiempo y costo a diferencia del modelo físico. El modelo numérico tridimensional brinda mayor versatilidad, en cuanto se refiere a la creación de varios escenarios al mismo tiempo, siempre y cuando dicho modelo se encuentre correctamente calibrado y validado (Vásquez, 2003).

1.3.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Con la presente investigación se pretende realizar un análisis comparativo de las variables hidráulicas sobre los vertederos de excesos, tales como: presión, calado y alcance del chorro, considerando los resultados del modelo numérico, los resultados del modelo físico y los obtenidos aplicando las fórmulas empíricas de la literatura técnica. De esta manera se podrá generar recomendaciones en la modelación numérica de este tipo de obras hidráulicas.

1.4 ALCANCE

La finalidad del presente proyecto de titulación consiste en llevar a cabo la modelación numérica tridimensional de los vertederos de excesos de la presa Toachi, mediante el empleo del paquete computacional FLOW-3D, determinando el mallado apropiado, condiciones iniciales y de borde pertinentes, además del modelo de turbulencia que represente mejor el fenómeno de despegue del chorro a la salida del salto en esquí de los vertederos de excesos de la Presa Toachi, con el objetivo de calibrar y validar el modelo numérico para la serie de caudales ensayados en el modelo físico a escala 1:50 realizado en el Centro de Investigaciones y Estudios de Recursos Hídricos (CIERHI) en el año 2013. Se elaborará finalmente una guía metodológica para la modelación numérica de este tipo de estructuras.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la modelación numérica tridimensional del flujo sobre los vertederos tipo cimacio de la presa Toachi, aplicando la metodología de la dinámica de fluidos computacional (CFD).

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el funcionamiento hidráulico de los vertederos de excesos de la presa Toachi para la condición más crítica de descarga a través del paquete computacional FLOW-3D.
- Determinar los parámetros más sensibles mediante la modelación numérica tridimensional de los vertederos de excesos, tales como mallado y modelo de turbulencia.
- Comparar los resultados del modelo físico mediante la simulación numérica tridimensional de los vertederos de excesos para calibrar y validar el modelo numérico.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 OBRAS DE EXCEDENCIA

2.1.1 GENERALIDADES

Los vertederos son elementos importantes dentro de las estructuras de presas con embalses y presas de derivación debido a la gran cantidad de roturas de presas que se han producido debido a su incorrecto diseño, tanto desde el punto de vista hidráulico como estructural. Los vertederos deben ser diseñados de tal manera que el flujo no produzca erosiones al pie de la presa, las presiones sobre la superficie de contacto con el agua no generen cavitación y que el material de la superficie sea resistente a la erosión provocada por la gran velocidad de flujo debida a las grandes diferencias de altura (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

Dada la importancia de los vertederos dentro de las presas, estos deben ser elegidos teniendo en cuenta factores hidrológicos, hidráulicos, tipo de presa y seguridad, topográficos, geológicos, económicos, operativos y de mantenimiento (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

2.1.2 COMPONENTES PRINCIPALES DE UN VERTEDERO DE EXCESOS

Un vertedero de excesos principalmente está compuesto de una canal de aproximación, estructura de entrada (opcional), estructura de control, canal de desagüe, estructura terminal y un canal de salida, en la Figura 2.1 se puede observar un esquema de los componentes.

2.1.2.1 Canal de aproximación

El canal de aproximación recoge el agua del embalse y lo conducen hasta la estructura de entrada (U.S. Bureau of Reclamation, 2014).

2.1.2.2 Estructura de entrada

Su diseño debe evitar grandes pérdidas de carga y uniformizar el flujo en la corona del aliviadero. Estas estructuras no son necesarias cuando el agua es tomada directamente del embalse, como es el caso de los vertederos en presas de hormigón (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

2.1.2.3 Estructura de control

Limita la salida de caudales por debajo del nivel fijado de embalse y regula el caudal de desagüe cuando el nivel es superior a dicho nivel. Estas estructuras pueden ser un umbral, un vertedero, un orificio, una tubería, entre otros (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

2.1.2.4 Canal de desagüe

Conduce el caudal de desagüe al cauce del río aguas abajo de la presa, es poco normal que el caudal desaguado no necesite de un canal para ser restituido aguas abajo. Esta estructura puede ser el paramento aguas abajo de la presa, un canal abierto, un conducto cerrado o un túnel. Sus dimensiones dependen de la capacidad hidráulica requerida, pero en la elección de tipo y geometría pesan las condiciones geológicas y topográficas (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

2.1.2.5 Estructura terminal

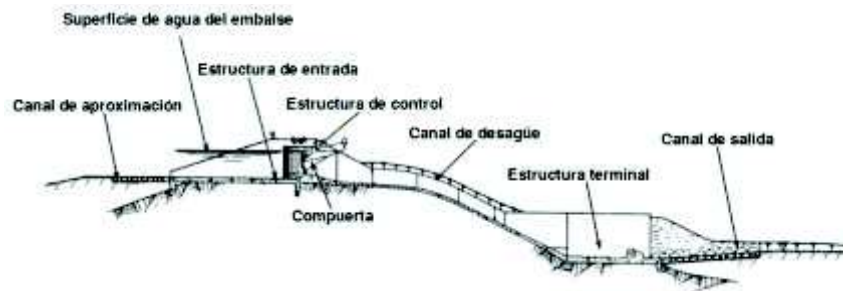
La energía potencial en el embalse de la presa se transforma en energía cinética en el nivel del río, esta energía se muestra en forma de altas velocidades que provocan arrastres y erosiones al pie de la presa comprometiendo su seguridad, siendo necesaria la implementación de estructuras que disipen la energía del flujo antes de la restitución en el cauce, pueden ser utilizados saltos en esquí, deflectores, tanques amortiguadores, entre otros (Arreguín, 2000).

La descarga a altas velocidades en el cauce es permitida cuando existe un lecho de roca resistente a poca profundidad o cuando la salida del aliviadero está lo suficientemente alejada de la presa u otro elemento, absorbiendo la energía por impacto, turbulencia y rozamiento (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

2.1.2.6 Canal de salida

Los canales de salida transportan el flujo de la estructura terminal hacia el río, su tamaño debe ser adecuado para no influir en los calados aguas abajo de las estructuras disipadoras, sus dimensiones y elección de material de protección depende de las consecuencias que se puedan generar por la erosión en el cauce del río (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

Figura 2.1 Componentes principales de un vertedero



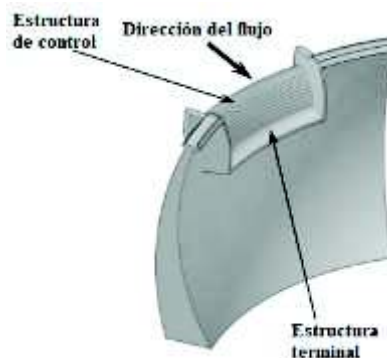
FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2014) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.3 TIPOS DE ALIVIADEROS

2.1.3.1 De caída libre (pared vertical)

Estos vertederos son aptos para presas con el paramento aguas abajo casi vertical y presas de arco. Deben disponer de protección artificial al pie del vertedero, puesto que la formación de socavación es inevitable, un lecho rocoso solo retardará su formación, ver Figura 2.2 (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

Figura 2.2 Vertedero de caída libre



FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2014) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.3.2 Laterales

Este tipo de vertedero se prefiere cuando se pretende un vertedero muy largo en laderas escarpadas o cuando se pretenda empatar con un canal estrecho o túnel, ver Figura 2.3 (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

Figura 2.3 Vertedero lateral

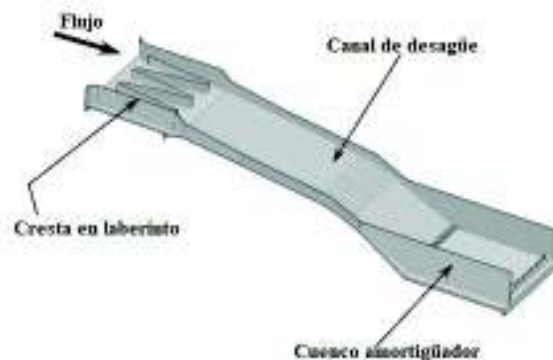


FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2014) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.3.3 En laberinto

Los vertederos en laberinto proporcionan una mayor longitud de vertido para un mismo ancho, disminuyendo la carga de la lámina vertiente. Es idóneo en condiciones en la que el ancho del vertedero y la cota del nivel de agua están limitadas y se desee verter grandes caudales, ver Figura 2.4 (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

Figura 2.4 Vertedero en laberinto

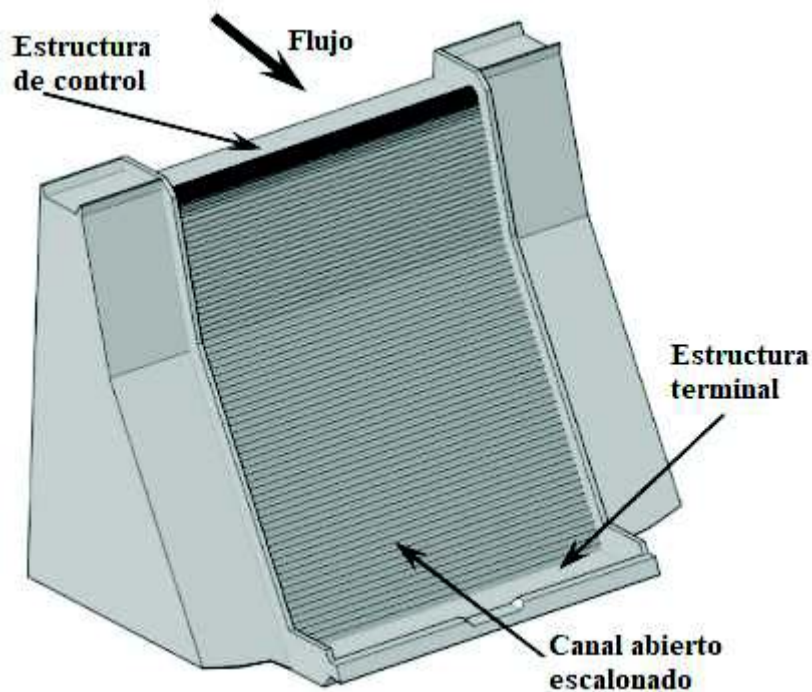


FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2014) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.3.4 De canal abierto

Estos vertederos son aptos cuando el elemento de control se ubica perpendicularmente al eje del canal y las líneas de corriente antes y después del elemento son paralelas al eje del canal; se han utilizado frecuentemente en presas de tierra, son de fácil diseño y construcción, además se adaptan a cualquier tipo de cimentación y generan un ahorro considerable al utilizar grandes volúmenes de excavación en los estribos, ver Figura 2.5 (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

Figura 2.5 Vertedero de canal abierto (superficie escalonada)

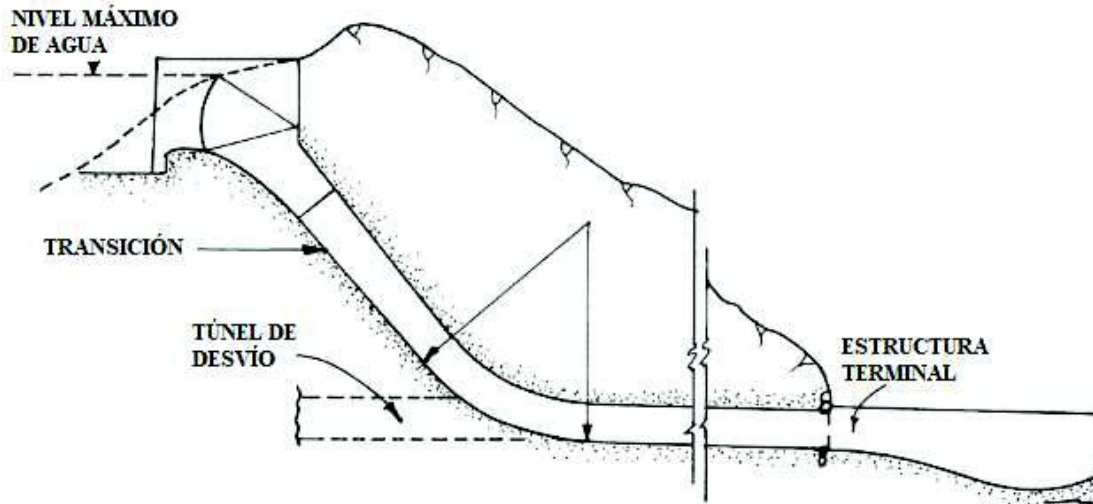


FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2014) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.3.5 De conducto cerrado o túnel

El uso de vertederos en túnel es ventajoso en presas ubicadas en cañones angostos con laderas empinadas donde es peligroso abrir canales por deslizamiento de nieve o rocas. Los vertederos de conducción cerrada son oportunos en presas ubicadas en valles amplios en las que las laderas son suaves y se encuentran alejadas del cauce natural del río, ver Figura 2.6 (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

Figura 2.6 Vertedero en túnel

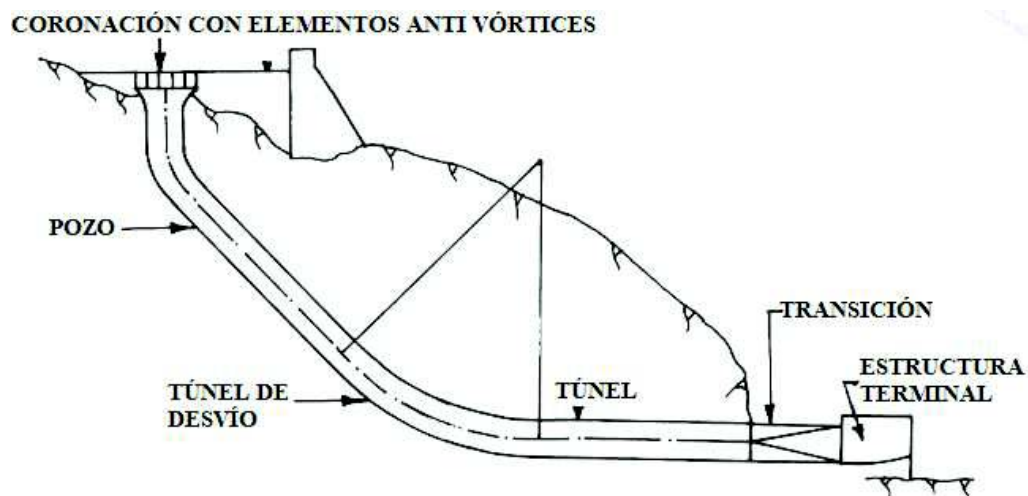


FUENTE: (Khatsuria, 2005) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.3.6 Circulares o "morning glory"

La toma de estos vertederos es horizontal cayendo el agua por un conducto vertical hasta llegar a una conducción horizontal que desemboca en la corriente del río. Su uso es conveniente en presas ubicadas en cañones angostos donde las laderas son empinadas o cuando se puede aprovechar un túnel o conducto que confluye aguas abajo, ver Figura 2.7 (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

Figura 2.7 Vertedero circular (morning glory)

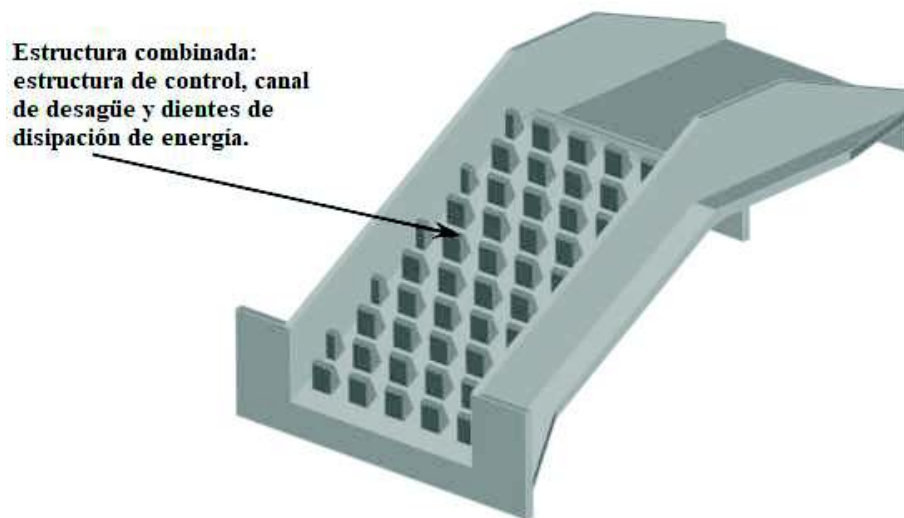


FUENTE: (Khatsuria, 2005) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.3.7 Dentados

Son idóneos para situaciones en la que el flujo es llevado de un nivel a otro sin el uso de cuencos amortiguadores, su configuración dentada permite la disipación de la energía y reduce la velocidad dentro de su propia estructura, ver Figura 2.8 (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

Figura 2.8 Vertedero dentado



FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2014) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.3.8 De alcantarilla

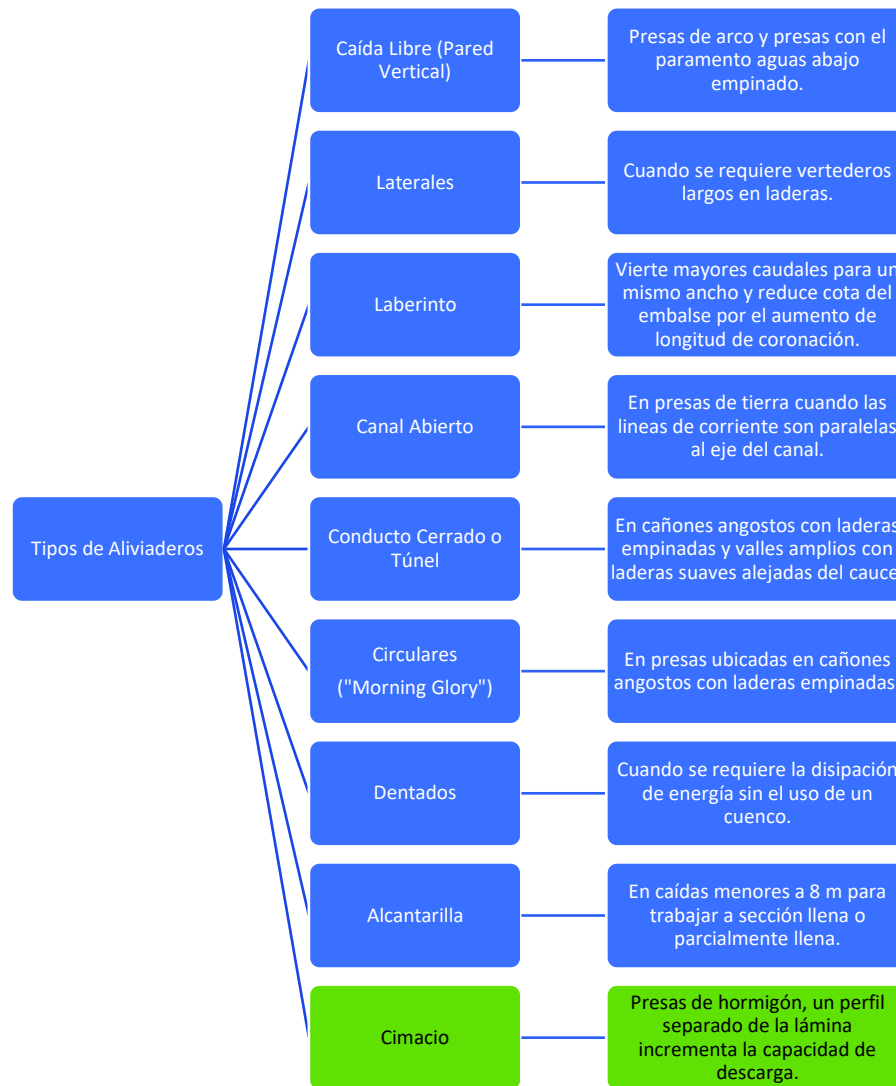
Su uso es recomendado para caídas menores a 8 m debido a su versatilidad para operar a sección llena o parcialmente llena, además de su sencillez y bajo costo de construcción (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

2.1.3.9 De perfil de lámina vertiente (Cimacio)

Apropiado para presas de hormigón. La superficie superior del vertedero se adapta al perfil inferior de la lámina de agua que fluye sobre un vertedero de pared delgada. La construcción de un perfil desprendido de la lámina genera presiones negativas e incrementa la capacidad de descarga (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

En la figura 2.9 se puede observar un resumen de los tipos de vertederos mencionados anteriormente.

Figura 2.9 Resumen de tipo de vertederos



FUENTE: (Toapaxi, 2014) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.4 CONTROL DEL FLUJO SOBRE VERTEDEROS TIPO CIMACIO

2.1.4.1 Vertederos no controlables

El vertedero libre es la forma más sencilla de control, puesto que el agua es vertida cuando sobrepasa el nivel de coronación, no necesita personal para la operación y regulación, además su mantenimiento es sencillo y no necesita reparaciones mecánicas (Arreguín, 2000).

2.1.4.2 Vertederos controlables

Se utilizan cuando no se dispone de longitud requerida para un aliviadero sin control, cuando la altura de la lámina de agua no pueda ser admitida o cuando se requiera evacuar el agua por debajo del nivel normal del embalse.

Los factores determinantes para elegir el tipo y la dimensión del elemento de control son: las características de desagüe, el clima, frecuencia de las avenidas, volumen de almacenamiento invernal, volumen de embalse de avenidas, volumen de necesidades aguas abajo, evacuación de sedimentos, necesidades de explotación, economía, adaptabilidad, seguridad y eficiencia en el funcionamiento (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

- **Ataguías y ataguías ranuradas**

Normalmente son tablonces de madera y paneles metálicos que aumentan el nivel del embalse cuando al nivel de coronación no es necesario evacuar crecidas (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

- **Compuertas deslizantes rectangulares**

Generalmente son de acero, aunque pueden ser de madera u hormigón, se colocan en ranuras verticales formados por perfiles estructurales en las pilas (Arreguín, 2000) y se elevan mediante un torno ubicado en la parte superior (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

- **Compuertas con Ruedas o Rodillos**

Es una variación de la anterior, en la que se ubican ruedas en las ranuras para disminuir el rozamiento y así usar elevadores de menor capacidad (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

- **Compuertas Radiales o de Sector**

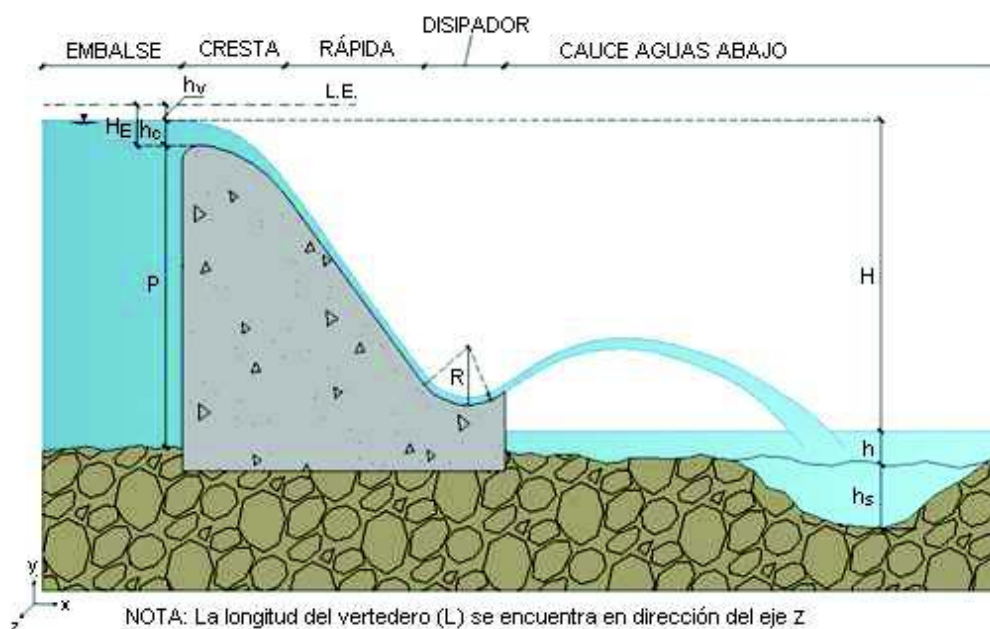
Son de acero, son un segmento cilíndrico unido a los soportes por vigas radiales y ejes. Su configuración concéntrica al eje permite que un pequeño momento de la carga de agua, que venza la compuerta y el rozamiento de los elementos, accione la compuerta (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

2.1.5 DESCRIPCIÓN DEL FLUJO HOMOGÉNEO Y FLUJO AGUA – AIRE SOBRE EL CIMACIO DE UNA PRESA

Los vertederos tipo cimacio o ajustados a la lámina vertiente son los que su forma se aproxima al perfil que se desarrolla en la parte inferior de la lámina en caída libre por un vertedero de pared delgada. Este tipo de vertedero es el más común utilizado en presas altas de hormigón susceptibles a grandes crecidas, donde: el ancho del cauce permita la implantación del largo de la cresta, el lecho del cauce sea de una resistencia adecuada que permita la disipación de la energía a costos moderados y su ubicación sea en una base sólida que no provoque problemas en la cimentación (Toapaxi, 2014).

Un vertedero tipo cimacio tiene una forma longitudinal tipo “S” y está compuesto de tres partes: la cresta, la pendiente posterior o rápida y el dedo del pie en el que se puede ubicar un dissipador de energía, ver Figura 2.10. La forma del perfil está en función de la carga de diseño, de la pendiente del paramento aguas arriba del vertedero y de la altura del mismo respecto al fondo del canal de aproximación (Khatsuria, 2005).

Figura 2.10 Partes de un vertedero tipo cimacio



FUENTE: (Toapaxi, 2014)

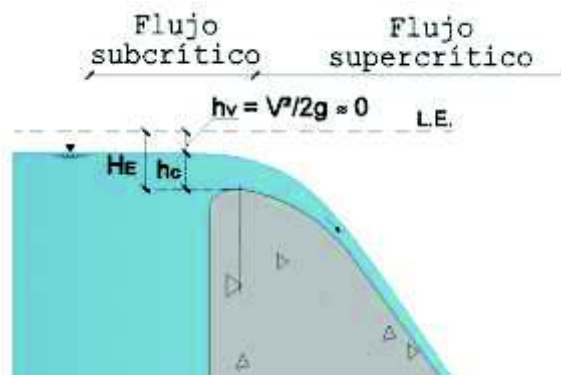
La configuración del perfil en forma de la de la superficie inferior de la capa de flujo sobre un vertedero de pared delgada aireado se determinó de tal forma para que el flujo siempre se mantenga en contacto con la superficie del vertedero y así evitar presiones negativas en el cimacio y el posible riesgo de cavitación, disminuir la erosión y obtener la máxima eficiencia en la descarga (Chow, 2004).

El primer estudio completo para determinar las coordenadas del perfil cimacio las realizó Bazin durante los años 1886-1888 dando como resultado el perfil de Bazin (1888). Debido a la existencia de presiones negativas causadas por la rugosidad de la superficie del vertedero se han realizado modificaciones al mismo y se han propuesto otros perfiles: el perfil Creager (1929), perfil Creager modificado (1945) basado en las pruebas de Denver (1936) de la USBR, perfil de Lane – Davis (1952) basado en las pruebas de Fort Collins (1932) de la USBR, perfil de Scimemi (1930), perfil de Smetana(1949), perfil de Marchi (1928), perfil de Escande (1937), formas estándar WES (1952) de la USACE, entre otros (Chow, 2004).

En el vertedero tipo cimacio se presenta un flujo rápidamente variado, debido al cambio de régimen subcrítico a supercrítico en un tramo relativamente corto, ver Figura 2.11 (U.S. Army Corps of Engineers, 1990):

- Flujo subcrítico en el tramo del embalse (flujo de aproximación), inicialmente a baja velocidad, se acelera a medida que se acerca a la cresta pasando a ser un flujo crítico a medida que el agua pasa sobre la cresta del vertedero.
- Flujo supercrítico desde la cresta hasta la estructura de disipación.

Figura 2.11 Tipo de flujo sobre la cresta



FUENTE: (Toapaxi, 2014)

Al considerar la composición del flujo, sobre el vertedero se presentan dos tipos de flujo, un flujo homogéneo hasta la cresta, luego se transforma en flujo agua – aire al transitar por la rápida.

2.1.5.1 Flujo homogéneo

Sobre el cimacio de una presa circula un flujo compuesto únicamente por agua, desde el inicio del perfil hasta el inicio de la auto aireación, caracterizado por mantener una densidad constante en cualquier punto del fluido.

El flujo de aproximación, cercano al vertedero, tiene una velocidad pequeña que por lo general se desprecia considerando la carga de velocidad aproximadamente cero cuando la profundidad de aproximación P es mayor que $1.33H_d$ (Chow, 2004).

Considerando los elementos de control del flujo sobre los vertederos, se puede clasificar al flujo en flujo sin control y flujo controlado, el primero se consigue con un vertido libre y el último se obtiene mediante la colocación de compuertas (Toapaxi, 2014).

- **Vertederos sin control**

A pesar de que el perfil de un vertedero se diseña para una sola altura, la altura de diseño (H_d), que da como resultado un perfil que se ajusta a la capa inferior del flujo, este debe operar con otras alturas diferentes a la de diseño. Cuando se presentan alturas mayores, la presión es menor que la atmosférica y puede llegar a ser tan baja que provoque separación del flujo, a pesar de ello se puede superar la altura de diseño en un 50% (Chow, 2004) sin afectar la seguridad de la presa y con ello también aumentar el coeficiente de descarga (C), cuando se supera este porcentaje se puede presentar cavitación. Para alturas menores la presión es mayor a la atmosférica pero menor que la hidrostática y el coeficiente de descarga (C) es menor (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

El flujo sobre un vertedero se rige por la ecuación:

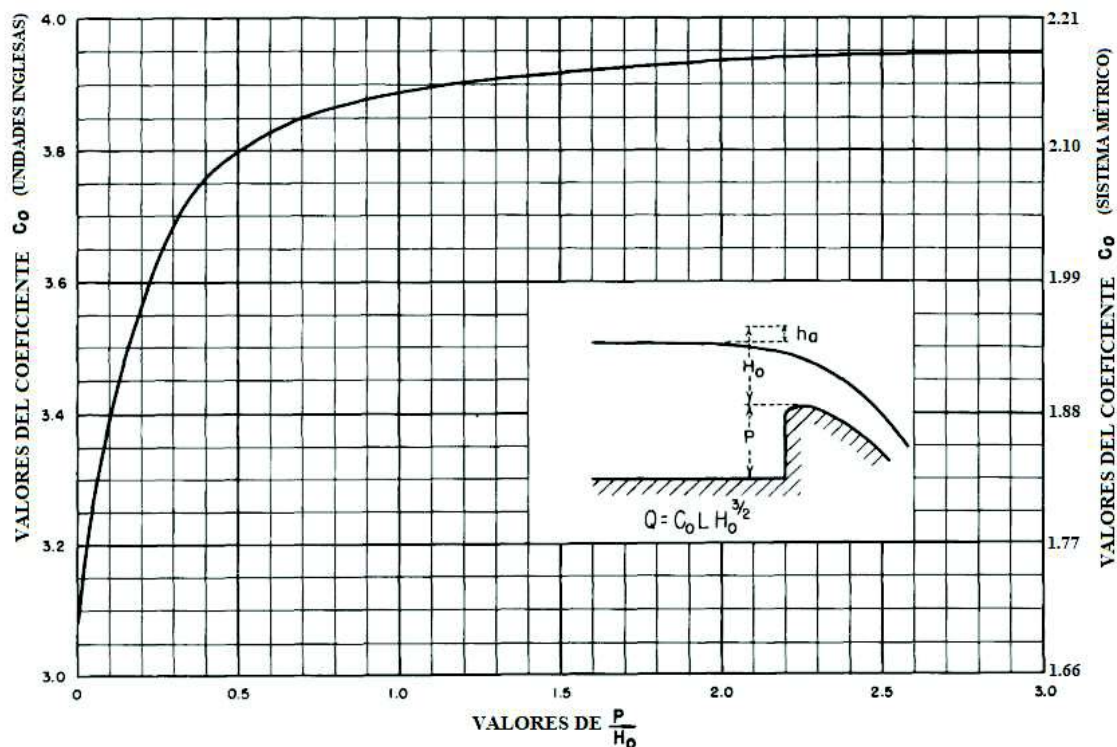
$$Q = CLH_e^{\frac{3}{2}} \quad (2.1)$$

En donde: Q es el caudal descargado (m^3/s), C es el coeficiente de descarga que es una medida de la eficiencia del vertedero, L es la longitud efectiva de la cresta del vertedero (m) y H_e es la altura de energía total sobre la cresta (m).

El coeficiente de descarga se modifica debido a una serie de factores, los más relevantes son (U.S. Bureau of Reclamation, 2007):

1. La profundidad de aproximación (P): la Figura 2.12 sólo es válida cuando la carga sobre la cresta sea igual a la de proyecto $H_e/H_o=1$, y se puede deducir que el coeficiente de descarga disminuye a medida que disminuye la profundidad de aproximación (P).

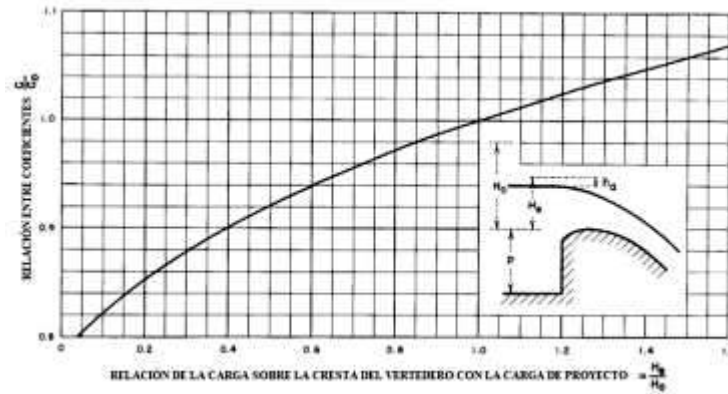
Figura 2.12 Coeficiente de descarga en función de la profundidad de aproximación



FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2007) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

- El efecto de cargas sobre la cresta distintas a las de proyecto: para cargas mayores $H_e > H_o$ se presentan presiones negativas y como se observa en la Figura 2.13 el caudal que se descarga es mayor, por el contrario, para cargas menores $H_e < H_o$ se presentan presiones positivas que reducen el caudal de descarga.

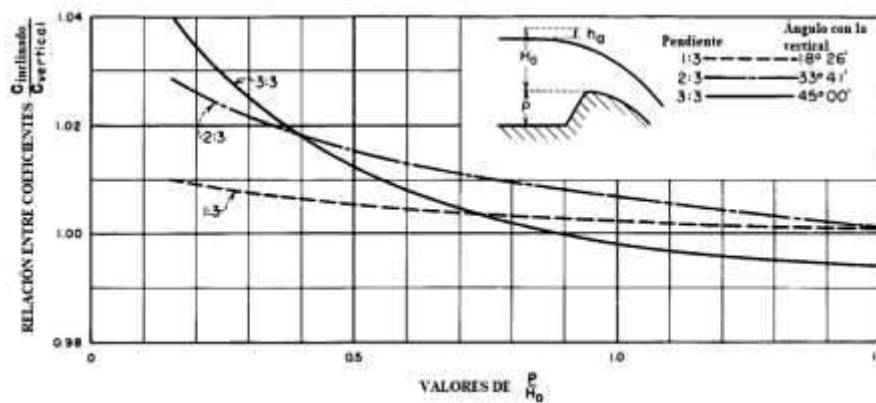
Figura 2.13 Coeficiente de descarga para distintas cargas



FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2007) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

- La pendiente del paramento aguas arriba: en la Figura 2.14 se observa que el efecto que generan las grandes pendientes (1H:3V, 2H:3V) es aumentar el coeficiente de descarga, respecto al coeficiente calculado anteriormente, mientras que una pendiente relativamente pequeña (3H:3V) disminuye el coeficiente de descarga cuando $P/H_0 > 0.9$.

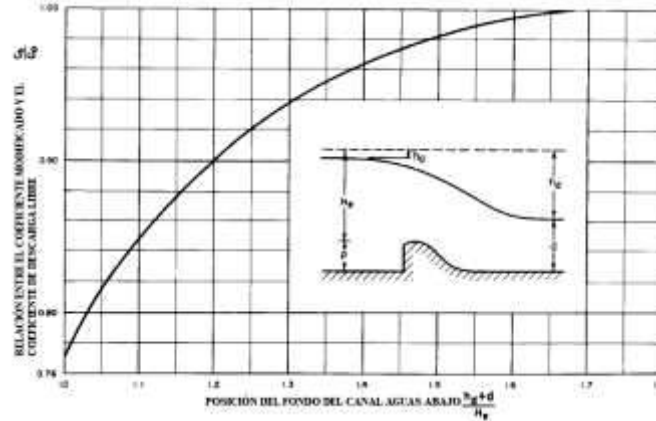
Figura 2.14 Coeficiente de descarga en función de la pendiente del paramento vertical aguas arriba



FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2007) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

- Efecto de la posición del fondo del canal aguas abajo: reduce el coeficiente de descarga por la contrapresión que genera el fondo del canal, este efecto se presenta cuando el flujo aguas abajo es supercrítico o con resalto hidráulico parcial; cuando la relación $(h_d+d)/H_e$ es mayor a 1.7 el fondo del canal ya no influye en el coeficiente de descarga (C), ver Figura 2.15.

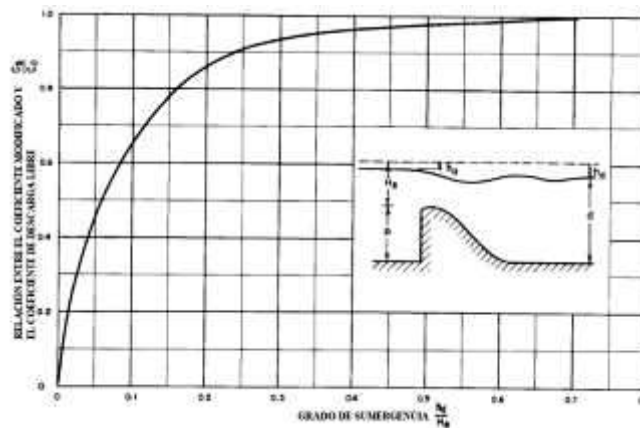
Figura 2.15 Coeficiente de descarga en función del nivel del canal aguas abajo



FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2007) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

- Grado de sumergencia: se produce una disminución del coeficiente de descarga por el efecto de sumergencia del caudal evacuado, cuando la relación h_d/H_e es menor a 0.7, ver Figura 2.16.

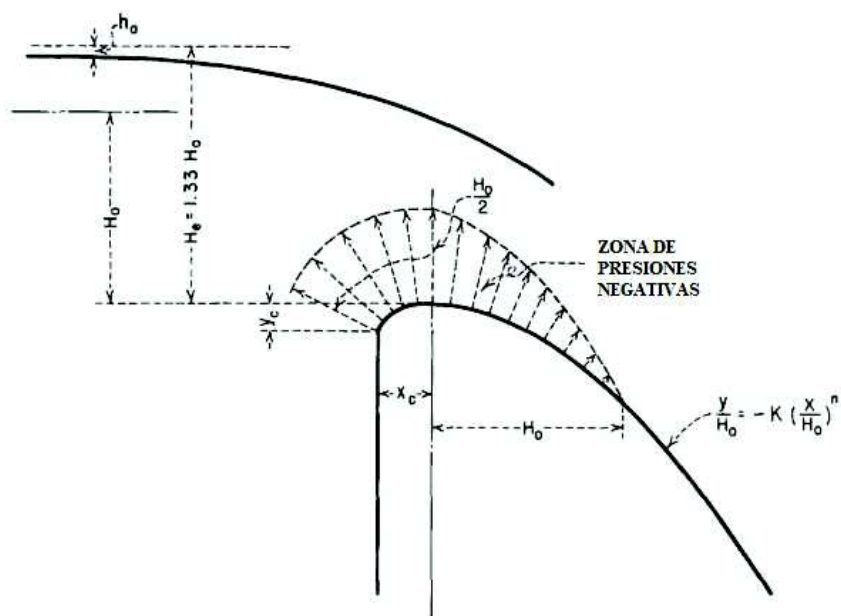
Figura 2.16 Coeficiente de descarga en función del grado de sumergencia



FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2007) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

En busca de economizar la construcción del vertedero, estos son diseñados para cargas menores que la máxima, mejorando la eficiencia de la descarga, pero generando presiones subatmosféricas sobre la cresta, ver Figura 2.17, estas presiones se toleran cuando la carga de diseño no es menor del 75% de la carga máxima ($H_0 \geq 0.75H_e$), cuando se pasa esta relación las presiones negativas pueden llegar a producir cavitación (Khatsuria, 2005).

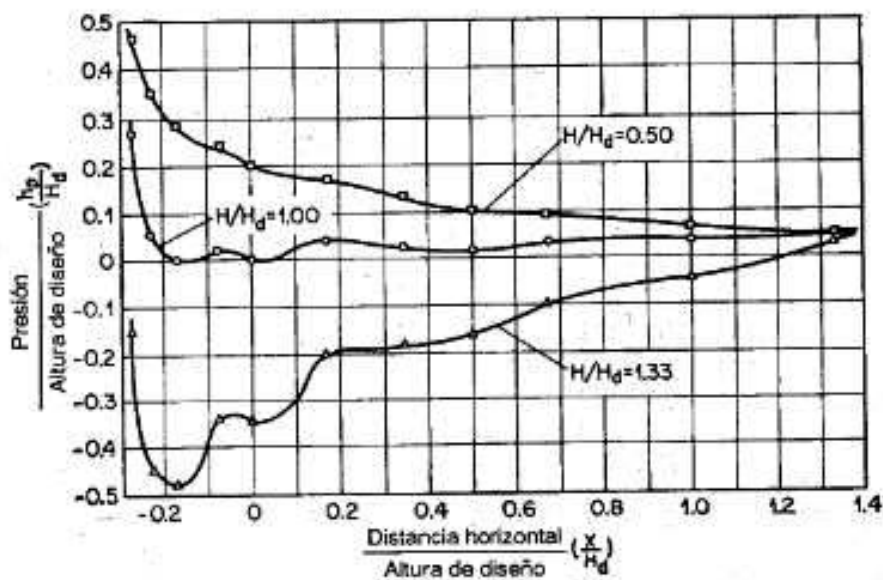
Figura 2.17 Presiones sobre la cresta de un vertedero sin control



FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2007) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

En base a las pruebas CW 801 en las formas de vertederos WES, se han desarrollado gráficas para determinar la presión a lo largo del vertedero para tres relaciones de (H_e/H_d) , ver Figura 2.18 (Chow, 2004).

Figura 2.18 Presiones sobre la cresta de vertederos de rebose WES altos



FUENTE: (Chow, 2004)

Tabla 2.1*Variación de presión y coeficiente de descarga sobre vertederos*

Carga sobre la cresta	Presión en la cresta	Coefficiente de caudal	Observación
$H_e = H_d$	$P \approx P_{atm}$	$C = C_d$	El desarrollo de la capa límite y la fricción no permiten que $P = P_{atm}$
$H_e > H_d$	$P < P_{atm}$	$C > C_d$	Eficiencia en el vertido con riesgo de cavitación
$H_e < H_d$	$P > P_{atm}$	$C < C_d$	Disminución del coeficiente de descarga

FUENTE: (Chanson, 2002) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

- **Vertederos con control**

Los vertederos de cimacio pueden ser controlados mediante compuertas, y sobre este se presentan dos escenarios (U.S. Bureau of Reclamation, 2007):

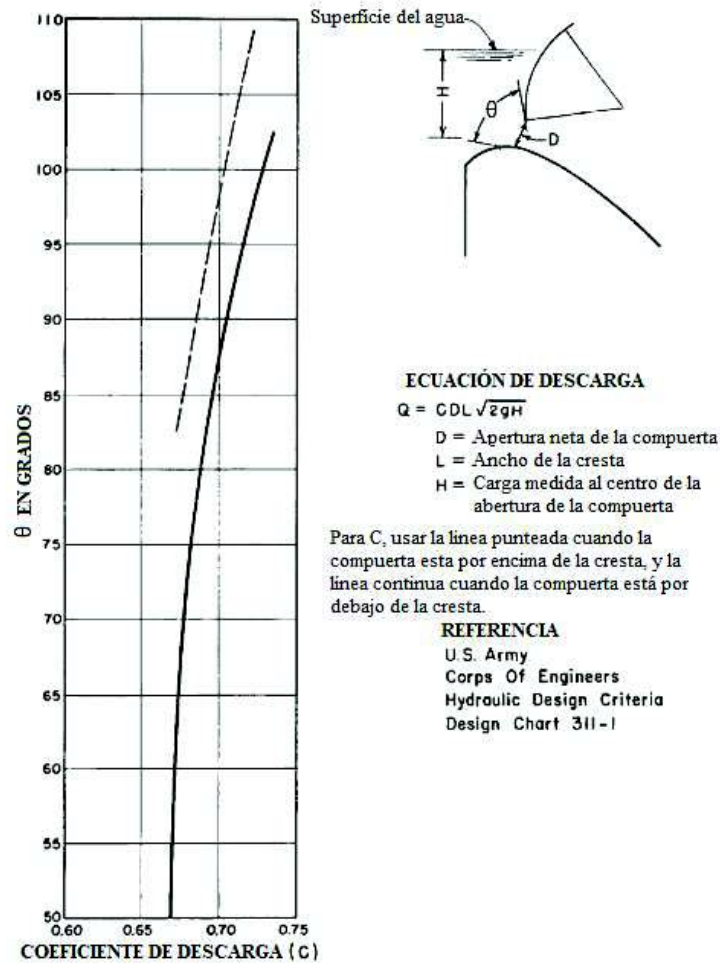
1. Compuertas abiertas totalmente: no se controla el caudal vertido, y el coeficiente de descarga (C) y la distribución de presiones corresponden a las de un vertedero sin control.
2. Compuertas parcialmente abiertas: el vertedero funcionará como un orificio con pequeñas cargas, y el caudal vertido se calcula:

$$Q = CDL\sqrt{2gH} \quad (2.2)$$

En donde: Q (m³/s) es el caudal vertido, C es el coeficiente de descarga, D (m) es la mínima distancia entre el labio de la compuerta y la cresta del vertedero, L (m) es la longitud efectiva del vertedero, g (m/s²) es la aceleración de la gravedad y H (m) es la carga de energía medida desde el centro de la abertura de la compuerta.

El coeficiente de descarga (C) varía en función de las líneas de corriente que entran y salen por el orificio, depende de la forma de la cresta, el tipo de compuerta y su ubicación, pero el parámetro más relevante es el ángulo (θ) formado por la tangente del labio de la compuerta y la tangente a la curva de la cresta más cercana a la compuerta, ver Figura 2.19 (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

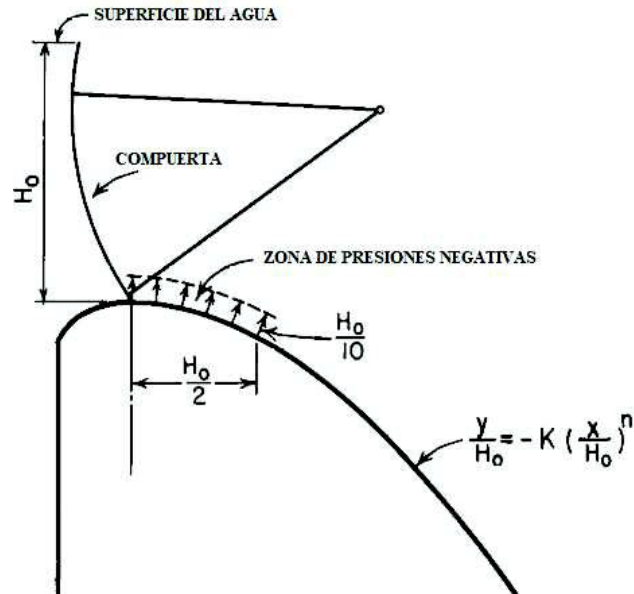
Figura 2.19 Coeficiente de descarga para distintas aberturas de compuerta



FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2007) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Cuando el vertedero opera con grandes cargas sobre la compuerta poco abierta, se presentan presiones menores a la presión atmosférica en la región próxima a la compuerta, ver Figura 2.20. Si el perfil de lámina vertiente fue diseñado para la carga máxima, para la condición anterior, las presiones presentes son aproximadamente de la décima parte de la carga de diseño ($0.10 H_0$), y se puede reducir el área en el que se presentan estas presiones colocando el umbral de la compuerta aguas abajo de la cresta del cimacio, de esta manera el chorro se ajustará a la forma de la lámina vertiente (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

Figura 2.20 Presiones sobre la cresta de un vertedero con compuerta



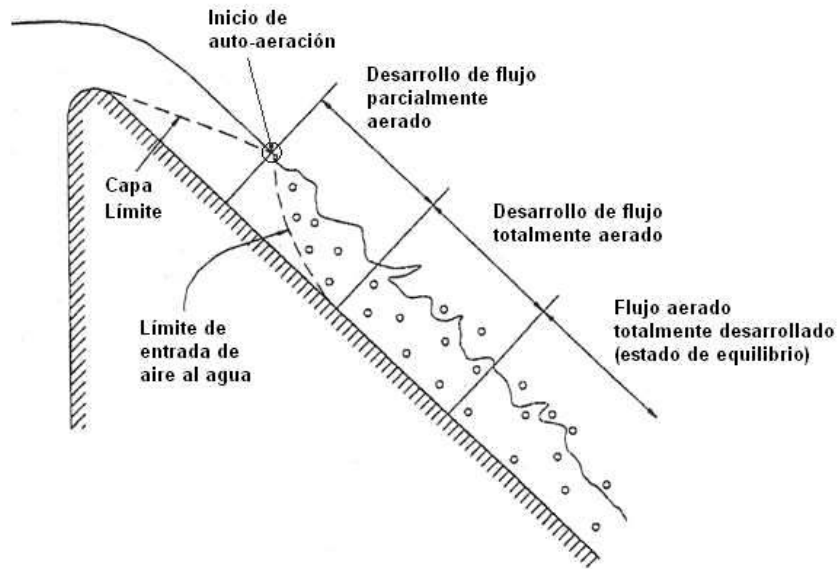
FUENTE: (U.S. Bureau of Reclamation, 2007) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Otra alternativa para evitar casi en su totalidad las presiones subatmosféricas, si el perfil del vertedero, a partir del punto del contacto entre la compuerta y la cresta, toma la forma de la trayectoria de un chorro, esta forma da un vertedero más ancho que proporciona mayor estabilidad estructural pero que disminuye el coeficiente de descarga (C) cuando la compuerta se encuentre totalmente abierta (U.S. Bureau of Reclamation, 2007).

2.1.5.2 Flujo agua-aire sobre la cresta de una presa

El arrastre de aire en la rápida de un vertedero es un proceso natural, al inicio de la descarga la superficie libre del flujo es lisa y transparente, pero la turbulencia generada por la rugosidad del vertedero (Chow, 2004), provoca que la capa límite turbulenta crezca gradualmente hasta alcanzar la superficie libre, alterando la superficie con la presencia de vórtices que arrastran aire, a este punto se le conoce como punto de inicio (Khatsuria, 2005).

Figura 2.21 Desarrollo de la aireación sobre el vertedero



FUENTE: (Toapaxi, 2014)

Aguas abajo del punto de inicio, el flujo está compuesto de una mezcla de agua-aire que se extiende gradualmente hasta la superficie del vertedero para pendientes pronunciadas, sin embargo, para pendientes pequeñas el equilibrio se alcanza antes de alcanzar la superficie del vertedero. El flujo cerca de la superficie es un flujo altamente aireado con una concentración de aire de 0.5 a 0.9, y las burbujas de aire alcanzan un diámetro de 10 a 20 mm, lejos de la superficie la concentración disminuye y el diámetro de las burbujas es de 0.5 a 3 mm.

Cuando la mezcla de agua-aire alcanza el equilibrio, en una zona más abajo del punto de inicio, el flujo se vuelve uniforme. La Figura 2.21 muestra un esquema del desarrollo del flujo agua-aire sobre el vertedero. El flujo entre el punto de inicio y el flujo uniforme es la región en la que se desarrolla el arrastre de aire y tiene un flujo gradualmente variado, su estructura vertical se describe en la Figura 2.22 (Khatsuria, 2005).

Figura 2.22 Estructura vertical del ingreso de aire



FUENTE: (Khatsuria, 2005) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Esta estructura también se puede describir únicamente por dos capas, una capa de aire arrastrado que está conformado por las burbujas que se transportan dentro del flujo de agua y una capa de aire atrapado que es el aire transportado dentro de la rugosidad de la superficie libre del flujo, estas dos capas conforman el aire total transportado, ver Figura 2.23. El aire arrastrado es más importante en el aspecto de prevención de cavitación (Khatsuria, 2005).

Figura 2.23 Aire atrapado y arrastrado por el flujo de agua



FUENTE: (Khatsuria, 2005) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Varios factores deben ser analizados debido a la aireación del flujo, los más importantes son (Khatsuria, 2005):

- Concentración de aire en el flujo, es necesario definir una concentración media de aire aguas abajo del punto de inicio. En un flujo uniforme esta concentración media es la misma para una pendiente, caudal y rugosidad dada.
- La distribución de velocidades es independiente de la concentración de aire, y se espera lo mismo en la región de flujo uniforme.

- El factor de fricción, debido a la presencia de aire cerca del límite flujo se espera la reducción de la tensión de corte y con ello el factor de fricción. La reducción del factor de fricción comienza cuando la concentración media de aire alcanza el 20%.
- Debido a la introducción de aire se produce un hinchamiento del flujo, el cual depende principalmente de la pendiente.

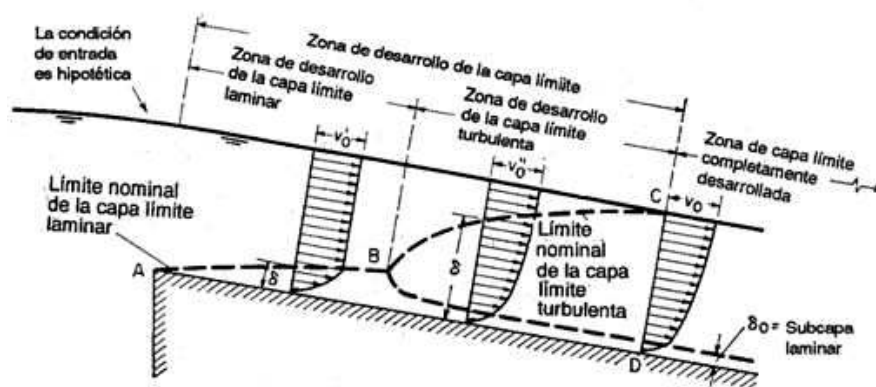
Es generalmente aceptado que el punto de inicio de la aireación es el punto donde parece en la superficie libre “agua blanca”, y coincide con el punto donde la capa límite turbulenta alcanza la superficie libre, por ello es importante definir la capa límite (Arreguín, 2000).

2.1.6 CAPA LÍMITE

En un canal la distribución de la velocidad varía con la distancia debido a la presencia de la rugosidad en la superficie. Si el flujo es uniforme y el canal posee una geometría definida con rugosidad constante, la distribución de velocidades alcanzará un patrón definido. El análisis simplificado del desarrollo de la capa límite establece las siguientes hipótesis (Chow, 2004):

- El flujo de entrada es laminar y su distribución de velocidades uniforme.
- A la entrada no existe perturbación ni en la superficie libre del agua ni en la distribución de velocidades.
- La profundidad de flujo a la entrada es constante.

Figura 2.24 Desarrollo de la capa límite en un canal abierto

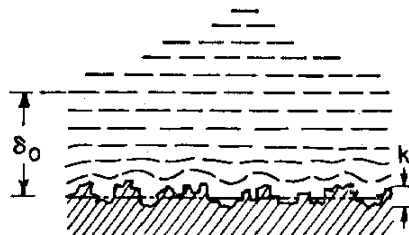


FUENTE: (Chow, 2004)

La distribución de velocidades fuera de la capa límite es uniforme, dentro de la capa límite la velocidad varía respecto a la distancia de la superficie. El espesor de la capa límite (δ) se define como la distancia perpendicular desde la superficie hasta el punto donde la velocidad es el 99% de la velocidad máxima presente en la distribución vertical de velocidades.

En el desarrollo de la capa límite se presenta una capa límite laminar y una capa límite turbulenta. Al inicio del flujo se presenta la capa límite laminar dentro de la cual el flujo es laminar y la distribución de velocidades es parabólica. Aguas abajo debido al aumento de la velocidad del flujo, el flujo pasa de laminar a turbulento, y es donde se presenta la capa límite turbulenta con una distribución de velocidades logarítmica, ver Figura 2.24. Dentro de esta capa límite turbulenta si la superficie es hidráulicamente lisa, la velocidad cercana a la superficie es pequeña por lo que se desarrolla una subcapa laminar (δ_0), dentro de esta subcapa el flujo es laminar y en la superficie de esta subcapa se presenta un flujo en transición de laminar a turbulento.

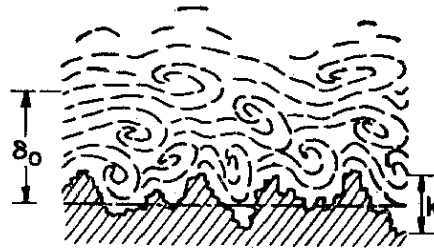
Figura 2.25 Superficie hidráulicamente lisa



FUENTE: (Chow, 2004) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

La existencia de una subcapa laminar dentro de la capa límite turbulenta permite explicar de mejor manera si una superficie es hidráulicamente lisa o hidráulicamente rugosa. La superficie está compuesta de irregularidades, la altura efectiva de estas es la rugosidad absoluta (k) y la relación de la rugosidad absoluta con el radio hidráulico (k/R) es la rugosidad relativa. Una superficie es hidráulicamente lisa cuando la rugosidad superficial es tan pequeña que todo el efecto que genera está dentro de la subcapa laminar, ver Figura 2.25. En cambio, una superficie es hidráulicamente rugosa cuando los efectos de la rugosidad se extienden fuera de la subcapa laminar perturbando el flujo, ver Figura 2.26 (Chow, 2004).

Figura 2.26 Superficie hidráulicamente rugosa



FUENTE: (Chow, 2004)/ MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Con el aumento de la velocidad de flujo el potencial daño por cavitación aumenta en proporción aproximadamente a la sexta potencia de la velocidad, un método sencillo para evitar estos daños es la aireación de flujo, puesto que la mezcla agua-aire absorbe los impactos de cavitación. Es importante señalar que la auto aireación solo es suficiente para intensidades de descarga pequeñas, y cuando se presentan altas intensidades de descarga se requiere de aireación artificial para que el aire llegue hasta la superficie del vertedero (Khatsuria, 2005).

2.1.7 CAVITACIÓN

Es la formación de una fase de gas y vapor de agua dentro de un líquido debido a presiones localizadas excesivamente bajas que igualan o superan la presión de vapor del líquido a temperatura ambiente. Este fenómeno es de suma importancia cuando se asocia con el diseño de vertederos, puesto que la vaporización ocurre cerca o sobre la superficie misma del vertedero y como regla general se recomienda investigar la cavitación en flujos con velocidades superiores a los 15 m/s (Arreguín, 2000).

2.1.7.1 Índice de cavitación

El potencial de daño resultante de la cavitación depende de la forma de la superficie, las características de resistencia al daño de la superficie, la velocidad y profundidad del flujo, la elevación de la estructura por encima del nivel medio del mar y la duración de la cavitación (U.S. Army Corps of Engineers, 1990). La forma, la velocidad y la elevación están relacionadas por el índice de cavitación, σ , que es una medida adimensional utilizada para caracterizar la susceptibilidad de un sistema a cavitación (Khatsuria, 2005).

$$\sigma = \frac{p_0 - (p_v + \gamma(z_c - z_o))}{\frac{\rho V_0^2}{2}} \quad (2.3)$$

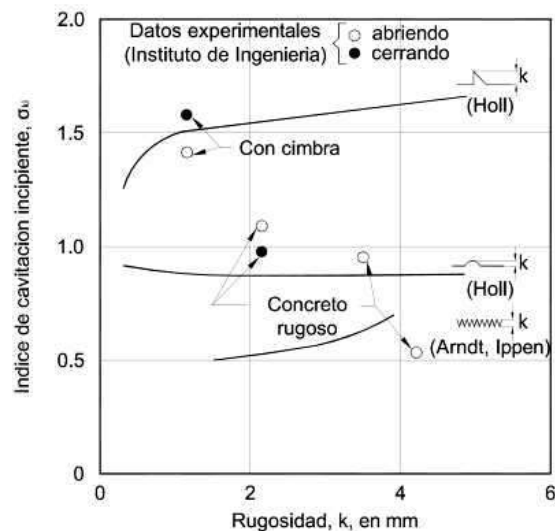
Para altas velocidades, el término de elevación puede ignorarse.

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{\rho V_0^2}{2}} \quad (2.4)$$

Donde: p_0 es la presión absoluta (Pa), p_v es la presión de vaporización (Pa), V_0 es la velocidad del flujo (m/s) y ρ es la densidad del fluido (kg/m³). El índice de cavitación (σ) debe ser comparado con el índice de cavitación incipiente (σ_i), si $\sigma_i > \sigma$ existe la posibilidad de cavitación (Arreguín, 2000) (Ver Figura 2.27 y 2.28). De manera general el riesgo de cavitación es esperado cuando el índice de cavitación es menor a 0.2 (Mays, 2004).

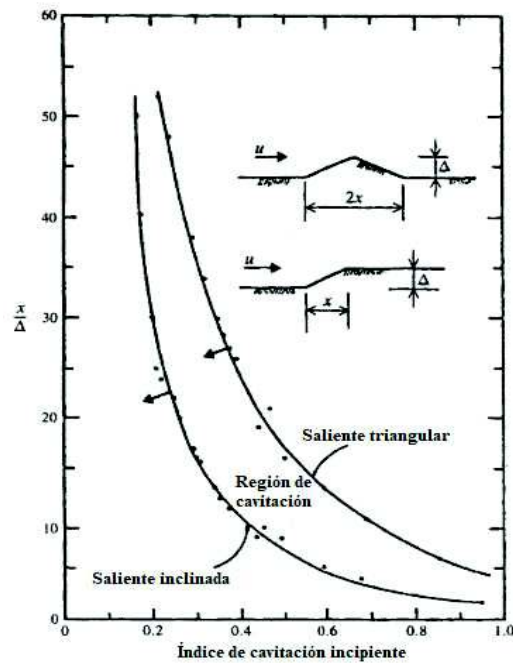
La Figura 2.27 muestra el índice de cavitación incipiente en función de la rugosidad y la Figura 2.28 muestra el índice de cavitación incipiente en función de protuberancias inclinadas.

Figura 2.27 Índice de cavitación incipiente para distintas rugosidades



FUENTE: (Rosales, 2013)

Figura 2.28 Índice de cavitación incipiente para protuberancias inclinadas



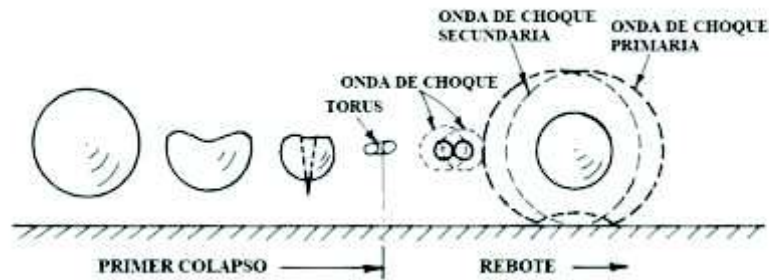
FUENTE: (Novak P. , Moffat, Nalluri, & Narayanan, 2007) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.7.2 Daño por cavitación

El daño por cavitación ocurre cuando las burbujas llenas de gas y vapor de agua crecen y se desplaza desde la zona de baja presión a una zona de alta presión que no admite la cavitación y colapsan (Khatsuria, 2005). El colapso de una burbuja cerca o en la superficie del vertedero genera una presión muy alta que actúa sobre un área infinitesimal ($10\ 000\ \text{kg/cm}^2$) durante un período de tiempo muy corto (Arreguín, 2000).

El colapso de una burbuja consiste en fases en las que el diámetro de la burbuja disminuye hasta alcanzar un mínimo (implosión) y luego crece o rebota, este proceso se repite durante varios ciclos, disminuyendo el diámetro de la burbuja en cada ciclo hasta que finalmente se vuelve una burbuja microscópica, ver Figura 2.29 (Khatsuria, 2005).

Figura 2.29 Colapso de una burbuja



FUENTE: (Khatsuria, 2005) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

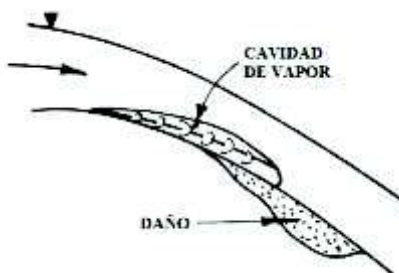
En el hormigón es común la presencia de micro fisuras en la superficie, y entre el hormigón y los agregados gruesos, por lo que la presión generada por la implosión de las burbujas llenan estas fisuras generando tensiones de tracción que aflojan elementos del material (Khatsuria, 2005), por lo que una secuencia de implosiones causan y propagan las grietas provocando finalmente desprendimiento de material y agravando aún más el fenómeno de cavitación (U.S. Army Corps of Engineers, 1990).

2.1.7.3 Cavitación en superficies de vertederos

Las principales causas de daños por cavitación en la superficie del vertedero se pueden clasificar en (Khatsuria, 2005):

- Diseño inadecuado: crestas de vertederos sub diseñados, ranuras de compuertas y curvaturas inadecuadas en transiciones conducen a la separación de flujo y la presencia de presiones negativas, ver Figura 2.30 y Figura 2.31.

Figura 2.30 Daño por cavitación debido a una curvatura brusca



FUENTE: (Khatsuria, 2005) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

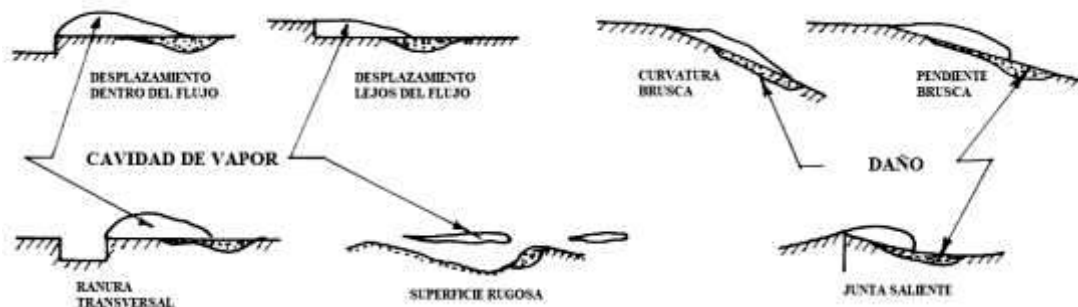
Figura 2.31 Daño por cavitación debido a ranura transversal



FUENTE: (Khatsuria, 2005) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

- Desalineación: la desalineación de estructuras respecto al diseño puede provocar serios problemas de cavitación.
- Rugosidad de la superficie: las angulosidades de la superficie que se encuentran aisladas se conocen como rugosidad local y generan desviaciones del flujo formando cavitación en la zona que se esperaba el flujo si no hubiera sido desviado, ver Figura 2.32. Si una superficie posee rugosidad en un área amplia, ya sea por abrasión o erosión, se la conoce como rugosidad uniformemente distribuida. Si una superficie se ha hecho uniformemente rugosa en condiciones controladas puede dar como resultado un índice de cavitación mayor y un potencial de daño menor.

Figura 2.32 Rugosidades aisladas comunes y probable lugar de daño



FUENTE: (Khatsuria, 2005) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.7.4 Prevención de daños por cavitación

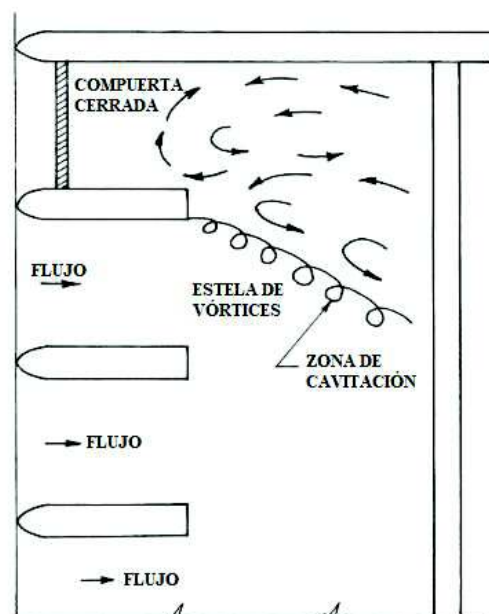
En teoría el daño por cavitación puede prevenirse aumentando el índice de cavitación mediante una forma de rugosidad superficial más uniforme, pero esta opción es poco práctica debido al proceso constructivo. Aumentar la resistencia del material o usar superficies endurecidas solo postergará las consecuencias no las

eliminará. Un método muy eficaz para prevenir el daño inducido por la cavitación es dispersar una cantidad de aire a lo largo del límite del flujo mediante aireadores, su efecto es elevar la presión (U.S. Army Corps of Engineers, 1990).

Por ellos es necesario considerar las medidas de prevención en las siguientes etapas (Khatsuria, 2005):

- **Diseño:** el perfil de la cresta del vertedero debe diseñarse para cargas mayores al 75% de la carga máxima de desbordamiento y debe ser igual al perfil de la trayectoria, además debe evitarse transiciones bruscas. Todos los accesorios de disipación de energía no deben operar a velocidades de flujo mayores a 15 m/s.
- **Construcción:** se debe monitorear el progreso para evitar desajustes y errores a gran escala, también debe controlarse el acabado superficial (rugosidad).
- **Operación:** debe evitarse el funcionamiento asimétrico de compuertas sobre la cresta del vertedero, puesto que puede inducir cavitación y condiciones de flujo propicias para daños por abrasión, ver Figura 2.33.

Figura 2.33 Separación de flujo debido a funcionamiento asimétrico de compuertas



FUENTE: (Khatsuria, 2005) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

2.1.7.5 Medidas correctivas y reparaciones

En las estructuras existentes que sufren daños por cavitación se debe determinar la causa que origina la cavitación para emplear medidas correctivas, la mayoría se pueden rectificar hasta valores permisibles, pero un inadecuado diseño y otras irregularidades no se pueden corregir, es entonces la aireación la mejor medida correctiva.

El uso de placas de revestimiento de acero inoxidable en superficies de concreto sujetas a alta velocidad es una solución exitosa para proteger las superficies contra la erosión por cavitación, ya que es cuatro veces más resistente al daño por cavitación que hormigón ordinario, el inconveniente radica en su alto costo y que estas placas pueden ser arrancadas agravando el problema.

El uso de compuestos epoxi proporcionan una unión duradera entre el hormigón y el hormigón epoxi, incluso en condiciones húmedas. Además de proveer resistencia a daños por cavitación. El concreto reforzado con fibra (FRC) es resistente a los efectos combinados de la erosión por cavitación y abrasión. El hormigón con polímeros como el concreto impregnado de polímeros (PIC), concreto de cemento portland con polímeros (PPCC) y concreto con polímeros (PC) son usados como materiales de reparación de concreto para superficies dañadas.

El hormigón antiabrasión ALAG está hecho de aluminato de calcio y agregado sintético reactivo al aluminato de calcio, proporcionando enlaces químicos como físicos que le dan resistencia mecánica para resistir la abrasión, además de haber sido probados en condiciones de cavitación en velocidades de 110 m/s (Khatsuria, 2005).

2.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA

2.2.1 ANTECEDENTES DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

La Hidráulica se suscitó a manera de un grupo de actividades técnicas, dichas actividades estuvieron basadas en el empirismo. Con la revolución industrial se dio comienzo a la Ingeniería como profesión formal, al mismo tiempo se establecieron los fundamentos teóricos de la Ingeniería Hidráulica, consolidada en la mecánica

de fluidos. De esta manera se originaron las denominadas ecuaciones fundamentales.

No obstante, estas ecuaciones solamente se las podía incluir en casos muy restringidos, lo cual implicaba que sean poco prácticos. Asimismo, algunos temas debido a su cierto grado de dificultad no permitían un planteamiento teórico. La manifestación de la modelación física como materia científica fue el recurso empleado para responder a estas restricciones.

Aunque los métodos numéricos ya eran parte de una alternativa teórica desde hace mucho tiempo atrás, no fue sino en torno a 1950 en donde gracias al auge de computadoras que estaban al alcance de los ingenieros hidráulicos se consolidó la tendencia por la solución de las ecuaciones con el apoyo de un ordenador sin recurrir a la modelación física.

De esta manera se estableció la modelación numérica rescatando los antiguos métodos numéricos. A su vez el empleo de esta técnica impulsó el origen de nuevas aproximaciones como son la de los elementos finitos y de contorno.

Debido al aumento de computadoras personales que tuvo lugar en la década de los años 80, y gracias al bajo costo que se tenía cada vez por estos ordenadores, se afianzó mucho más las posibilidades de estos sistemas de cálculo. Esto conllevó a que la diferencia de costos que se tenía entre la elaboración de un modelo físico y la ejecución de un ordenador sea muy significativa.

De igual manera, la computadora hizo posible que se desafíe la resolución de problemas que en esos días no eran abordados. En los últimos años se dio lugar a modelos matemáticos de turbulencia que fueron aplicados en ciertos problemas de interés; tales como: perfiles de velocidad en resaltos y dispersión de contaminantes en la atmósfera (Lopardo, 1995).

Entonces, un modelo físico o matemático representa una simplificación de la naturaleza y de las obras realizadas en la misma. La elaboración de modelos además de ser un método aceptado es también el que ha hecho posible que la ciencia progrese (Rocha, 2003).

Actualmente se puede sugerir que tanto la modelación física como la numérica se complementen entre sí, con la finalidad de reproducir a detalle lo que se acontezca en el estudio de un fenómeno determinado (Lopardo, 1995). Cabe destacar que el ingeniero es quien debe llegar a un equilibrio entre aspectos de seguridad, eficiencia y costo que impliquen el diseño de una estructura (Rocha, 2003).

2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

El desplazamiento del agua en flujo superficial es característico de innumerables problemas que se tienen dentro de la ingeniería hidráulica, a los cuales el ingeniero civil presta una gran importancia, ya sea en flujos naturales en quebradas y ríos o en estructuras hidráulicas tales como: puentes, bocatomas, desarenadores, canales, etc. Es posible que la dinámica del flujo llegue a tener un alto grado de complejidad, y la construcción de modelos físicos sea indispensable para estos casos como lo ha venido siendo durante varios años. Estos modelos fueron durante mucho tiempo la única metodología factible encargada del estudio y diseño apropiado de las estructuras hidráulicas.

No obstante, en años recientes el asombroso aumento en las capacidades computacionales y la mejora en sus algoritmos ha encaminado a un notable progreso de modelos numéricos que se han empleado para representar el flujo de agua por gravedad (Vásquez, 2003).

2.2.2.1 Modelación Física

Un modelo físico a escala reducida es una herramienta que se emplea en el diseño, verificación y optimización de estructuras hidráulicas (Badano & Menéndez, 2014). Sin embargo, para que los fenómenos observados en una obra a escala natural (prototipo) sean similares en el modelo a escala reducida, es necesario respetar las condiciones de similitud y las características físicas de los materiales (Caicedo, Velasquez, & Monroy, 2004). Este tipo de modelación se desarrolló y mejoró entre los años 1950 y 1965 fundamentalmente para presas de hormigón que implicaban en su diseño curvaturas múltiples y con alto grado de dificultad, esto a causa de que en la aplicación de análisis matemáticos sofisticados se requería una gran

disponibilidad de cómputo, lo cual en ese entonces era una gran limitación (Novak et al., 2007).

Se puede afirmar que un modelo físico es una herramienta eficaz en acontecimientos donde la teoría no es suficiente, no se puede aplicar o en algunos casos inexistente. La construcción de este tipo de modelo se justifica si la estructura es de gran relevancia y magnitud considerable, cuyo colapso o falla desencadenara graves consecuencias. Asimismo, es necesario su empleo debido a que propicia la comprobación, o en algunos casos la oportunidad de incluir un ahorro significativo en el valor de las construcciones (Pulcha, 2014).

La investigación en modelo físico permite visualizar el funcionamiento de la estructura en tres dimensiones, a diferencia de la gran parte de expresiones utilizadas en Hidráulica que competen a modelos bidimensionales. Además de esto, este tipo de modelación brinda la posibilidad de analizar diferentes condiciones de diseño y operación con gran facilidad, tales como: variación de caudales, cantidad de sólidos, etc. Cabe mencionar que un modelo no siempre tiene que dar información cuantitativa, en algunas ocasiones, debido a diferentes condiciones, solamente se logra conseguir información cualitativa (Rocha, 2003).

Un modelo físico facilita precisar algunas características de diseño, estudiando su comportamiento hidráulico desde su fase inicial (Pulcha, 2014). La acertada representación de los resultados que se logran en el estudio es responsabilidad del ingeniero, él es quien a fin de cuentas tiene la obligación de solucionar los problemas con apoyo del modelo analizado.

Cuando la modelación física es indispensable, esta debe integrarse al estudio definitivo y elaborarse simultáneamente con él. En varios casos la investigación en este tipo de modelo debe establecerse en el análisis de alternativas.

Un modelo, además de constituir una simplificación a escala de una parte del medio ambiente y de las construcciones impulsadas en él, con propósito de investigación, debe contar con alguna de las propiedades del prototipo que pretende representar. Por ejemplo, en el modelo de un resalto hidráulico, además de satisfacer la similitud geométrica, es necesario que se cumpla con la igualdad del número de Froude y

también exista un grado aceptable de turbulencia (Rocha, 2003). Es imprescindible proporcionar al modelo un gran número de datos de excelente calidad si queremos que este nos otorgue información útil y provechosa (Pulcha, 2014).

En un modelo físico el flujo se propone modelar por medio de un fluido. Sus dimensiones son generalmente más pequeñas en comparación a las que posee el prototipo, es por aquello que corresponde garantizar la presencia de relaciones, denominadas escalas, las cuales deben ser permanentes en cada modelo y propiedades de cada magnitud (Mateos, 2000). Un ejemplo de prototipo y modelo físico se aprecia en las Figuras 2.34 y 2.35 respectivamente.

Figura 2.34 Ejemplo de prototipo (Presa Toachi)



FUENTE: (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014)

Figura 2.35 Ejemplo de modelo físico (Presa Toachi)



FUENTE: (CIERHI, 2013)

El problema fundamental radica en la construcción del modelo para que con las escalas adecuadas conserve un comportamiento que represente justamente el del prototipo. Lo relevante de esta modelación es que se sabe con toda seguridad que las ecuaciones que gobiernan tanto en el prototipo como en el modelo son las mismas (Mateos, 2000).

Como se mencionó anteriormente, para que los modelos físicos sean equivalentes al prototipo además de cumplir con las leyes de similitud (Tabla 2.2), se deben minimizar los efectos de escala, los cuales son resultado de la escala adoptada, dimensiones y demás propiedades del modelo que hacen que en él surjan ciertos fenómenos que no coincidan con los que se tienen en el prototipo (Rocha, 2003).

Tabla 2.2

Leyes de similitud: Geométrica, Cinemática y Dinámica

Similitud Geométrica	Se establece cuando la escala de longitud es igual en todas las direcciones (Novak et al., 2007).
Similitud Cinemática	Se cumple en el momento en que la relación de velocidades de puntos semejantes es permanente, a priori debe haberse cumplido la similitud geométrica (Vergara, 1993).
Similitud Dinámica	Además de haber cumplido con las dos similitudes anteriores, es preciso tomar en cuenta la acción de las fuerzas que se ejercen sobre las partículas del fluido, como, por ejemplo, tensión superficial, de inercia, de fricción, de gravedad o peso, etc. Esto conlleva a que el polígono de fuerzas actuante en los sitios análogos sea similar geométricamente, dando lugar a la similitud dinámica (Vergara, 1993).

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Al cumplirse con las similitudes anteriormente descritas, el movimiento del fluido tanto en prototipo como en modelo será completamente similar (Vergara, 1993).

La elección apropiada del criterio de similitud corresponde al paso inicial del diseño de un modelo. Por ejemplo, si se pretende representar y analizar un flujo a superficie libre en el cual prevalecen las fuerzas de gravedad sobre las de inercia, el número de Froude tiene que ser el mismo en prototipo y modelo necesariamente. De esta manera, el número de Froude se establece como el Parámetro Característico de la Información (PCI).

Consecuentemente se determinan las escalas del modelo, en las cuales se deben considerar factores como requerimientos teóricos generados en el PCI y detalles inherentes al laboratorio en el que se llevará a cabo el estudio, tales como área disponible, precisión de instrumentos presentes en el mismo, capacidad de las bombas a emplearse y demás factores.

De lo anteriormente señalado se deduce que un modelo brinda la posibilidad de ser analizado en un laboratorio con una escala definida y en otro laboratorio con una escala distinta. En la selección de escalas, de manera indirecta entra en consideración los límites del modelo, estas condiciones de frontera son de vital importancia y demanda de gran pericia.

Para entender y representar de manera adecuada los resultados del modelo es de vital trascendencia el criterio de similitud seleccionado, las escalas adoptadas, la especificación de las condiciones de frontera y los efectos de escala.

Una de las cuestiones de mayor interés para los proyectistas es el costo del modelo, siendo esta muy fácil de responder: muy poco si se contrasta con el costo del diseño, prácticamente nada si se relaciona con el valor total de la construcción, algo significativo si se considera el ahorro que se puede tener y en realidad nada si se le diferencia con la seguridad extra conseguida (Rocha, 2003).

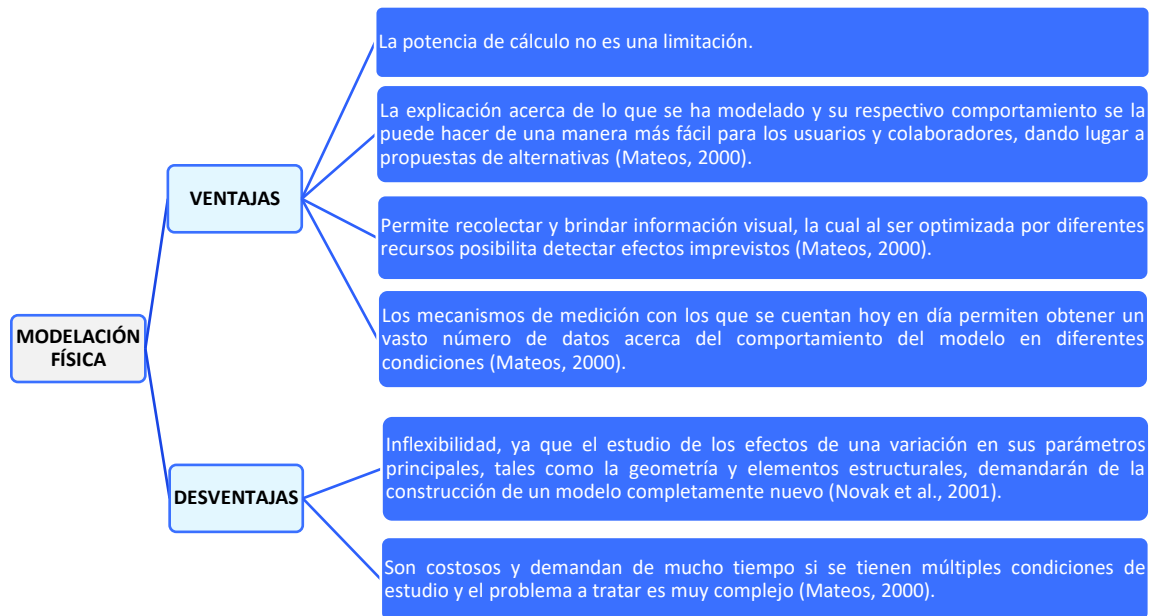
Otro tema de interés para los ingenieros proyectistas recae en la confiabilidad del modelo físico, la cual gira en torno a diversos agentes, tales como: el problema representativo que se está estudiando, tipo de estructura, escalas adoptadas, calidad de información, etc. Siempre se debe considerar que un modelo físico solamente responderá a las cuestiones por las cuales fue elaborado, por ende, no necesariamente resolverá todos los problemas. Debido a lo anteriormente señalado, una de las tareas más difíciles que se presentan en el estudio en un modelo físico es el planteamiento adecuado de los problemas y preguntas que se pretenden solucionar (Pulcha, 2014).

La calibración de este tipo de modelo es un procedimiento dirigido a comprobar que el modelo reproduzca fielmente el comportamiento del prototipo, lo cual se logrará al cumplir con la similitud dinámica (Pulcha, 2014).

- **Ventajas y desventajas del modelo físico**

La Figura 2.35 muestra algunas de las ventajas y desventajas del modelo físico.

Figura 2.36 Ventajas y desventajas del modelo físico



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Una vez terminada la investigación en el modelo es necesario representar los resultados y elaborar conclusiones y recomendaciones respectivas. En este punto se debe considerar las limitaciones generadas en la ley de similitud seleccionada y en las escalas adoptadas, prestando interés a los efectos de escala que se presentaran.

De igual manera finalizado el estudio en modelo, se tienen dos opciones relacionadas al modelo en sí, la primera y más común es destruirlo. La otra alternativa es conservar dicho modelo. En la mayoría de los proyectos es preferible conservarlo, ya que, si un determinado aspecto del prototipo no funcionara de manera correcta, se podría buscar su optimización apoyándose en el modelo (Rocha, 2003).

2.2.2.2 Modelación Numérica

De manera paralela al empleo de la modelación física, los ingenieros establecieron un método diferente con el fin de resolver los problemas hidráulicos complejos, que era el uso de modelos matemáticos aplicados a la hidráulica del flujo en superficie libre, esto debido al surgimiento y evolución de las computadoras y técnicas de

programación que se dio a partir de la década de los años 60 del siglo anterior (Balairón, López, Morán, Ramos, & Toledo, 2014).

La aplicación de esta metodología contó con dos posibilidades: la primera era el empleo de modelos comerciales impulsados por entidades públicas o particulares que utilizan las ecuaciones de comportamiento de manera muy reducida (pero adecuadamente analizadas) con el propósito de que su uso sea accesible. La segunda posibilidad era la creación de modelos ad hoc (híbridos), los cuales fueron desarrollados fundamentalmente en universidades y centros de investigación, dichos modelos tuvieron su aplicación en casos muy limitados (Balairón et al., 2014).

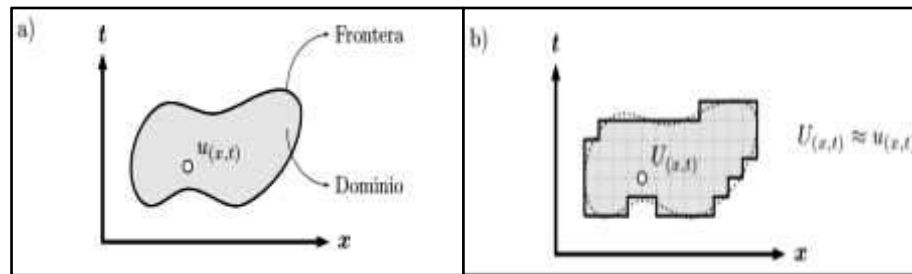
En este tipo de modelación se busca resolver de manera numérica las ecuaciones que gobiernan el problema, estas se consideran lo bastante conocidas, al igual que las condiciones iniciales y de borde respectivas (Mateos, 2000).

El flujo superficial, a excepción de algunos casos como: flujo uniforme, orificios, vertederos y otros, no se consigue resolver de manera analítica. El régimen gradualmente variado, inclusive en canales prismáticos con una geometría sencilla, demanda de cálculo numérico para llegar a su resolución. Un número importante de problemas, tales como: el flujo en estructuras hidráulicas artificiales o en cauces naturales únicamente se permiten describir a través de expresiones matemáticas complejas, las cuales exigen técnicas avanzadas para su correspondiente solución (Vásquez, 2003).

Un modelo numérico está constituido por un grupo de hipótesis y relaciones de las variables que representan el fenómeno a investigar, dicho modelo conlleva a cuestiones matemáticas que para su resolución es necesario emplear herramientas numéricas adecuadas (Vergara, 1993). La modelación numérica de las ecuaciones de flujo consta de dos pasos principales que deben llevarse a cabo para la elaboración de un modelo computacional (Pulcha, 2014):

1. Discretizar el dominio computacional: En la Figura 2.36 se indica el dominio continuo y el dominio discretizado

Figura 2.37 Dominio de solución de una Ecuación en derivadas parciales de variable espacio-temporal. a) Dominio de solución continuo, b) Dominio de solución discretizado



FUENTE: (Suxo, 2016)

2. Aproximar las ecuaciones en derivadas parciales a ecuaciones algebraicas

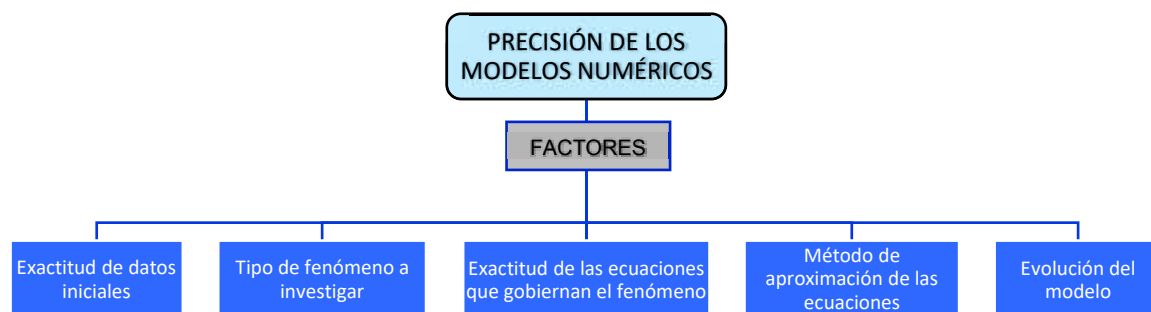
Finalmente, por medio de la combinación de los dos pasos expuestos anteriormente, se obtiene la solución numérica (Pulcha, 2014).

En numerosas ocasiones las ecuaciones que gobiernan los fenómenos físicos a ser evaluados no permiten ser resueltas de forma analítica, siendo indispensable el uso de métodos aproximados a través de procedimientos computacionales, hallándose entre los más empleados el de diferencias finitas y elementos finitos (Vergara, 1993). Estos métodos se describirán de manera detallada en la sección: Dinámica de Fluidos Computacional CFD: Métodos de solución de un código CFD

- **Factores que definen la precisión de los modelos numéricos**

La precisión de los modelos numéricos está dada por los factores expuestos en la Figura 2.38.

Figura 2.38 Factores que definen la precisión de los modelos numéricos



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

1. Exactitud de los datos iniciales: Analizar la discontinuidad y magnitud de error de los datos.
2. Tipo de fenómeno a investigar: Su precisión dependerá del fenómeno y su trascendencia.
3. Exactitud de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno: La precisión con la que el fenómeno podrá describirse depende de las ecuaciones diferenciales que se han implementado al momento de proponer el modelo. Dicha precisión está limitada por las hipótesis planteadas y por el mismo hecho de no tomar en cuenta ciertas variables.
4. Método de aproximación de las ecuaciones: La exactitud se puede alterar debido a errores de truncamiento que se generan en el proceso de aproximación del sistema de ecuaciones diferenciales parciales a sistema de ecuaciones en diferencias.
5. Evolución del modelo: En el desarrollo del cálculo, al variar el modelo en tiempo y espacio, puede suceder que los errores generados se acumulen o se propaguen.

Finalmente es indispensable describir los conceptos fundamentales relacionados a los modelos numéricos, que son: consistencia, estabilidad y convergencia.

Si se considera que un modelo se ha elaborado por el método de diferencias finitas, se podrá afirmar que es consistente en el momento en que al tender a cero tanto el tamaño de la malla como el intervalo de tiempo, las ecuaciones en diferencias brindan soluciones semejantes que las ecuaciones en derivadas parciales; que es estable si al modificar los parámetros a los cuales obedece el modelo, las soluciones alcanzadas se mantienen acotadas; y, que es convergente en caso de que el modelo cumpla con los conceptos de consistencia y estabilidad al mismo tiempo (Vergara, 1993).

- **Etapas del desarrollo de una simulación numérica y de un paquete computacional**

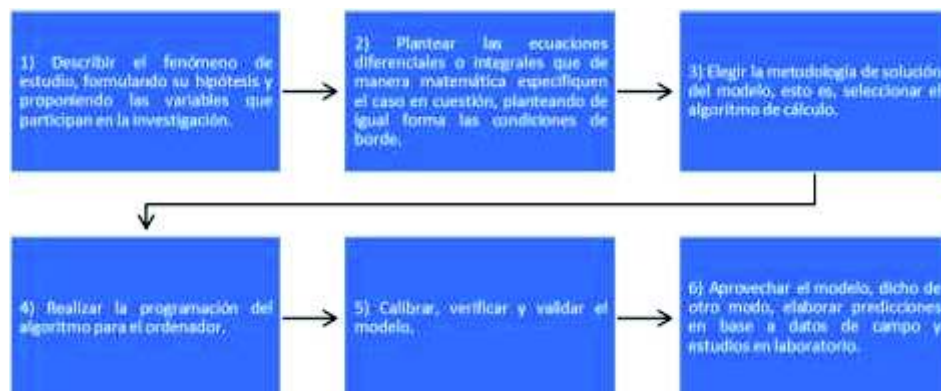
Las etapas por llevarse a cabo en el desarrollo de una simulación numérica y un paquete computacional se exponen en las Figuras 2.39 y 2.40 respectivamente.

Figura 2.39 Etapas de una simulación numérica



FUENTE: (Tarifa, 2001)/ ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 2.40 Etapas del desarrollo de un paquete computacional



FUENTE: (Vergara, 1993) / ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Tipos de modelos numéricos**

En sus inicios la modelación numérica se desarrolló únicamente para dar solución a un problema específico, comúnmente de flujo agua. En la actualidad estos modelos son generales y cuentan con la disposición para solucionar un conjunto de condiciones de flujo semejantes, con módulos complementarios para determinar demás fenómenos como calidad de agua, dispersión de contaminantes, transporte de sedimentos, etc (Vásquez, 2003).

(Vásquez, 2003) señala ciertos criterios para la clasificación de los modelos numéricos, entre los cuales se pueden mencionar:

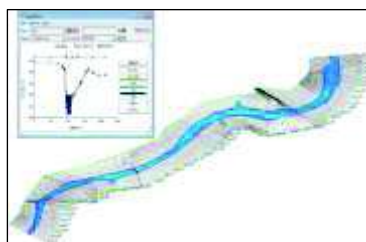
- 1. En relación con su dimensionalidad**

- a) Modelos Unidimensionales (1D)**

Hipotéticamente una dimensión predomina con respecto a las otras dos. Dicha dimensión corresponde a la longitudinal a lo largo del eje del canal o del río. Los datos concernientes a hidráulica y topografía se incluyen por medio de secciones transversales, en donde se calcula la velocidad y el calado promedio. En otros términos, toda la sección es caracterizada por un valor promedio único de velocidad, sin tomar en cuenta las alteraciones en la distribución de velocidades tanto vertical como horizontalmente. Se asume que el flujo es normal a la sección transversal, siendo esta suposición una de las restricciones para su empleo.

Estos modelos se pueden adaptar a tramos de ríos y canales extensos, frecuentemente superiores a veinte veces el ancho, además son aplicables cuando se pretende definir el nivel máximo de agua (como por ejemplo para el diseño de diques). Un ejemplo de este tipo de modelos se expone en la Figura 2.41.

Figura 2.41 Ejemplo de modelación numérica unidimensional



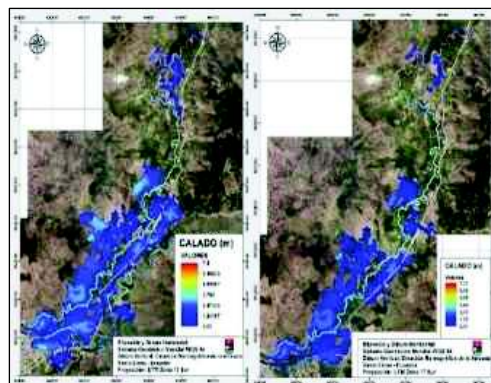
FUENTE: (Benayas, 2014)

b) Modelos Bidimensionales (2D)

Toman en cuenta las alteraciones del plano horizontal en las dos dimensiones. Las fluctuaciones de la velocidad u otra medida de importancia se promedian y se consideran como un valor único en la columna vertical de agua. Dichos modelos se utilizan principalmente en flujos muy prolongados tales como: lagos, estuarios, etc. En estas aplicaciones la variación de velocidad en la componente vertical es muy baja, por tal razón se denominan modelos de aguas poco profundas.

Es por tal motivo que estos modelos no se pueden aplicar a casos en los cuales la fluctuación de la velocidad en la componente vertical sea considerable, entre los cuales se puede mencionar el flujo a través de un orificio sumergido o el flujo sobre un vertedero; no obstante, por medio del empleo de fórmulas empíricas o semejantes se puede incluir a la modelación las particularidades anteriormente señaladas. Un ejemplo de este tipo de modelos se expone en la Figura 2.42.

Figura 2.42 Ejemplo de modelación numérica bidimensional

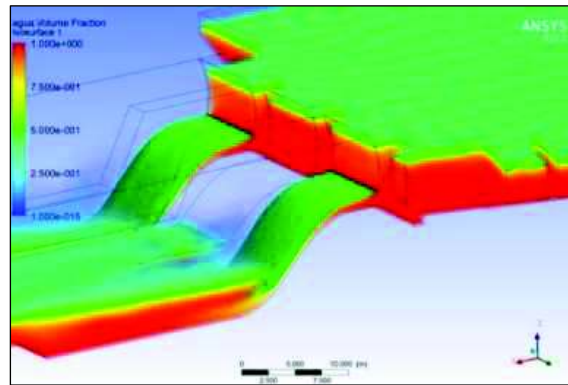


FUENTE: (Guaya & Montalván, 2018)

c) Modelos Tridimensionales (3D)

Constituyen la condición más sofisticada de la modelación. Estos modelos cuentan con la capacidad de realizar el respectivo cálculo de las tres componentes espaciales de la velocidad, brindando la posibilidad de aplicarse a cualquier acontecimiento. Un ejemplo de este tipo de modelos se expone en la Figura 2.43.

Figura 2.43 Ejemplo de modelación numérica tridimensional



FUENTE: (Aulestia, 2017)

2. En relación con el método de cálculo

Definir la velocidad de cada partícula en un medio continuo como lo es el flujo agua es poco práctico y casi imposible; por tal motivo este medio continuo se divide en componentes discretos de dimensiones finitas, con el objetivo de que la memoria del ordenador tenga la posibilidad de realizar las operaciones pertinentes.

En acontecimientos de flujo unidimensional, esta discretización se la hace por medio de secciones transversales. En cambio, los casos en dos y tres dimensiones demandan la solución de ecuaciones diferenciales y por ende realizar una discretización más fina por medio del empleo de mallas.

Entre los principales métodos de cálculo se pueden mencionar los siguientes: Método de Diferencias Finitas (MDF), Método de Elementos Finitos (MEF) y hace poco el Método de Volúmenes Finitos (MVF). Estas metodologías, apoyándose en la solución de un número finito de puntos discretos en el dominio continuo, resuelven las ecuaciones presentes en tal dominio computacional.

En el momento en que se logra determinar los valores solicitados en los puntos discretos como velocidad, calado, etc. El resultado en algún otro punto se puede aproximar por medio de técnicas de interpolación.

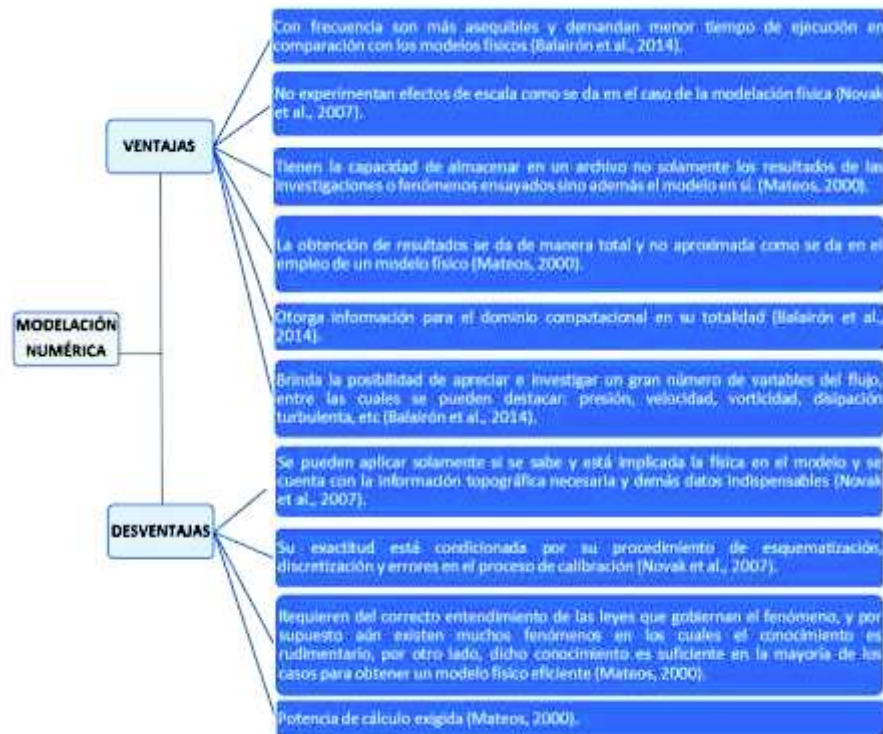
A pesar de ello, gran parte de los métodos mencionados necesitan de la solución paralela de todos los nodos del dominio, lo cual aumenta la carga computacional tornándolos más lentos. Además, se pueden dar dificultades de convergencia

numérica implicando soluciones irreales, por dicha razón el ingeniero debe contar con un criterio acertado en la interpretación de resultados.

- **Ventajas y desventajas de la modelación numérica**

La Figura 2.44 muestra algunas de las ventajas y desventajas del modelo numérico.

Figura 2.44 Ventajas y desventajas de la modelación numérica



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

En el transcurso del tiempo se irán superando las limitaciones antes mencionadas, sin embargo, del mismo modo se irán incluyendo nuevos obstáculos en la aparición de otros problemas (Mateos, 2000).

- **Evolución de la modelación numérica**

A lo largo de varios años, los modelos numéricos en dos y tres dimensiones únicamente podían ser resueltos en períodos de tiempo muy extensos, utilizando supercomputadoras que solo estaban disponibles en ciertas instituciones de investigación privilegiadas del planeta, siendo esto un gran problema para la mayor parte de los ingenieros que no podían acceder al uso de estos ordenadores. Por tal

motivo, la metodología experimental como lo es la modelación física fue por muchos años el único medio práctico empleado para analizar las cuestiones más complejas concernientes al flujo superficial (Vásquez, 2003).

No obstante, últimamente, el avance extraordinario de la velocidad de los ordenadores de uso personal ha permitido que sea factible el empleo de modelos numéricos para una numerosa cantidad de usuarios, disminuyendo los costos computacionales con el incremento de la demanda (Vásquez, 2003). Consecuentemente, debido al aumento de la disponibilidad de ordenadores personales y a la mejora de la informática mediante base de datos y redes e interfaces gráficas, se pone a disposición de la ingeniería la elaboración de modelos numéricos para múltiples condiciones (Pulcha, 2014).

Actualmente, la aplicación de los modelos numéricos en una y dos dimensiones se ha generalizado en investigaciones de flujos en superficie libre, a diferencia de los modelos numéricos en tres dimensiones, los cuales no cuentan con una gran aplicación a diferencia de los modelos numéricos en 1D y 2D, pero sí con un notable crecimiento, siendo empleados para analizar la interacción del flujo con estructuras. Estos estudios se los puede llevar a cabo tanto en modelos comerciales como también en modelos desarrollados en instituciones públicas de investigación (Balairón et al., 2014).

La evolución de las recientes técnicas computacionales favorece al desarrollo y calibración de los modelos numéricos en tres dimensiones proporcionando soluciones muy esperanzadoras en lo que respecta al análisis de la interacción del flujo con estructuras (Balairón et al., 2014).

- **Conclusiones de la modelación numérica**

La inclinación al empleo de modelos numéricos que se dio a partir de los años sesenta tal vez generó una nueva orientación, mas no una reducción del uso de talleres de investigación. Los obstáculos principales que impiden sustituir la modelación física por la modelación numérica son la potencia de cálculo requerida y el conocimiento precario de las leyes que gobiernan varios de los fenómenos a investigar (Novak et al., 2007).

Si la velocidad de cálculo y la capacidad de memoria de las computadoras permanecen con el ritmo actual, los requerimientos más exigentes referentes a la potencia de cálculo podrían cumplirse antes de 25 años. A pesar de ello, también hay que tomar en consideración la problemática del desarrollo en el conocimiento de las ecuaciones, ya que su avance es muy lento a pesar de haberse dado esfuerzos significativos tanto en el pasado como en la actualidad (Mateos, 2000).

Si esta tendencia se extrapolara, se diría que en la mayoría de los casos la calidad limitada de las ecuaciones provocaría que por lo menos durante los siguientes 30 años los modelos numéricos apoyados en estas ecuaciones sean útiles para una aproximación inicial, pero no lo bastante si se pretende conseguir una excelente precisión. Para que los modelos físicos puedan superar la precisión de los modelos numéricos se requieren escalas cada vez más grandes y con un mayor costo (Mateos, 2000).

Hoy en día, gracias a la rapidez de cómputo y a los programas de pre y post procesamiento gráfico que cuentan con la habilidad de generar el mallado automáticamente, se hace posible la modelación numérica de manera eficaz y competitiva frente a la modelación física. Al comparar los resultados otorgados por la modelación numérica y los obtenidos mediante la modelación física, se está logrando determinar de mejor manera las limitaciones y capacidades de los diferentes modelos numéricos, lo cual generará criterios para su elección y un empleo de forma más razonable (Vásquez, 2003).

2.2.3 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacional se fundamenta en la aplicación de dos herramientas esenciales que son las técnicas numéricas y las computadoras, con el objetivo de dar solución a determinados fenómenos físicos que de una u otra manera se relacionan con el flujo de fluidos (Fernández, 2012).

2.2.3.1 Reseña histórica acerca de la CFD

Las ecuaciones que rigen el movimiento de los fluidos fueron manifestadas de manera absoluta por Claude Navier y George Stokes desde hace aproximadamente dos siglos. Los matemáticos nombrados anteriormente fueron quienes incluyeron a

las ecuaciones de Euler las expresiones de transporte viscoso, lo que dio como resultado las reconocidas ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones comprenden las leyes de balance de masa, momento lineal y de energía que desafortunadamente forman una estructura acoplada de ecuaciones, en la cual no se puede determinar una única solución analítica. Por esta razón regularmente el análisis dimensional y la experimentación han acompañado siempre a la vía analítica, siendo estas dos técnicas trascendentales en la investigación tanto para contrastar como para validar los reducidos estudios teóricos dentro del campo de la mecánica de fluidos.

A partir de los años 70, debido al auge de modernos ordenadores, se contó con una nueva técnica como lo es la CFD. Esta herramienta complementa a los estudios experimentales y de igual forma a los teóricos. A pesar de que no es fácil establecer una fecha precisa en la cual se dieron los primeros cálculos empleando la CFD, sí es válido mencionar que Lewis Fry Richardson fue el pionero del uso de dicha técnica, ya que fue el primero en utilizar un modelo numérico con el fin de realizar pronósticos meteorológicos, esto lo consiguió al dividir el espacio en celdas y al aplicar una metodología elemental por diferencias finitas. Los métodos básicos de Richardson, desarrollados entre 1910 y 1920 constituyen el origen de la aplicación de la CFD.

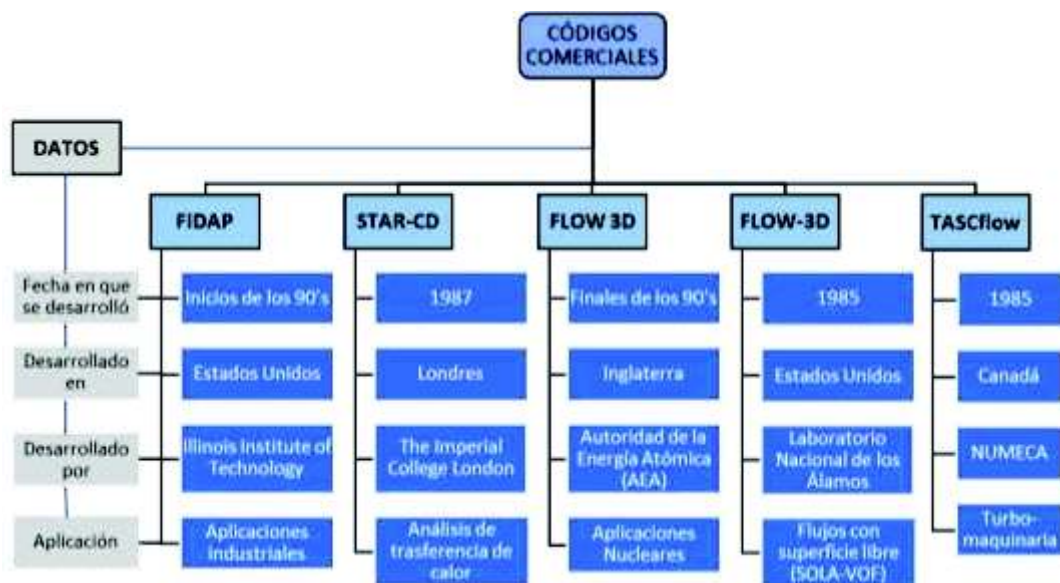
Desde los últimos años de la década de 1950 y a lo largo de los años 60, el laboratorio nacional de Los Alamos (LANL), patrocinado por la NASA, se estableció como el auténtico promotor de la CFD, exponiendo códigos primarios y siendo el precursor en el uso de computadoras. Actualmente, varias metodologías que se aplican en paquetes comerciales son resultado de dichos trabajos primitivos. Ya a finales de la década de 1960 e inicios de los años 70, la dinámica de fluidos computacional alcanza una mayor trascendencia, debido a que en las simulaciones ya se integraban los primeros modelos de turbulencia, tal es el caso del desarrollo de los fundamentos del modelo k-épsilon que tuvo lugar en 1967.

Los primeros programas comerciales de la CFD se suscitaron en la década de 1980. Es necesario mencionar que hasta el año de 1975 ningún código de los elaborados en el LANL fue compartido fuera del entorno académico. No obstante, numerosas

compañías dedicadas a la ingeniería aeronáutica y aeroespacial habían puesto interés por el empleo de las técnicas CFD, dejando de crear sus propios códigos para dar inicio al uso de programas comerciales.

Ya en los últimos años de la década de 1980 e inicios de la década de 1990 se genera el auge de la innovación de códigos comerciales, entre los cuales se destacan a los precursores PHOENICS y FLUENT. Además de estos, en la Figura 2.45 también se pueden mencionar los siguientes:

Figura 2.45 Códigos comerciales de la CFD



FUENTE: (Fernández, 2012) ELABORADO POR: Chandi & Escobar

El alto grado de dificultad de las ecuaciones y el nivel de detalle con el que se pretende obtener las modelaciones, hace que los ingenieros responsables del desarrollo de las herramientas de la CFD requieran del empleo de supercomputadoras que dispongan de una gran potencia de cálculo. Por ende, a pesar de que se utilice un paquete comercial, se debe tener presente que dichos códigos están fundamentados en un sistema de ecuaciones no lineales, de alta complejidad y enlazadas entre sí, las cuales se resuelven de manera iterativa por medio de algoritmos muy peculiares que están incorporados en el mismo paquete.

El fin que se pretende alcanzar es que el usuario esté en capacidad de dar solución a cualquier flujo presente en una geometría establecida (limitada por condiciones

iniciales y de borde), y para el que se pueda identificar con antelación los fenómenos físicos incluidos en el mismo. Los resultados que proporcionan los paquetes comerciales, tales como: variables vectoriales y escalares, generalmente se pueden representar de manera gráfica.

El precursor en la elaboración de códigos libres de la CFD es OpenCFD, el cual hoy en día desarrolla un solver libre sofisticado llamado OpenFOAM. Seguramente, en un futuro no muy distante, el código libre desempeñe un rol importante en el entorno de la CFD, lo que conllevaría a la reducción de costos de las licencias de los distribuidores contemporáneos.

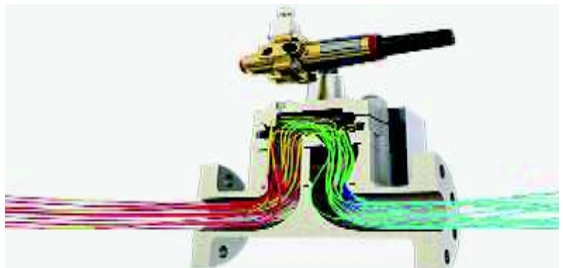
Es válido manifestar que las técnicas de la CFD se constituyen como otro instrumento utilizado mundialmente en la industria y que está presente en la ingeniería asistida por computador (CAE). De la misma manera, se puede decir que debido al sorprendente desarrollo del software para la CFD se ha dado tal evolución que en tiempos de Richardson o Navier-Stokes hubiese sido inimaginable (Fernández, 2012).

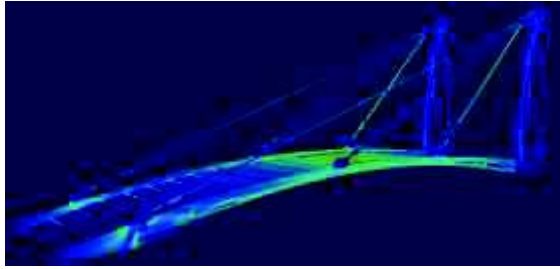
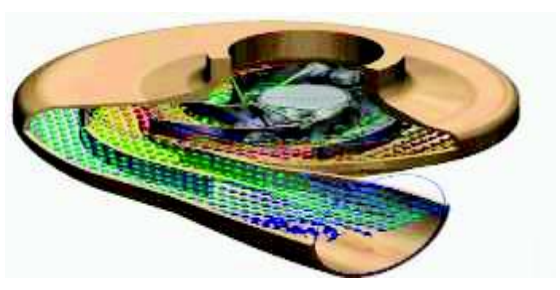
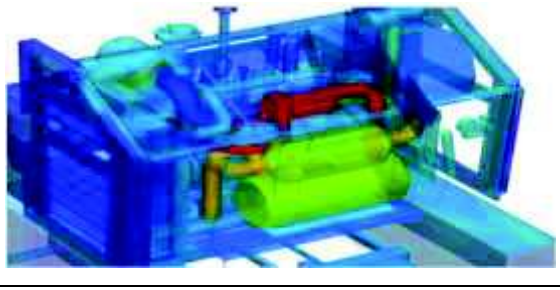
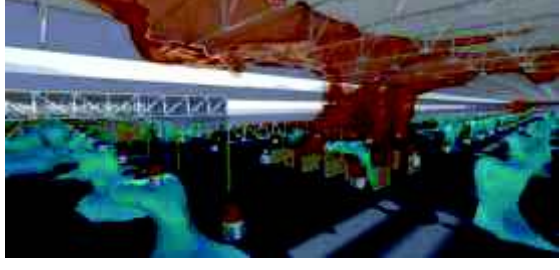
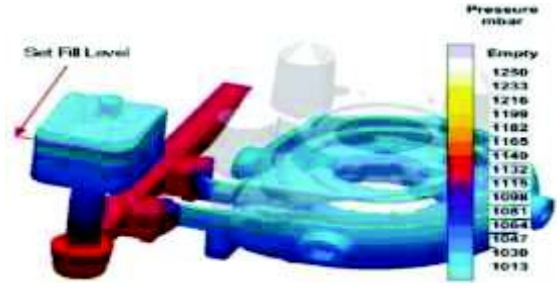
2.2.3.2 Campos de aplicación de la CFD

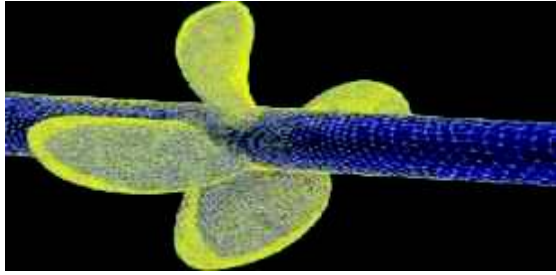
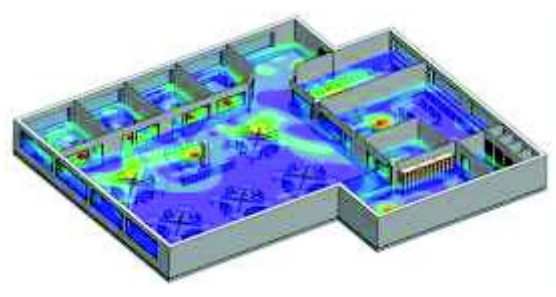
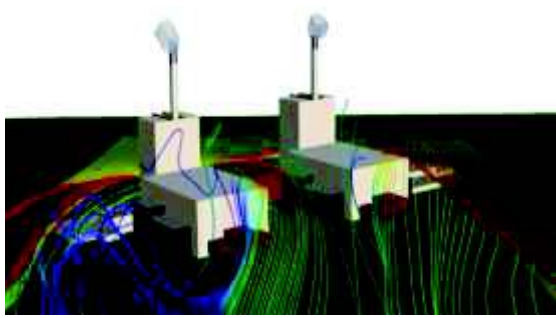
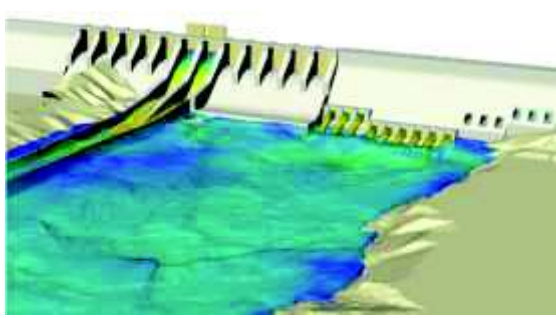

Actualmente el empleo de la CFD se ha propagado de tal manera que es parte de toda clase de procesos que se llevan a cabo en la industria, esto a causa de la universalización de paquetes comerciales y al avance paulatino de los algoritmos propios de dichos códigos (Fernández, 2012). Algunos ejemplos de aplicación de la CFD se presentan en la Tabla 2.3.

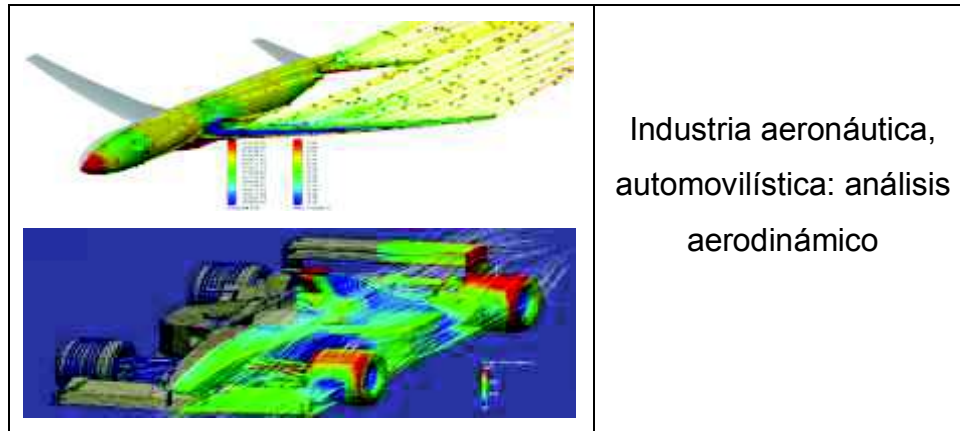
Tabla 2.3

Campos de aplicación de la CFD

	<p>Flujo de fluidos y transferencia de calor</p>
---	--

	<p>Análisis estructural</p>
	<p>Diseño y optimización de máquinas rotativas</p>
	<p>Refrigeración de transferencia de calor</p>
	<p>Extracción de aire contaminado en una industria o mina</p>
 <p>Set Fill Level</p> <p>Pressure mbar</p> <ul style="list-style-type: none"> Empty 1250 1253 1216 1199 1182 1165 1149 1132 1115 1098 1081 1064 1047 1030 1013 	<p>Industria de manufactura y metal mecánica: Procesos de fundición</p>

 A 3D mesh model of a propeller, showing the blades and the central hub. The model is rendered in a blue and yellow color scheme against a black background.	<p>Aplicaciones navales: Diseño de propulsores navales</p>
 A 3D perspective view of an office floor plan. The floor is colored with a gradient from blue to red, representing different levels of air conditioning or ventilation. The walls and ceiling are shown in a light gray color.	<p>Análisis del sistema de acondicionamiento y ventilación en la oficina</p>
 A 3D visualization of air dispersion. It shows a central source of air with multiple colored streamlines (red, green, blue) radiating outwards, representing the spread of contaminants in a room.	<p>Estudios de calidad de aire: Dispersión de contaminantes</p>
 A 3D perspective view of a dam structure. The water behind the dam is colored with a gradient from blue to red, representing the flow and pressure of the water. The dam itself is shown in a light gray color.	<p>Obras Hidráulicas: Proyectos de energía hidroeléctrica</p>
 A 3D perspective view of a cyclist in a blue and yellow racing suit, riding a bicycle. The cyclist is shown in a dynamic pose, leaning forward. The background is a solid green color.	<p>Entorno deportivo</p>



FUENTE: (3D CAD PORTAL, 2018) ELABORADO POR: Chandi & Escobar

2.2.3.3 Ventajas de la CFD

- Brinda la posibilidad de reducir costos y tiempos presentes en las etapas de diseño.
- Provee una amplia cantidad de información en todo el dominio de simulación.
- Permite conseguir información útil y con un alto grado de detalle en condiciones donde la experimentación puede conllevar un alto riesgo.
- Cuenta con la capacidad de analizar situaciones o sistemas en donde su reproducción de manera experimental es compleja.
- Agrega valor al producto por ser diseñado mediante computadoras.

2.2.3.4 Inconvenientes de la CFD

- Paquetes computacionales con un costo elevado, el cual es inaccesible para la mayoría de los usuarios.
- Requiere de supercomputadoras con una elevada potencia de cálculo.
- Es indispensable que los programas y los respectivos análisis de las soluciones sean ejecutados por personal cualificado.
- Pueden darse acontecimientos en los cuales sus resultados no cuenten con una gran precisión.
- Frecuentemente los resultados se consideran válidos sin ser lo suficientemente comparados con los generados con otras metodologías.

2.2.3.5 Secuencia y estructura de la CFD

Por medio de interfaces amigables con el usuario, los paquetes comerciales brindan un fácil acceso a la incorporación de parámetros de solución y modelado de geometrías. Comúnmente también añaden un módulo complementario para favorecer la presentación y análisis de los resultados generados. Por ende, la estructura de cálculo de técnicas CFD viene dada por los módulos de preproceso, solver y postproceso (Fernández, 2012).

- **Módulo de Preproceso**

Constituye una interfaz amigable con el usuario de mucha utilidad que posibilita el ingreso de datos al programa de resolución, los cuales posteriormente se transformarán a un formato compatible para el módulo solver.

En esta etapa están contenidas las siguientes funciones:

1. Establecer la geometría a modelar; es decir, definir el dominio computacional.
2. Elaborar el mallado (dividir el dominio computacional en una cantidad adecuada de celdas que ocupen toda la geometría y a la vez no se superpongan).
3. Determinar los fenómenos tanto físicos como químicos que se desean modelar.
4. Fijar las características del fluido.
5. Definir las condiciones de borde e iniciales del caso de estudio.

Es importante destacar que la elaboración del mallado tiene gran influencia en la calidad de los resultados. Se puede decir en un inicio que mientras más refinada sea la malla, los resultados de la simulación tendrán mayor semejanza con la solución real. No obstante, si se tiene un mallado extremadamente fino, se afecta de manera sustancial el tiempo de cómputo, tornándolo muy extenso. Por ende, se debe llegar a un equilibrio entre la duración de cálculo y el tamaño de malla, con el fin de obtener resultados válidos en un tiempo apropiado. Adicionalmente, se debe procurar que el mallado sea más fino en áreas donde se considere que las variables del flujo puedan fluctuar en gran medida.

- **Módulo de Solver**

Es el responsable de resolver las ecuaciones activadas en el preproceso de una manera iterativa. A pesar de que constituye la parte más relevante del programa de resolución, el trabajo del usuario del paquete computacional radica únicamente en ejecutar el código y esperar los resultados generados por las herramientas computacionales. Este tiempo de espera está en función del tamaño de celda y de los modelos que se pretenden resolver, por lo que su duración puede ser: minutos, horas, semanas e incluso meses de simulación en tiempo real.

- **Módulo de Postproceso**

Generalmente viene dado por un conjunto de herramientas gráficas, las cuales facilitan el análisis de los resultados, disponiendo además de la cualidad para gestionar el gran número de datos generados por el código. En este módulo no se pretende únicamente contar con una interfaz gráfica, sino también de disponer de una herramienta capaz de generar variables promediadas e integradas para poder expresar resultados de manera global.

Algunas de las prestaciones con las que se cuenta en esta etapa son expuestas a continuación:

1. Se representa gráficamente el dominio computacional con su respectivo mallado.
2. Se posibilita la elección de las variables del flujo a representar en la simulación.
3. Se visualizan esquemas en dos y tres dimensiones.
4. Se permite el ploteado de líneas de corriente.
5. Se puede generar animaciones y también exportar los resultados a formatos convenientes para el usuario.

2.2.3.6 Estrategias para el empleo de códigos CFD

La Figura 2.46 indica las estrategias para el empleo de códigos CFD

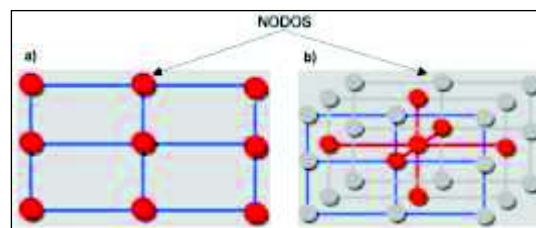
Figura 2.46 Estrategias para el empleo de códigos CFD



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Con frecuencia, la estrategia empleada en la CFD consiste en la sustitución del problema establecido en un dominio continuo por un dominio discreto que se encuentra delimitado mediante un mallado. En el dominio continuo todas y cada una de las variables del flujo como temperatura, velocidad y presión están definidas por completo en el espacio. Sucede lo contrario en el dominio discreto, ya que la variable del flujo se encuentra definida solamente en los nodos que conforman el mallado. Es por lo anteriormente citado que el proceso de ir de un dominio continuo a uno discreto toma el nombre de discretización espacial (el espacio se discretiza en una cantidad finita de puntos).

Figura 2.47 Discretización espacial. a) 2D, b) 3D



FUENTE: (Tinetti, 2009)

Las variables de importancia en la simulación CFD son resueltas solamente en los puntos (nodos) que conforman la malla. Sin embargo, si se desea conocer los valores en sitios que no coincidan con dichos nodos, se puede realizar una interpolación entre los valores determinados en los puntos que configuran la malla.

Hasta el momento se ha considerado que el punto de partida es discretizar el espacio del dominio físico. Evidentemente si las ecuaciones que rigen el comportamiento del fenómeno son dependientes del tiempo, será imprescindible hacer una discretización temporal. Para ello se cuenta con varias metodologías, entre las más comunes se hallan: el método de diferencias finitas, el método de elementos finitos y el método de volúmenes finitos (Fernández, 2012).

2.2.3.7 Métodos de solución de un código CFD

- **Método de elementos finitos (MEF)**

Este método resuelve las ecuaciones de Euler/Navier Stokes dividiendo el dominio en elementos triangulares (en 2D) o de ser el caso en elementos tetraédricos (en 3D), dando como resultado un mallado no estructurado, el cual es empleado para el planteamiento de problemas con geometrías complejas. Su aplicación también está dada particularmente en fluidos no newtonianos (Sánchez, 2004).

Por medio de este método, las cantidades continuas que constituyen el fenómeno son aproximadas por una cantidad finita de valores en nodos discretos de los elementos que componen el mallado. El mallado y el tamaño de estas se conforman de acuerdo con la geometría que se representará y el grado de precisión que se pretende conseguir (Pulcha, 2014).

- **Método de diferencias finitas (MDF)**

Fue la primera herramienta utilizada para dar solución a ecuaciones diferenciales, siendo Euler el precursor del empleo de dicha técnica posiblemente en 1768. Para discretizar las derivadas de las variables del flujo, esta metodología hace uso del desarrollo en series de Taylor (Sánchez, 2004).

Este método aporta detalles suficientes de los contornos y utiliza una red de rectángulos, la cual tiene un grado de complejidad menor comparado a los demás métodos. El MDF se fundamenta en aproximaciones que posibilitan sustituir ecuaciones diferenciales parciales por expresiones algebraicas con los valores de la variable dependiente en un número limitado de puntos escogidos (Vergara, 1993).

La ventaja que proporciona este método radica en su simplicidad teórica y la capacidad de incrementar su exactitud únicamente aumentando el grado de aproximación de las derivadas. Sin embargo, esta metodología demanda de un mallado estructurado, por lo que su rango de aplicación se encuentra limitado usualmente a problemas con geometrías sencillas (Sánchez, 2004).

- **Método de volúmenes finitos (MVF)**

En esta metodología se garantiza que el volumen total del fluido está dado por la sumatoria de volúmenes de control definidos en la discretización espacial, la cual es realizada de manera directa en el entorno físico del problema (Sánchez, 2004). La característica más relevante del sistema de ecuaciones proveniente de la discretización es que la solución alcanzada satisface de manera precisa las ecuaciones de conservación planteadas, indistintamente de la dimensión de la malla (Niño, 2008). En contraste con el método de diferencias finitas, este método cuenta con una mayor flexibilidad, ya que en él se pueden implementar mallados estructurados y no estructurados (Sánchez, 2004).

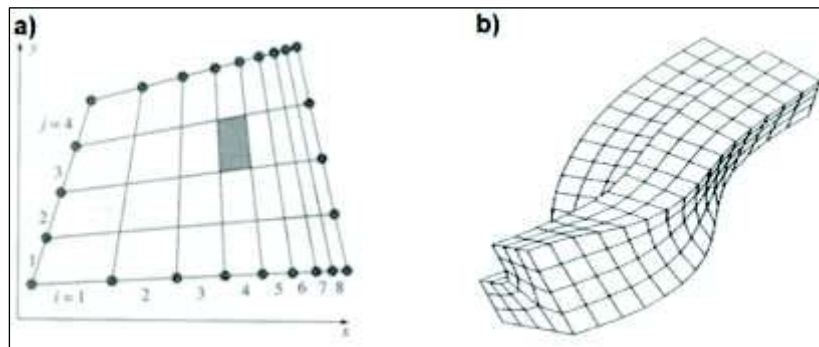
2.2.3.8 Solución de CFD: generación del mallado

El paso inicial y probablemente el de mayor importancia en la solución de CFD es la creación del mallado en el cual se definen las celdas donde se calcularán las variables del flujo en todo el dominio. Los paquetes computacionales comerciales de hoy en día cuentan con generadores de malla, pero también existen programas en los que se pueden elaborar mallados independientes (Cengel & Cimbala, 2006).

- **Mallado estructurado**

Un mallado estructurado en dos dimensiones está constituido por celdas planas con cuatro lados, y en tres dimensiones está conformado por celdas volumétricas con seis caras (Cengel & Cimbala, 2006). Este tipo de mallado se representa en la Figura 2.48.

Figura 2.48 Mallado estructurado: a) Cuadrilátero, b) Hexaédrico

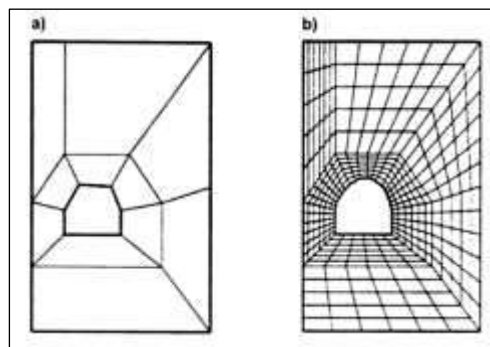


FUENTE: (Díaz, 2000)

Se debe mencionar que hay ocasiones en las cuales se opta por este tipo de mallado debido a que el propio código CFD solicita el empleo de este, o también cuando la modelación pone a prueba la capacidad de memoria disponible de la computadora. La elaboración de un mallado estructurado se da de manera directa para geometrías que disponen de lados rectos, lo único que se debe hacer es dividir todo el dominio computacional en zonas de cuatro lados (casos bidimensionales) o bloques de seis lados (casos tridimensionales). El estudio en el cual el mallado estructurado es generado dentro de cada bloque toma el nombre de análisis de bloques múltiples (Cengel & Cimbala, 2006).

Para geometrías complejas con superficies curvas es indispensable establecer cómo el dominio computacional puede ser dividido en bloques individuales. Por tal motivo, el mallado de bloques múltiples (Figura 2.49) desempeña un rol importante en este tipo de configuraciones complicadas (Cengel & Cimbala, 2006).

Figura 2.49 Mallado de bloques múltiples: a) Descomposición inicial, b) Malla final

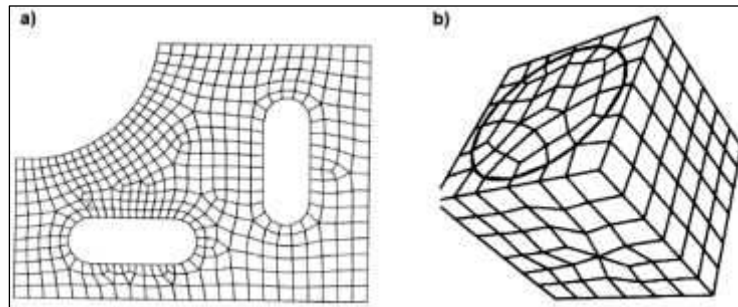


FUENTE: (Díaz, 2000)

- **Mallado no estructurado**

Un mallado no estructurado se encuentra compuesto de celdas de diversas formas, generalmente en dos dimensiones se utilizan triángulos, cuadriláteros, y en tres dimensiones se emplean hexaedros o tetraedros (Figura 2.50). Normalmente para el usuario es más viable la creación de este tipo de mallado en problemas con geometrías muy complejas (Cengel & Cimbala, 2006).

Figura 2.50 Mallado no estructurado: a) Cuadrilátero, b) Hexaédrico



FUENTE: (Díaz, 2000)

- **Importancia en la calidad del mallado**

Se debe tener presente que, para llegar a soluciones confiables de la CFD lo indispensable es contar con la calidad del mallado, indistintamente si este es estructurado o no. Esta calidad puede verse afectada por variaciones bruscas en el tamaño de celda, provocando complicaciones numéricas.

Aun cuando es factible disminuir el número de celdas empleando un mallado estructurado en lugar de uno no estructurado, el primero no siempre constituye la mejor alternativa, debido a que el empleo de uno u otro tipo se encuentra en función de la geometría del dominio computacional (Cengel & Cimbala, 2006).

- **Particularidades de la Elaboración del mallado**

La elaboración de un mallado apropiado tiende a ser tedioso e implicar tiempos muy prolongados; los ingenieros que aplican las técnicas CFD con frecuencia, estarán de acuerdo con el hecho de que la generación de la malla involucra más tiempo que la simulación en sí. Esto hablando del tiempo empleado por el ingeniero y más no por el CPU. No obstante, el tiempo invertido en la generación de un mallado de

calidad constituye un periodo bien empleado, ya que los resultados de la CFD contarán con una mayor fiabilidad (Cengel & Cimbala, 2006).

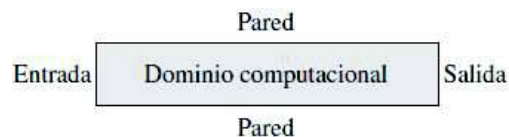
- **Dependencia del mallado**

En el momento en que los resultados obtenidos por medio de mallados distintos llegan a ser semejantes respecto a cierto grado de tolerancia establecido por el usuario, se puede afirmar que las soluciones no son función del mallado. También es fundamental establecer el nivel de influencia que posee la densidad de la malla en los resultados obtenidos, ya que antes de considerar como solución válida al resultado de una simulación, esta debe ser comparada aplicando un mallado más fino (Fernández, 2012).

2.2.3.9 Solución de la CFD: Condiciones de Borde

El tipo de flujo a modelar es definido por las condiciones de borde impuestas, ya que tanto el dominio computacional como las ecuaciones de movimiento, e incluso el mallado pueden ser iguales para dos cálculos distintos de la CFD. Para que los resultados obtenidos por el código sean válidos y aceptados, las condiciones de borde deben ser las adecuadas y estar aplicadas con gran precaución en todos los límites del dominio. Un ejemplo de las condiciones de borde aplicadas a un dominio computacional se muestra en la Figura 2.51.

Figura 2.51 Condiciones de contorno



FUENTE: (Cengel & Cimbala, 2006)

2.2.3.10 Estado actual de la CFD

Hoy en día los códigos CFD tratan con facilidad los flujos laminares, lo que no sucede con los flujos turbulentos, ya que resulta imposible resolver estos casos de interés práctico sin acudir a modelos de turbulencia.

Desafortunadamente ninguno de estos modelos es universal, por cuanto la calidad presente en los resultados de la CFD de flujo turbulento es función del modelo de turbulencia empleado (Cengel & Cimbala, 2006).

2.3 TURBULENCIA

Figura 2.52 Fenómeno de Turbulencia

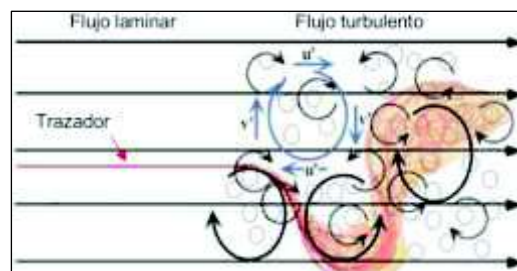


FUENTE: Rápida lisa de la Quebrada el Batán Proyecto (EPMAPS, 2016)

Los flujos se pueden manifestar en dos regímenes totalmente distintos: ya sea en régimen laminar o turbulento (Figura 2.53). El primer régimen se caracteriza debido al hecho de que las partículas del fluido presentan un movimiento ordenado, suave, estratificado en dirección del flujo. Los flujos laminares se presentan cuando la viscosidad se constituye en el fenómeno de transporte predominante, lo que permite disminuir toda clase de perturbaciones que pudieran alterar el flujo. Además, se distinguen por poseer un número de Reynolds pequeño.

En cambio, los flujos con régimen turbulento se encuentran caracterizados por las variaciones aleatorias de velocidad y presión que se dan en espacio y tiempo. Dichas fluctuaciones son resultado de ciertas inestabilidades del flujo, las cuales a manera de cascada de energía producen remolinos cada vez más diminutos hasta el punto en que llegan a disiparse a modo de calor debido al efecto de la viscosidad.

Figura 2.53 Flujo Laminar y Flujo Turbulento



FUENTE: (Casa, 2016)

Particularmente, para flujos turbulentos, el desarrollo de la variable velocidad en un punto en el espacio está dado por una secuencia de fluctuaciones de diferente escala. Cabe destacar que este tipo de flujo es el de mayor interés práctico en ingeniería (Fernández, 2012).

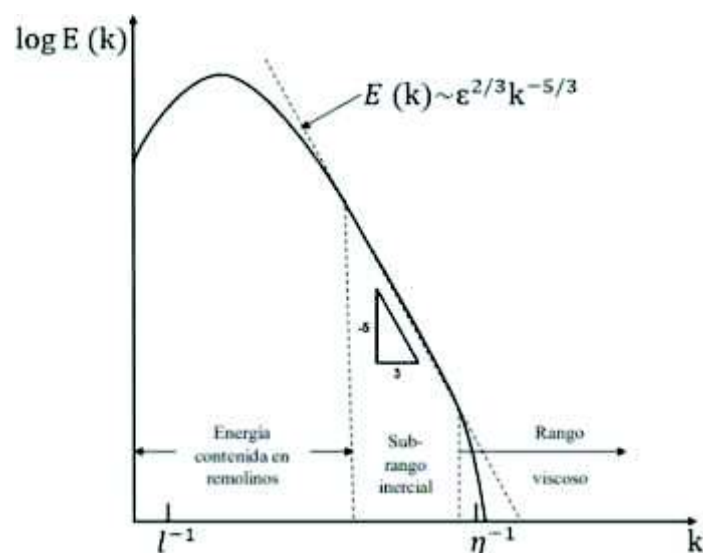
2.3.1 ESCALAS DE TURBULENCIA

La turbulencia comprende un gran espectro de escalas, tanto espaciales como temporales. Los vórtices grandes extraen energía del flujo para su formación y por lo general estos presentan inestabilidad debido a la acción de los gradientes de velocidad. Estos vórtices interactúan entre ellos y tienden a separarse en vórtices de menor magnitud, este proceso se repite de manera sucesiva hasta llegar a escalas únicamente disipativas. Al proceso anteriormente descrito se le denomina cascada de energía.

Es importante destacar que la viscosidad para altos números de Reynolds no influye en la cascada de energía, pero si incide en escalas más pequeñas. Debido a que en el flujo turbulento se presenta una gran variedad de vórtices de diferente magnitud, estos pueden ser agrupados de acuerdo a su escala, constituyéndose de esta manera: la macroescala, escala intermedia y microescala (Casa, 2016).

En la Figura 2.54 se muestra el espectro de energía para un flujo turbulento

Figura 2.54 Espectro de energía para un flujo turbulento



Fuente: (Carrillo, 2014)

2.3.1.1 Macroescala

El flujo es anisotrópico y comprende los vórtices de mayor tamaño, los cuales están relacionados a las condiciones de borde. En esta escala el número de Reynolds es igual al del flujo principal y las magnitudes asociadas a sus vórtices son longitud, tiempo y velocidad (L, T y U).

2.3.1.2 Escala Intermedia

En esta escala el número de Reynolds sigue siendo grande, es por tal razón que la disipación de energía se considera despreciable, además el espacio comprendido por esta escala toma el nombre de subrango inercial. En la Figura 2.54 se puede apreciar que dicho subrango presenta una tendencia lineal con pendiente $-5/3$ en escala logarítmica de acuerdo a la ley universal de Kolmogorov (1944).

$$E(k) = \alpha \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (2.5)$$

Dónde:

α : Constante, valor sobre 1.5

ε : Tasa de disipación viscosa

k : Número de onda

2.3.1.3 Microescala

Constituye la escala más pequeña y ya en la cual el número de Reynolds es similar a 1. En relación a la disipación de energía se pueden obtener formulaciones de todas las escalas disipativas, dichas expresiones son:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.6)$$

$$\mu_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.7)$$

$$\tau = \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

Dónde: μ_n : velocidad, η : longitud, τ : tiempo y ν : viscosidad.

Si se relaciona la macroescala con las escalas de Kolmogorov se obtiene:

$$\frac{\eta}{L} = Re^{-\frac{3}{4}} \quad (2.9)$$

$$\frac{\mu_{\eta}}{U} = Re^{-\frac{1}{4}} \quad (2.10)$$

$$\frac{\tau}{T} = Re^{-\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

De las expresiones anteriores se concluye que, para altos números de Reynolds, las escalas de Kolmogorov son muy pequeñas, lo que implica que su solución directa sea muy difícil. Por tal motivo, para una simulación numérica se emplean modelos de turbulencia (Casa, 2016).

Para dar solución a las ecuaciones que rigen el flujo turbulento, las aproximaciones con las que se cuentan están constituidas por dos grandes grupos, los cuales son: la resolución directa de las ecuaciones (Direct Numerical Simulation; DNS) y la aplicación de cierto modelo de turbulencia luego de haber realizado un filtrado espacial (Large Eddy Simulation; LES) o un promedio temporal de las ecuaciones (Reynolds-Averaged Navier Stokes equations; RANS) (Fernández, 2012).

2.3.2 APROXIMACIONES PARA DAR SOLUCIÓN A LAS ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL FLUJO TURBULENTO

2.3.2.1 Simulación Numérica Directa (DNS)

Se encarga de resolver todas las fluctuaciones tanto espaciales como temporales, lo cual involucra que para números de Reynolds grandes (desde 10^5) se requieran mallados tridimensionales excesivamente finos como también pasos de tiempo muy pequeños. Con estos dos requisitos, se puede resolver todos los tamaños de remolinos (vórtices grandes y pequeños) presentes en el flujo (Fernández, 2012). No obstante, esto conlleva al uso de supercomputadoras y a una gran cantidad de tiempo empleada por el CPU (Cengel & Cimbala, 2006).

Con las computadoras que se disponen hoy en día, los resultados de la DNS no son viables incluso para cuestiones de interés práctico en la ingeniería en donde se tienen flujos turbulentos con altos números de Reynolds. Esta realidad se

mantendrá incluso varias décadas más a pesar de que la rapidez del progreso de las computadoras siga con el ritmo actual.

Por tal razón, es indispensable realizar varias suposiciones que brinden la posibilidad de simplificar la complejidad de los flujos turbulentos con altos números de Reynolds y así poder simularlos (Cengel & Cimbala, 2006).

2.3.2.2 Simulación de Grandes Remolinos (LES)

Constituye una técnica debajo de la DNS que permite la obtención de las propiedades no estacionarias de los remolinos turbulentos a gran escala, entretanto que se modelan los de pequeña escala. La hipótesis elemental es que los vórtices turbulentos más pequeños son isotrópicos; o sea, se considera que los vórtices pequeños no dependen de la dirección del sistema de coordenadas y en todo momento se comportan de forma estadísticamente semejante y previsible.

A diferencia de la DNS, la técnica LES requiere de menores recursos computacionales debido a que no resuelve los vórtices más pequeños que se encuentran en el campo de flujo. No obstante, los estudios y diseños de la práctica ingenieril desafían las características que poseen actualmente las computadoras (Cengel & Cimbala, 2006).

En este modelo se disminuye el grado de complejidad de las ecuaciones, al considerar solamente parte de los efectos generados por la turbulencia presente en el flujo, es decir, en este tipo de técnicas se resuelve únicamente el intercambio de energía que se da entre grandes remolinos (grandes escalas), y solo lleva a la modelación el efecto producido por las pequeñas escalas de turbulencia (Fernández, 2012).

Una de las ventajas que más sobresale en esta técnica es que brinda la posibilidad de establecer modelos para escalas pequeñas, las cuales presentan mayor isotropía y por ende se las puede modelar de manera más fácil. Sin embargo, este modelo demanda de una elevada capacidad de cálculo para poder considerar los efectos de corte en las fronteras de los contornos sólidos. Por tal motivo, el mallado debe ser muy fino en regiones próximas a las paredes (Fernández, 2012).

2.3.2.3 Ecuaciones de Navier Stokes Promediado de Reynolds (RANS)

El siguiente nivel de menor dificultad consiste en modelar todos los vórtices turbulentos no estacionarios mediante un tipo de modelo de turbulencia. En este nivel no se pretende dar solución a las características no estacionarias de vórtices turbulentos de ninguna escala. Por facilidad, se tiene en cuenta solamente el flujo incompresible estacionario. En el momento en que se emplea un modelo de turbulencia, la ecuación de Navier Stokes se sustituye por lo que se denomina ecuación de Navier Stokes promediado de Reynolds (RANS), la cual se indica a continuación para flujo turbulento, estacionario, incompresible.

$$\text{Ec. Navier Stokes: } (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.12)$$

$$\text{Ec. RANS: } (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{\nabla} \cdot (\tau_{ij,turbulento}) \quad (2.13)$$

Dónde:

\vec{V} : Velocidad del fluido

ρ : Densidad del fluido

$\vec{\nabla}$: Operador gradiente

P' : Presión modificada

ν : Viscosidad cinética

∇ : Operador nabra

Se puede observar que la ecuación RANS posee un término extra en el lado derecho, este justifica las variaciones turbulentas. $\tau_{ij,turbulento}$ es el tensor de esfuerzo específico de Reynolds.

En coordenadas cartesianas, $\tau_{ij,turbulento}$ es:

$$\tau_{ij,turbulento} = - \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

En donde, u, v, w son las velocidades turbulentas, los apóstrofes indican componentes de velocidad fluctuantes, la barra superior denota el promedio en el tiempo del producto de dos componentes de velocidad fluctuantes. Debido a que el esfuerzo de Reynolds es simétrico, se incluyen al problema seis incógnitas más.

Dichas incógnitas se llevan a la modelación a través de los modelos de turbulencia (Cengel & Cimbala, 2006).

En la aproximación RANS se da exclusivamente solución a los valores medios de las variables como velocidad y presión, pero para lograr dicha solución, es necesario incluir una serie de términos extras que en este caso son las tensiones de Reynolds. Estas deberán ser modeladas con el fin de asegurar el cierre del sistema de ecuaciones. Naturalmente estos modelos son genéricos y pueden originar errores significativos en el cómputo numérico (Fernández, 2012).

El flujo y la variación de sus propiedades debido a la turbulencia constituyen el centro de estudio de estos modelos. Para el empleo de los métodos numéricos primeramente se debe determinar el promedio de las ecuaciones de Navier-Stokes con respecto al tiempo. Varios términos incluidos en este análisis estadístico se presentan a causa de la interacción que se genera entre diversas fluctuaciones turbulentas, siendo los modelos en estudio los responsables de llevar dichos términos a la modelación. Los modelos RANS requieren de un gasto computacional moderado para la obtención de resultados confiables, por tal razón, en los últimos treinta años han sido muy empleados para cálculos de flujo en ingeniería (Aulestia, 2017).

La simulación del flujo turbulento para las ecuaciones RANS incorpora algunas suposiciones y cierres simplificados, por tal motivo se han formulado una numerosa cantidad de modelos de turbulencia, los cuales se dividen en ecuaciones de cierre de primer y segundo orden (Sánchez, 2004).

- **Ecuaciones de cierre de primer orden: modelos de cero ecuaciones**

Constituyen la metodología más simple para determinar el coeficiente de viscosidad dinámica (μ_t), ya que no requieren del cálculo de ninguna ecuación extra, siendo además la base del modelo de longitud de mezcla de Prandtl, el cual define un vínculo entre (μ_t) y el gradiente de velocidad de la siguiente manera (Capote, Alvear, Abreu, Lázaro, & Espina, 2008):

$$\mu_t = \bar{\rho} l_{min}^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (2.15)$$

Donde, $\bar{\rho}$ es la densidad promedio del fluido, l_{min} la longitud de mezcla que se determina en función de la geometría del flujo, $\left| \frac{du}{dy} \right|$ el gradiente de velocidad.

Asimismo, basados en el modelo de Prandtl se encuentran modelos más complejos de cero ecuaciones, que son: el modelo de Cebeci-Smith y el modelo de Baldwin-Lomax (Capote et al., 2008).

- **Ecuaciones de cierre de primer orden: Modelos de una ecuación**

Hay varios modelos que aplican una ecuación para determinar μ_t , entre ellos se puede mencionar: el modelo de Prandtl-Kolmogorov, el modelo de Spalart-Allmaras, el modelo de Baldwin-Barth, etc. El primer modelo añade al conjunto de ecuaciones que rigen el movimiento del fluido una ecuación que relaciona a μ_t con la energía cinética del flujo turbulento k , y viene expresado por (Capote et al., 2008):

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu l_{pk} \sqrt{k} \quad (2.16)$$

Donde, C_μ corresponde a una constante y l_{pk} a una longitud que se determina a través de varias expresiones.

- **Ecuaciones de cierre de primer orden: Modelos de dos ecuaciones**

El objetivo de la modelación numérica respecto al problema de cierre es tener en cuenta una hipótesis y modelar de una manera aproximada el comportamiento físico de la turbulencia, para lo cual se cuenta con modelos algebraicos simples y modelos que emplean viscosidad artificial, destacando entre ellos los modelos: longitud de mezcla, k- ϵ , k- ω (Casa, 2016). Estos dos últimos son los más conocidos y utilizados en los modelos RANS (Capote et al., 2008).

1. **Modelo k-épsilon (k- ϵ)**

Añade dos ecuaciones de balance en derivadas parciales, en estas se genera una interrelación entre las variables k y ϵ (energía cinética del flujo turbulento y su tasa de disipación turbulenta respectivamente). Por medio de dichas ecuaciones se

determinan los valores de las variables anteriormente mencionadas para más adelante calcular μ_t (Capote et al., 2008).

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.17)$$

2. Modelo k-omega (k- ω)

Del mismo modo que el modelo anterior, este utiliza también dos ecuaciones en las que se interrelacionan k y ω (energía cinética del flujo turbulento y la disipación específica respectivamente). La variable k define la energía de la turbulencia y ω establece la escala de turbulencia (Capote et al., 2008).

$$\mu_t = \bar{\rho} \frac{k}{\omega} \quad (2.18)$$

Entonces, para resolver las ecuaciones que representan el flujo turbulento es necesario aplicar un modelo de turbulencia, siempre y cuando se haya determinado con anterioridad el promedio temporal (RANS) de las ecuaciones (Casa, 2016).

En los modelos de primer orden también destaca el modelo de viscosidad turbulenta de remolino (Turbulent Eddy Viscosity Model) (Sánchez, 2004).

- **Ecuaciones de cierre de segundo orden**

Sobresalen el modelo algebraico de los esfuerzos de Reynolds y el modelo de transporte de los esfuerzos de Reynolds (Reynolds Stress Transport Model) (Sánchez, 2004).

1. Modelos de Turbulencia de tensiones de Reynolds (RSM)

La ecuación general para dar solución a cada tensión se la determina en base a las ecuaciones de Navier Stokes promediadas luego de haberlas multiplicado por velocidades fluctuantes. De esta manera, denominando $MA(\rho)$ a la ecuación de conservación de la masa y $MO(v_i)$ a la de momento para cada componente de la velocidad, es posible deducir las ecuaciones de transporte para las tensiones de Reynolds como (Fernández, 2012):

$$\overline{v'_i \cdot MO(v_j) + v'_j \cdot MO(v_i) + v'_i v'_j \cdot MA(\rho)} = 0 \quad (2.19)$$

Luego de numerosos cálculos, se obtiene la ecuación general de transporte para cada una de las tensiones de Reynolds:

$$\frac{\partial(\rho \overline{v_i'v_j'})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho \bar{v}_k \overline{v_i'v_j'}) = P_{ij} + D_{ij} - \rho \varepsilon_{ij} + \Pi_{ij} + \Omega_{ij} \quad (2.20)$$

Donde:

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho \bar{v}_k \overline{v_i'v_j'}) \quad (2.21)$$

Es el término convectivo, C_{ij} . Además, cada uno de los términos en el segundo miembro de la ecuación representa:

P_{ij} : Producción de Tensiones de Reynolds

D_{ij} : Difusión de las tensiones de Reynolds

Π_{ij} : Términos de esfuerzos de presión

ε_{ij} : Disipación de la tensión

Ω_{ij} : Rotación de las tensiones

Es importante resaltar que los modelos de turbulencia son aproximaciones, las cuales se apoyan en constantes empíricas con el fin de garantizar el cierre del sistema de ecuaciones. Estos modelos se los calibra con ayuda de la DNS y en base a resultados obtenidos a través de ciertos experimentos llevados a cabo en el campo de flujo.

Desafortunadamente, ninguno de los modelos de turbulencia se puede aplicar de manera general para cualquier caso; es decir, a pesar de que un modelo trabaje bien para flujos semejantes que se utilizan para la calibración, puede no funcionar bien para campos de flujos turbulentos generales en donde se requiere una acertada solución física.

Al aplicar la CFD en flujos laminares, habitualmente se puede mejorar la exactitud física de la modelación numérica con solo refinar el mallado. Esto no siempre sucede cuando se aplica la CFD en flujos turbulentos, en donde a pesar de que un

mejor mallado genera una mejor exactitud numérica, la exactitud física del resultado de la simulación se encuentra condicionada por la exactitud física del modelo de turbulencia. Entonces, se puede afirmar que los resultados de la CFD de flujo turbulento son favorables dependiendo de qué tan válido y adecuado es el modelo de turbulencia empleado en el cálculo (Cengel & Cimbala, 2006).

2.3.3 ESTADO ACTUAL DEL ESTUDIO DE LA TURBULENCIA

El estudio del fenómeno de la turbulencia hoy en día continúa siendo uno de los mayores retos, los cuales son desafiados por los investigadores; tanto para el caso de su modelación como también de su tratamiento, lo que conlleva a que el análisis de la turbulencia sea actualmente la línea de investigación más importante (Fernández, 2012).

2.4 ESTADO DEL ARTE

Tabla 2.4
Estado del arte

INVESTIGACIÓN	LUGAR Y AÑO	AUTOR (ES)	OBJETO DE ESTUDIO	RESUMEN	RESULTADO
Modelación numérica en tres dimensiones de flujo en las compuertas de la captación del proyecto Toachi-Pilatón aplicando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	EPN-FICA. Quito, 2017	Aulestia Carlos	Analizar los fundamentos teóricos de la CFD que permiten la solución de fluidos en movimiento a través de modelos numéricos, además de la creación de un modelo CFD que permita ser empleado tanto en diseño como en optimización de obras hidráulicas.	Esta investigación pretende establecer un plan de operación de las compuertas de limpieza de la captación del proyecto hidroeléctrico Toachi Pilatón mediante la aplicación de un modelo CFD y a la vez correlacionando sus resultados con los fundamentos teóricos de transporte de sedimentos.	Se evaluó la capacidad de arrastre de las compuertas abiertas parcialmente y las velocidades presentes en el flujo antes de las compuertas para posteriormente definir el plan de operación de las compuertas.
Comparación de métodos para estimar la socavación aguas abajo de un salto de esquí	Universidad Politécnica de Cartagena. España, 2017	Castillo, Luis Carrillo, José	Analizar la profundidad de la socavación esperada en el cuenco de disipación de energía de la Presa Toachi.	Para el estudio del fenómeno de la socavación, se emplearon cuatro procedimientos complementarios: 1) Modelo físico con escala 1:50 como base para la validación de resultados. 2) 36 fórmulas empíricas derivadas de los modelos y prototipos. 3) Metodología semi-empírica basada en el índice: fluctuaciones de presión-erosionabilidad. 4) Paquete computacional FLOW-3D para la simulación numérica. Las simulaciones se realizaron a escala de laboratorio.	Varias simulaciones se llevaron a cabo mediante análisis de sensibilidad en lo que respecta a modelos de arrastre de aire, modelos de turbulencia, tamaño de celda y tipo de solucionador, con lo cual los resultados obtenidos de profundidades de socavación son similares en contraste con los del modelo físico.
Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD). Programa FLOW-3D	EPN-FICA. Quito, 2016	Casa Edwin	Analizar el flujo rasante en una rápida escalonada mediante la modelación numérica empleando el paquete computacional FLOW-3D.	La modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada se desarrolló en dos dimensiones (2D) debido a que el flujo rasante o flujo sobre el fondo virtual tiene particularidades correspondientes a un flujo plano.	Se analizó las características del flujo rasante en la rápida escalonada para un rango de caudales de operación. Además de analizar y validar los resultados de la modelación numérica del flujo rasante, se evaluó el grado de disipación de energía alcanzado al pie de la rápida escalonada. Con esto, finalmente se contribuyó con criterios de diseño hidráulico para rápidas escalonadas.

INVESTIGACIÓN	LUGAR Y AÑO	AUTOR (ES)	OBJETO DE ESTUDIO	RESUMEN	RESULTADO
<p>Modelación numérica 3D con ANSYS-FLUENT del Vertedero Laberinto de la Central Hidroeléctrica "La Naveta", en Apulo-Cundinamarca, a partir de un modelo físico a escala</p>	<p>Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, 2016</p>	<p>Otálora Andrés</p>	<p>Modelar y analizar el vertedero tipo laberinto de la central hidroeléctrica "La Naveta", mediante la aplicación del paquete computacional Ansys-Fluent 17.0 con base a resultados obtenidos de un modelo físico a escala 1:21.</p>	<p>Este proyecto pretende desarrollar una metodología que vincule la modelación física de los vertederos tipo laberinto con las modelaciones numéricas, empleando la base teórica de la dinámica de fluidos computacional (CFD) y las teorías de volúmenes finitos.</p>	<p>Se simuló uno de los cinco ciclos que conforman el vertedero tipo laberinto, determinando el comportamiento del coeficiente de descarga, el perfil del flujo, líneas de corriente y su campo de velocidades, con el fin de establecer las variables hidráulicas que comprenden este tipo de geometrías. Con los anteriores resultados se procedió a simular el vertedero tipo laberinto completo, contrastando los resultados obtenidos con los alcanzados en la modelación física. Además, se generó una guía metodológica para la modelación numérica de este tipo de estructuras hidráulicas en base a resultados de modelos físicos a escala.</p>
<p>Implementación del programa FLOW-3D para la simulación tridimensional del flujo en una estructura de separación de caudales</p>	<p>EPN-FICA, Quito, 2015</p>	<p>Ruiz Marcelo, Narváez Manuel</p>	<p>Implementar el paquete computacional FLOW 3D para llevar a cabo la simulación tridimensional del flujo en una estructura de separación de caudales con flujo de aproximación supercrítico y su posterior calibración mediante los resultados obtenidos del modelo físico desarrollado en el proyecto de investigación: EPN-PIMI-14-01 realizado en el CIERHI-EPN.</p>	<p>En este proyecto se elaboran modelos numéricos de estructuras simples en el software FLOW-3D para validar sus resultados mediante la información obtenida en modelos físicos. Esto se lo realiza para definir parámetros adecuados de mado y modelo de turbulencia para luego llevar a cabo la construcción del modelo numérico de la estructura de separación de caudales, la cual de igual manera se valida en base a resultados experimentales.</p>	<p>A través de la validación experimental de los modelos numéricos estudiados se concluye que, al plantear correctamente la modelación numérica, esta es capaz de representar de forma adecuada el fenómeno hidráulico de flujo en tres dimensiones, otorgando resultados afines a la realidad.</p>

INVESTIGACIÓN	LUGAR Y AÑO	AUTOR (ES)	OBJETO DE ESTUDIO	RESUMEN	RESULTADO
Validación de simulaciones de flujo bifásico en programas de CFD	Universidad Politécnica de Cartagena. España, 2014	Castillo, Luis Carrillo, José	Simular la interacción del flujo bifásico aire-agua, el cual se genera en los elementos de disipación de energía que conforman la mayoría de las presas.	En este trabajo se simulan un aliviadero de vertido libre y un resalto hidráulico mediante el paquete computacional FLOW-3D. Sus resultados se contrastan con investigaciones realizadas en laboratorio.	En el aliviadero de vertido libre, FLOW-3D resuelve el chorro sin tomar en cuenta la inclusión de aire; es decir, no se logra simular el fenómeno de aireación. En el resalto hidráulico se lograron ajustes apropiados en lo que concierne a sus perfiles de velocidad. No obstante, hay diferencias notables en las tasas de aireación. Se determinan las máximas profundidades de socavación para tres tamaños de material pétreo presente en el cuenco de disipación de energía. Estos resultados son comparados con resultados obtenidos mediante la aplicación de once ecuaciones empíricas que se reportan en la literatura técnica. Además, con dichos resultados se establecen criterios de diseño y se obtienen curvas experimentales que definen las características geométricas de las fosas de socavación para un rango de caudales de operación de la estructura.
Estudio experimental en modelo físico sobre el desarrollo del cuenco de socavación al pie de la Presa Toachi	EPN-FICA. Quito, 2013	Hermosa Daniel	Evaluar el desarrollo de los cuencos de socavación correspondiente a su tamaño, forma y profundidad máxima debido al impacto de los chorros de descarga provenientes de los saltos de esquí de los vertederos de excesos de la presa Toachi.	La investigación es realizada en modelo físico con escala 1.50 de la Presa Toachi y obras complementarias para determinar de manera experimental la forma, tamaño, ubicación y profundidad máxima de las fosas de socavación que se forman en el cuenco disipador de energía debido al impacto de los chorros de descarga provenientes de los saltos de esquí ubicados al final de la rápida de los vertederos de excesos.	Se concluye que los chorros de descarga provenientes tanto de desagües de fondo como de los vertederos de excesos cumplen con el requisito de disipar energía y además impactan en el centro del cuenco disipador sin alterar las márgenes laterales.
Estudio experimental sobre el flujo en los vertederos de excesos y desagües de fondo de la Presa Toachi, Aprovechamiento hidroeléctrico Toachi-Pilatón	UCE-FICFM. Quito, 2013	Huilca Diego	Garantizar la dirección adecuada de los chorros de descarga provenientes de los saltos en esquí y desagües de fondo con el fin de que el proceso de socavación tanto en forma como en profundidad tome lugar al interior del cuenco de disipación de energía y sea el apropiado para el correcto funcionamiento del prototipo.	El estudio experimental es llevado a cabo con el fin de determinar el comportamiento del flujo sobre los desagües de fondo y vertederos de excesos con su reubicación en el eje central de la Presa Toachi.	

Elaborado por: Chandi & Escobar

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El compendio de la información constituye una etapa esencial para el desarrollo de la presente investigación. Los datos necesarios han sido proporcionados por el Centro de Investigación y Estudios de Recursos Hídricos (CIERHI), ya que en su laboratorio se han desarrollado proyectos de investigación y sus correspondientes informes técnicos, los cuales tienen relación con el presente estudio.

Los datos por emplearse son resultado de la modelación física, escala 1:50, por lo que a continuación se describirá de manera detallada sus elementos y características fundamentales que serán de utilidad en la modelación numérica tridimensional de los vertederos de excesos.

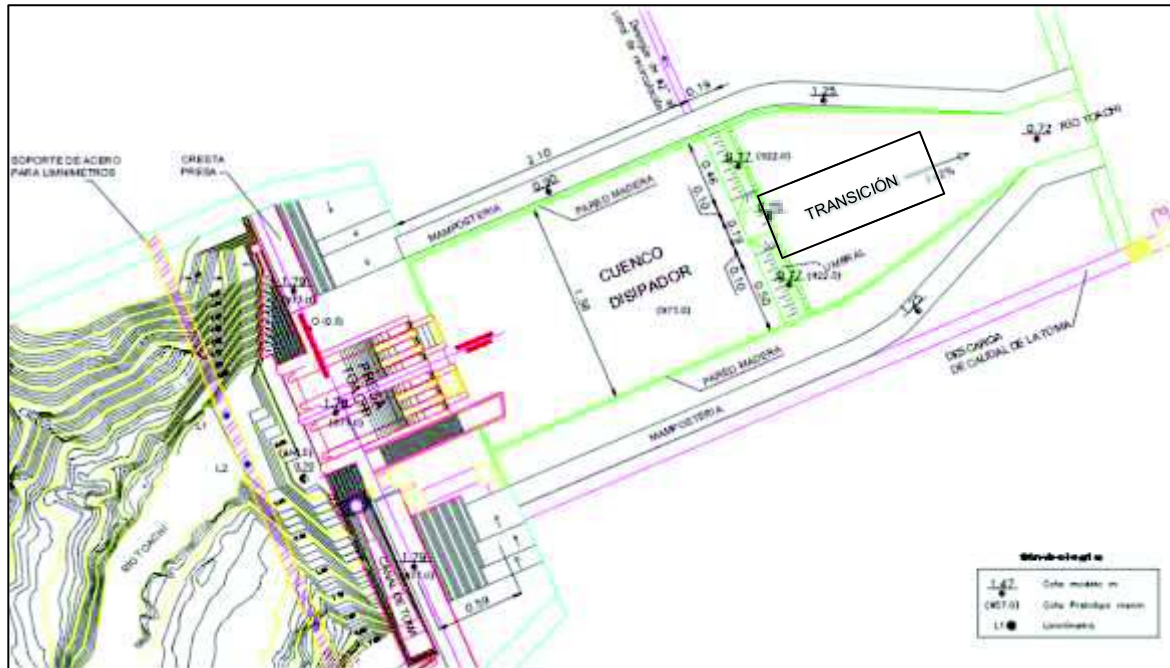
3.2 MODELO FÍSICO EXISTENTE

El modelo físico de la Presa Toachi con escala 1:50 (Figuras 3.1 y 3.2), fue construido en las instalaciones del Centro de Investigación y Estudios de Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) conforme a la información técnica otorgada por HIDROTOAPI-EP al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA). Para la selección de dicha escala se consideraron varios factores como: requerimientos impuestos por la ley de similitud restringida de Froude, área necesaria para la implantación del modelo en el laboratorio, capacidad disponible del sistema de recirculación de flujo y también el agente económico (Hermosa, 2013).

Con la escala 1:50 se obtuvo un área semejante a 37m² y un caudal de operación máximo de 180 l/s aproximadamente. El tramo de aproximación hacia la presa tiene un valor en modelo de 4.50m, en este se representan las márgenes del río Toachi y la curvatura del cauce. Seguidamente se encuentra la presa como tal y sus obras complementarias como: embalse y ataguía, canal y obra de toma, vertederos de

excesos, vertedero Sarapullo, desagües de fondo. Al pie de la presa se sitúan el cuenco de disipación de energía, la transición hacia el río y un tramo pequeño de río que en conjunto suman 3.90m de longitud (Hermosa, 2013).

Figura 3.1 Vista en planta del modelo físico de la Presa Toachi, Plano: MPT4-01 entregado el 7 de febrero del 2013



FUENTE: (CIERHI, 2013)

Figura 3.2 Modelo físico de la Presa Toachi, escala 1:50



FUENTE: (Hermosa, 2013)

En la tabla 3.1 se indican los valores de las principales dimensiones presentes tanto en prototipo como en modelo.

Tabla 3.1

Magnitudes principales en el modelo 1:50

MAGNITUDES	ESTRUCTURA	PROTOTIPO	MODELO 1:50
CAUDAL [m ³ /s]	Desagües	3200	0.181
	Vertederos	1182	0.067
CARGA [m]	Desagües	43	0.86
	Vertederos	7.5	0.15
LONGITUD [m]	Altura de Presa	59	1.18
	Longitud de Presa	170.5	3.41
	Ancho del Cuenco	67.75	1.355
	Longitud del Cuenco	105	2.1

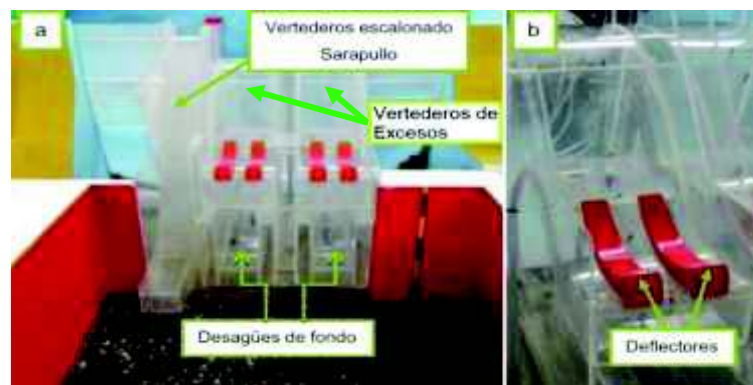
FUENTE: (Hermosa, 2013) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL DISEÑO FINAL PLANTEADO PARA LAS ESTRUCTURAS

3.2.1.1 Vertederos de excesos

Estas estructuras fueron construidas en acrílico transparente con un espesor igual a 6mm. Tanto las pilas como los deflectores se moldearon en madera lacada con acabado liso (Hermosa, 2013). Estos vertederos se encuentran ubicados en el eje central de la Presa Toachi sobre los desagües de fondo (Figura 3.3), con la finalidad de que los chorros que impacten en el lecho del cuenco generen la consecuente socavación en la zona central aguas abajo de la presa, como se indica en la siguiente figura.

Figura 3.3 Ubicación de los vertederos de excesos



FUENTE: (Hermosa, 2013) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Cada uno de los vertederos está conformado por dos deflectores trapezoidales localizados en el salto en esquí (Huilca, 2013). Para una mejor descripción de estos elementos se presenta en la Tabla 3.2 los valores numéricos de cada una de sus características principales y en la Figura 3.4 un corte transversal de los vertederos de excesos.

Tabla 3.2

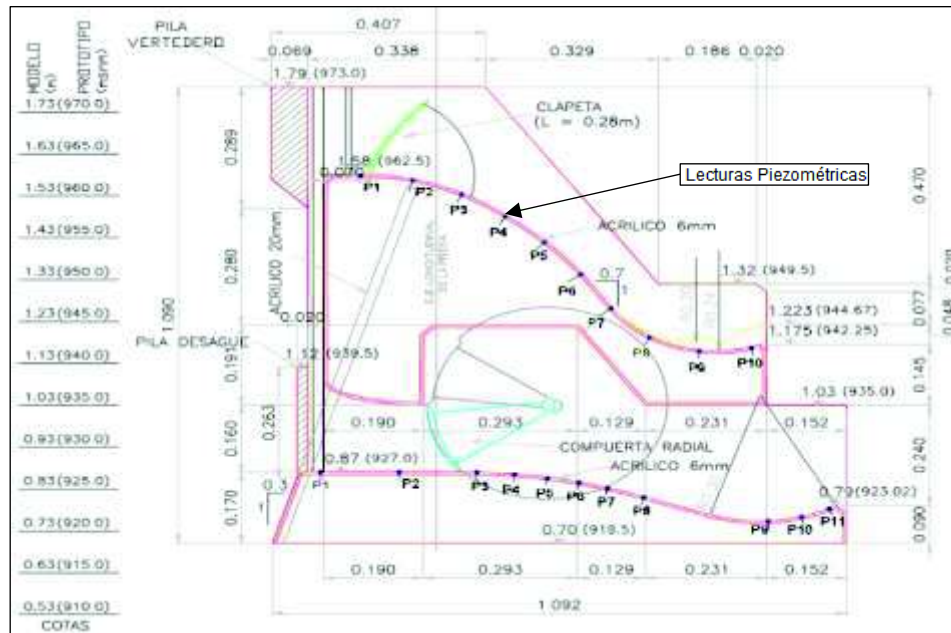
Dimensiones en modelo de los vertederos de excesos

ESTRUCTURA / ESPECIFICACIÓN	UNIDADES	MODELO
VERTEDEROS DE EXCESOS		
		
Vertederos		
Ancho de bloques	m	0.36
Ancho de vertedero	m	0.28
Carga de diseño	m	0.15
Cota de la cresta	m	1.58
CLAPETAS		
		
Clapeta		
Radio	m	0.34
Borde superior	m	1.74

ESTRUCTURA / ESPECIFICACIÓN	UNIDADES	MODELO
SALTOS EN ESQUI		
		
Salto en esquí		
Radio	m	0.24
Ángulo de salida	°	20
Cota de la cresta	m	1.175
DEFLECTORES		
		
Deflectores		
Ángulo de salida	°	37
Radio	m	0.2
Cota de la cresta	m	1.223

FUENTE: (Hermosa, 2013) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.4 Corte transversal vertederos de excesos y desagües de fondo del modelo, Plano: MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013



FUENTE: (CIERHI, 2013)

Las coordenadas y el perfil de los vertederos de excesos se presentan en la Tabla 3.3 y en la Figura 3.4 respectivamente.

Tabla 3.3

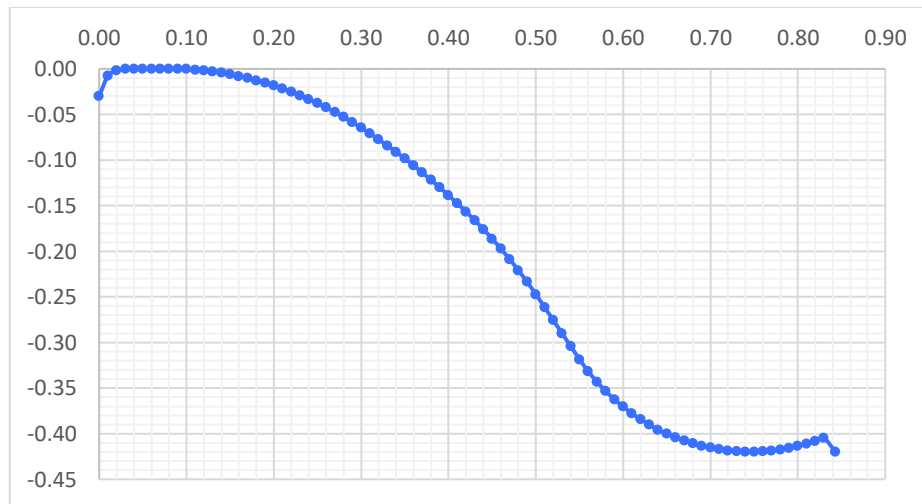
Coordenadas del perfil de los vertederos de excesos, Plano: MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013

PUNTO	X	Y	PUNTO	X	Y	PUNTO	X	Y
1	0.0000	-0.0300	29	0.2800	-0.0530	57	0.5600	-0.3317
2	0.0100	-0.0076	30	0.2900	-0.0588	58	0.5700	-0.3432
3	0.0200	-0.0017	31	0.3000	-0.0647	59	0.5800	-0.3534
4	0.0300	0.0000	32	0.3100	-0.0708	60	0.5900	-0.3624
5	0.0400	0.0000	33	0.3200	-0.0775	61	0.6000	-0.3705
6	0.0500	0.0000	34	0.3300	-0.0841	62	0.6100	-0.3778
7	0.0600	0.0000	35	0.3400	-0.0911	63	0.6200	-0.3843
8	0.0700	0.0000	36	0.3500	-0.0985	64	0.6300	-0.3901
9	0.0800	0.0000	37	0.3600	-0.1059	65	0.6400	-0.3959
10	0.0900	0.0000	38	0.3700	-0.1138	66	0.6500	-0.4000
11	0.1000	-0.0003	39	0.3800	-0.1219	67	0.6600	-0.4041
12	0.1100	-0.0010	40	0.3900	-0.1300	68	0.6700	-0.4077
13	0.1200	-0.0019	41	0.4000	-0.1388	69	0.6800	-0.4108
14	0.1300	-0.0031	42	0.4100	-0.1476	70	0.6900	-0.4134
15	0.1400	-0.0045	43	0.4200	-0.1566	71	0.7000	-0.4156

PUNTO	X	Y	PUNTO	X	Y	PUNTO	X	Y
16	0.1500	-0.0062	44	0.4300	-0.1661	72	0.7100	-0.4173
17	0.1600	-0.0081	45	0.4400	-0.1760	73	0.7200	-0.4186
18	0.1700	-0.0103	46	0.4500	-0.1864	74	0.7300	-0.4195
19	0.1800	-0.0128	47	0.4600	-0.1974	75	0.7400	-0.4199
20	0.1900	-0.0155	48	0.4700	-0.2088	76	0.7500	-0.4200
21	0.2000	-0.0185	49	0.4800	-0.2209	77	0.7600	-0.4196
22	0.2100	-0.0217	50	0.4900	-0.2337	78	0.7700	-0.4188
23	0.2200	-0.0253	51	0.5000	-0.2472	79	0.7800	-0.4176
24	0.2300	-0.0291	52	0.5100	-0.2614	80	0.7900	-0.4159
25	0.2400	-0.0332	53	0.5200	-0.2757	81	0.8000	-0.4138
26	0.2500	-0.0377	54	0.5300	-0.2900	82	0.8100	-0.4113
27	0.2600	-0.0425	55	0.5400	-0.3043	83	0.8200	-0.4083
28	0.2700	-0.0476	56	0.5500	-0.3186	84	0.8298	-0.4049
						85	0.8430	-0.4199

FUENTE: (CIERHI, 2013)

Figura 3.5 Perfil de los vertederos de excesos, Plano MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013



FUENTE: (CIERHI, 2013)

Tanto el modelo de la presa Toachi como sus obras complementarias (vertederos de excesos, saltos en esquí y cuenco de disipación de energía al pie de la presa), han sido diseñados bajo el criterio de similitud de Froude ($Fr_m = Fr_p$) (CIERHI, 2013).

3.2.1.2 Cuenco de disipación de energía

Esta estructura fue elaborada con una losa de hormigón y paredes de mampostería, debido a las recomendaciones generadas en etapas previas, se incrementó tanto

el ancho como la longitud del cuenco colocándose paredes de madera triplex de 18mm (Hermosa, 2013). En la Tabla 3.4 se indican las dimensiones principales del cuenco.

Tabla 3.4

Dimensiones principales del cuenco de disipación de energía

CUENCO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA			
MAGNITUD	UNIDAD	PROTOTIPO	MODELO
Longitud	m	105.00	2.10
Ancho	m	68.00	1.36
Cota enrocado	m	918.50	0.70

FUENTE: (Hermosa, 2013)

3.2.1.3 Transición hacia el río

De igual manera que el cuenco disipador de energía, esta estructura fue elaborada con hormigón en la zona de ingreso (aguas arriba), consta de un umbral de 7cm de altura en modelo. Esta transición no es simétrica debido a que los ángulos de las paredes son diferentes en relación con el eje longitudinal. En la Tabla 3.5 se destacan sus respectivas características.

Tabla 3.5

Dimensiones principales de la transición hacia el cauce natural

TRANSICIÓN HACIA EL RÍO			
MAGINUTD	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Longitud de la transición	m	85	1.7
Ancho aguas arriba	m	68	1.36
Ancho aguas abajo	m	17.25	0.345
Pendiente longitudinal	%	2	2
Ángulo margen derecha	°	13	13
Ángulo margen izquierda	°	26	26

FUENTE: (Hermosa, 2013)

En la Figura 3.6 se presenta la figura que incluye a las dos estructuras citadas anteriormente.

Figura 3.6 Estructuras complementarias situadas aguas abajo de la Presa Toachi



FUENTE: (Hermosa, 2013)

3.2.2 MAGNITUDES DERIVADAS EN EL MODELO BAJO LA LEY DE SIMILITUD DE FROUDE

Teniendo en cuenta que la escala de longitudes es igual a 1:50, en la Tabla 3.6 se muestran los valores de las escalas principales y de las respectivas magnitudes empleadas tanto en el diseño como en la operación del modelo.

Tabla 3.6

Magnitudes derivadas en el modelo bajo criterio de similitud según Froude

Magnitud	Símbolo	Equivalencia	Valor Numérico	Valor (Prototipo)	Valor (Modelo)	Dimensión
Longitud	e_L	e_L	50	1 m	2	cm
Superficie	e_A	e_L^2	2500	10 m ²	40	cm ²
Velocidad	e_V	$e_L^{1/2}$	7,07	2 m/s	28.28	cm/s
Tiempo	e_T	$e_L^{1/2}$	7,07	1 h	8.49	min
Caudal	e_Q	$e_L^{5/2}$	17667,7	100 m ³ /s	5.66	l/s
Fuerza	e_F	e_L^3	125000	1 T	0.008	Kg (fuerza)
Presión	e_P	e_L	50	10 m	20	cm

FUENTE: (Huilca, 2013)

Para la determinación experimental de los resultados se contó con los equipos y herramientas correspondientes, entre los cuales se puede nombrar a: nivel y estación total, cinta métrica, limnímetros y vertedero triangular de 90° de pared delgada (Hermosa, 2013).

3.2.3 CAUDALES ENSAYADOS EN EL MODELO FÍSICO CON ESCALA 1:50

En base al informe de revisión hidrológica de la zona del proyecto, se estableció una serie de cinco caudales con el fin de representar los eventos de operación normales y extraordinarios del embalse de la presa.

En modelo, el total del caudal que entra al embalse se distribuye de manera equitativa para cada vertedero de excesos, lo cual significa que para el caudal máximo que en este caso es $1200\text{m}^3/\text{s}$, se descarguen $600\text{m}^3/\text{s}$ en cada vertedero (Huilca, 2013). La Tabla 3.7 muestra los caudales ensayados.

Tabla 3.7

Serie de caudales de ingreso según el código de prueba

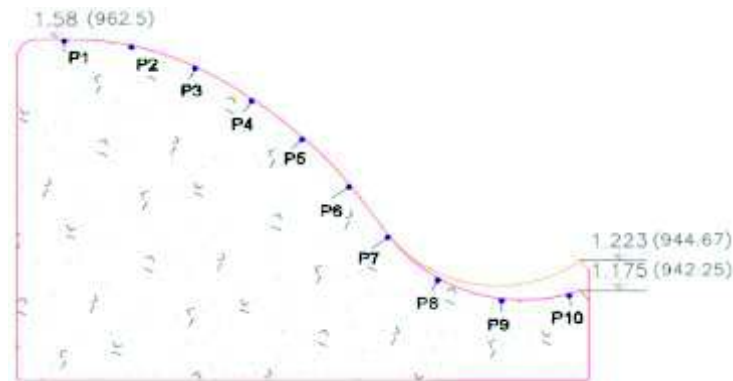
CÓDIGO DE PRUEBA	$Q_{\text{teórico}}$ [m^3/s]	Q_{modelo} [m^3/s]	$Q_{\text{prototipo}}$ [m^3/s]
D1	1200	0.06863	1213.16
D2	1000	0.05651	998.97
D3	700	0.04021	710.85
D4	500	0.02826	499.57
D5	250	0.01495	264.35

FUENTE: (Huilca, 2013)

3.2.4 PRESIONES ADIMENSIONALES SOBRE EL PERFIL DEL VERTEDERO DE EXCESOS

En el modelo, las lecturas de las cargas piezométricas se las realizó en 10 puntos situados a lo largo del eje de cada vertedero de excesos (Figura 3.7), con el fin de verificar la geometría de dichas estructuras hidráulicas. La medición de las cargas piezométricas en cada punto permite establecer la distribución de presiones en el perfil del cimacio (CIERHI, 2013). Los resultados de estas mediciones están dados para cada uno de los cinco caudales ensayados, los cuales se indican en cada una de las Tablas (3.8, 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12) y Figuras (3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17).

Figura 3.7 Localización de piezómetros a lo largo del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos, Plano: MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013



FUENTE: (CIERHI, 2013) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

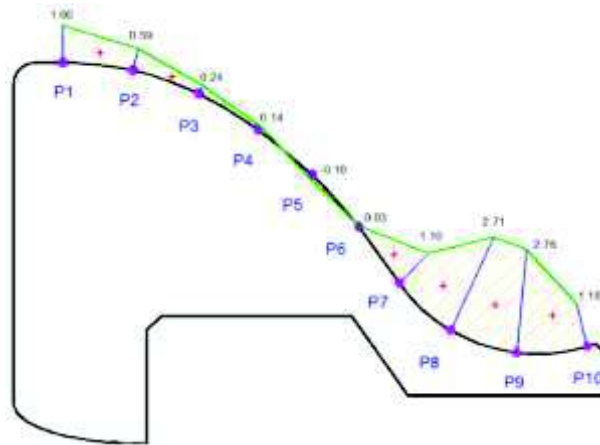
Tabla 3.8

Lecturas Piezométricas a lo largo del eje del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos. Descarga simultánea por ambos vertederos, $Q= 1200\text{m}^3/\text{s}$

Q= 1200 m ³ /s				
Lectura N°	Vertedero Derecho		Vertedero Izquierdo	
	Carga Piezométrica	Adimensional	Carga Piezométrica	Adimensional
	[m]	[P/γh]	[m]	[P/γh]
1	0.079	1.000	0.082	1.00
2	0.0465	0.589	0.049	0.60
3	0.019	0.241	0.022	0.27
4	0.011	0.139	0.003	0.04
5	-0.008	-0.101	-0.011	-0.13
6	0.002	0.025	-0.032	-0.38
7	0.087	1.101	0.082	1.00
8	0.214	2.709	0.207	2.52
9	0.218	2.759	0.214	2.61
10	0.093	1.177	0.104	1.27

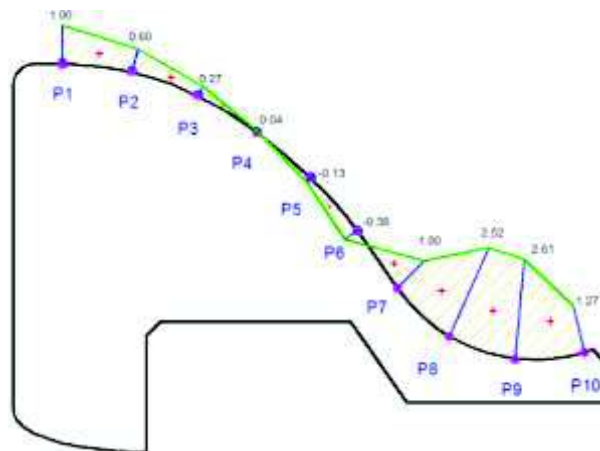
FUENTE: (CIERHI, 2013)

Figura 3.8 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos derecho. $Q= 1200\text{m}^3/\text{s}$, ($600\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)



FUENTE: (CIERHI, 2013)

Figura 3.9 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 1200\text{m}^3/\text{s}$, ($600\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)



FUENTE: (CIERHI, 2013)

Tabla 3.9

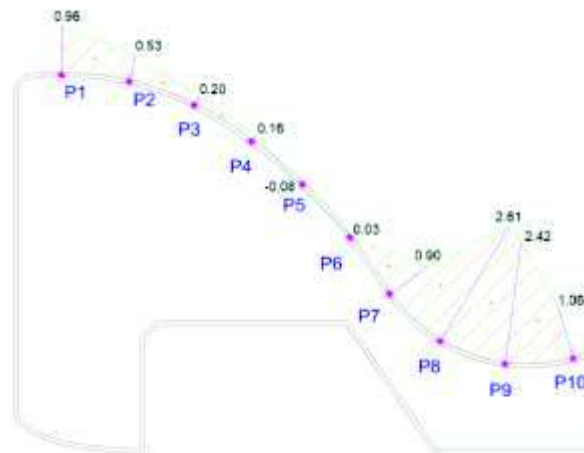
Lecturas Piezométricas a lo largo del eje del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos. Descarga simultánea por ambos vertederos, $Q= 1000\text{m}^3/\text{s}$

Q= 1000 m ³ /s				
Lectura N°	Vertedero Derecho		Vertedero Izquierdo	
	Carga Piezométrica	Adimensional	Carga Piezométrica	Adimensional
	[m]	[P/ℓh]	[m]	[P/ℓh]
1	0.076	0.96	0.076	0.93
2	0.042	0.53	0.045	0.55
3	0.016	0.20	0.021	0.26
4	0.013	0.16	0.006	0.07

Q= 1000 m ³ /s				
Lectura	Vertedero Derecho		Vertedero Izquierdo	
N°	Carga Piezométrica	Adimensional	Carga Piezométrica	Adimensional
	[m]	[P/∇h]	[m]	[P/∇h]
5	-0.006	-0.08	-0.004	-0.05
6	0.002	0.03	-0.032	-0.39
7	0.071	0.90	0.065	0.79
8	0.206	2.61	0.177	2.16
9	0.191	2.42	0.189	2.30
10	0.084	1.06	0.083	1.01

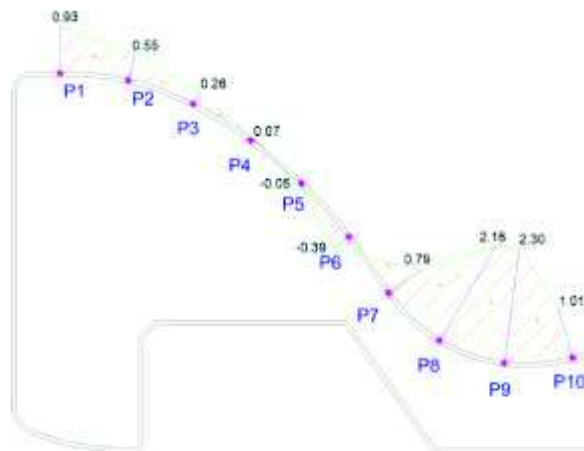
FUENTE: (Huilca, 2013)

Figura 3.10 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos derecho. Q= 1000m³/s, (500m³/s por cada vertedero)



FUENTE: (Huilca, 2013)

Figura 3.11 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos izquierdo. Q= 1000m³/s, (500m³/s por cada vertedero)



FUENTE: (Huilca, 2013)

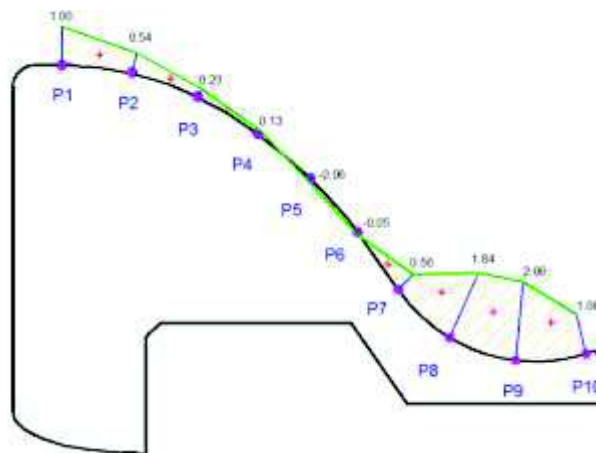
Tabla 3.10

Lecturas Piezométricas a lo largo del eje del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos. Descarga simultánea por ambos vertederos, $Q= 700\text{m}^3/\text{s}$

Q= 700 m ³ /s				
Lectura N°	Vertedero Derecho		Vertedero Izquierdo	
	Carga Piezométrica	Adimensional	Carga Piezométrica	Adimensional
	[m]	[P/h]	[m]	[P/h]
1	0.064	1.000	0.065	1.00
2	0.0345	0.539	0.037	0.57
3	0.015	0.234	0.016	0.25
4	0.008	0.125	0.005	0.08
5	-0.004	-0.063	-0.004	-0.06
6	-0.003	-0.047	-0.028	-0.43
7	0.036	0.563	0.032	0.49
8	0.118	1.844	0.110	1.69
9	0.132	2.063	0.128	1.97
10	0.069	1.078	0.076	1.17

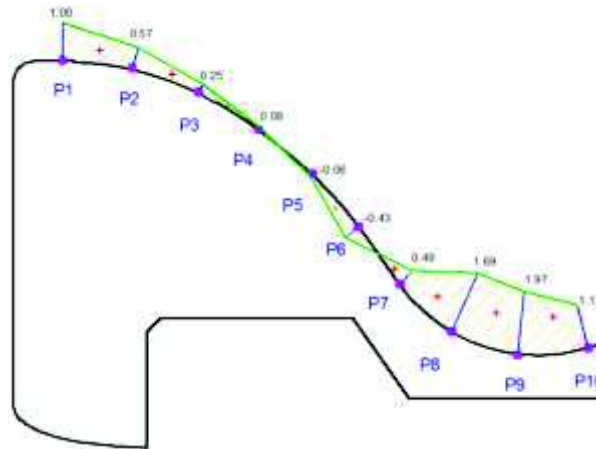
FUENTE: (CIERHI, 2013)

Figura 3.12 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos derecho. $Q= 700\text{m}^3/\text{s}$, (350m³/s por cada vertedero)



FUENTE: (CIERHI, 2013)

Figura 3.13 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 700\text{m}^3/\text{s}$, ($350\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)



FUENTE: (CIERHI, 2013)

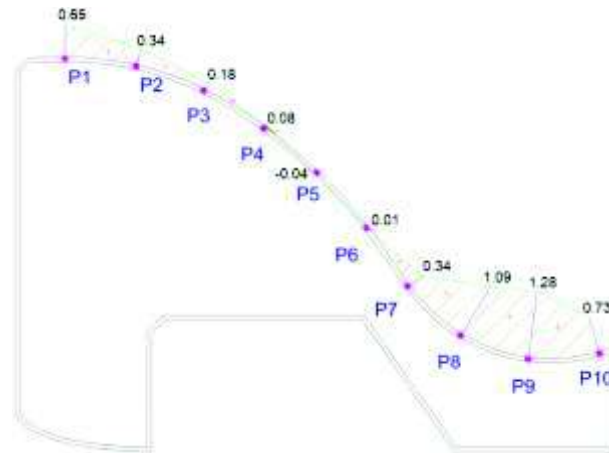
Tabla 3.11

Lecturas Piezométricas a lo largo del eje del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos. Descarga simultánea por ambos vertederos, $Q= 500\text{m}^3/\text{s}$

Q= 500 m ³ /s				
Lectura	Vertedero Derecho		Vertedero Izquierdo	
N°	Carga Piezométrica	Adimensional	Carga Piezométrica	Adimensional
	[m]	[P/γh]	[m]	[P/γh]
1	0.051	0.65	0.054	0.66
2	0.027	0.34	0.030	0.37
3	0.014	0.18	0.014	0.17
4	0.006	0.08	0.005	0.06
5	-0.003	-0.04	0.00	0.00
6	0.001	0.01	-0.018	-0.22
7	0.027	0.34	0.026	0.32
8	0.086	1.09	0.071	0.87
9	0.101	1.28	0.099	1.21
10	0.058	0.73	0.060	0.73

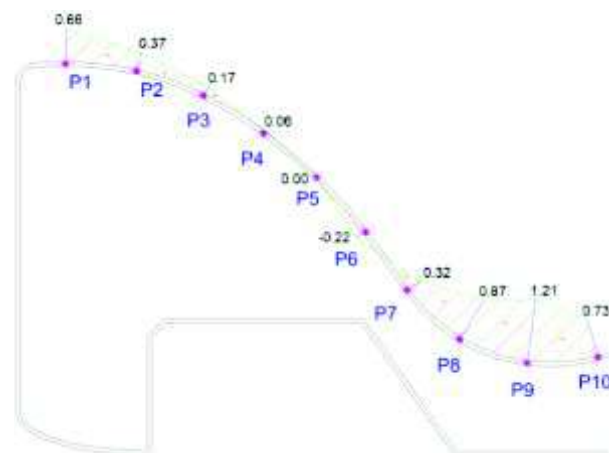
FUENTE: (Huilca, 2013)

Figura 3.14 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos derecho. $Q= 500\text{m}^3/\text{s}$, ($250\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)



FUENTE: (Huilca, 2013)

Figura 3.15 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 500\text{m}^3/\text{s}$, ($250\text{m}^3/\text{s}$ por cada vertedero)



FUENTE: (Huilca, 2013)

Tabla 3.12

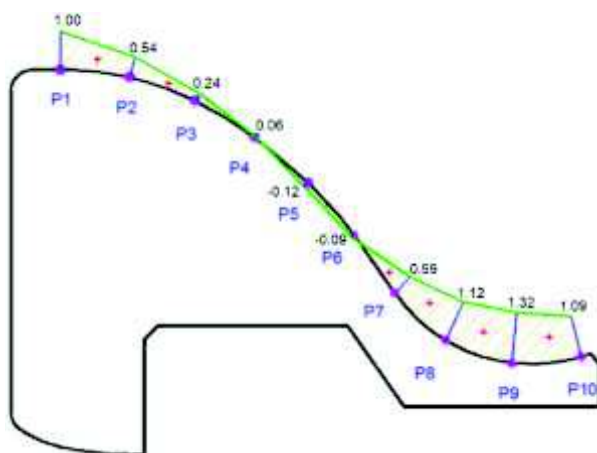
Lecturas Piezométricas a lo largo del eje del perfil del cimacio, en el eje de los vertederos de excesos. Descarga simultánea por ambos vertederos, $Q= 250\text{m}^3/\text{s}$

Q= 250 m ³ /s				
Lectura	Vertedero Derecho		Vertedero Izquierdo	
N°	Carga Piezométrica	Adimensional	Carga Piezométrica	Adimensional
	[m]	[P/ℓh]	[m]	[P/ℓh]
1	0.034	1.00	0.034	1.00
2	0.0185	0.544	0.018	0.53
3	0.008	0.235	0.008	0.24
4	0.002	0.059	0.002	0.06
5	-0.004	-0.118	0.00	0.00

Q= 250 m ³ /s				
Lectura	Vertedero Derecho		Vertedero Izquierdo	
N°	Carga Piezométrica	Adimensional	Carga Piezométrica	Adimensional
	[m]	[P/γh]	[m]	[P/γh]
6	-0.003	-0.088	-0.017	-0.50
7	0.020	0.588	-0.003	-0.09
8	0.038	1.118	0.017	0.50
9	0.045	1.324	0.044	1.29
10	0.037	1.088	0.040	1.18

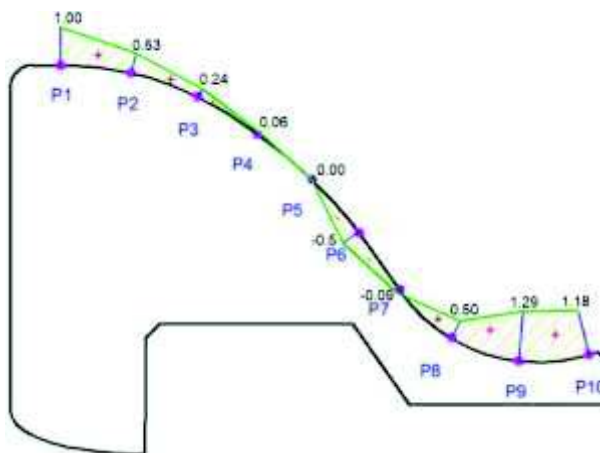
FUENTE: (CIERHI, 2013)

Figura 3.16 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos derecho. Q= 250m³/s, (125m³/s por cada vertedero)



FUENTE: (CIERHI, 2013)

Figura 3.17 Distribución de las alturas piezométricas adimensionales para el vertedero de excesos izquierdo. Q= 250m³/s, (125m³/s por cada vertedero)



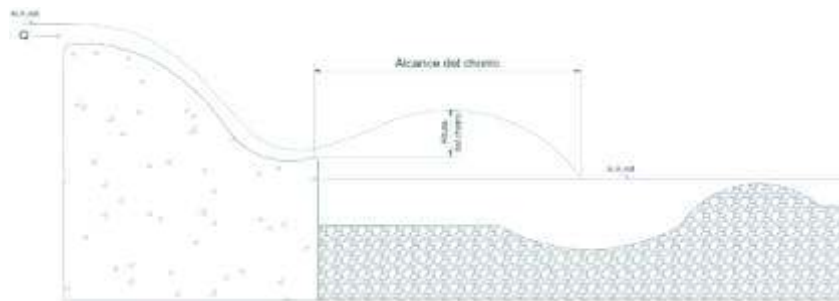
FUENTE: (CIERHI, 2013)

3.2.5 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LOS CHORROS DESCARGADOS POR LOS VERTEDEROS DE EXCESOS

Los caudales descargados por los vertederos de excesos son dirigidos hacia aguas abajo de la presa a través de dos saltos en esquí, provocando que el flujo entre en contacto directo con el aire (proceso de aireación del chorro), Figura 3.18, de esta manera estas obras favorecen a la disipación de energía y permiten que el flujo se aleje del pie de las estructuras (Huilca, 2013). Algunas investigaciones realizadas establecen que en la interacción del chorro con el aire se produce una disipación de energía de alrededor del 19% y 20% (Hermosa, 2013).

En lo que respecta a sus características dinámicas (altura y alcance), se tiene que para ambos vertederos los resultados son muy similares (Huilca, 2013).

Figura 3.18 Características dinámicas de los chorros



FUENTE: (Huilca, 2013)

En las Tablas 3.13 y 3.14 se presentan los resultados experimentales obtenidos concernientes al alcance y altura de los chorros.

Tabla 3.13

Resultados obtenidos en el modelo con respecto al alcance de los chorros

CARACTERÍSTICA DINÁMICA	VERTEDERO DE EXCESOS	CAUDAL [m ³ /s]	Alcance máximo [m]
ALCANCE	DERECHO	0.06863	1.24
		0.05651	1.2
		0.04021	1.095
		0.02826	0.995
		0.01495	0.979
	IZQUIERDO	0.06863	1.24
		0.05651	1.202
		0.04021	1.104
		0.02826	1.04
		0.01495	0.975

FUENTE: (Huilca, 2013)

Tabla 3.14

Resultados obtenidos en el modelo con respecto a la altura de los chorros

CARACTERÍSTICA DINÁMICA	VERTEDERO DE EXCESOS	CAUDAL [m ³ /s]	Altura máxima [m]
ALTURA	DERECHO	0.06863	0.171
		0.05651	0.164
		0.04021	0.156
		0.02826	0.145
		0.01495	0.12
	IZQUIERDO	0.06863	0.173
		0.05651	0.171
		0.04021	0.163
		0.02826	0.162
		0.01495	0.126

FUENTE: (Huilca, 2013)

3.2.6 RESULTADOS DE CALADOS SOBRE CADA VERTEDERO DE EXCESOS

Para la medición de calados de agua en los vertederos y deflectores se emplearon reglas metálicas, las cuales cuentan con una precisión de 1mm. Los resultados se presentan en las Tablas (3.15, 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19).

Tabla 3.15

Mediciones de calados en el modelo, $Q= 0.06863$ m³/s

VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO			VERTEDEROS DE EXCESOS IZQUIERDO		
Carga sobre la cresta	cm	13.0	Carga sobre la cresta	cm	13.0
		12.5			12.5
		13.0			13
Carga sobre el perfil	cm	5.3	Carga sobre el perfil	cm	6.0
SALTO EN ESQUÍ			SALTO EN ESQUÍ		
Calado esquí 1	cm	5.0	Calado esquí 1	cm	5.0
Calado deflector	cm	1.5	Calado deflector	cm	1.5
Calado esquí 2	cm	6.0	Calado esquí 2	cm	5.9
Calado deflector	cm	1.7	Calado deflector	cm	1.4
Calado esquí 3	cm	5.8	Calado esquí 3	cm	5.5

FUENTE: (Huilca, 2013)

Tabla 3.16

Mediciones de calados en el modelo, $Q= 0.05651$ m³/s

VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO			VERTEDEROS DE EXCESOS IZQUIERDO		
Carga sobre la cresta	cm	11.4	Carga sobre la cresta	cm	11.7
Carga sobre el perfil	cm	4.0	Carga sobre el perfil	cm	4.0
SALTO EN ESQUÍ			SALTO EN ESQUÍ		
Calado esquí 1	cm	5.0	Calado esquí 1	cm	5.0
Calado deflector	cm	1.0	Calado deflector	cm	1.2
Calado esquí 2	cm	5.3	Calado esquí 2	cm	5.3
Calado deflector	cm	1.3	Calado deflector	cm	1.1
Calado esquí 3	cm	5.6	Calado esquí 3	cm	5.5

FUENTE: (Huilca, 2013)

Tabla 3.17

Mediciones de calados en el modelo, $Q= 0.04021 \text{ m}^3/\text{s}$

VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	8.7
		8.9
		8.7
Carga sobre el perfil	cm	3.3
SALTO EN ESQUÍ		
Calado esquí 1	cm	3.3
Calado deflector	cm	0.8
Calado esquí 2	cm	4.3
Calado deflector	cm	0.8
Calado esquí 3	cm	3.4

VERTEDEROS DE EXCESOS IZQUIERDO		
Carga sobre la cresta	cm	8.7
		3.4
		8.8
Carga sobre el perfil	cm	8.9
SALTO EN ESQUÍ		
Calado esquí 1	cm	3.6
Calado deflector	cm	0.8
Calado esquí 2	cm	4.0
Calado deflector	cm	0.8
Calado esquí 3	cm	3.4

FUENTE: (Huilca, 2013)

Tabla 3.18

Mediciones de calados en el modelo, $Q= 0.02826 \text{ m}^3/\text{s}$

VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	5.7
Carga sobre el perfil	cm	2.8
SALTO EN ESQUÍ		
Calado esquí 1	cm	3.2
Calado deflector	cm	0.6
Calado esquí 2	cm	3.3
Calado deflector	cm	0.6
Calado esquí 3	cm	2.7

VERTEDEROS DE EXCESOS IZQUIERDO		
Carga sobre la cresta	cm	6.5
Carga sobre el perfil	cm	2.9
SALTO EN ESQUÍ		
Calado esquí 1	cm	2.6
Calado deflector	cm	0.6
Calado esquí 2	cm	3.5
Calado deflector	cm	0.6
Calado esquí 3	cm	3

FUENTE: (Huilca, 2013)

Tabla 3.19

Mediciones de calados en el modelo, $Q= 0.01495 \text{ m}^3/\text{s}$

VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	3.3
		3.5
		3.9
Carga sobre el perfil	cm	1.9
SALTO EN ESQUÍ		
Calado esquí 1	cm	1.3
Calado deflector	cm	0.4
Calado esquí 2	cm	1.7
Calado deflector	cm	0.4
Calado esquí 3	cm	1.4

VERTEDEROS DE EXCESOS IZQUIERDO		
Carga sobre la cresta	cm	4.7
		4.6
		5.0
Carga sobre el perfil	cm	1.4
SALTO EN ESQUÍ		
Calado esquí 1	cm	1.7
Calado deflector	cm	0.5
Calado esquí 2	cm	2.0
Calado deflector	cm	0.5
Calado esquí 3	cm	1.3

FUENTE: (Huilca, 2013)

3.2.7 COORDENADAS DE LAS LECTURAS PIEZOMÉTRICAS A EMPLEARSE EN EL MODELO NUMÉRICO

En las Tablas 3.20 y 3.21 se presentan las coordenadas de los piezómetros en el modelo numérico para el vertedero derecho e izquierdo respectivamente.

Tabla 3.20

Coordenadas de los piezómetros en modelo CAD-3D, MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013. Vertedero de excesos derecho

X	Y	Z
0.2723	1.8543	1.7297
0.3723	1.8543	1.7202
0.4692	1.8543	1.6865
0.5473	1.8543	1.6343
0.6267	1.8543	1.5731
0.6957	1.8543	1.4966
0.7492	1.8543	1.4152
0.8265	1.8543	1.3456
0.9129	1.8543	1.3123
1.0202	1.8543	1.3201

FUENTE: (CIERHI, 2013) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 3.21

Coordenadas de los piezómetros en modelo CAD-3D, MPT4-04 entregado el 7 de febrero del 2013. Vertedero de excesos izquierdo

X	Y	Z
0.2723	2.2143	1.7297
0.3723	2.2143	1.7202
0.4692	2.2143	1.6865
0.5473	2.2143	1.6343
0.6267	2.2143	1.5731
0.6957	2.2143	1.4966
0.7492	2.2143	1.4152
0.8265	2.2143	1.3456
0.9129	2.2143	1.3123
1.0202	2.2143	1.3201

FUENTE: (CIERHI, 2013) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

3.3 INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) CON EL PROGRAMA FLOW-3D

En la mecánica de fluidos clásica una de las hipótesis es considerar como un dominio continuo a los fluidos, es decir, las variables del flujo como presión, velocidad y temperatura se definen en todos los puntos del espacio. La estrategia utilizada por la CFD para eliminar la complejidad de representar los problemas

mediante un dominio continuo, es reemplazarlo por un dominio discreto definido por una malla, en la que las variables del flujo se definen en los puntos (nodos) que conforman la malla.

Al proceso de dividir el espacio en un número finito de puntos se le denomina discretización espacial, y se lo puede realizar mediante mallas que según el tipo de conectividad entre las celdas pueden ser: mallas estructuradas o no estructuradas (Fernández, 2012).

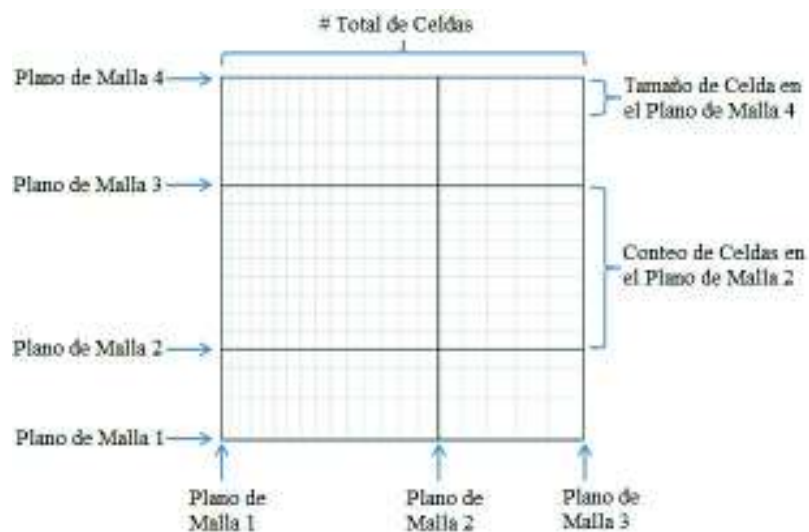
3.3.1 MALLADO EN EL PROGRAMA FLOW-3D

En el programa FLOW-3D el mallado que se utiliza es estructurado y se puede definir mediante coordenadas cartesianas o cilíndricas.

En busca de eficiencia en la modelación de dominios complejos de flujo se pueden definir mallas multi bloque, en la que los bloques de malla adicionales pueden estar anidados (bloque dentro de otro) o vinculados (bloque colinda con otro) (Flow Science, Inc, 2016).

En la Figura 3.19 se puede observar los principales componentes de un bloque de malla.

Figura 3.19 Componentes principales de un bloque de malla



FUENTE: (Flow Science, Inc, 2016) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Para obtener resultados precisos y eficientes utilizando FLOW-3D hay que seguir los siguientes consejos (Flow Science, Inc, 2016):

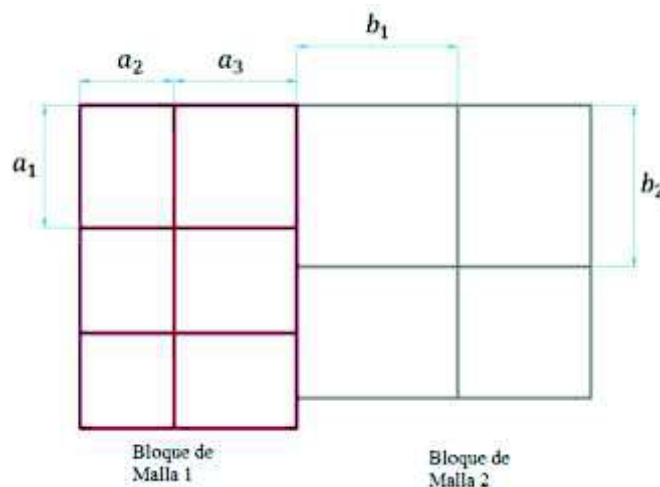
- No sobre especificar el bloque de malla, es decir, solo especificar el tamaño de celda, y dejar que el generador de malla especifique planos de malla necesarios o faltantes.
- La relación de tamaño entre celdas adyacentes (a_3/a_2) debe ser lo más cercana a uno y no exceder 1.25.
- Las relaciones de aspecto de las celdas (a_1/a_2) deben ser cercanas a la unidad y no superar 3.0.

En mallas multi-bloques seguir las siguientes pautas nos ayudará a minimizar errores (Flow Science, Inc, 2016):

- Minimizar la cantidad de bloques, ya que estos requieren interpolación y son posibles fuentes de errores de truncamiento.
- La relación del tamaño de celdas entre bloques adyacentes (b_2/a_1 , b_1/a_3 , entre otros) debe ser menor a 2 para evitar perder precisión.
- Asegurar la continuidad de los planos de malla en los bloques anidados o bloques vinculados, ver Figura 3.21.

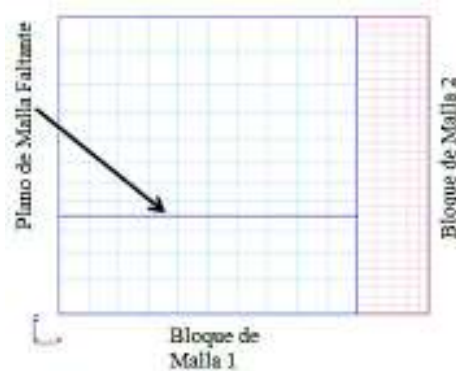
En la Figura 3.20 se muestra la notación de las relaciones indicadas anteriormente.

Figura 3.20 Notación de las dimensiones de celdas de bloques distintos de malla



FUENTE: (Flow Science, Inc, 2016) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.21 Plano de malla faltante en bloque de malla 2 vinculado



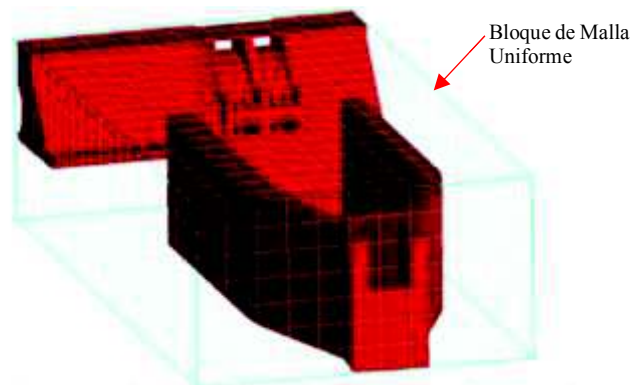
FUENTE: (Flow Science, Inc, 2016) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

3.3.1.1 Mallado Básico

Se define el dominio mediante una malla de bloque único, ver Figura 3.22, en la que de manera predeterminada el tamaño de la celda es constante en todas las direcciones. Este tipo de mallado se puede crear especificando el tamaño de celda, un número total de celdas o un número específico de celdas en cada dirección.

Se pueden generar planos de malla intermedios con el fin de estirar el tamaño de las celdas en una dirección particular, en los que se debe especificar el tamaño de celda y el número de celdas entre planos de malla para así configurar el espaciado de las líneas de cuadrícula. También se puede utilizar los planos de malla intermedios como planos referenciales para verificar la alineación de estructuras (Flow Science, Inc, 2016).

Figura 3.22 Mallado básico en FLOW-3D



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

3.3.1.2 Mallado Multi-Bloque

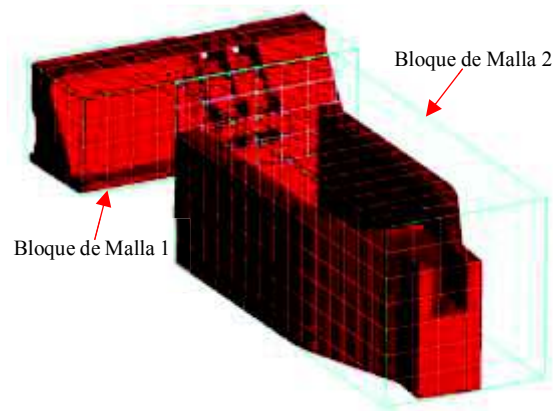
Para aumentar la resolución de simulación en el área de interés y excluir regiones donde no se espera flujo, se utiliza un mallado multi-bloque que además de ser eficiente reduce el número de celdas. El límite de bloques de malla que se pueden crear es 150, ya que el post procesador permite esta cantidad (Flow Science, Inc, 2016).

Dentro de este tipo de mallado multi-bloque se encuentran la malla vinculada, superpuesta y anidada.

3.3.1.3 Malla Vinculada

Los bloques de malla se encuentran vinculados, cuando estos comparten un límite común entre sí (Flow Science, Inc, 2016), ver Figura 3.23.

Figura 3.23 Bloques de malla vinculados en FLOW-3D

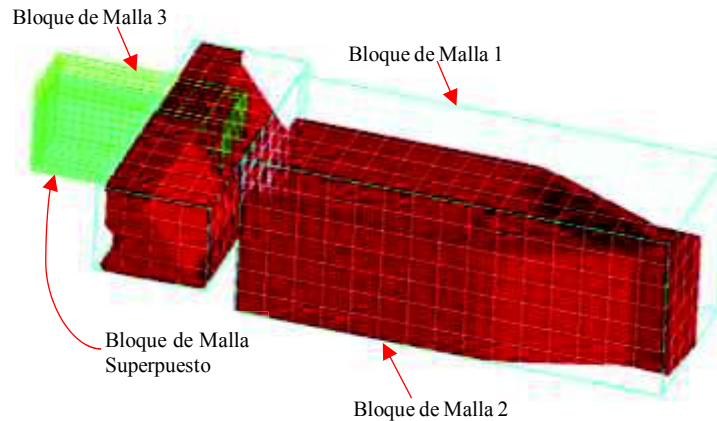


ELABORADO POR: Chandi & Escobar

3.3.1.4 Malla Superpuesta

Los bloques de malla se encuentran superpuestos, ver Figura 3.24, cuando un bloque se superpone parcialmente a otro. Las ecuaciones gobernantes se resuelven en el bloque de malla que tenga el tamaño de celda promedio más pequeño (Flow Science, Inc, 2016).

Figura 3.24 Bloque de malla superpuesta en FLOW-3D

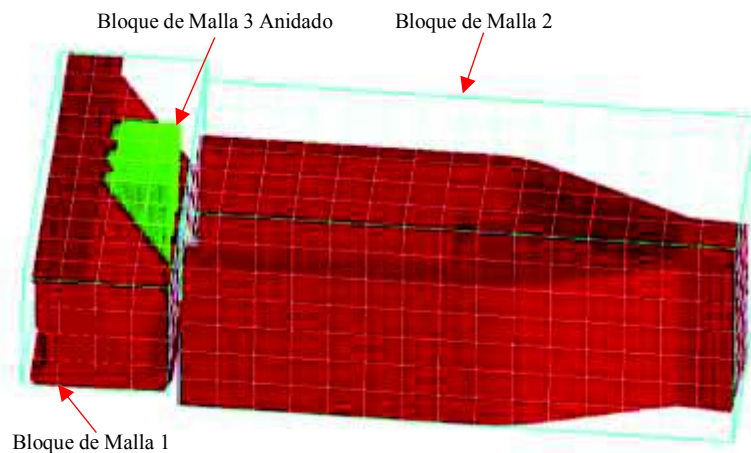


ELABORADO POR: Chandi & Escobar

3.3.1.5 Malla Anidada

Los bloques de malla se encuentran anidados, ver Figura 3.25, cuando un bloque de malla está completamente encerrado por otro. Las ecuaciones gobernantes se resuelven en el bloque de malla que tenga el tamaño de celda más pequeño (Flow Science, Inc, 2016).

Figura 3.25 Bloque de malla anidado en FLOW-3D



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

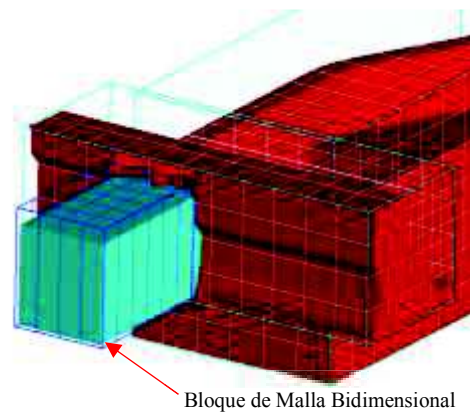
3.3.1.6 Mallas de Dimensionalidad Reducida

En ciertos problemas a veces es útil reducir el número de dimensiones, en FLOW-3D la dimensionalidad se reduce estableciendo solo una celda en una dirección de

coordenadas en particular (Flow Science, Inc, 2016), y así se pueden obtener mallados bidimensionales (ver Figura 3.26) y unidimensionales (ver Figura 3.27).

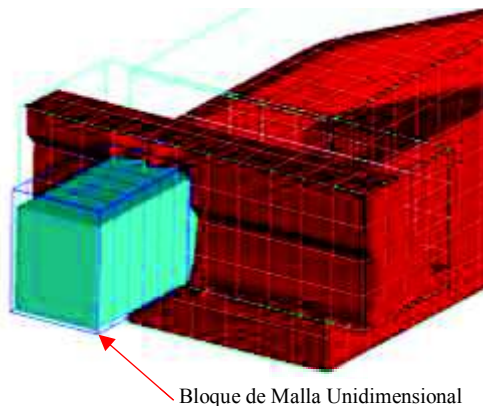
Otra opción es utilizar el mallado shallow water (mallado de aguas poco profundas), que se basa en la suposición que la extensión del fluido es mucho mayor en relación con la profundidad, entonces las ecuaciones gobernantes son cuasi tridimensionales ya que se encuentran promediadas en profundidad (Flow Science, Inc, 2016).

Figura 3.26 Mallado bidimensional X-Y en FLOW-3D



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.27 Mallado unidimensional X en FLOW-3D



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

3.3.2 ALGORITMO FAVOR

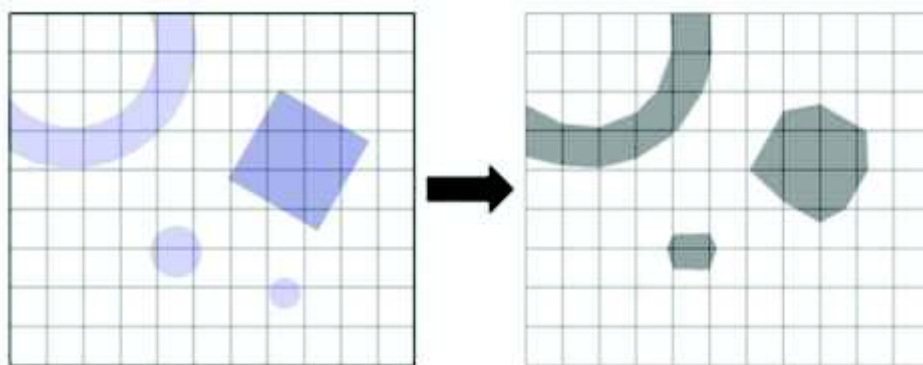
Es un mecanismo que permite al programa FLOW-3D integrar el sólido en tres dimensiones al mallado realizado, sin necesidad de realizar un mallado ajustado al

sólido. FAVOR permite de esta manera integrar efectos de geometría en las ecuaciones, este método depende de la resolución del mallado, debido a que el preprocesador genera fracciones de área para cada cara de celda en la cuadrícula al determinar qué esquinas de la cara están dentro de una geometría definida es decir cualquier parte de una geometría que se extienda a través de una cara de celda, pero no incluya una esquina de esa cara de celda no es reconocida por el generador de fracción de área.

Las fracciones de área se calculan a partir de los puntos intersección de la geometría con los bordes de la cara, suponiendo conexiones en línea recta entre los puntos de intersección dentro de la cara. La representación de la geometría aumenta al reducir el tamaño de mallado (mejorar la resolución del mallado).

Objeto dibujado (izquierda) y objeto creado en FLOW-3D aplicado FAVOR (derecha).

Figura 3.28 Visualización de objetos luego de aplicar el algoritmo FAVOR



FUENTE: (Flow Science, Inc, 2016)

En conclusión, FAVOR es un método que se usa exclusivamente en FLOW-3D que permite calcular áreas interfaciales, mejorar la estabilidad numérica y calcular la advección y el estrés a lo largo de límites sólidos.

3.3.3 CONDICIONES DE CONTORNO EN FLOW-3D

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del flujo de fluido se pueden caracterizar como problemas de valores iniciales de contorno, lo que significa que para conocer la solución del problema en el dominio debe conocerse soluciones en

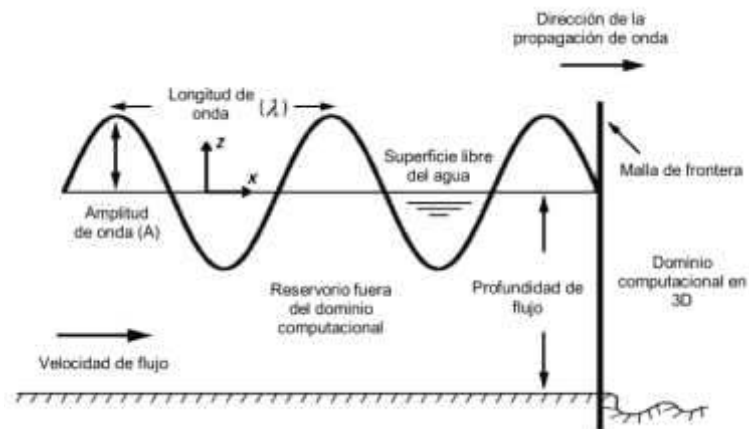
el momento inicial (condiciones iniciales) y en las fronteras (condiciones de contorno) (Flow Science, Inc, 2016).

Existen 10 condiciones de contorno que se pueden establecer en las caras de los bloques de malla (Flow Science, Inc, 2016):

- Continuativo: esta condición consiste en cero derivadas normales en el límite para todas las cantidades y pretende representar una continuación suave del flujo a través del límite.
- Superposición de cuadrícula: aplica la solución tomada de la simulación de origen de reinicio como una condición de contorno en una simulación de reinicio.
- Flujo de salida: la condición de límite de salida permite a los usuarios investigar numéricamente los efectos de las interacciones de onda con las estructuras. Esta capacidad permite una reducción en la extensión de la malla informática necesaria para cálculos precisos. La condición de límite de salida se puede usar para flujos de fluido incompresibles que están confinados o tienen superficies libres. También se puede usar para flujos totalmente compresibles.
- Periódico: los límites periódicos se aplican en parejas y cualquier fluido que salga por un límite periódico se reintroduce en el límite periódico par.
- Presión específica: en esta condición se especifica la presión en la frontera. Si además de especificar la presión, se especifica la elevación del fluido, la presión en la frontera seguirá una distribución hidrostática. Las condiciones de presión sirven para representar problemas como depósitos confinados de fluido, condiciones ambientales de laboratorio y presiones aplicadas que surgen de dispositivos mecánicos.
- Velocidad específica: se establece la velocidad del flujo en la frontera de la malla.
- Simetría: aplica una condición de gradiente cero en el límite, así como una condición de velocidad cero normal al límite. Esta condición de frontera está predeterminada en las caras de los bloques de malla.
- Caudal volumétrico: se establece un caudal de ingreso en el límite.

- Pared: aplica la condición antideslizante en el límite, así como una condición de velocidad cero normal al límite.
- Onda: aplica un campo de velocidad asociado con el tipo de onda solicitado: Linear (ver Figura 3.29), Stokes, Stokes y Senoidal, Solitaria y Aleatoria.

Figura 3.29 Esquema de condición de contorno de Onda Linear Periódica



FUENTE: (Flow Science, Inc, 2016) / MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

3.3.4 MODELOS DE TURBULENCIA EN FLOW-3D

En FLOW-3D, hay seis modelos de turbulencia disponibles: el modelo de longitud de mezcla de Prandtl, modelo de una ecuación, los modelos de dos ecuaciones κ - ϵ , RNG y κ - ω , y un modelo de simulación de grandes remolinos (LES).

3.3.4.1 Modelo de Longitud de Mezcla de Prandtl

Es el modelo de turbulencia más simple, asume que la viscosidad del fluido aumenta debido a los procesos turbulentos de mezclado en regiones de alto cizallamiento, como cerca de límites sólidos. Este modelo asume que la producción y disipación de turbulencia están equilibradas en cualquier punto del flujo, por lo que el modelo es menos útil que los modelos de turbulencia de una y dos ecuaciones, siendo adecuado su uso en flujos completamente desarrollados y casi estables (Flow Science, Inc, 2016).

3.3.4.2 Modelo de una ecuación

El modelo de transporte de turbulencia de una ecuación consiste en una ecuación de transporte para la energía cinética específica asociada con las fluctuaciones de velocidad turbulentas en el flujo, es decir una ecuación para la energía cinética turbulenta (k).

La ecuación de transporte (k) incluye la convección y difusión de la energía cinética turbulenta, la producción de energía cinética turbulenta debido a los efectos de cizalladura y flotabilidad, la difusión y la disipación debido a las pérdidas viscosas dentro de los remolinos turbulentos. La producción de flotabilidad solo ocurre si hay una densidad no uniforme en el flujo e incluye los efectos de la gravedad y las aceleraciones no inerciales.

La tasa de la disipación de la energía turbulenta (ϵ) está relacionada con la energía cinética turbulenta, y requiere un valor para la escala de longitud turbulenta (TLEN) la cual el programa de manera predeterminada la calcula como el 7% de la dimensión más pequeña del dominio, pero se recomienda que sea el 7% del diámetro hidráulico (Flow Science, Inc, 2016).

3.3.4.3 Modelo k - ϵ

Es un modelo más sofisticado, y es ampliamente utilizado, consiste en dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para su tasa de disipación (ϵ). Este modelo proporciona aproximaciones razonables para muchos tipos de flujos. Debido a la ecuación adicional, en este modelo se reduce la necesidad de un valor específico de escala de longitud turbulenta (TLEN) en todo el dominio (Flow Science, Inc, 2016).

3.3.4.4 Modelo RNG

El modelo RNG usa ecuaciones similares a las del modelo k - ϵ , pero las constantes de las ecuaciones que son encontradas empíricamente en el modelo k - ϵ estándar en el modelo RNG se derivan explícitamente. Este enfoque aplica métodos estadísticos a la derivación de las ecuaciones promediadas para cantidades de turbulencia, como la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación.

En general, el modelo RNG tiene un mayor campo de aplicación que el modelo $\kappa\text{-}\epsilon$ estándar, de manera particular el modelo RNG describe flujos de turbulencia de baja intensidad y flujos que tienen regiones de cizalla fuertes con mayor precisión (Flow Science, Inc, 2016).

3.3.4.5 Modelo $k\text{-}\omega$

El modelo $\kappa\text{-}\omega$ en ciertas condiciones de flujo es superior a los otros modelos de turbulencia de dos ecuaciones ($\kappa\text{-}\epsilon$ y RNG), en particular, cerca de límites de pared y en flujos con gradientes de presión en sentido horario como chorros y estelas, es decir es un modelo que proporciona una muy buena aproximación para altos niveles de turbulencia (Flow Science, Inc, 2016) .

3.3.4.6 Modelo LES (Large Eddy Simulation)

El modelo LES surgió de los esfuerzos de modelado atmosférico. La idea básica es se calcula directamente todas las estructuras de flujo turbulento que pueden resolverse mediante la cuadrícula computacional y solo se aproxima aquellas características que son demasiado pequeñas para ser resueltas, es por ello que los resultados del modelo LES a menudo brindan más información que la producida por modelos basados en las ecuaciones promediadas de Reynolds (todos los modelos anteriormente mencionados). Cabe recalcar que el modelo es inherentemente tridimensional y dependiente del tiempo (Flow Science, Inc, 2016).

3.3.5 APROXIMACIONES NUMÉRICAS EN FLOW-3D

FLOW-3D resuelve numéricamente las ecuaciones usando aproximaciones de diferencias finitas, subdividiendo la región de flujo en una malla de celdas rectangulares fijas, en la que todas las variables se ubican en el centro de las celdas, excepto las velocidades que se ubican en los centros de las caras de las celdas.

La mayoría de los términos en las ecuaciones se evalúan utilizando los valores de nivel de tiempo actuales de las variables locales, es decir, explícitamente, aunque la formulación implícita de presión-velocidad resulta en conjuntos acoplados de

ecuaciones que deben ser resueltos mediante una técnica iterativa. En FLOW-3D se proporcionan tres técnicas (Flow Science, Inc, 2016):

- SOR (Successive Over-Relaxation)
- SADI (Special Alternating-Direction Line-Implicit)
- GMRES (Generalized Minimal Residual)

El solucionador GMRES tiene propiedades de convergencia superiores a los métodos SOR y SADI, por lo tanto, este el solucionador predeterminado.

Para la aproximación de las ecuaciones de momento FLOW-3D ofrece las siguientes opciones (Flow Science, Inc, 2016):

- Método de primer orden: es la aproximación más simple y precisa en incrementos de espacio y tiempo. Su ventaja radica en su simplicidad y su facilidad para mantener la estabilidad computacional, ofreciendo buenas soluciones para una gran cantidad de aplicaciones. Su desventaja es que en ciertos casos para obtener una solución precisa se requiera de una resolución de malla fina que puede ser costosa en términos computacionales.
- Método de segundo orden: son de segundo orden en el tiempo. Este algoritmo es el menos difusivo numéricamente, pero es el que requiere mayor uso de CPU. Su desventaja es que puede ocasionalmente generar una solución numéricamente inestable para flujos con superficies libres transitorias.
- Método de preservación de monotonicidad de segundo orden: es tan robusto como el esquema de primer orden original. Requiere un poco más de uso de CPU que el método de primer orden, aunque en la mayoría de los casos la diferencia es insignificante. Este método se puede aplicar para aproximar la advección de momento, así como la advección de densidad, energía y advección de fracción fluida.
- Aproximación de la advección localmente implícita: se supone que los valores de todas las variables dependientes se avanzan en el tiempo a través de una sucesión de pequeños intervalos de tiempo. Este método es un

esquema simple para generar una aproximación numérica implícita de flujos de advección que tienen una estabilidad incondicional, no es aplicable en las celdas que contienen una superficie libre en movimiento para evitar imprecisiones debido a tamaños de paso de tiempo.

3.3.6 APROXIMACIONES DE ADVECCIÓN DE LA INTERFAZ FLUIDA (VOF)

En el programa FLOW-3D existe distintos métodos para determinar interfaces fluidas, los cuales se utilizan en función del problema de flujo. Hay dos tipos principales de interfaces fluidas: una interfaz nítida y una interfaz difusa (Flow Science, Inc, 2016).

- **Automático:** es el método predeterminado, elige la opción más adecuada dependiendo de la cantidad de líquidos y la presencia de una interfaz nítida.
- **One fluid, no free surface:** desactiva el método VOF y no rastrea en absoluto la fracción de fluido; esto se puede usar solo para una simulación de flujo confinado de un solo fluido sin vacío.
- **Two fluids with diffuse interface:** se puede usar para dos flujos de fluido sin una interfaz nítida, es decir cuando los dos fluidos se pueden mezclar como el aire y humo.
- **Two fluids with Sharp interface:** se usa en simulaciones de dos fluidos con interfaz nítida.
- **One Fluid, free Surface:** Es similar para la anterior pero solo se simula un fluido.
- **Unsplit Lagrangian method:** adecuado para flujos de uno y dos fluidos, exhibe buena exactitud en el seguimiento de interfaces nítidas en movimientos tridimensionales complejos.
- **Split Lagrangian method (Tru VOF):** adecuado para flujos de uno y dos fluidos, exhibe buena exactitud en el seguimiento de interfaces nítidas en movimientos tridimensionales complejos. Este método produce un menor error acumulativo de volumen en comparación a los otros métodos.

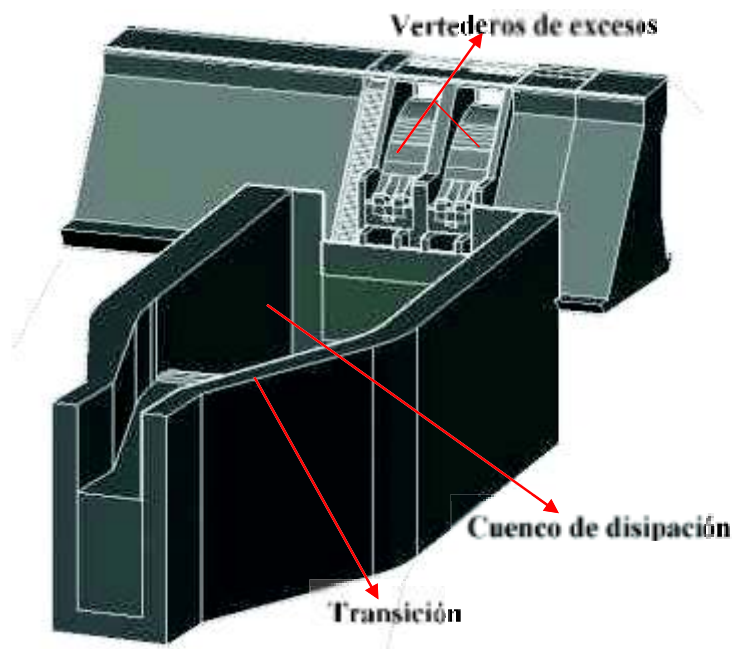
3.4 GUÍA METODOLÓGICA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS

A continuación, se indica una serie de pasos que se deben llevar a cabo para realizar la modelación numérica de vertederos de excesos, esta guía abarca desde la creación de la geometría pasando por cómo se realiza la simulación en el programa FLOW-3D y finaliza con la visualización de resultados en el programa FlowSight. Para la creación de esta guía el caudal a ingresarse será de 68.63 (l/s) que equivale a 1213.16 m³/s en prototipo.

3.4.1 CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Antes de empezar con la modelación numérica en el programa FLOW-3D hay que representar la geometría en tres dimensiones de los vertederos de excesos de la Presa Toachi, para ello se utiliza el programa AutoCAD (Ver Figura 3.30).

Figura 3.30 Geometría en tres dimensiones de la presa Toachi en el programa AutoCAD



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

El dibujo debe tener la propiedad de ser un sólido tridimensional, para poder guardarlo en formato de estereolitografía (.stl) y así sea compatible con el programa FLOW-3D.

3.4.2 INGRESO DE PARÁMETROS PARA LA MODELACIÓN EN EL PROGRAMA FLOW-3D

3.4.2.1 Configuración General

Para ingresar la configuración general primero se ingresa a la pestaña Model Setup y dentro de esta en la pestaña General (Ver Figura 3.31).

Figura 3.31 Interfaz del programa para la configuración general



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

El tiempo de finalización es el tiempo en el que la simulación se considera terminada y se detiene. En el caso de la simulación de los vertederos de excesos se ha considerado un tiempo de 100s, en el que se ha visto que la modelación numérica converge y en el que se vuelve estable la entrada y salida de caudal.

La opción número de fluidos define como se tratan las celdas que no contienen fluido, se escoge "One fluid" porque en nuestro caso solo se va a modelar agua, las celdas sin fluido son consideradas como vacío y no se resuelven.

En el seguimiento de interfaz se escoge la opción de "Free surface or sharp interface" para que se pueda visualizar una superficie libre nítida en la simulación.

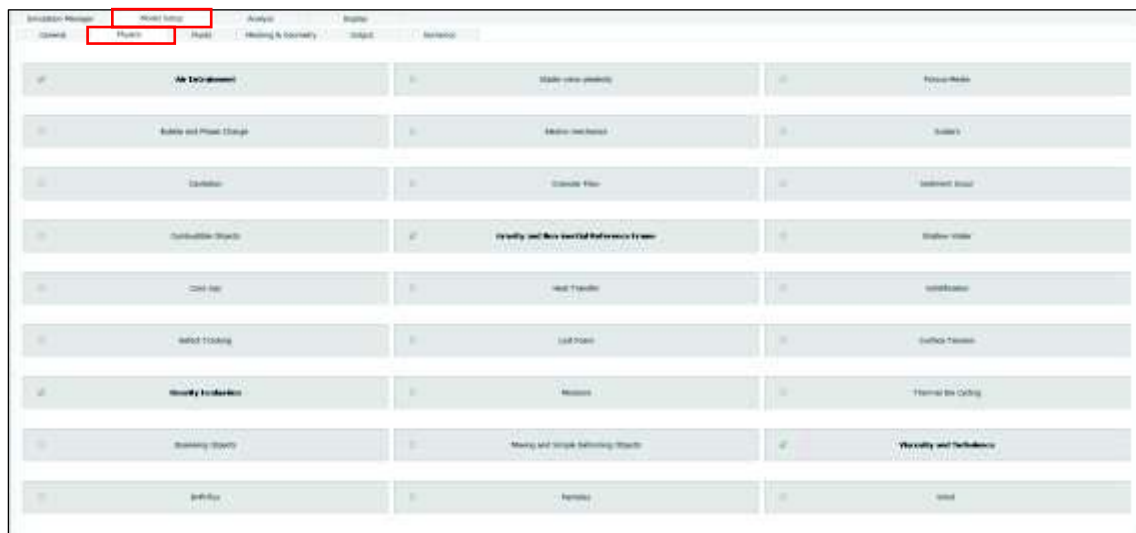
En el modo de flujo se define si la ecuación de continuidad sufre variaciones, para esta simulación se ha escogido "Incompressible / Limited compressibility" en la que el fluido a modelar se considera como incompresible.

En las unidades hay la opción de unidades de simulación y unidades de temperatura, y se han definido unidades SI y Celsius respectivamente. Las unidades de simulación definen las unidades utilizadas para masa, longitud, tiempo y presión, y las unidades de temperatura definen la unidad de temperatura que se utilizará en el postproceso (Flow Science, Inc, 2016).

3.4.2.2 Parámetros Físicos

El flujo a superficie libre en los vertederos de excesos depende de la gravedad y de los efectos de la viscosidad. Para activar los diferentes mecanismos físicos en la simulación numérica hay que entrar en la pestaña “Model Setup” y dentro de esta en la pestaña “Physics” (ver Figura 3.32).

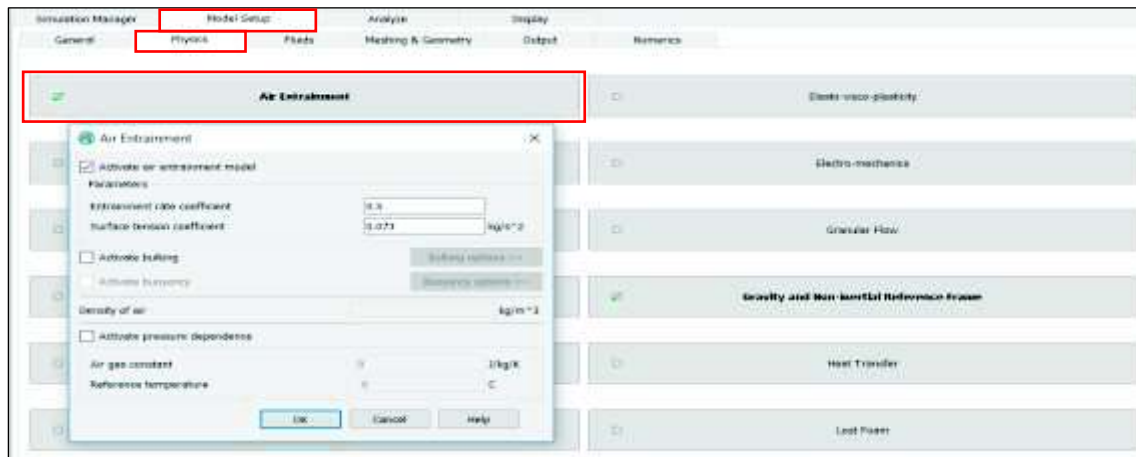
Figura 3.32 Interfaz del programa para la configuración de parámetros físicos



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

El modelo “Air Entrainment” se usa para modelar el movimiento y los efectos del aire arrastrado en superficies libres turbulentas, en este caso es útil para el flujo sobre los vertederos de excesos y se activa según la Figura 3.33.

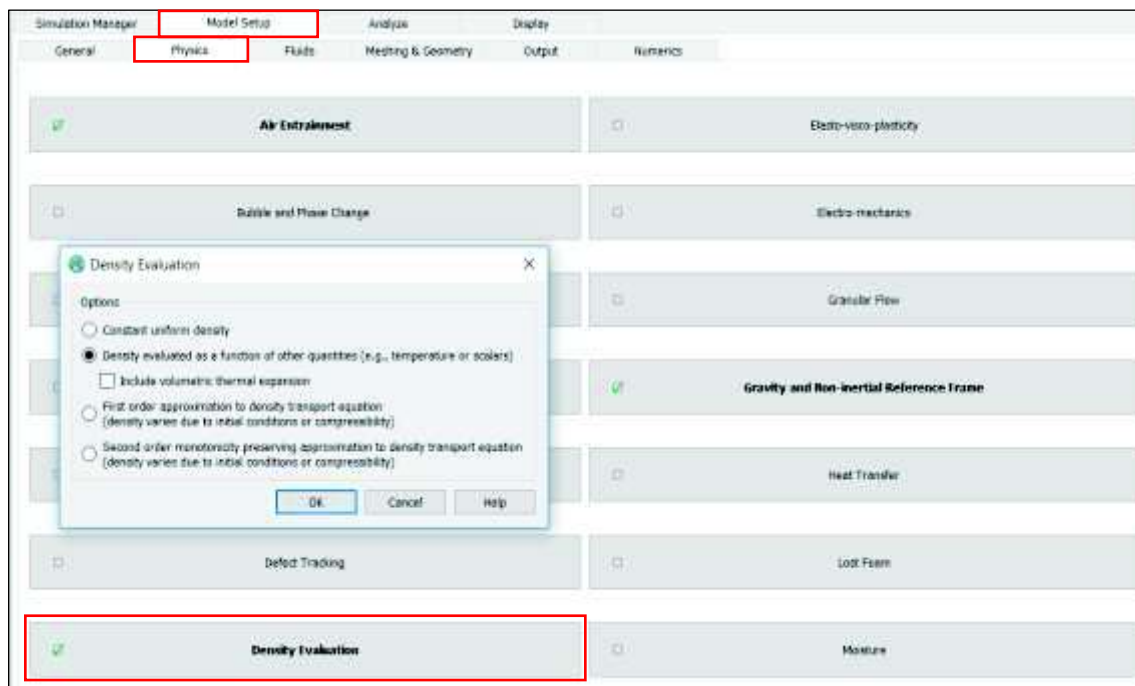
Figura 3.33 Activación del modelo de arrastre de aire



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

El modelo “Density Evaluation” se usa para controlar como se calcula la densidad en la simulación, en nuestro caso de flujo incompresible de un solo fluido, todos los valores de densidad se ajustan al valor de la densidad del Fluido N° 1 (ver Figura 3.34).

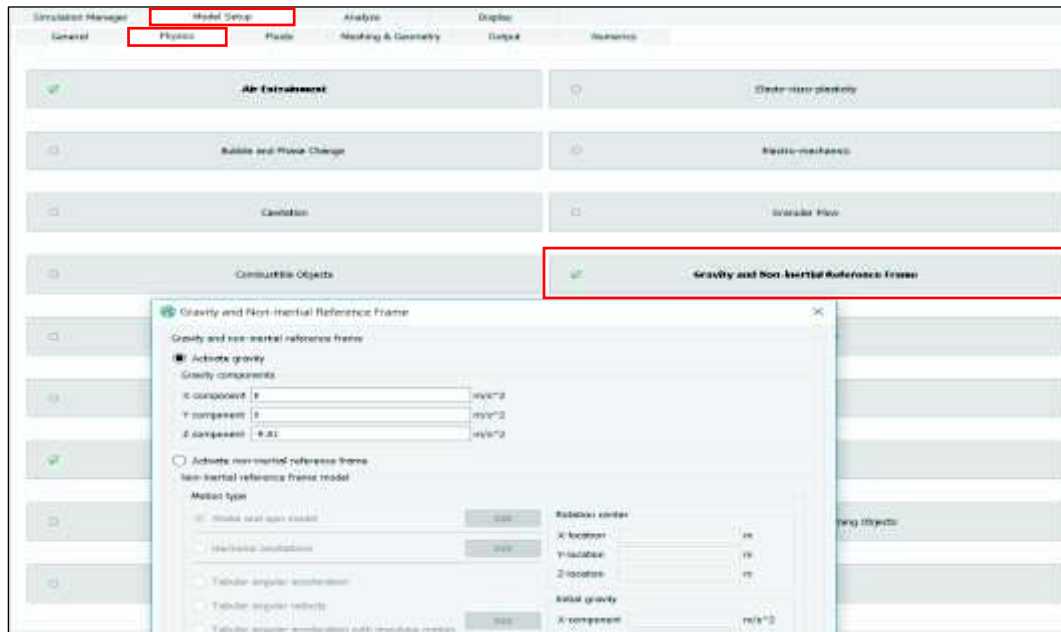
Figura 3.34 Activación del modelo de evaluación de densidad



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

El modelo “Gravity and Non-Inertial Reference Frame” se utiliza para aplicar fuerzas corporales constantes y fuerzas corporales no constantes y no uniformes resultantes de un marco de referencia de aceleración, en nuestro caso representamos la Fuerza de Gravedad (ver Figura 3.35).

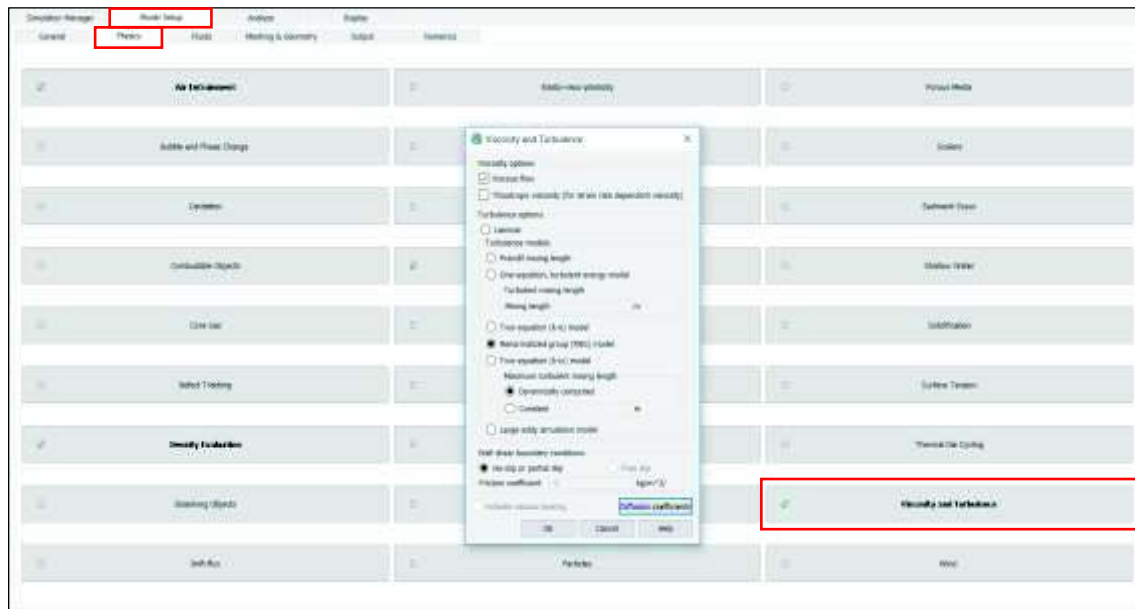
Figura 3.35 Activación de la fuerza de gravedad



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

El modelo de viscosidad y turbulencia agrega el cálculo de tensiones viscosas y cantidades de turbulencia a la solución, los modelos recomendados para la simulación de vertederos de excesos de presas son k- ϵ , k- ω y RNG (ver Figura 3.36).

Figura 3.36 Activación del modelo de turbulencia

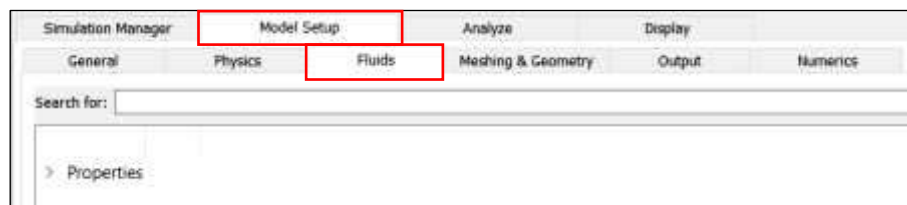


ELABORADO POR: Chandi & Escobar

3.4.2.3 Fluidos

Las propiedades del fluido se ingresan en la pestaña “Model Setup” y luego en la pestaña “Fluids” (ver Figura 3.37). Las propiedades del material requerido dependerán de los modelos físicos que estén habilitados, pero todas las propiedades se deben ingresar en unidades que sean consistentes con todas las demás variables utilizadas.

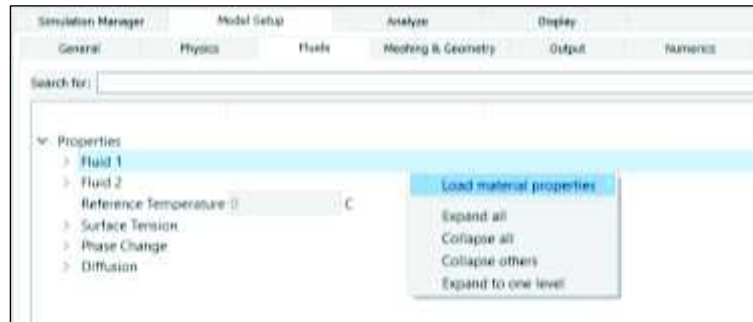
Figura 3.37 Interfaz del programa para la configuración de propiedades de los fluidos



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Las propiedades de los fluidos se pueden ingresar manualmente o se pueden cargar desde la base de datos de materiales haciendo clic con el botón derecho en el nombre del fluido y seleccionando “Load material properties” (ver Figura 3.38).

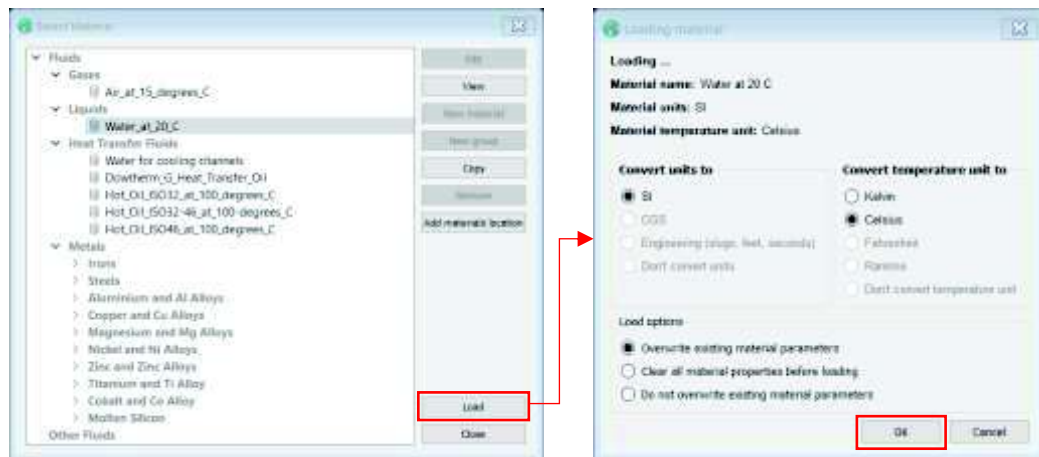
Figura 3.38 Interfaz del programa para cargar propiedades al fluido



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

En nuestra simulación se cargará las propiedades del agua a una temperatura de 20°C (ver Figura 3.39).

Figura 3.39 Propiedades del agua a 20°C



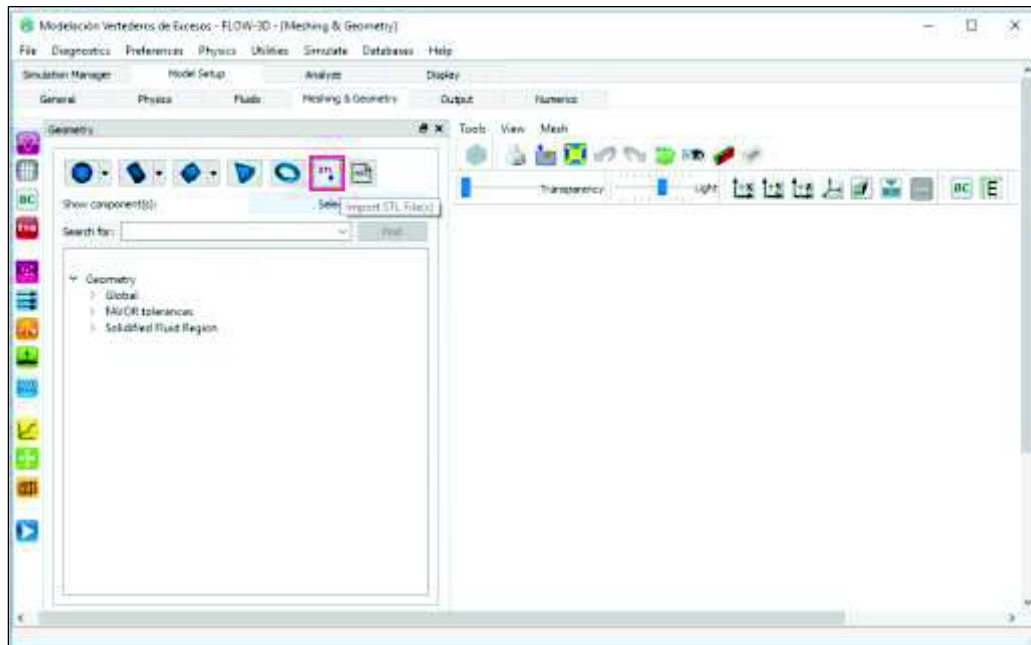
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

3.4.2.4 Mallado del Dominio Computacional

- **Importación de la geometría de la Presa Toachi en el programa Flow-3D**

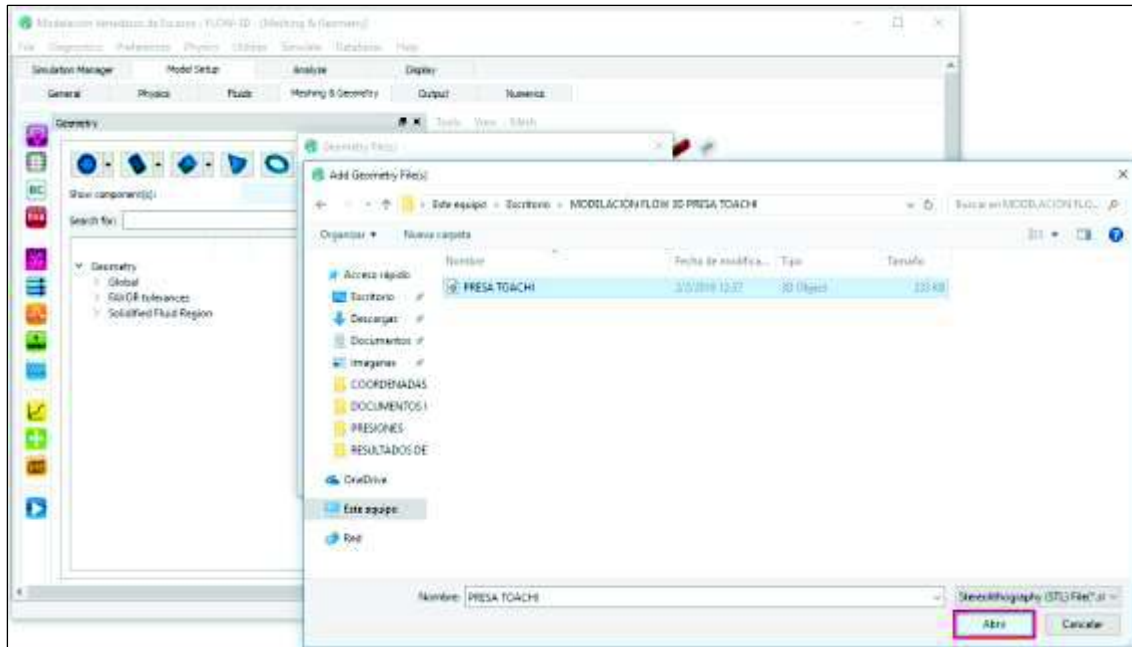
La Figura 3.40 presenta el procedimiento llevado a cabo para importar el sólido en 3D de la Presa Toachi al paquete computacional FLOW-3D.

Figura 3.40 Serie de pasos para importar la geometría de la Presa Toachi en FLOW-3D



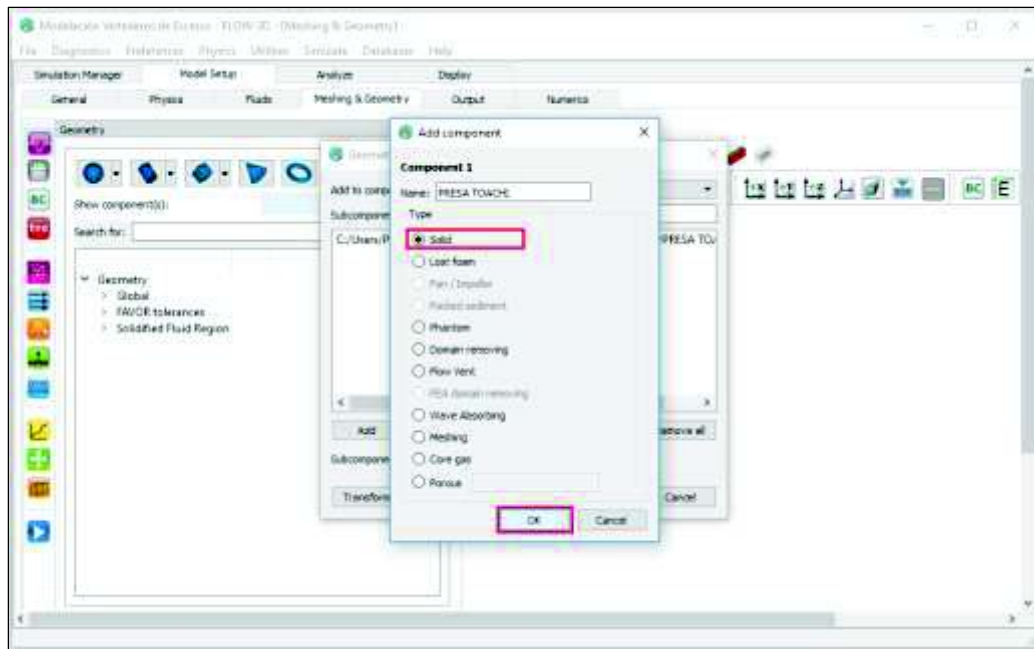
Continuación; Figura 3.40



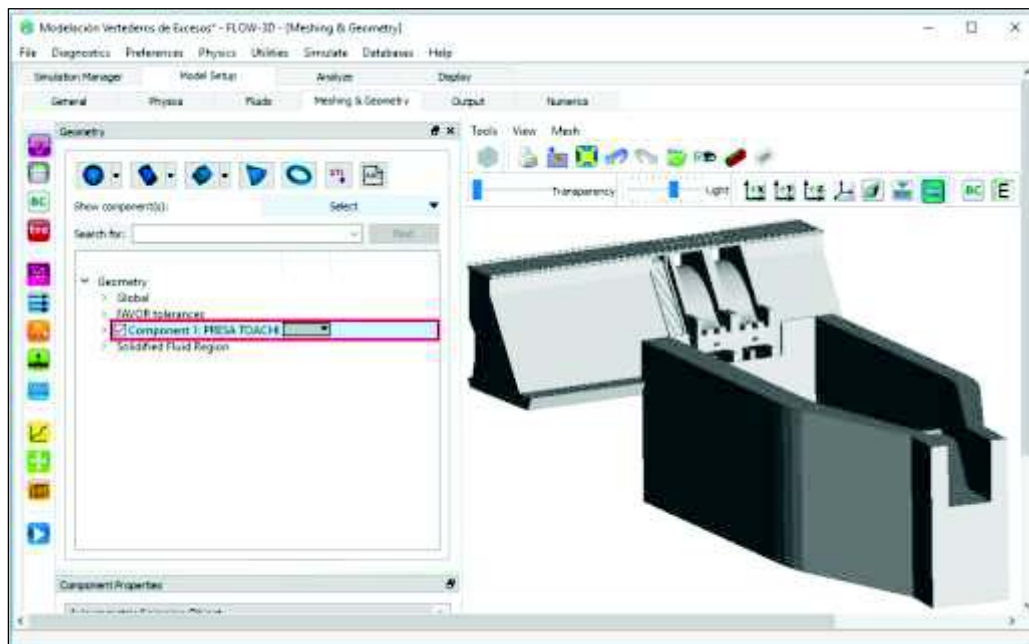


Continuación; Figura 3.40





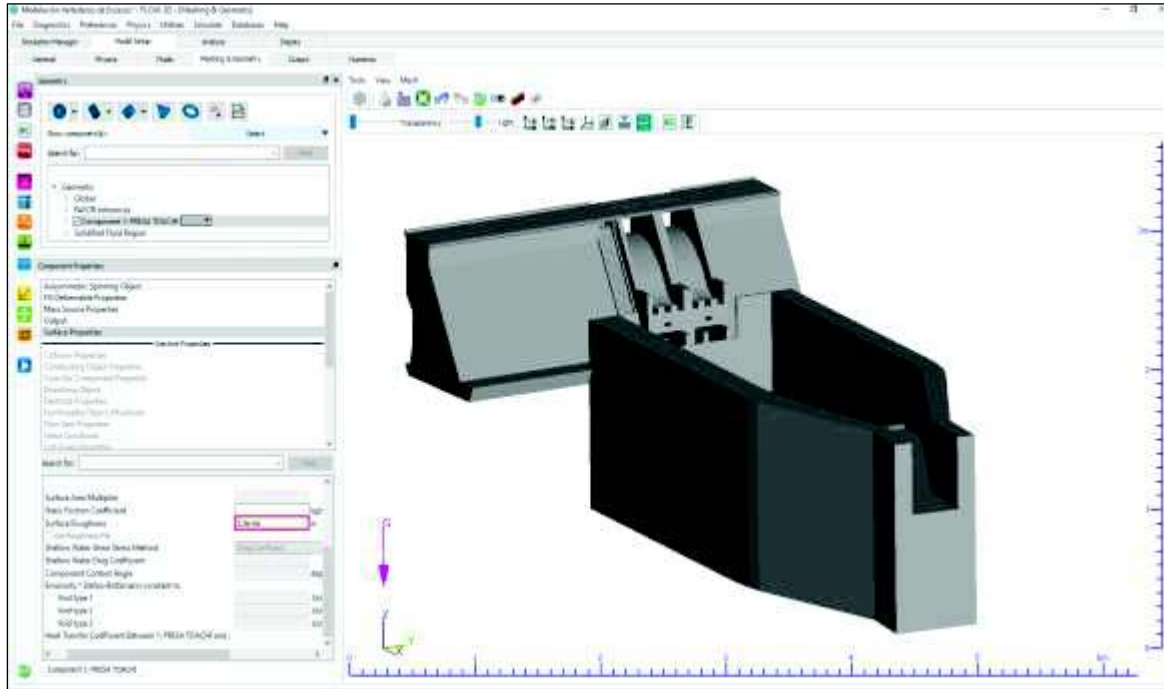
Continuación; Figura 3.40



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Luego de importar la geometría se procede a establecer el valor de la rugosidad superficial del modelo, como se indica en la Figura 3.41.

Figura 3.41 Valor de la rugosidad superficial del modelo establecido



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Condiciones iniciales para el modelo numérico**


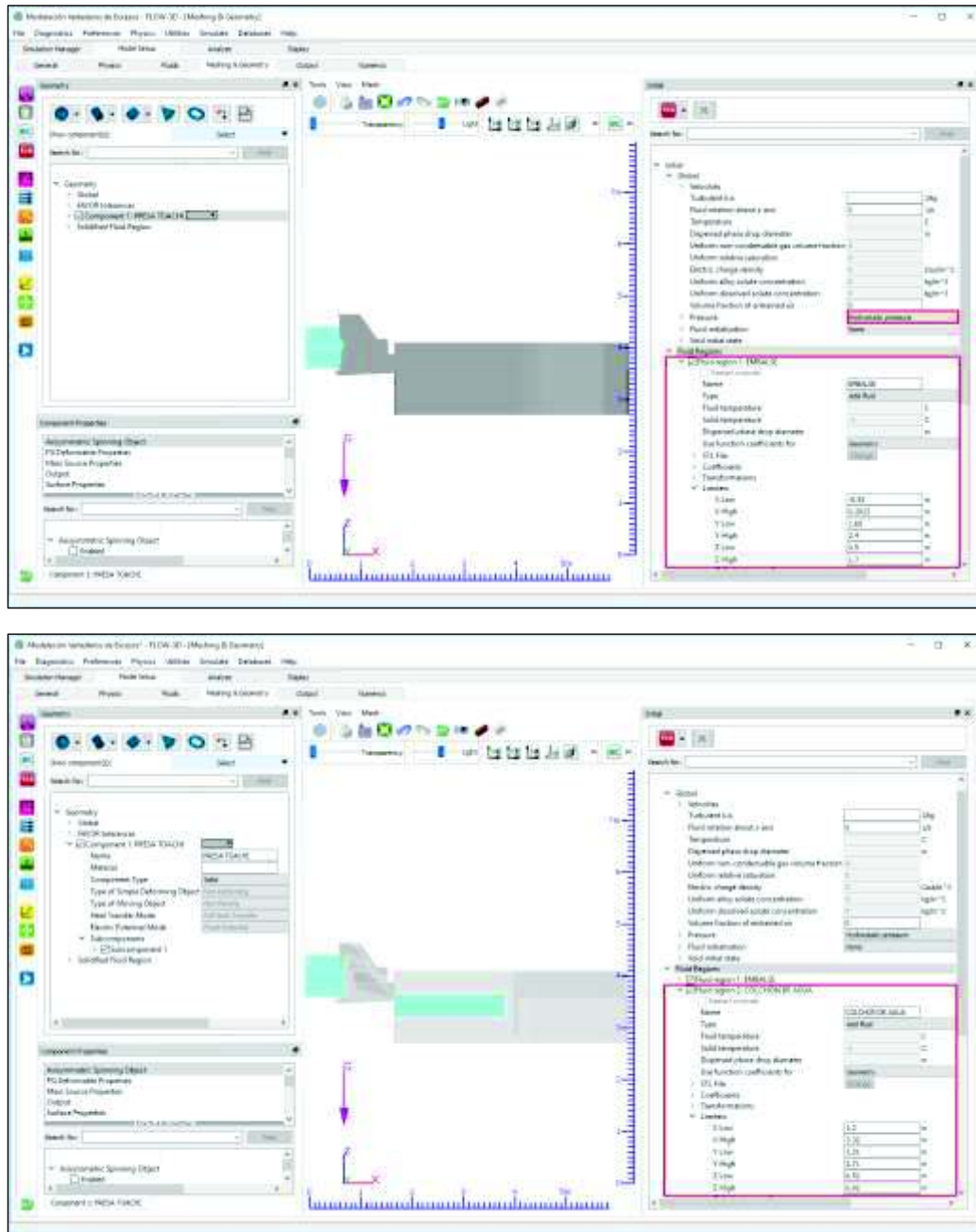

Una vez realizado los pasos anteriores, es necesario fijar las condiciones iniciales para el modelo numérico, este proceso se lo ha representado en la Figura 3.42. En el ícono  Se establecen las condiciones iniciales y respectivas coordenadas para las regiones del fluido, embalse y colchón de agua.

Figura 3.42 Condiciones iniciales del modelo numérico



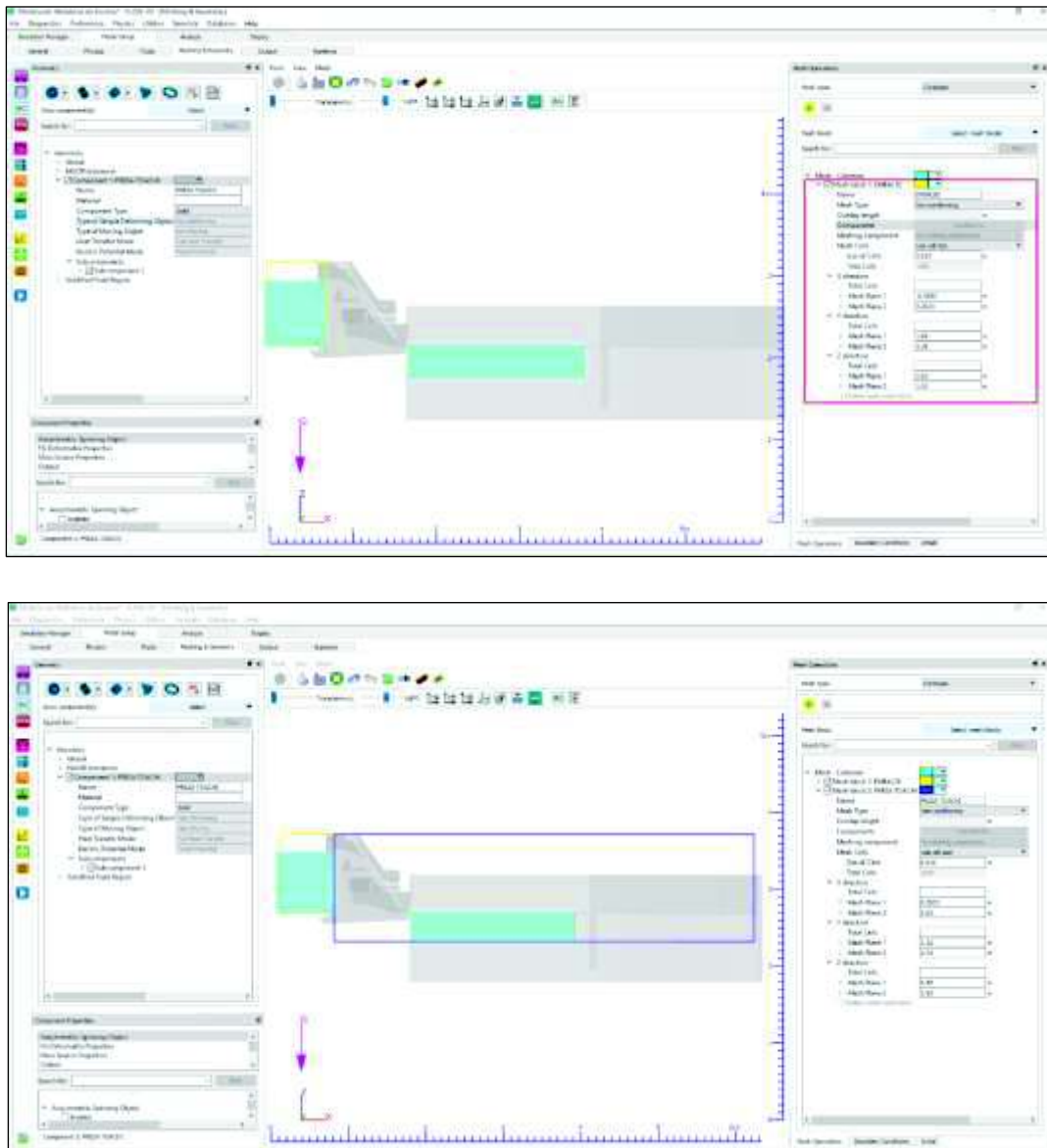
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Elaboración de los bloques de malla para la geometría de la presa**

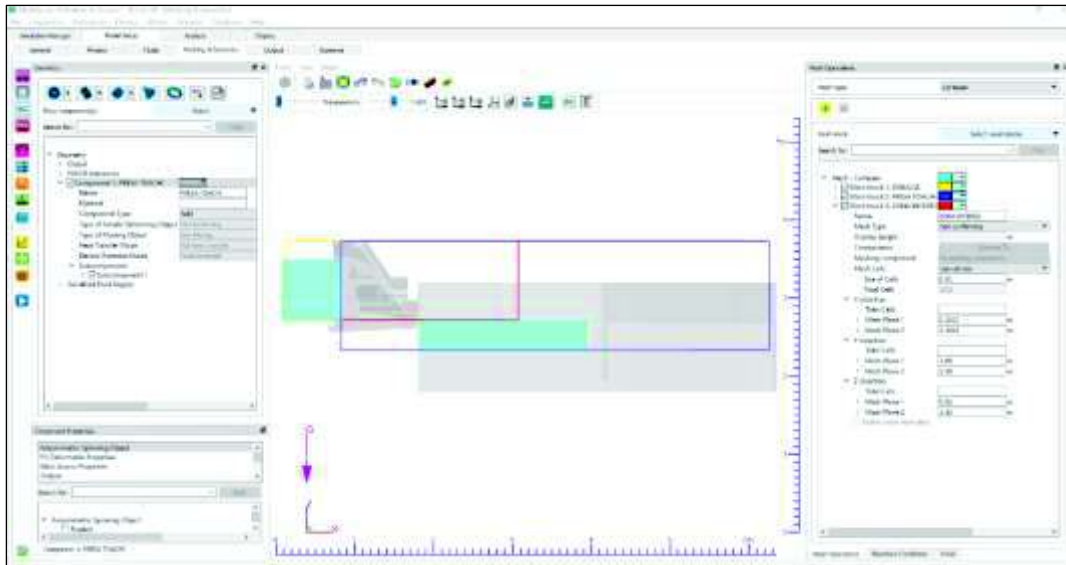
En el ícono  se elabora el mallado, para este caso, se realizan tres bloques de malla, para el embalse, la presa y para el área de interés, que en este caso inicia en la cresta de los vertederos y termina en el alcance máximo de los chorros.

El bloque anidado se lo implementó con el objetivo de tener un tamaño de celda menor a los otros dos, y así contar con una mejor discretización del dominio en esta zona. La Figura 3.43 muestra el proceso llevado a cabo para la realización del mallado de la geometría.

Figura 3.43 Procedimiento para realizar el mallado de la estructura



Continuación; Figura 3.43



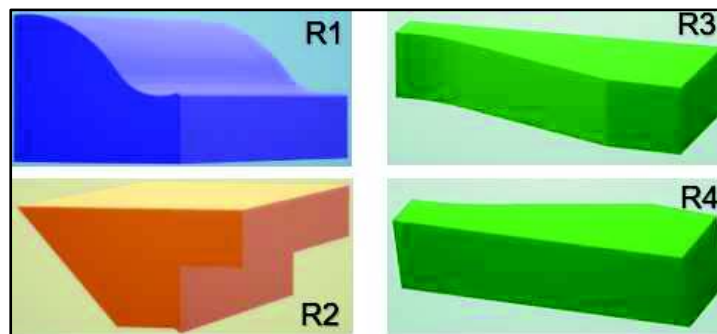
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Implementación de elementos “domain removing” al modelo numérico**

Una vez establecidos los límites de cada uno de los bloques de malla, se opta por incorporar elementos “domain removing” con el fin de eliminar celdas presentes en el dominio que no son necesarias para resolver las ecuaciones gobernantes. Todas las celdas que estén en contacto con un componente “domain removing” no se designarán durante el preprocesamiento. De esta manera se disminuirá el tiempo de simulación.

Los siguientes 4 elementos (Figura 3.44) fueron elaborados en AUTOCAD 3D, y de igual manera que la geometría de la Presa, fueron importados como “.stl”.

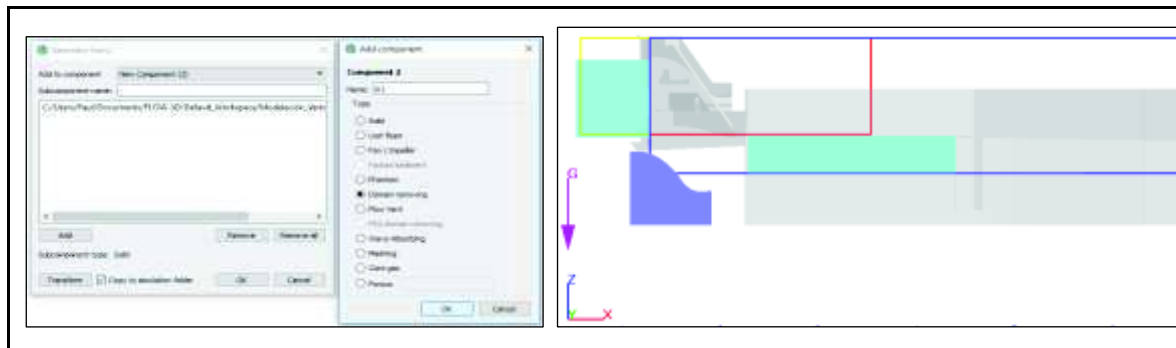
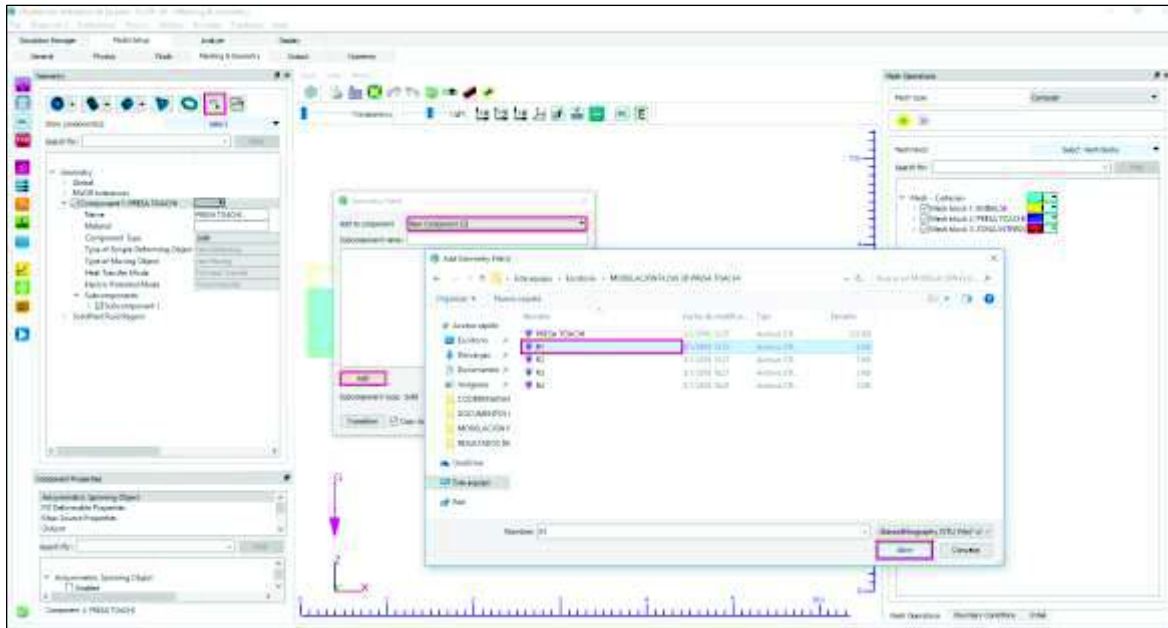
Figura 3.44 Elementos “Domain Removing” a incorporarse en el modelo numérico



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

En la Figura 3.45 se indica el procedimiento para importar uno de los 4 “domain removing”:

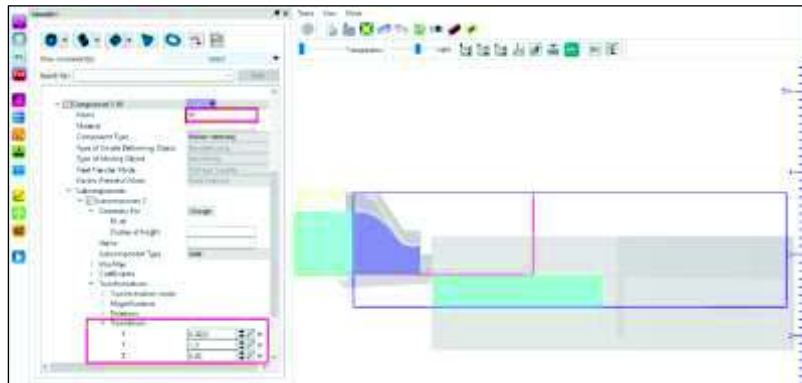
Figura 3.45 Procedimiento para añadir un elemento “Domain Removing” al modelo numérico



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Posteriormente, se ubica el elemento “R1” con las respectivas coordenadas (Figura 3.46):

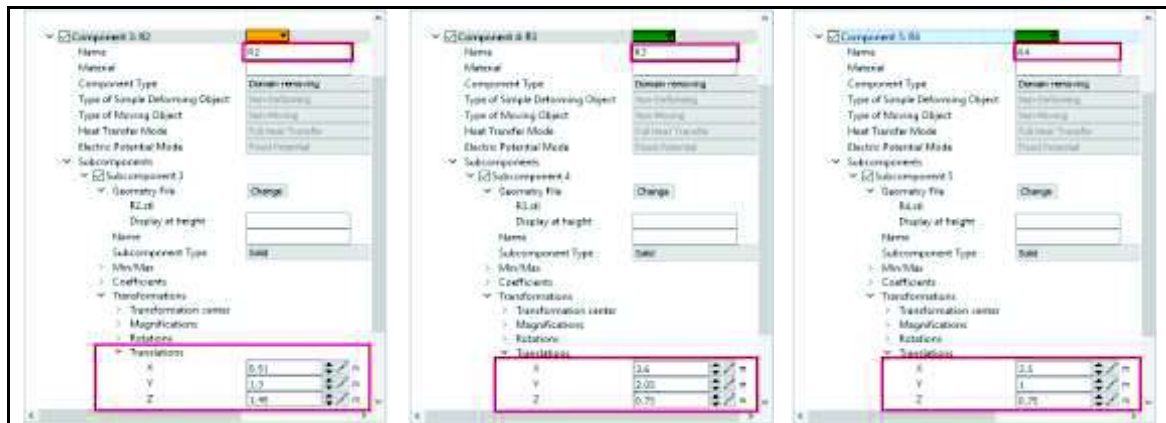
Figura 3.46 Coordenadas del elemento “Domain Removing” establecidas



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

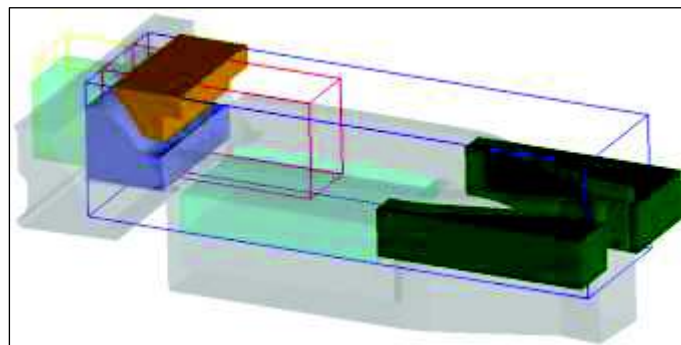
El procedimiento anteriormente detallado es realizado para los otros 3 elementos (Figura 3.47), siendo las coordenadas de “R2”, “R3” y “R4” las siguientes:

Figura 3.47 Coordenadas de los demás elementos “domain removing”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.48 Geometría de la Presa Toachi con bloques de malla y los 4 elementos “domain removing” añadidos



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

A pesar de añadir los 4 elementos “domain removing”, quedan espacios en los cuales de igual manera no es necesario resolver las ecuaciones de gobierno, por este motivo se incorporan 5 elementos más del mismo tipo (Figura 3.49), con la diferencia de que su geometría es más simple que las anteriores, pudiendo ser elaborados directamente con ayuda de la siguiente pestaña (Figura 3.49):

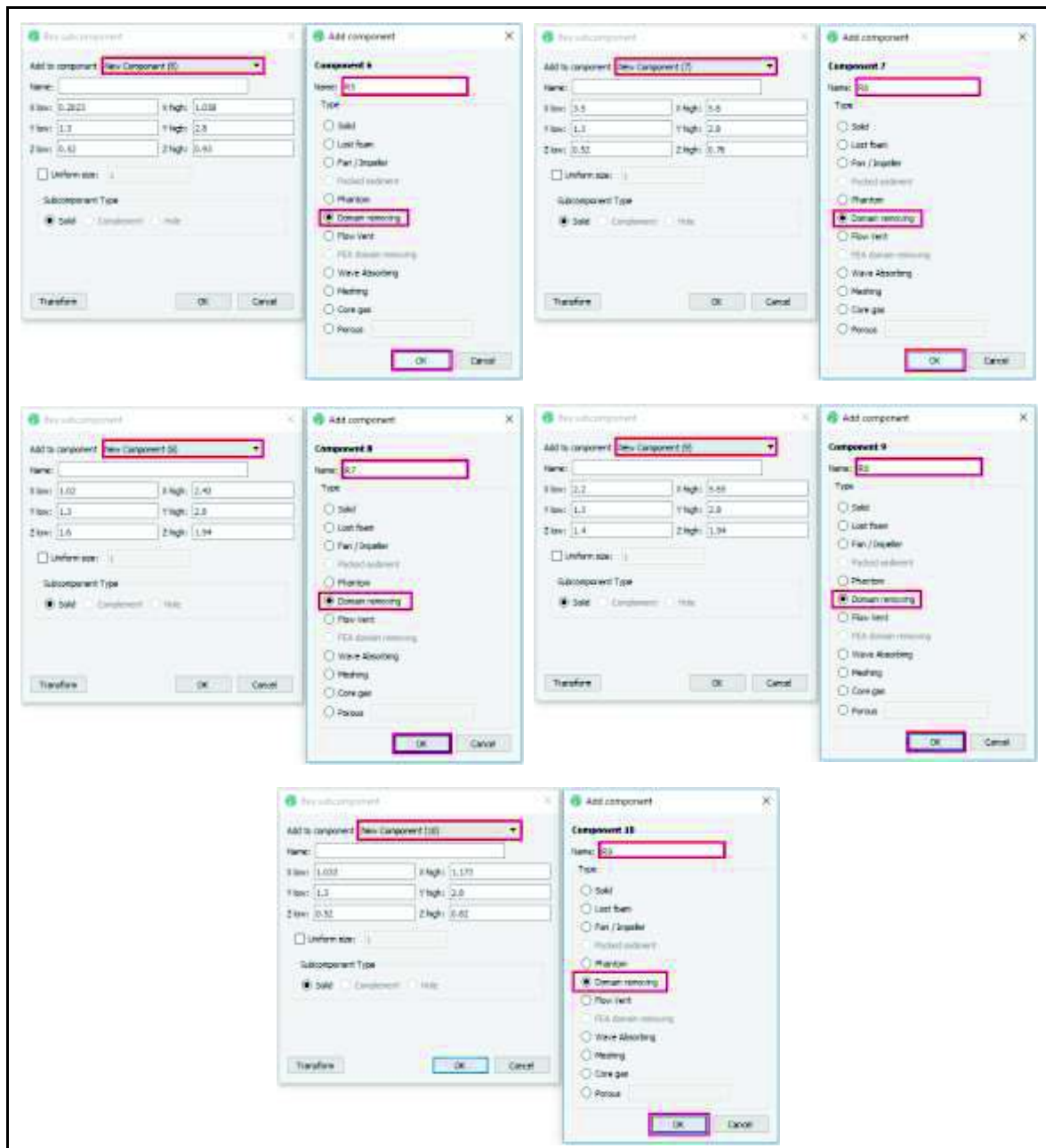
Figura 3.49 Elección de elemento “Box” a incorporar en el modelo numérico



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Las coordenadas para la creación de cada uno de estos elementos se presentan en la Figura 3.50.

Figura 3.50 Coordenadas de los elementos “Box” establecidas

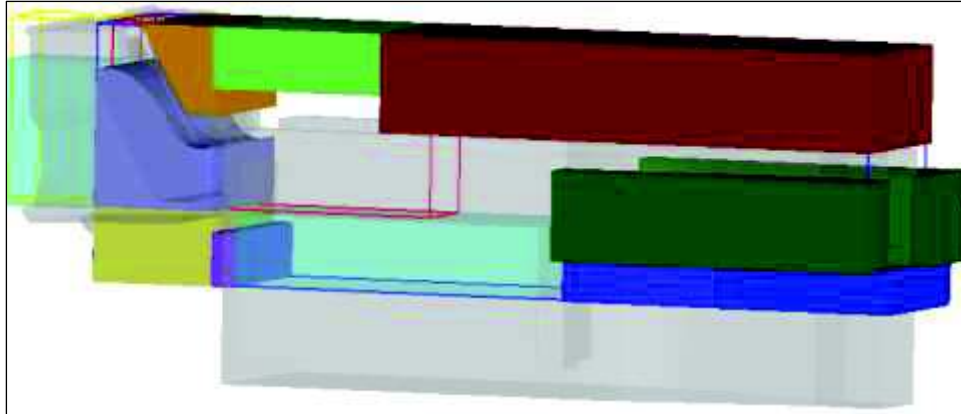


ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Visualización de la geometría de la presa con bloques de malla y elementos “domain removing” creados**


Una vez importados y realizados los elementos “domain removing” se los puede visualizar en el modelo, así como también los bloques de malla (Figura 3.51).

Figura 3.51 Geometría de la Presa Toachi con bloques de malla y todos los elementos “domain removing”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Condiciones de contorno a aplicar en cada bloque de malla**

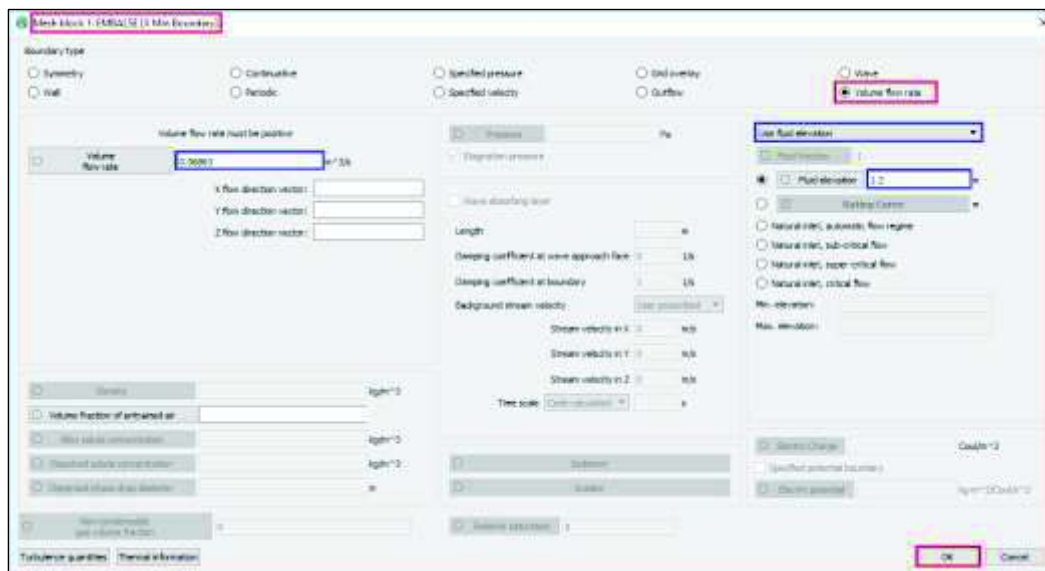
Seguidamente, en la pestaña  se establecen las condiciones de contorno para cada bloque de malla. Estas condiciones definen el problema y la forma en la que el sistema computacional determina la convergencia. Es por tal razón que dichas condiciones se han determinado en base al modelo físico con escala 1:50 con el objetivo de reflejar las condiciones reales del flujo. Es más, debido a que las condiciones de frontera influyen claramente en la solución del problema, en la presente investigación se han impuesto las siguientes condiciones de borde: caudal de entrada (volume flow rate), salida de caudal (outflow), symmetry (simetría), Wall (pared) y Specified Pressure (Presión específica).

A continuación, se indica el procedimiento a seguir para fijar las condiciones de contorno para cada bloque de malla del modelo numérico.

1. Condiciones de contorno establecidas para el bloque de malla 1 “EMBALSE”

Como indica la Figura 3.52, la simulación será efectuada con el caudal de prototipo $1213.16 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde al caudal de $0.06863 \text{ m}^3/\text{s}$ en el modelo físico. El caudal entra al sistema por la cara del bloque de malla Xmin y saldrá posteriormente por la cara Xmax del “Mesh Block 2”. Además, se establece el nivel de agua al ingreso del sistema.

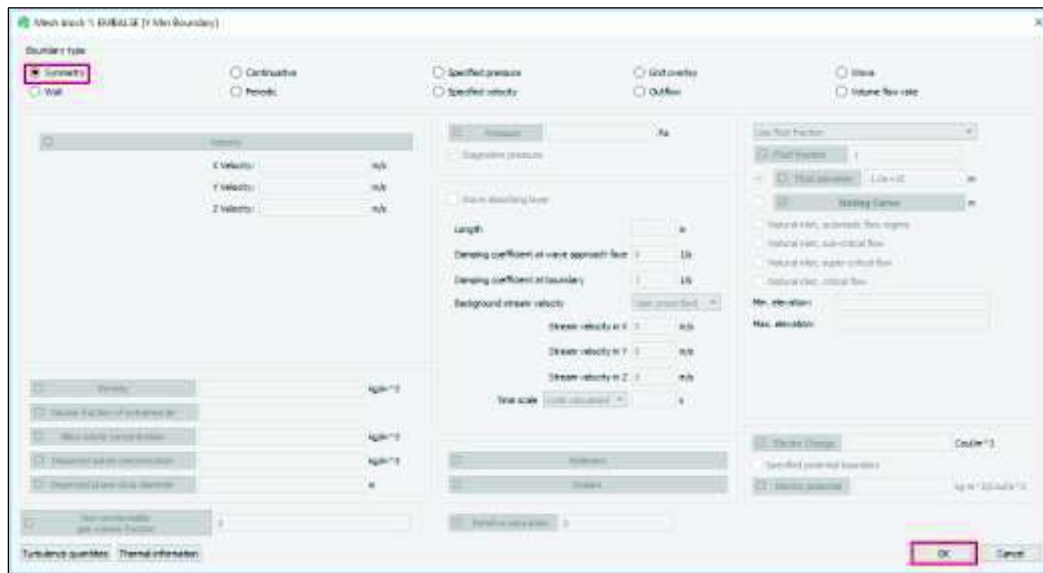
Figura 3.52 Condición de contorno “Volume flow rate” establecida para el “Mesh Block 1”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

La condición de borde “Symmetry” (Figura 3.53) se ha establecido para las caras: Xmin, Ymin, Ymax. Esta aplica una condición de gradiente cero en la frontera; así como también una condición de velocidad cero perpendicular al contorno.

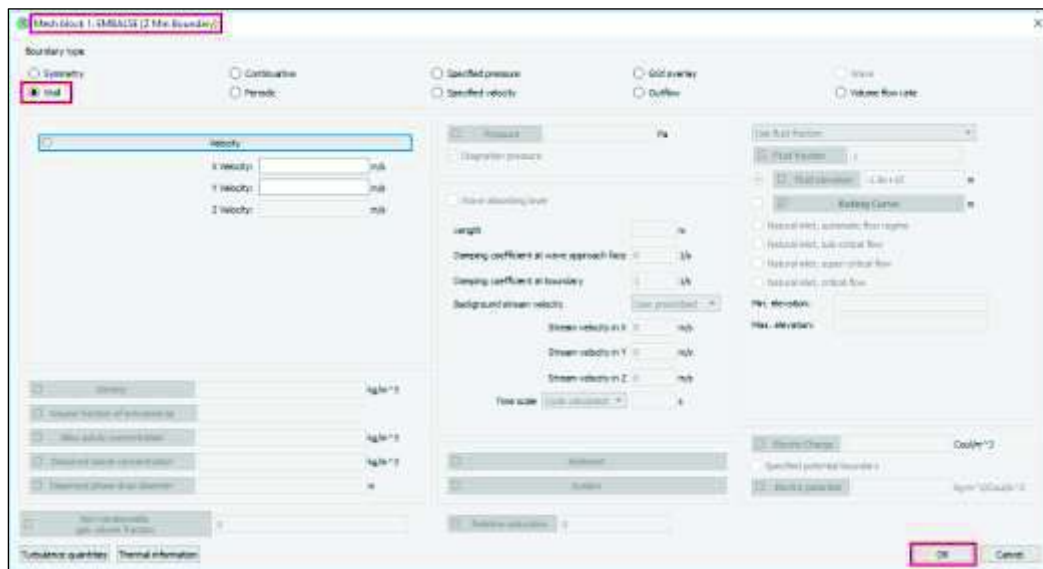
Figura 3.53 Condición de contorno “Symmetry” establecida para el “Mesh Block 1”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

La condición de borde “Wall” (Figura 3.54) se ha fijado en la cara Zmin, con el fin de que no exista traslación en el contorno y además se genere una condición de velocidad cero normal a la frontera.

Figura 3.54 Condición de contorno “Wall” establecida para el “Mesh Block 1”

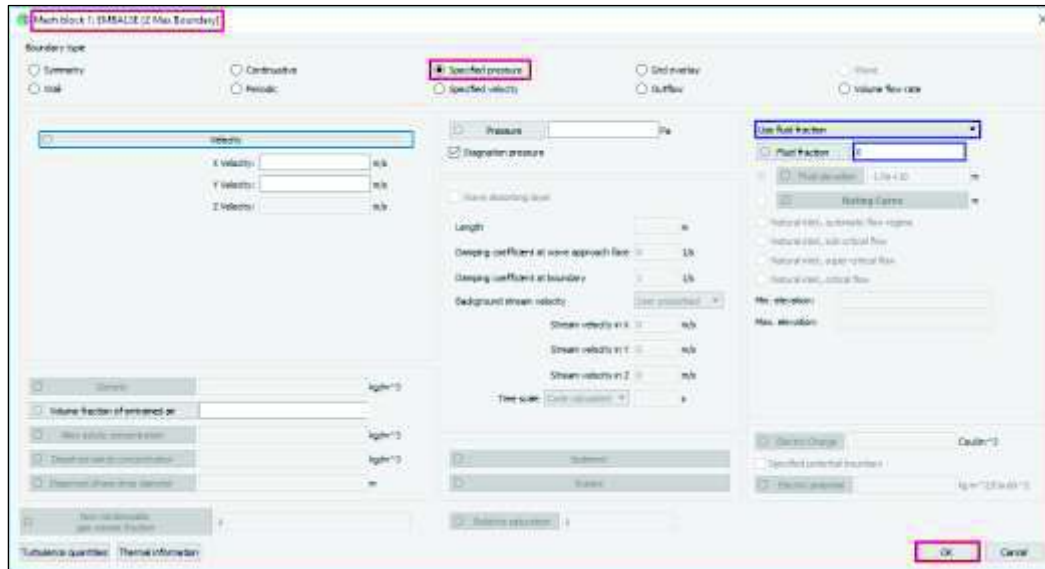


ELABORADO POR: Chandi & Escobar

La condición de contorno “Specified pressure” (Figura 3.55) se establece en la cara Zmax. Como se puede observar, el programa permite la selección de dos

alternativas para la condición de presión, una dinámica y otra estática, siendo esta última recomendada frecuentemente para una gran parte de aplicaciones, ya que representa un embalse de agua.

Figura 3.55 Condición de contorno “Specified pressure” establecida para el “Mesh Block 1”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

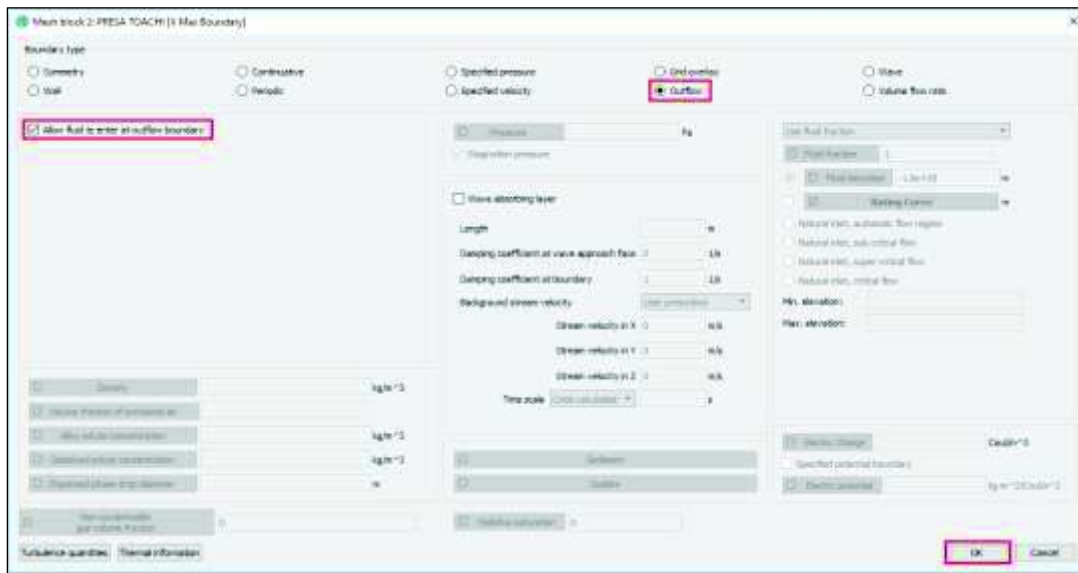
2. Condiciones de contorno establecidas para el bloque de malla 2 “PRESA”

Para los planos: Xmin, Ymin, Ymax se ha establecido la condición de contorno “Symmetry”.

Para el plano Zmin se ha fijado la condición de contorno “Wall” y para la cara Zmax de igual manera que para el embalse se ha establecido la condición de contorno “Specified Pressure”.

En la cara Xmax se ha impuesto la condición de salida de flujo “Outflow” (Figura 3.56). En esta condición, para fluidos incompresibles a gravedad, el gradiente de velocidad es distinto de cero.

Figura 3.56 Condición de contorno “Outflow” establecida para el “Mesh Block 2”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

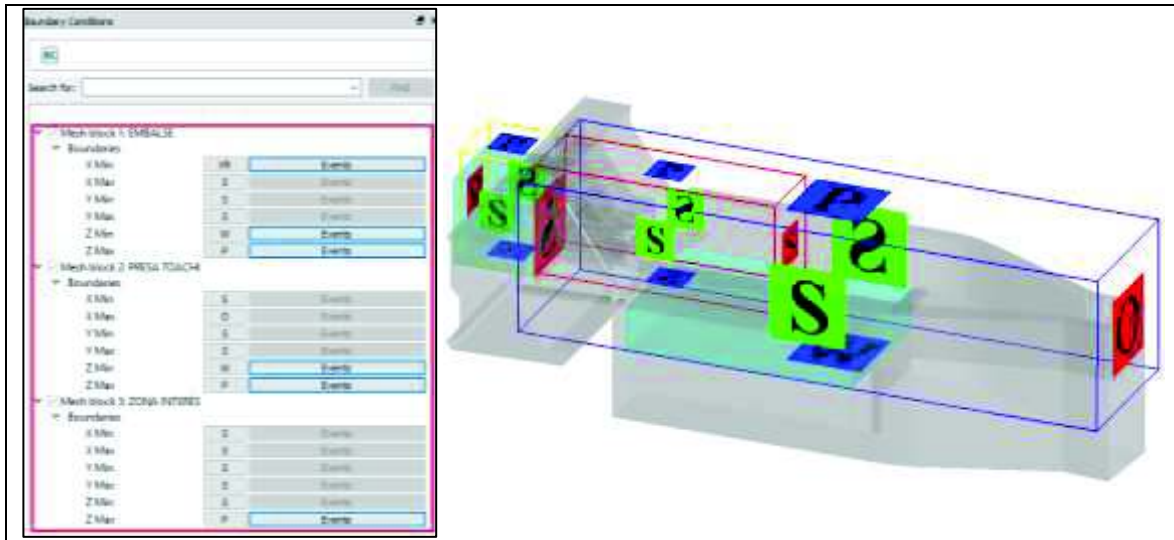
3. Condiciones de contorno establecidas para el bloque de malla 3 “ZONA DE INTERÉS”:

En el presente estudio se cuenta con bloques de mallas adyacentes y unidas, razón por la cual se establece la condición de contorno “Symmetry” para los planos: Xmin, Xmax, Ymin, Ymax, Zmin. Esta condición de borde permite copiar las características de sus mallas adyacentes con el fin de que el proceso de solución de las ecuaciones de movimiento no sea interrumpido. Además, cuando esta condición se encuentra aislada se la puede considerar como una pared lateral.


En la cara Zmax se ha impuesto de igual manera que los anteriores bloques de malla, la condición de contorno “Specified Pressure”.

La Figura 3.57 muestra la geometría con los bloques de malla y las condiciones de contorno establecidas:

Figura 3.57 Condiciones de contorno establecidas para cada bloque de malla



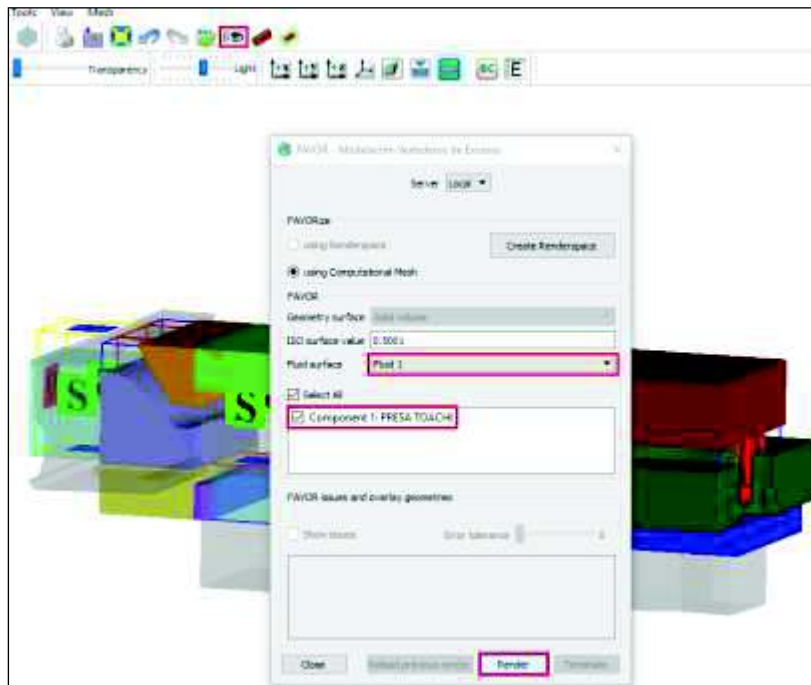
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Una vez definida la geometría, el mallado, las condiciones iniciales y de contorno se procede a verificar si la representación de la geometría discretizada es conveniente, esto se logra a través del empleo del algoritmo “FAVOR”, dando clic en el ícono: . Este algoritmo es empleado para el tratamiento del contorno sólido. Al renderizar la estructura se puede visualizar si el tamaño de celda establecido en cada bloque de malla contiene los detalles más relevantes del modelo numérico (Casa, 2016).

Para llevar a cabo la renderización, deben estar seleccionados todos los elementos “domain removing” y por supuesto la geometría de la Presa Toachi.

En la Figura 3.58 se presenta la renderización del modelo numérico con los tamaños de celda que fueron considerados en la etapa de la creación del mallado.

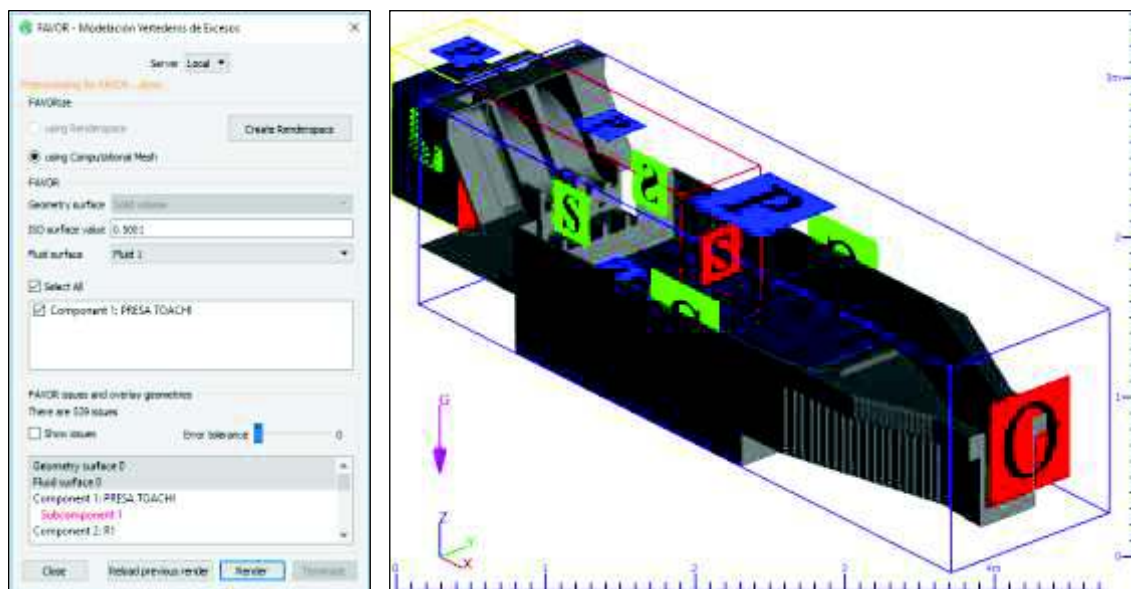
Figura 3.58 Renderización del modelo numérico



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Llevado a cabo la renderización, esta puede ser visualizada como se indica en la Figura 3.59:

Figura 3.59 Visualización del modelo numérico al aplicar el algoritmo “FAVOR”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

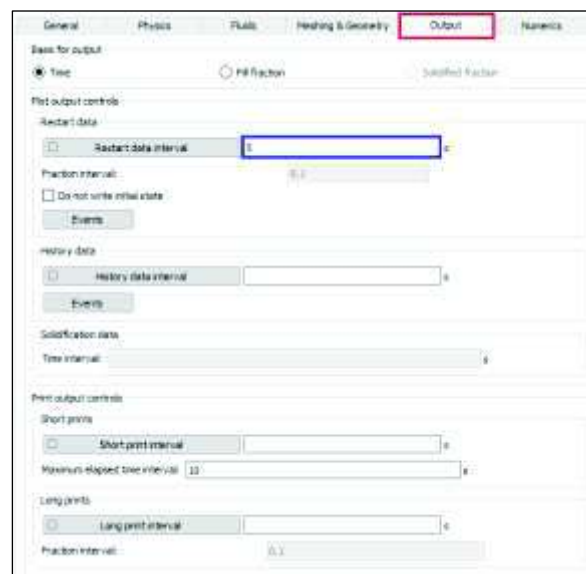
Al visualizar la renderización, se concluye que el tamaño de celda establecido es apropiado para abarcar todos los detalles relevantes de la estructura para su consecuente modelación.

3.4.2.5 Parámetros de salida de la simulación y selección de resultados a obtenerse

Esta sección controla qué datos serán parte del archivo de resultados y con qué frecuencia se configuran los mismos.

Durante un cálculo en el programa FLOW-3D, sus resultados se escriben de manera periódica en un archivo de datos binarios. El post-procesador hace uso de este archivo para graficar o continuar el cálculo a través de una operación de reinicio. El tiempo para llevar a cabo esta operación es impuesto como se exhibe en la Figura 3.60.

Figura 3.60 Tiempo de reinicio del intervalo de datos establecido



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

En la Figura 3.61, se define el intervalo de tiempo en el cual se requiere la presentación de los resultados. Además, se eligen las variables que se desean encontrar al llevar a cabo la modelación. Algunas de estas variables aparecen únicamente después de haberlas seleccionado en la pestaña de datos de salida adicionales como se indica en la Figura 3.62.

Figura 3.61 Intervalo de tiempo para presentación de resultados definido

Selected data

Selected data interval: 0.5

Fraction interval: 0.01

Events

- Dynamic viscosity
- Entrained air
- Excess shear stress
- Fluid fraction
- Fluid velocities
- Hydraulic data
- Macroscopic Density
- Mass source rate
- Particle information (for 2D and 3D plots)
- Pressure
- Turbulent quantities (k/epsilon)

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.62 Datos de salida adicionales seleccionados

Additional output

Dynamic viscosity

Fluid tracer(s)

Fluid vorticity & Q-criterion

Strain rate

Total hydraulic head 3D

Hydraulic data (depth averaged values and assuming gravity in -Z direction)

Flow depth

Maximum flow depth

Free surface elevation

Velocity

Offset velocity:

Distance from bottom: 0

Froude number

Specific hydraulic head

Total hydraulic head

Shear stress

Distance traveled by fluid

Fluid arrival time

Fluid residence time

Wall contact time

PSI/TSE Tecplot output format: No Output

PSI/TSE EXODUS output format: No Output

Additional options

Debug level: Standard

Activate solver wall clock timers (output written at the end of the Solver Summary file)

Output on failure

Batch Mode

Batch Post-Processing

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

3.4.2.6 Métodos numéricos empleados para el cálculo

A pesar de que las opciones que vienen predeterminadas en FLOW-3D funcionan bien para una gran parte de problemas, este programa brinda controles para ajustar muchos de los métodos numéricos empleados para el cálculo. Sin embargo, se debe tener presente que ajustar estas opciones numéricas sin comprender cuál es

el rol de cada parámetro puede tener consecuencias negativas en lo que respecta a la precisión de la simulación y su tiempo de ejecución.

En lo que se refiere a los controles de paso del tiempo, FLOW-3D ajusta de manera automática el tamaño del paso del tiempo para que sea lo más grande posible sin exceder ninguno de los límites de estabilidad. Uno de los controles principales es el correspondiente al tamaño de paso de tiempo en el ciclo de cálculo inicial, figura.

Se fijó el valor de 0.001 (Figura 3.63) debido a que en las simulaciones de prueba se constató que el valor predeterminado por FLOW-3D genera el siguiente error al inicio de la simulación: "Convective flux exceeded stability limit", dicho error es ocasionado cuando la velocidad calculada del fluido resulta en un número de Courant mayor a 1, lo que significa que el cociente entre el intervalo de tiempo y el tiempo de residencia en un volumen finito sobrepasa la unidad, excediendo así el límite de estabilidad al final del ciclo informado.

Sin embargo, dicho error no es muy relevante y el programa corrige esto haciendo una copia de seguridad y repitiendo el ciclo computacional con un tamaño de paso de tiempo más pequeño.

En lo que respecta a las opciones de solución de presión se emplea la alternativa Implícita GMRES, ya que los métodos implícitos pueden ser usados en todo tipo de flujos sean compresibles o incompresibles y además son incondicionalmente estables. El método GMRES es seleccionado a causa de su rápida convergencia y eficacia paralela (Flow Science, Inc, 2016).

Figura 3.63 Paso de tiempo inicial definido

The screenshot shows the 'Numerics' tab with the following settings:

- Time-step controls:**
 - Initial time step: 0.001 s
 - Minimum time step: (empty)
 - Maximum time step: Tabular (empty)
- Pressure solver options:**
 - Explicit (compressible or shallow-water models only)
 - Implicit
 - Implicit with automatic limited compressibility
 - Implicit solver options:**
 - SOR
 - Line-implicit
 - 1-d direction 2-d direction 3-d direction
 - GMRES
- GMRES solver options:**
 - GMRES subspace size: 16
 - Maximum number of iterations: 20
 - Convergence tolerance: 0.001
 - Additional memory (in GB) for storing FSI data structures: 2
 - Dynamically selected subspace size
 - Preconditioning of FSI GMRES
- Coupling between solidified fluid/FSI:**
 - No coupling
 - Partial coupling
- Friction coefficient: (empty)

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.64 Opciones para controlar la solución de las tensiones viscosas en el fluido

The screenshot shows the following settings for viscous stress solvers:

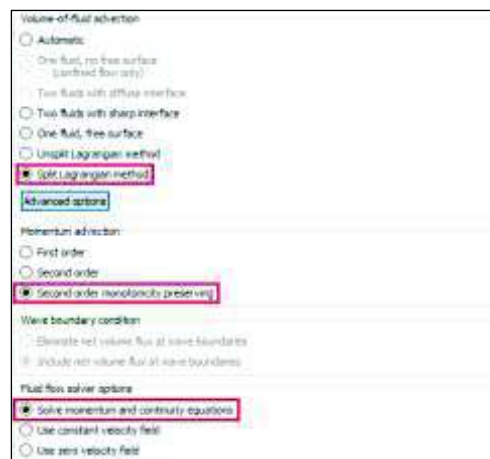
- Viscous stress solver options:**
 - Explicit
 - Successive under-relaxation (compatible with all pressure solvers)
 - Line-implicit (requires SOR pressure solver)
- Other explicit/implicit solver options:**
 - Heat transfer: Explicit Implicit
 - Elastic stress: Explicit Implicit
 - Surface tension pressure: Explicit Implicit
 - Free surface pressure: Implicit Explicit
 - Bubble pressure: Explicit Implicit
 - Advection: Implicit Explicit
 - Moving object/Fluid coupling: Implicit Explicit
 - Shallow water: Explicit Implicit
- Console acceleration implicit weighting factor: 1

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Las opciones de advección de volumen de fluido se utilizan para controlar cómo se mueve la fracción de fluido a través de la malla. Cada método tiene sus ventajas y desventajas. A pesar de que la configuración predeterminada “Automatic” funciona bien para la mayoría de los problemas, existen ciertos casos, principalmente en flujos a superficie libre en donde los métodos de advección VOF “Langrangian” pueden ser de mayor utilidad al abordar errores en la conservación de la masa debido al método de advección (Flow Science, Inc, 2016). Es por esta razón que se ha seleccionado la opción “Split Lagrangian Method”, como se indica en la Figura 3.65.

Se escoge la alternativa de advección de momento: “Second order monotonicity preserving” debido a que este método es de segundo orden preciso en el espacio y de primer orden preciso en el tiempo, siendo útil en el estudio de flujos con remolinos en la superficie libre. (Flow Science, Inc, 2016). Asimismo, en las opciones del solucionador del flujo de fluidos se opta por resolver las ecuaciones de momento y continuidad.

Figura 3.65 Alternativas de advección de volumen de fluido y de momento

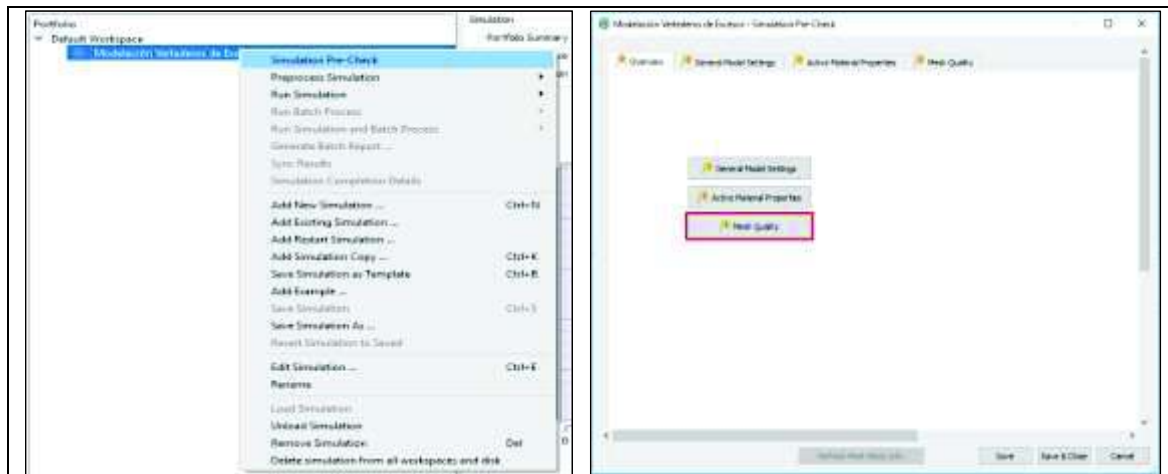


ELABORADO POR: Chandi & Escobar

3.4.2.7 Revisión del modelo, previo a su simulación

Antes de iniciar la simulación es conveniente realizar un chequeo para así determinar la existencia de conflictos que pudieran afectar a la simulación. Esto se logra mediante el proceso indicado en la Figura 3.66.

Figura 3.66 “Pre check” del modelo numérico

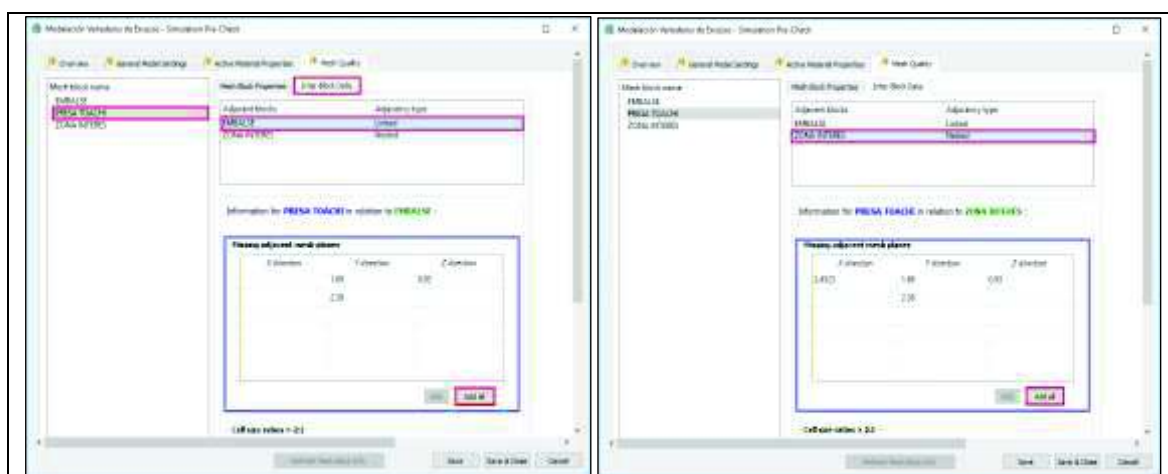


ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Como se puede observar en la Figura 3.66, la calidad del mallado se muestra en color amarillo, lo que quiere decir que se deben hacer arreglos en ciertas zonas del mallado.

Al dar clic en la pestaña “inter-block data” se puede apreciar que para el “Mesh Block 2” es necesario añadir planos de malla en la dirección Y y Z que corresponden al “Mesh Block 1”. Además de estos planos, se necesita añadir planos de malla de igual manera en dirección Y y Z que relacionan al “Mesh Block 3” (Figura 3.67).

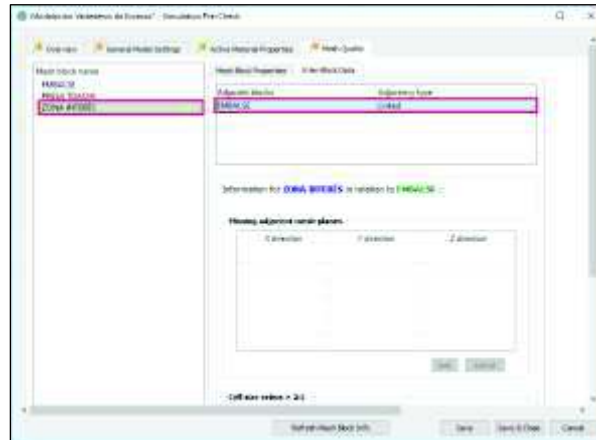
Figura 3.67 Planos de malla faltantes en el “Mesh Block 2” añadidos



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

En la Figura 3.68, se verifica si en el Mesh Block 3 existe la necesidad de incorporar nuevos planos de mallas. Como esto ya no es necesario, se da clic en la opción “Save & Close”

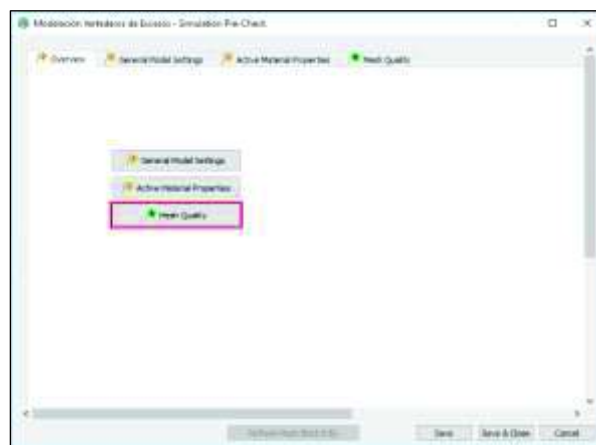
Figura 3.68 Comprobación de planos de malla faltantes en el “Mesh Block 3”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Ya con las modificaciones realizadas se procede a verificar nuevamente la calidad del mallado. Como se indica en la Figura 3.69, dicha calidad está en color verde, lo que significa que el mallado se encuentra correctamente realizado.

Figura 3.69 Verificación de calidad del mallado “Mesh Quality”

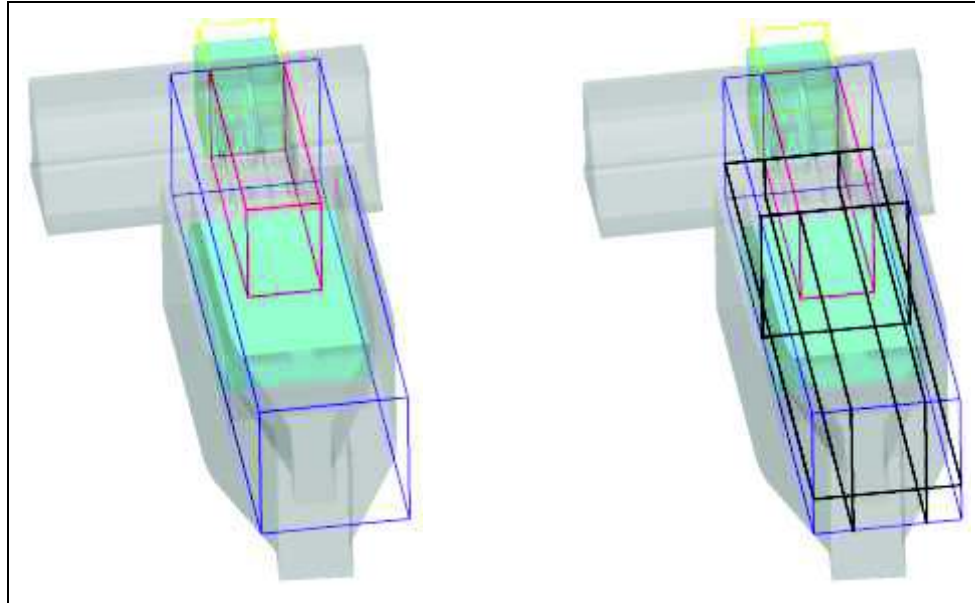


ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Ahora es necesario dirigirse nuevamente a Meshing and Geometry para visualizar los nuevos planos de malla creados. En la Figura 3.70, a lado izquierdo se muestra

el modelo con mallado inicial y a lado derecho se presenta el modelo con los nuevos planos de malla creados.

Figura 3.70 Comparación de planos de malla iniciales y finales para el modelo numérico

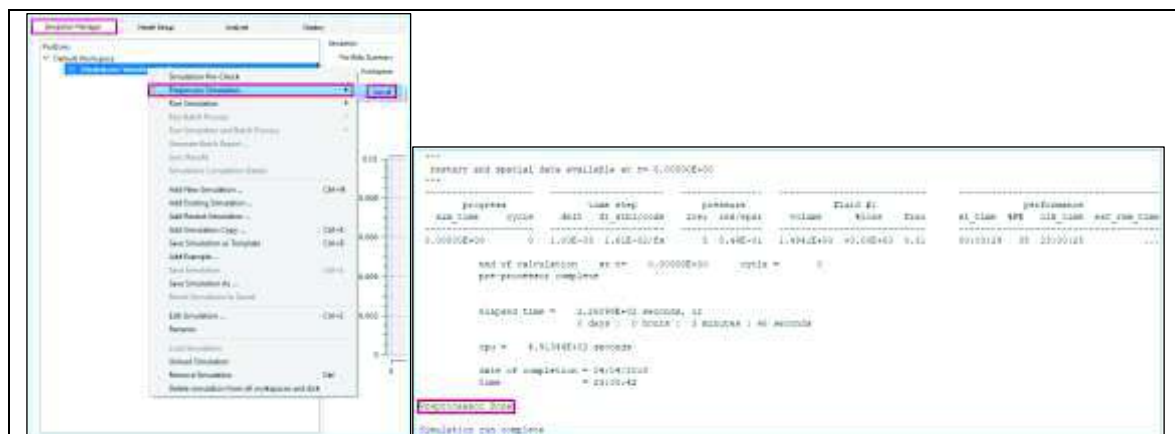


ELABORADO POR: Chandi & Escobar

El modelo numérico está listo para ser simulado, como se exhibe en la Figura 3.71, se dirige a la pestaña de “Simulation Manager” para posteriormente llevar a cabo el Pre-proceso de la simulación.

3.4.2.8 Simulación del modelo numérico

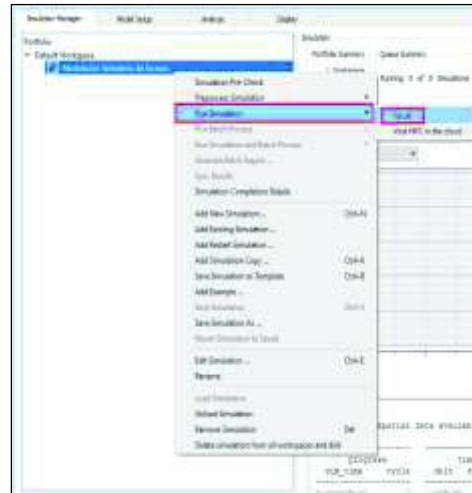
Figura 3.71 Pre-proceso de la simulación en la pestaña “Simulation Manager”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Finalmente se procede a correr la simulación, dando clic en “Run Simulation” (Figura 3.72).

Figura 3.72 Correr la simulación en la pestaña “Simulation Manager”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Luego de que se haya llevado a cabo la simulación del modelo al 100%, se puede visualizar la gráfica de estabilidad vs paso de tiempo, así como también el tiempo que demoró tal simulación (Figura 3.73).

Figura 3.73 Gráfica de límite de estabilidad y paso de tiempo



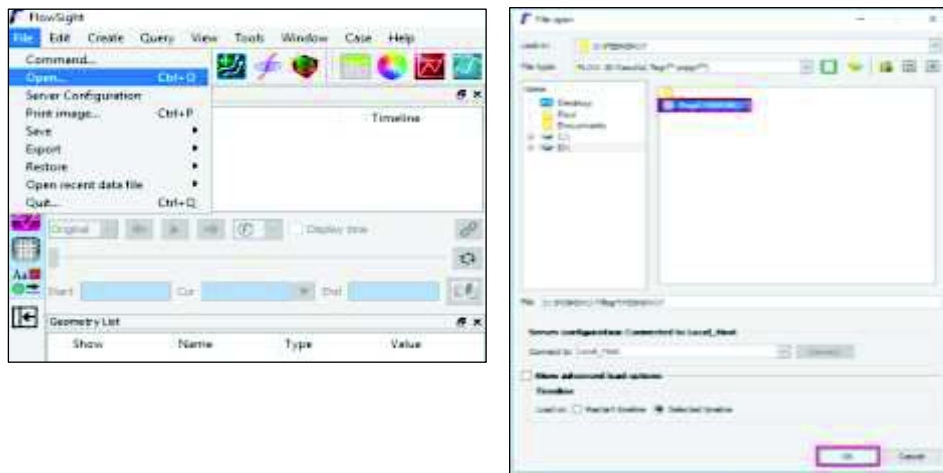
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Para la presentación de resultados se hará uso de “FLOWSIGHT”, la cual es una herramienta avanzada de post-procesamiento, diseñada para ofrecer visualizaciones sofisticadas de los resultados FLOW-3D. El uso de Flowsight permite sacar el mayor provecho de los resultados de CFD.

3.4.2.9 Visualización de resultados en FlowSight

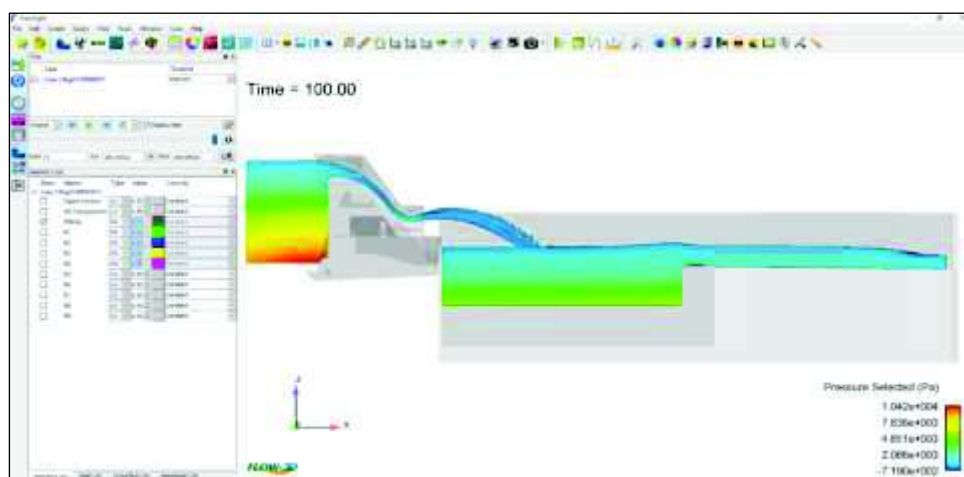
Una vez en la interfaz de FLOWSIGHT, se abre el archivo correspondiente a la simulación realizada en FLOW-3D, como se muestra en la Figura 3.74.

Figura 3.74 Selección de la modelación numérica a visualizar en la interfaz FLOWSIGHT



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

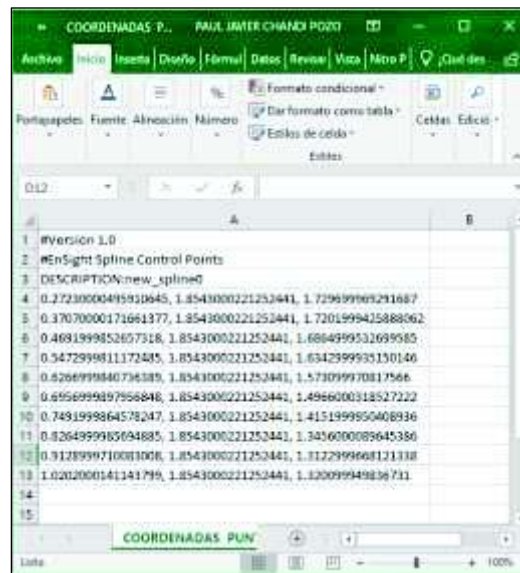
Figura 3.75 Modelación numérica cargada en FLOWSIGHT



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

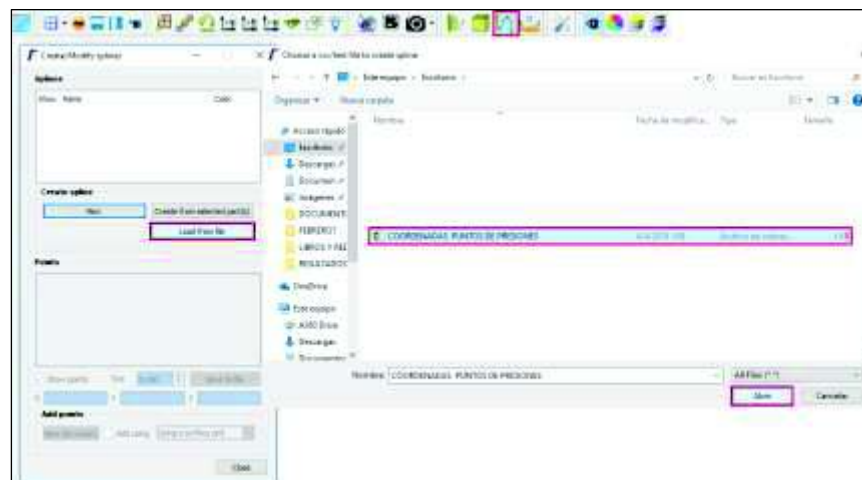
Para conocer los resultados de presiones a lo largo del perfil de los vertederos de excesos, es necesario la creación de un archivo “CSV” con las coordenadas de los puntos en los cuales se requieren determinar dichas variables (Figura 3.76). Este archivo posteriormente se importará mediante la herramienta: “Spline”-“Load from file” (Figura 3.76).

Figura 3.76 Creación en formato “CSV” de las coordenadas de los puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero derecho



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

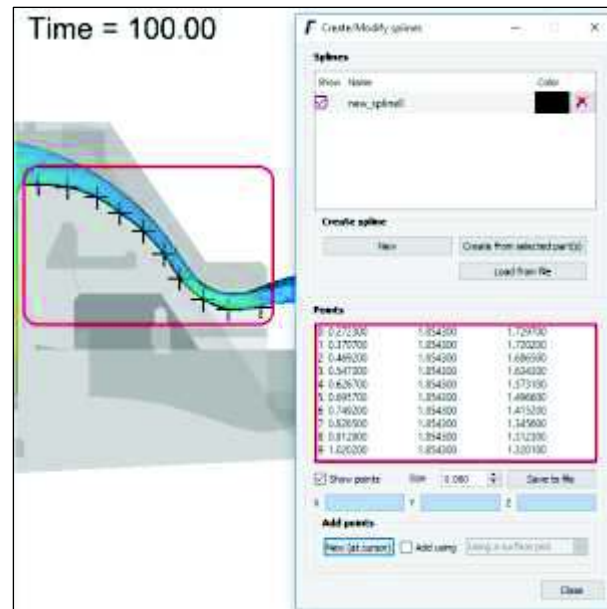
Figura 3.77 Importación del archivo “CSV” de las coordenadas de los puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero derecho



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

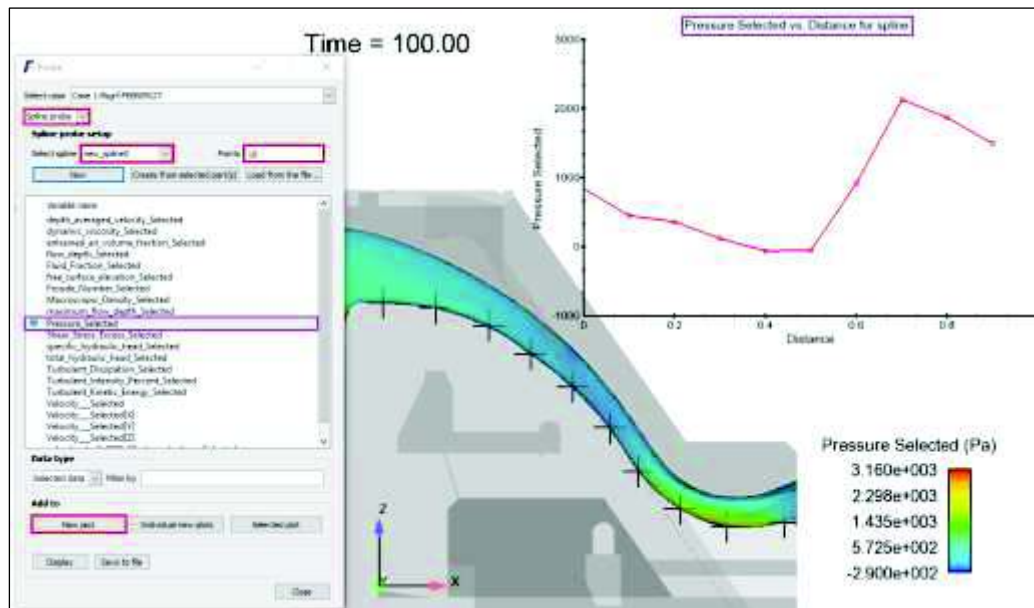
Una vez cargados los puntos al modelo numérico, se puede visualizar los puntos en los cuales se determinarán las presiones (Figura 3.78).

Figura 3.78 Visualización de puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero derecho



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.79 Gráfico de resultados de presiones para el vertedero derecho “Presión vs Distancia de Spline”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Para obtener las presiones en cada punto, en lugar de dividir en 10 puntos la “Spline0”, se la divide en 1000 puntos (Figura 3.80), esto se hace con el fin de que exista mayor número de puntos y algunos de estos sean similares a los establecidos en el modelo físico.

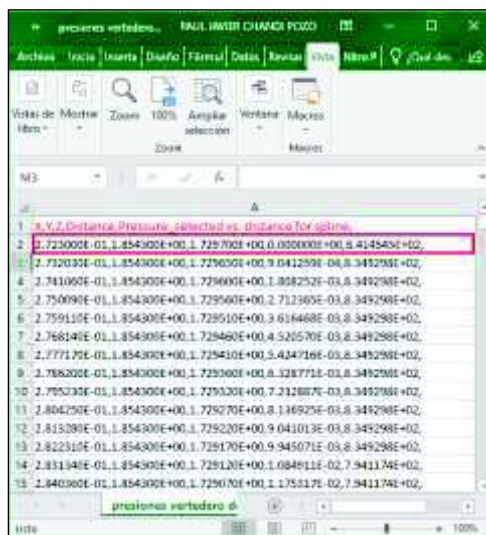
Figura 3.80 Selección de la variable “Pressure” a determinarse en el perfil del vertedero derecho



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Los resultados se guardan en formato “CSV” como se indica en la Figura 3.81, posteriormente se ubican las coordenadas de los 10 puntos para obtener las 10 presiones. Dichas presiones se encuentran en unidades de [Pascales], por lo que se transforman a [m.c.a].

Figura 3.81 Resultados de presiones del perfil del vertedero derecho en formato “CSV”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Resultados de presiones del perfil del vertedero derecho**

La presión en el primer punto resulta 841.45 [Pa], equivalente a 0.086 [m.c.a]. Para obtener las presiones en los demás puntos, se deben localizar sus coordenadas en “x”. La Tabla 3.22 indica las presiones en los 10 puntos a lo largo del perfil del vertedero derecho.

Tabla 3.22

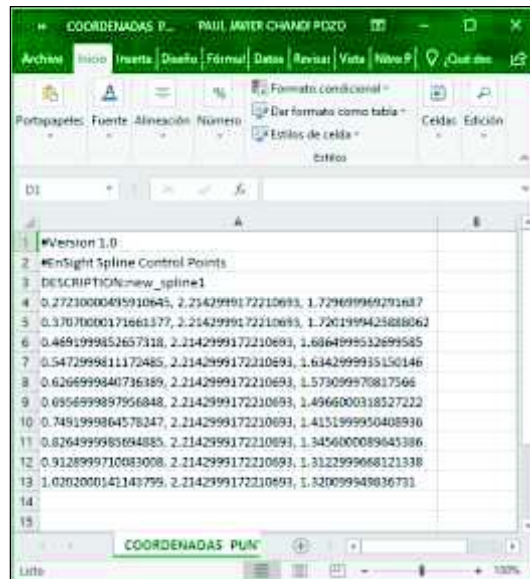
Presiones obtenidas en los 10 puntos del perfil del vertedero derecho

X	Y	Z	Presión [m.c.a]
0.2723	1.8543	1.7297	0.086
0.3707	1.8543	1.7202	0.046
0.4692	1.8543	1.6865	0.020
0.5473	1.8543	1.6343	0.011
0.6267	1.8543	1.5731	-0.008
0.6957	1.8543	1.4966	0.0019
0.7492	1.8543	1.4152	0.095
0.8265	1.8543	1.3456	0.224
0.9129	1.8543	1.3123	0.208
1.0202	1.8543	1.3201	0.085

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

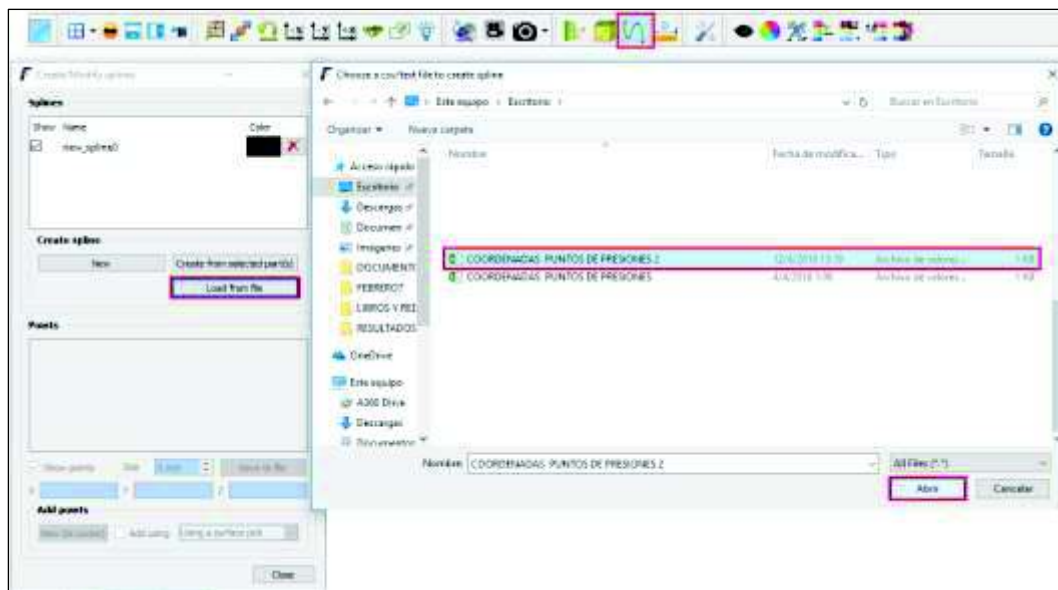
De la misma manera, se procede para la ubicación de los 10 puntos en el vertedero de excesos izquierdo.

Figura 3.82 Creación en formato “CSV” de las coordenadas de los puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero izquierdo



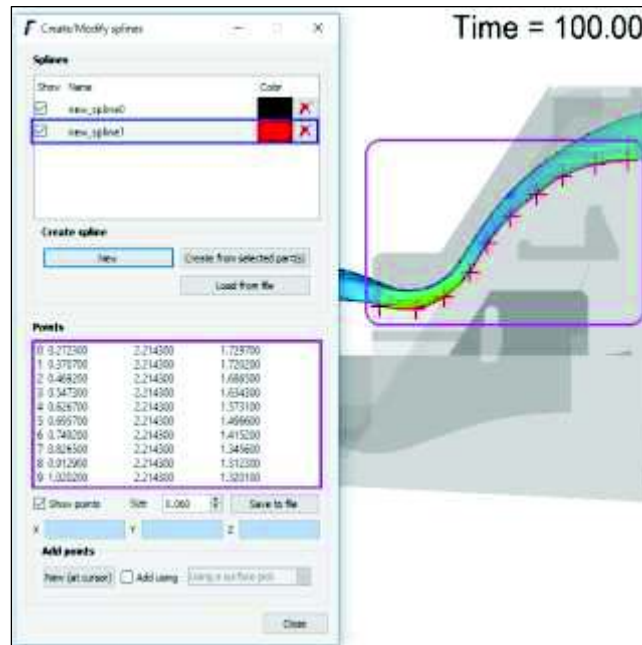
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.83 Importación del archivo “CSV” de las coordenadas de los puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero izquierdo



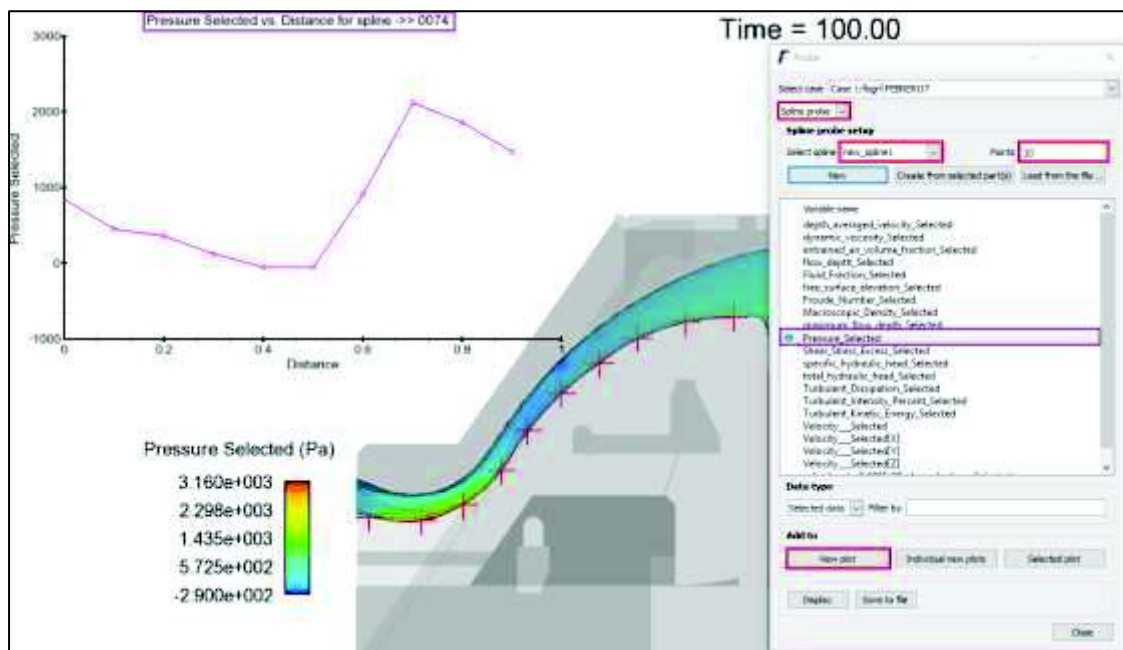
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.84 Visualización de puntos en los cuales se determinarán los resultados de presiones a lo largo del perfil del vertedero izquierdo



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.85 Gráfico de resultados de presiones para el vertedero izquierdo “Distancia de Spline vs Presión”



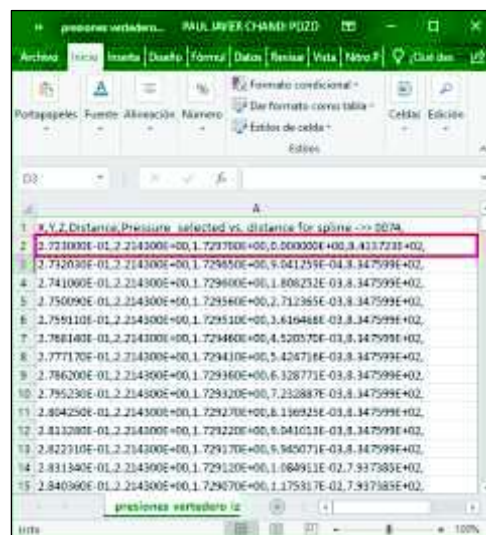
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.86 Selección de la variable “Pressure” a determinarse en el perfil del vertedero izquierdo



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.87 Resultados de presiones del perfil del vertedero izquierdo en formato “CSV”



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Resultados de presiones del perfil del vertedero izquierdo**

La presión en el primer punto resulta 841.37 [Pa], equivalente a 0.086 [m.c.a.]. Para obtener las presiones en los demás puntos, se deben localizar sus coordenadas en

“x”. La Tabla 3.23 indica las presiones en los 10 puntos a lo largo del perfil del vertedero izquierdo.

Tabla 3.23

Presiones obtenidas en los 10 puntos del perfil del vertedero izquierdo

X	Y	Z	Presión [m.c.a]
0.2723	2.2143	1.7297	0.086
0.3707	2.2143	1.7202	0.046
0.4692	2.2143	1.6865	0.022
0.5473	2.2143	1.6343	0.0032
0.6267	2.2143	1.5731	-0.011
0.6957	2.2143	1.4966	-0.033
0.7492	2.2143	1.4152	0.078
0.8265	2.2143	1.3456	0.216
0.9129	2.2143	1.3123	0.204
1.0202	2.2143	1.3201	0.100

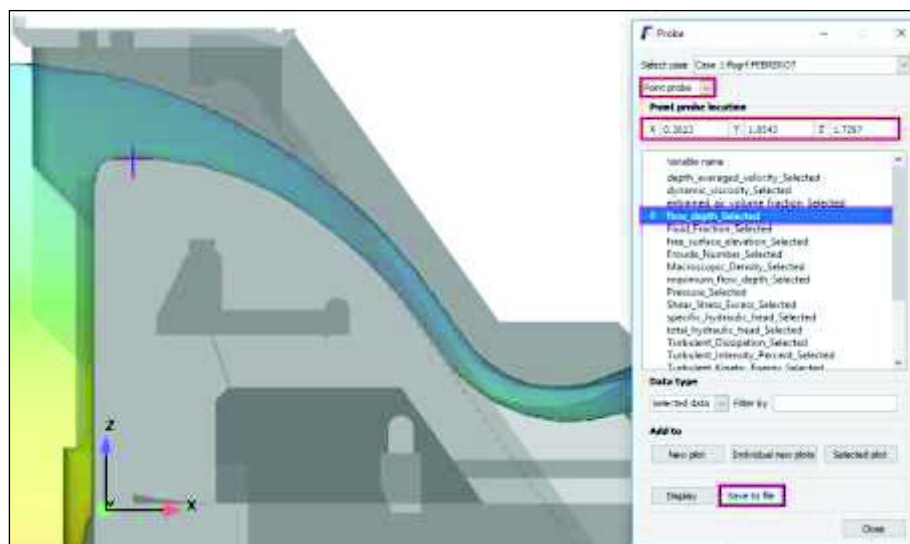
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Para obtener los resultados correspondientes al calado sobre la cresta del vertedero derecho, se procede a dar clic en el ícono “Probe”:



Posteriormente se establecen las coordenadas del punto en donde se desea conocer el calado, en este caso un punto ubicado en la cresta del vertedero. Las coordenadas son expuestas en la Figura 3.88. En la misma ventana se ubica la variable a determinarse, “flow_depth_Selected” y finalmente se guarda el archivo.

Figura 3.88 Ubicación de las coordenadas para determinar la carga sobre la cresta del vertedero derecho:



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Como se muestra en la Figura 3.89, el archivo de resultados se encuentra en formato “CSV” y se ubica la solución en $t=100$ [segundos].

Figura 3.89 Archivo de resultados de la carga sobre la cresta del vertedero derecho

Time (s)	Calado Cresta V.D. (cm)
0.999844	1.2419964
0.999999	1.242008
1.000026	1.242209
1.000181	1.241973
1.000346	1.242056
1.000501	1.241944
1.000656	1.241927
1.000811	1.242024
1.000966	1.242048
1.001121	1.242138
1.001276	1.242131
1.001431	1.241986
1.001586	1.242165
1.001741	1.24243
1.001896	1.242172
1.002051	1.242263
1.002206	1.242095
1.002361	1.241788
1.002516	1.242046
1.002671	1.242136
1.002826	1.242536

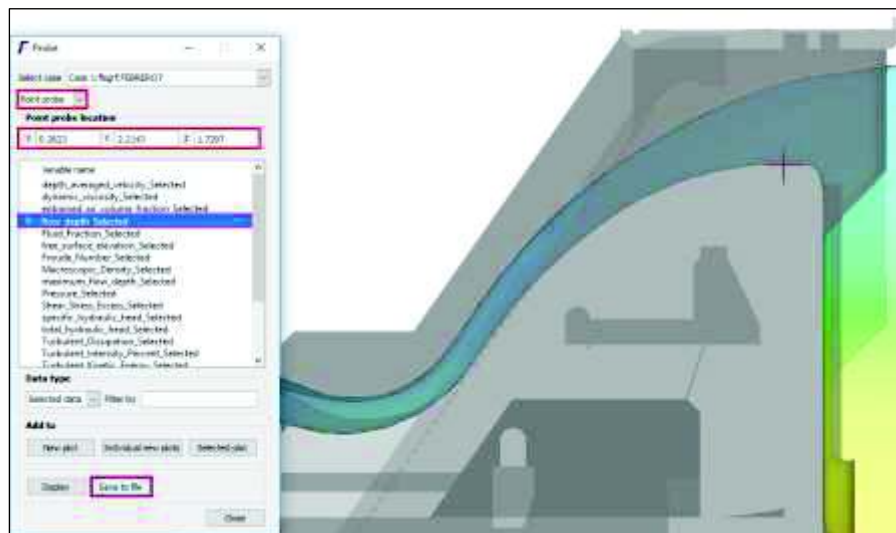
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Resultados de carga sobre la cresta del vertedero derecho**

Por lo tanto, la carga sobre la cresta del vertedero derecho es 12.62[cm].

Para determinar el calado sobre la cresta del vertedero izquierdo se procede de la misma forma que para el vertedero derecho, variando la coordenada en “y” como se indica en la Figura 3.90.

Figura 3.90 Ubicación de las coordenadas para determinar la carga sobre la cresta del vertedero izquierdo



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.91 Archivo de resultados de la carga sobre la cresta del vertedero izquierdo

Time	Flow depth	selected vs. time at pt. 0.2623 2.2143 1.7257
1.000000E+01	1.282394E-01	
1.000000E+01	1.282476E-01	
1.000000E+01	1.282617E-01	
1.000000E+01	1.282845E-01	
1.000000E+01	1.283181E-01	
1.000000E+01	1.283635E-01	
1.000000E+01	1.284275E-01	
1.000000E+01	1.285111E-01	
1.000000E+01	1.286111E-01	
1.000000E+01	1.287302E-01	
1.000000E+01	1.288611E-01	
1.000000E+01	1.290000E-01	
1.000000E+01	1.291488E-01	
1.000000E+01	1.293178E-01	
1.000000E+01	1.295071E-01	
1.000000E+01	1.297168E-01	
1.000000E+01	1.299471E-01	
1.000000E+01	1.302081E-01	
1.000000E+01	1.305000E-01	
1.000000E+01	1.308231E-01	
1.000000E+01	1.311876E-01	
1.000000E+01	1.315935E-01	
1.000000E+01	1.320408E-01	
1.000000E+01	1.325296E-01	
1.000000E+01	1.330600E-01	
1.000000E+01	1.336321E-01	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Resultados de carga sobre la cresta del vertedero izquierdo**

Por lo tanto, la carga sobre la cresta del vertedero izquierdo es 12.63[cm].

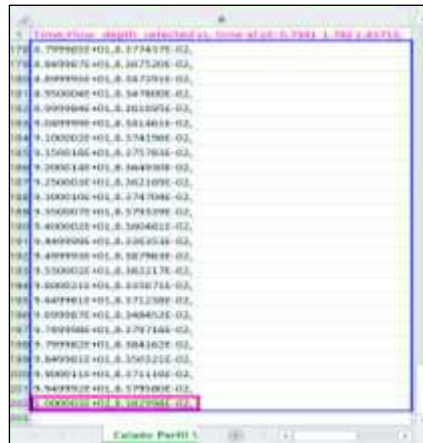
Para la obtención de resultados de la carga sobre el perfil del vertedero derecho, únicamente se varían las coordenadas del punto en el cual se requiere conocer dicha variable. Lo manifestado anteriormente, se expone en la Figura 3.92.

Figura 3.92 Ubicación de las coordenadas para determinar la carga sobre el perfil del vertedero derecho



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.93 Archivo de resultados de la carga sobre el perfil del vertedero derecho



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

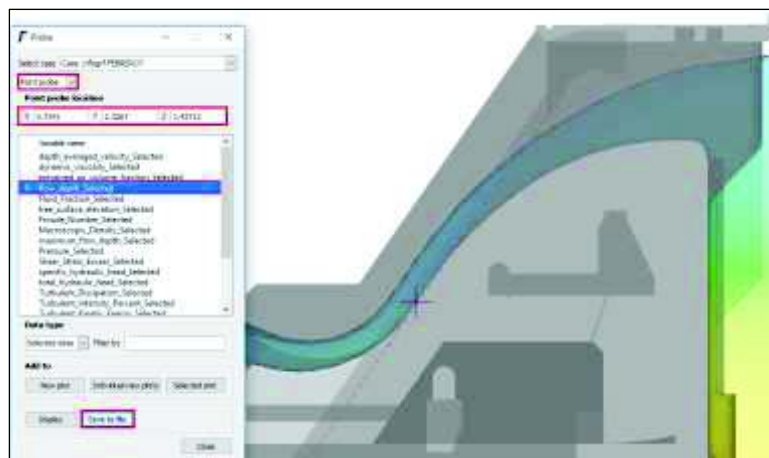
- **Resultados de calado sobre el perfil del vertedero derecho**

Calado: $0.08383[\text{m}] = 8.38[\text{cm}]$, para determinar el calado normal a la superficie es necesario multiplicar la distancia obtenida por la función Coseno del ángulo que forma el perfil del vertedero con la horizontal: $8.38[\text{cm}] \times \text{Cos}(55^\circ) = 4.81[\text{cm}]$.

Entonces el calado sobre el perfil del vertedero derecho es $4.81[\text{cm}]$.

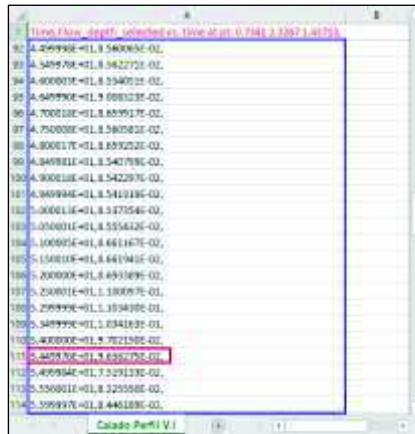
Para determinar el calado sobre el perfil del vertedero izquierdo se procede de la misma manera que para el vertedero derecho, con la diferencia de que la coordenada en “y” será diferente (Figura 3.94).

Figura 3.94 Ubicación de las coordenadas para determinar la carga sobre el perfil del vertedero izquierdo



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.95 Archivo de resultados de la carga sobre el perfil del vertedero izquierdo



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Resultados de calado sobre el perfil del vertedero izquierdo**

La distancia es 9.63[cm], por lo que el calado sobre el perfil sobre el vertedero izquierdo es: $9.63[\text{cm}] \times \text{Cos}(55^\circ) = 5.52[\text{cm}]$

Para encontrar los calados sobre los saltos en esquí y sobre los deflectores de los vertederos de excesos es necesario fijar las coordenadas de los puntos (Tabla 3.24) en los cuales se pretende la obtención de dichos resultados. Dichos puntos se encuentran establecidos en el modelo numérico como se indica en la Figura 3.96.

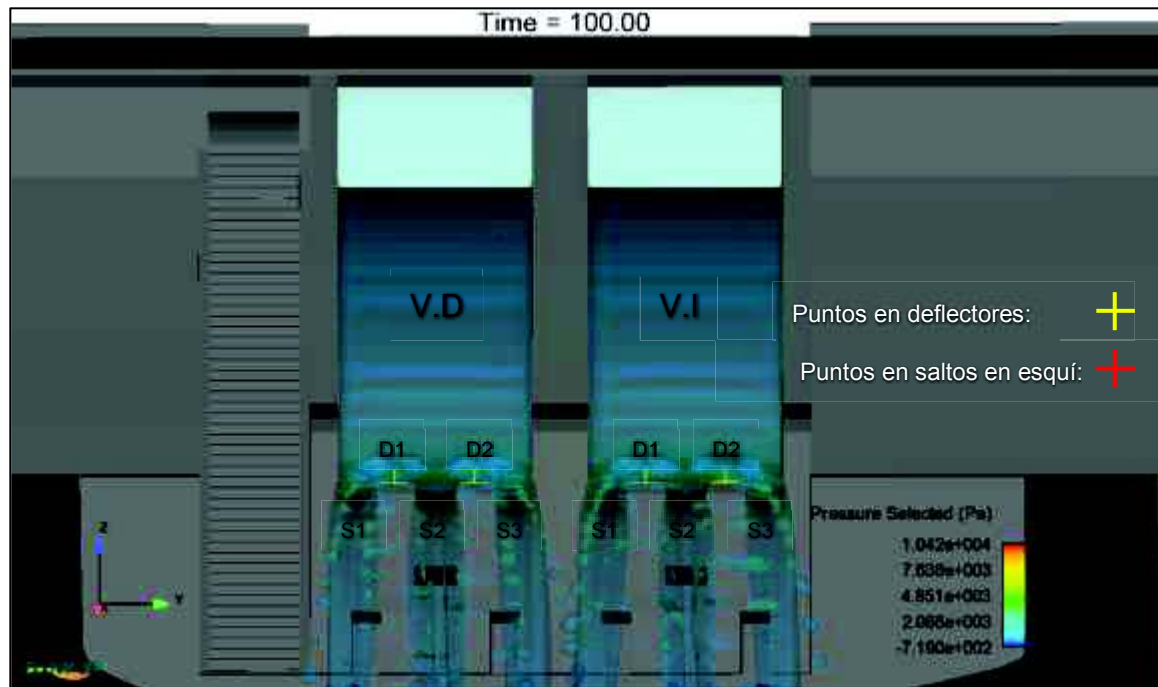
Tabla 3.24

Coordenadas de saltos en esquí y deflectores en donde se determinarán los calados

X	Y	Z
1.0321	1.7420	1.32480
1.0321	1.7967	1.37305
1.0321	1.8543	1.32480
1.0321	1.9117	1.37305
1.0321	1.9667	1.32480
1.0321	2.1020	1.32480
1.0321	2.1567	1.37305
1.0321	2.2143	1.32480
1.0321	2.2717	1.37305
1.0321	2.3267	1.32480

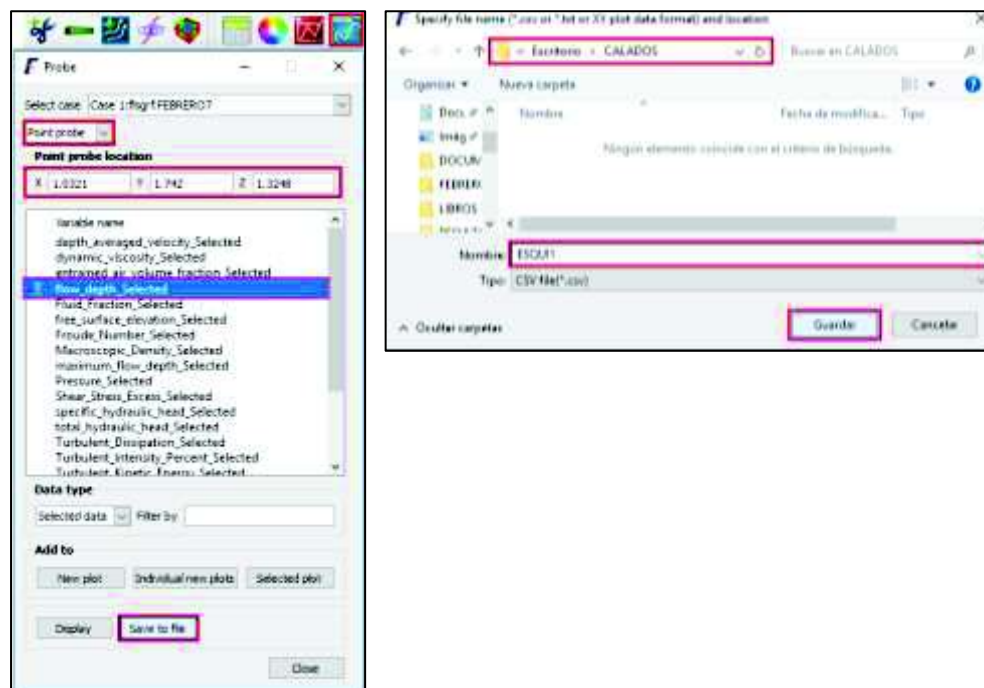
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 3.96 Ubicación en modelo numérico de los puntos en donde se establecerán los calados en saltos en esquí y deflectores



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

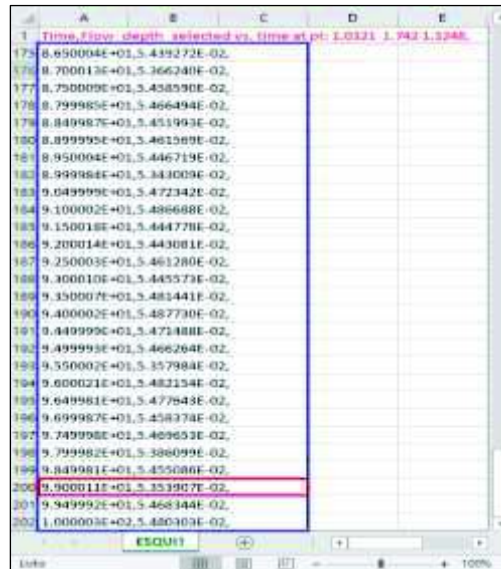
Figura 3.97 Coordenadas en donde se determinará el calado en un salto en esquí (S1) del vertedero de excesos derecho (V.D)



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Los resultados se indican en formato “CSV” (Figura 3.98), en este archivo se busca el calado en el intervalo de tiempo en el cual ya se cumple la conservación de la masa.

Figura 3.98 Archivo de resultados del calado en el primer salto en esquí (S1) del vertedero de excesos derecho (V.D)



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

De la Figura 3.98, se establece que el calado para el salto en esquí (S1) es 5.35cm.

El procedimiento anterior se realiza para los demás puntos en los cuales se busca determinar los calados (saltos en esquí y deflectores).

- **Resultados de calados en los deflectores y saltos en esquí de los vertederos de excesos para $Q=0.06863$ m³/s.**


Tabla 3.25

Resultados del modelo numérico de calados en deflectores y saltos en esquí

VERTEDERO DERECHO			VERTEDERO IZQUIERDO		
CALADOS	ESQUÍ 1	5.35 cm	CALADOS	ESQUÍ 1	5.37 cm
	DEFLECTOR 1	1.60 cm		DEFLECTOR 1	1.56 cm
	ESQUÍ 2	5.94 cm		ESQUÍ 2	5.96 cm
	DEFLECTOR 2	1.80 cm		DEFLECTOR 2	1.53 cm
	ESQUÍ 3	5.67 cm		ESQUÍ 3	5.42 cm

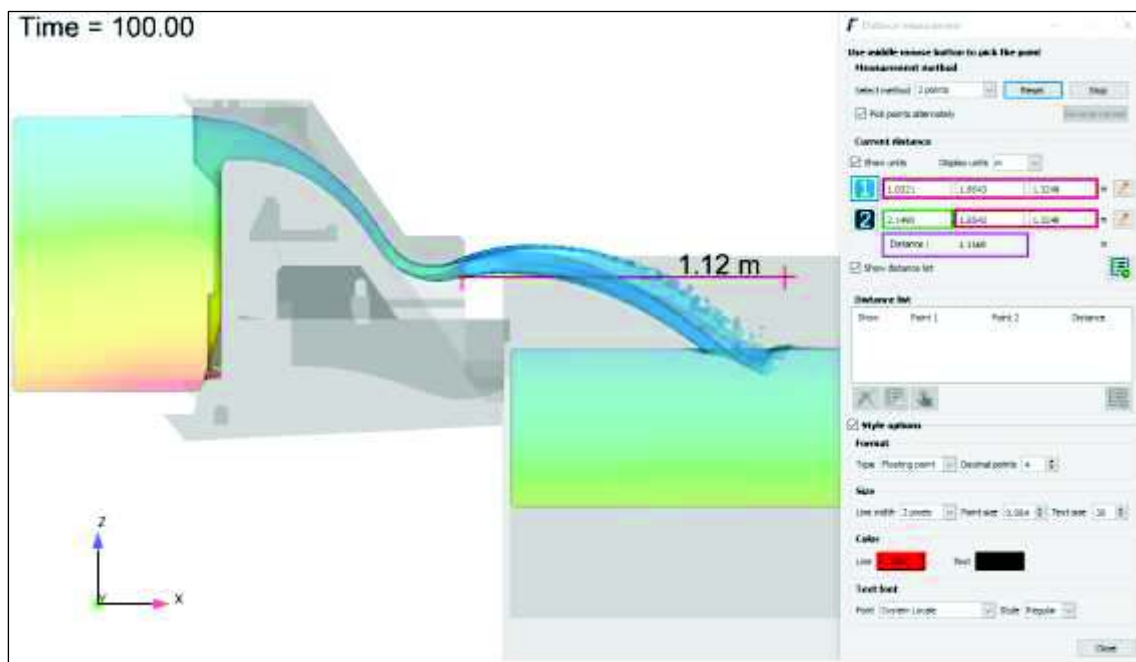
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

- **Resultados de alcance máximo de los chorros de descarga provenientes de los vertederos de excesos**

Para establecer el alcance del chorro proveniente de la descarga de los vertederos de excesos se hizo uso de la herramienta “Distance measuring tool” 

Primero se determina el eje de coordenadas desde dónde se tomará la distancia (salto en esquí) hasta el alcance máximo del chorro. La coordenada en el eje “x” del segundo punto es establecida de manera cualitativa; es decir, dando valores hasta que de manera visual se pueda apreciar que dicha longitud cumple con la distancia máxima alcanzada por el chorro. Esta coordenada se encuentra enmarcada de color verde. Lo anteriormente expuesto se indica en la Figura 3.99.

Figura 3.99 Medición en modelo numérico del alcance máximo del chorro de descarga



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Entonces, para este caso ($Q = 0.06863 \text{ m}^3/\text{s}$) el alcance máximo del chorro de descarga es igual a 1.12[m].

En el Anexo N° 2 se encuentra resumida la metodología descrita anteriormente mediante un diagrama de flujo.

CAPÍTULO IV

4. SIMULACIÓN NUMÉRICA Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 CONSIDERACIONES PARA LA CALIBRACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

La modelación de los vertederos de excesos de la presa Toachi es compleja puesto que al final se encuentran estructuras como los saltos en esquí y deflectores, en donde es necesario medir los calados y presiones. Estas estructuras al repartirse en lo ancho de los deflectores, son relativamente de dimensiones pequeñas en comparación al ancho total, requiriendo de esta forma un mallado fino que permita representar adecuadamente sus detalles.

La calibración de esta simulación numérica en el programa FLOW-3D se basa principalmente en encontrar el tamaño de celda de malla adecuado y el modelo de turbulencia más apropiado para representar el fenómeno físico, para ello es importante tener en cuenta: la física del fluido y la dinámica de la turbulencia, la capacidad disponible del ordenador, plazo disponible para finalizar las simulaciones, nivel de detalle y precisión de resultados.

Lo ideal según la literatura técnica sería poder simular todo el espectro de fluctuaciones turbulentas mediante una simulación directa DNS, pero debido a la capacidad del ordenador y al tiempo que tomaría este procesamiento, no es posible. Por tal razón se recurre a modelos simplificados que resuelven las ecuaciones de cantidad de masa y cantidad de movimiento con características medias del flujo (Casa, 2016).

4.1.1 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE CELDA

La importancia de elegir un tamaño de celda adecuado radica en que el tamaño influye en la aproximación de los resultados de la simulación numérica a los

resultados de la modelación física, además que el tiempo de simulación depende la cantidad de celdas a simular.

Para este análisis se consideran cuatro tamaños de celdas: 1.75 cm, 1.5 cm, 1 cm y 0.7 cm. El caudal asociado para el análisis es de 1200 m³/s en prototipo equivalente a 68.63 l/s en el modelo físico a escala 1:50.

En estas modelaciones las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS) se resuelven usando el modelo de turbulencia RNG que aplica métodos estadísticos a la derivación de las ecuaciones promediadas para cantidades de turbulencia, como la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación.

El modelo de turbulencia RNG exige la necesidad de poner un mínimo a los valores de la tasa de disipación de energía turbulenta, siendo necesario establecer un valor de escala de longitud máxima turbulenta (TLEN) que puede ser calculado o establecido de manera predeterminada para que el programa lo calcule como el 7% de la dimensión de dominio más pequeña, de esta forma se evitará obtener valores anormales o muy altos de la viscosidad turbulenta.

Para el análisis de influencia del tamaño de celda de malla se designa que el valor de TLEN se calcule automáticamente en el programa FLOW-3D, además se activan los modelos de entrada de aire y de evaluación de densidad. En la Tabla 4.1 se describen ciertos parámetros de las simulaciones numéricas utilizadas para el análisis de influencia del tamaño de celda.

Tabla 4.1

Plan de simulaciones numéricas para el análisis de influencia del tamaño de celda

Simulación	Tamaño de celda de malla m	Total de celdas u	Modelo de Turbulencia	TLEN m
-			-	
S1	0.01750	2077480	RNG	Automático
S2	0.01500	3349784	RNG	Automático
S3	0.01000	4890756	RNG	Automático
S4	0.00700	9146124	RNG	Automático

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

4.1.1.1 Resultados de la simulación según la influencia del tamaño de celda de malla

La principal comparación de resultados para los cuatro diferentes tamaños de celdas de malla se realiza observando las presiones medidas a lo largo de los vertederos. Se escogió como variable de análisis la lectura de las presiones a lo largo del perfil del cimacio de los vertederos de excesos puesto que este es un factor importante en la verificación de la geometría de estos.

El ordenador utilizado para el análisis de sensibilidad de la celda de malla tiene las siguientes características: memoria RAM de 256 GB y un procesador Intel® Xeon® E5-2687W v4 3GHz de 12 núcleos. Dicho ordenador fue facilitado por el Centro de Investigación y Estudios de Recursos Hídricos (CIERHI). En la Tabla 4.2 se muestra el tiempo de simulación y duración de corrida de las distintas simulaciones.

Tabla 4.2

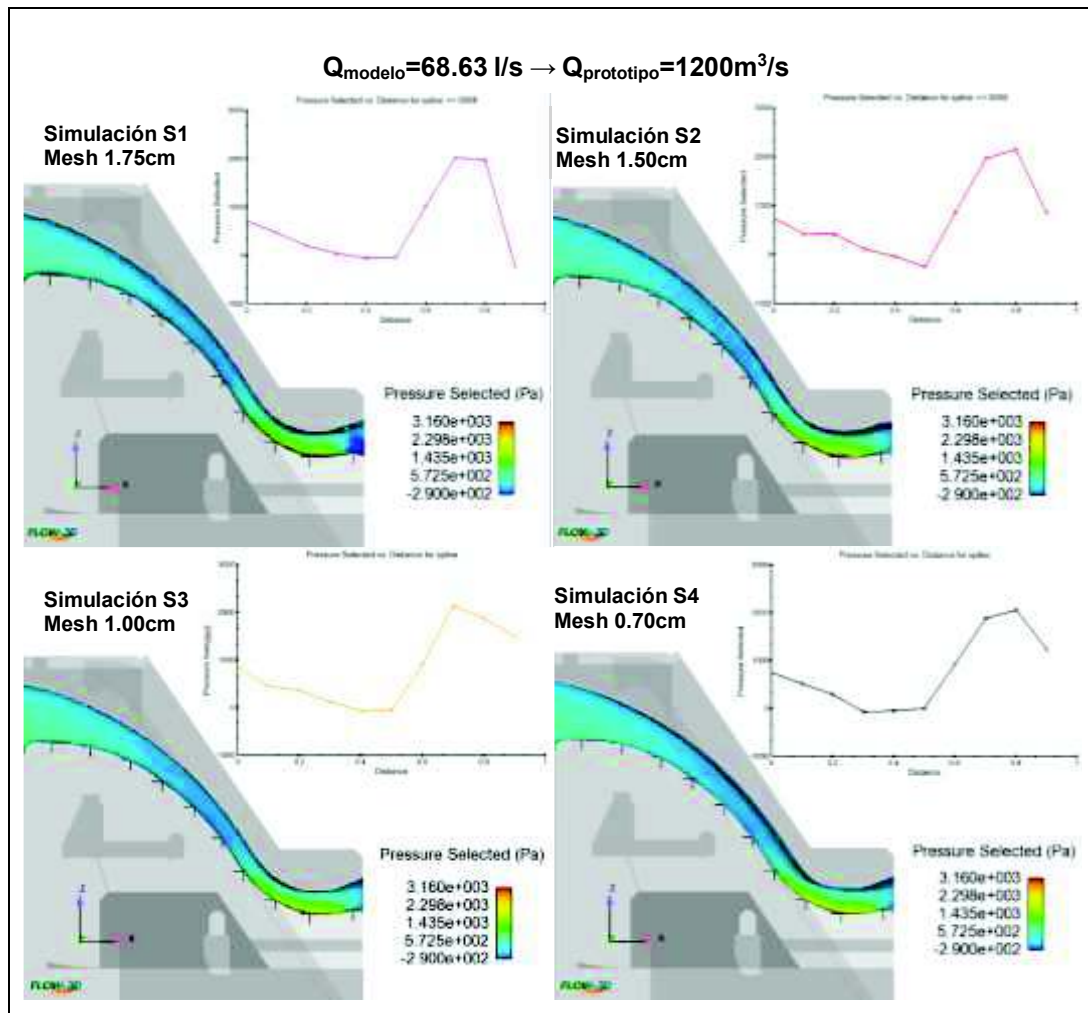
Tiempo de simulación y duración de corrida de las distintas simulaciones

Simulación	Tiempo de simulación	Duración de corrida	Observación
-	s	h/día	
S1	100	14:50 h	Simulación estable
S2	100	1 día 4:35 h	Simulación estable
S3	100	3 días 19:03 h	Simulación estable
S4	48	6 días 23:56 h	Simulación estable

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

La Figura 4.1 muestra el perfil de presiones a lo largo del vertedero derecho y la lámina de agua sobre el perfil con una simbología de colores que varía dependiendo de la presión, para un caudal de 68.63 l/s para los distintos tamaños de celdas de malla.

Figura 4.1 Perfil de presiones a lo largo del vertedero derecho para las simulaciones S1, S2, S3 y S4



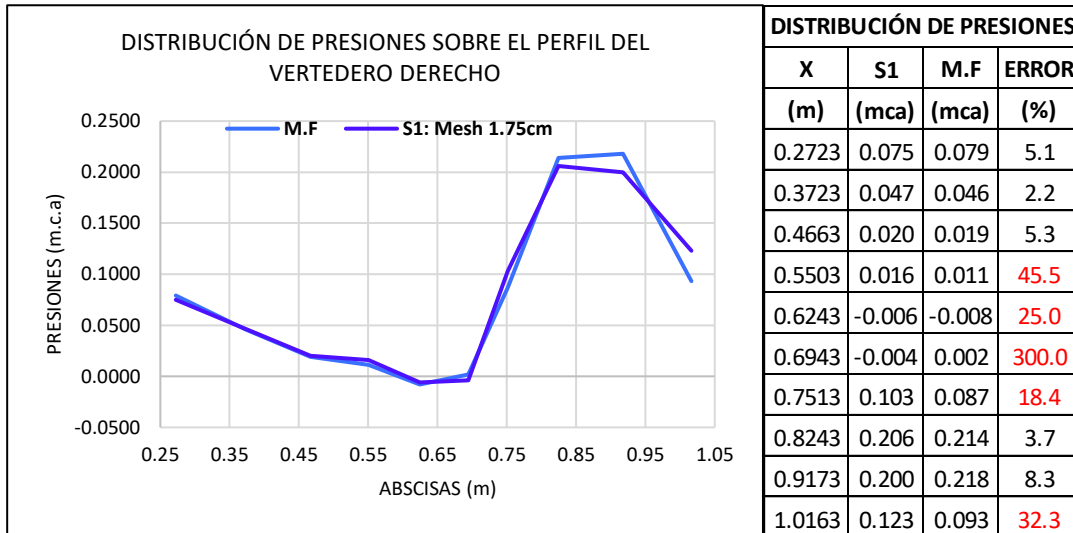
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

La simulación S1 es la única que presenta en el perfil de la lámina de agua un color diferente a las tres simulaciones restantes según la escala de colores. Las simulaciones S2, S3 y S4 presentan un perfil de la lámina de agua según la simbología muy similares, salvo que en la simulación S2 se pueden observar pequeñas ondulaciones en el perfil de la superficie.

En las Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se compara el perfil de las presiones sobre el vertedero derecho para las distintas simulaciones con el perfil obtenido en el modelo físico (M.F) y se realiza un análisis cuantitativo del porcentaje (%) de error presente. Todas las gráficas cualitativamente muestran una gran similitud con el modelo físico, debido a que las presiones son relativamente pequeñas. Pero en el análisis

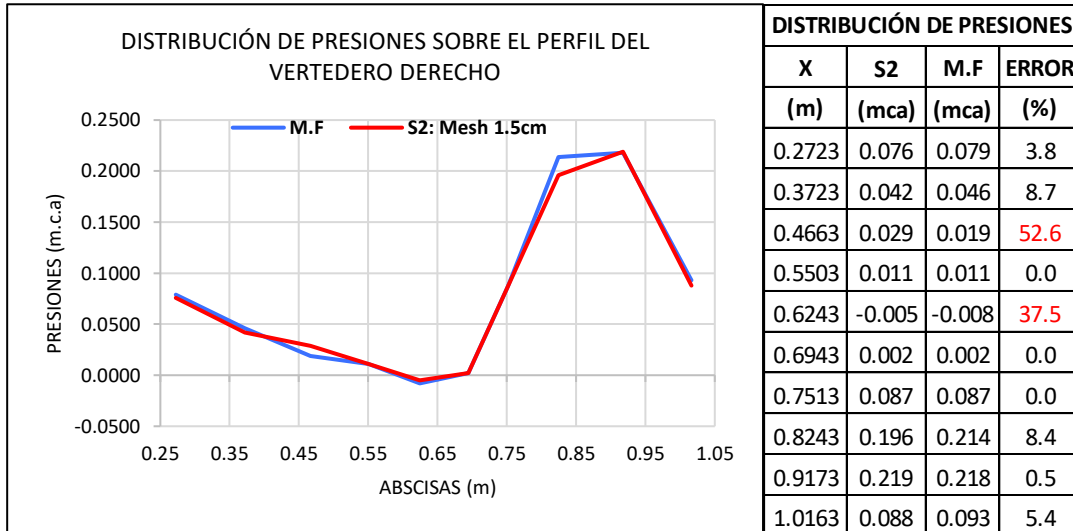
cuantitativo se ha marcado con color rojo los puntos que no cumplen con un margen de error menor al 10% respecto a las presiones del modelo físico.

Figura 4.2 Perfil de presiones de la simulación S1 con tamaño de celda 1.75 cm



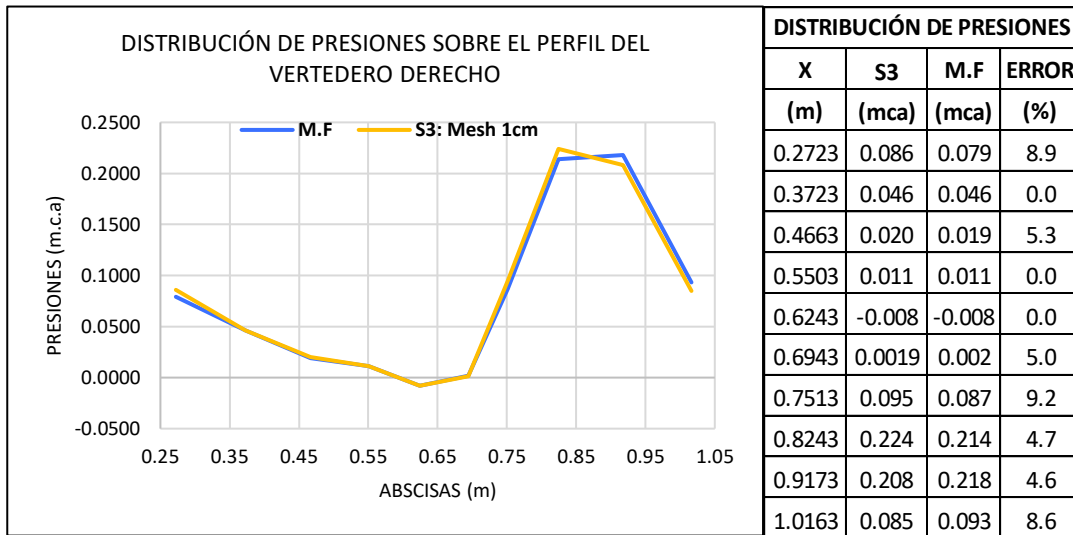
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 4.3 Perfil de presiones de la simulación S2 con tamaño de celda 1.50 cm



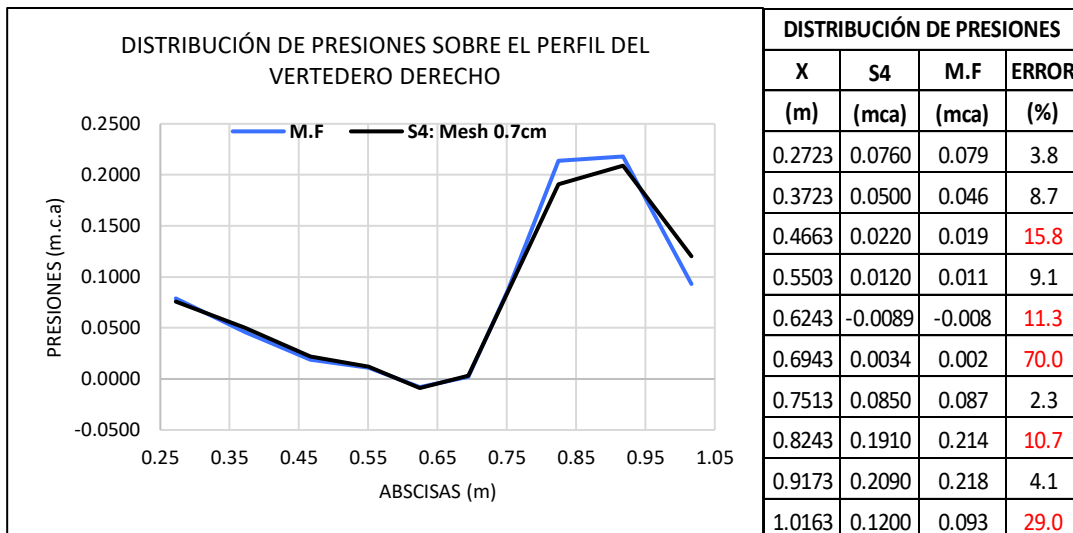
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 4.4 Perfil de presiones de la simulación S3 con tamaño de celda 1.00 cm



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 4.5 Perfil de presiones de la simulación S4 con tamaño de celda 0.70 cm



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Se puede observar que en los dos primeros puntos que están ubicados en la cresta del vertedero para todas las simulaciones cumplen las presiones dentro del margen de error, debido a que prácticamente el flujo subcrítico, en los siguientes puntos se presenta el flujo supercrítico y con ello empiezan las variaciones de las presiones en las distintas simulaciones.

Las simulaciones S2 y S3 son las que mejores resultados presentan, siendo el tamaño de celda de malla de la simulación S3 la que se utilizará para la

presentación de los resultados finales para los distintos caudales y distintas variables. Debido al tiempo de simulación más corto y a la buena aproximación de sus resultados se utilizará el tamaño de celda de malla de la simulación S2 para realizar el análisis de influencia del modelo de turbulencia.

4.1.2 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MODELO DE TURBULENCIA

En la Tabla 4.3 se muestra el plan de simulaciones utilizados para realizar el análisis de la influencia del modelo de turbulencia en la modelación numérica tridimensional de los vertederos de excesos.

Tabla 4.3

Plan de simulaciones numéricas para el análisis de influencia del modelo de turbulencia

Simulación	Tamaño de celda de malla	Total de celdas	Modelo de Turbulencia	TLEN
-	m	u	-	m
S2	0.015	3349784	RNG	Automático
S5	0.015	3349784	k- ω	Automático
S6	0.015	3349784	k- ϵ	Automático

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

En estas simulaciones se ha escogido los modelos RANS para realizar el análisis de influencia, estos modelos trabajan con la viscosidad turbulenta por ello es necesario definir el valor de la longitud máxima de mezcla turbulenta, en este caso se ha continuado con el valor definido automáticamente con el programa puesto que, en el análisis de influencia de malla, se han registrado resultados muy aproximados y se ha logrado la estabilidad de la simulación.

4.1.2.1 Resultados de la simulación según la influencia del modelo de turbulencia

De igual forma que para el análisis de la influencia del tamaño de celda de malla, en el análisis de influencia del modelo de turbulencia la variable para realizarlo va a ser las presiones a lo largo del vertedero derecho.

El ordenador utilizado para el análisis de sensibilidad del modelo de turbulencia tiene las siguientes características: memoria RAM de 256 GB y un procesador Intel® Xeon® E5-2687W v4 3GHz de 12 núcleos. En la Tabla 4.4 se muestra el tiempo de simulación y duración de corrida de las distintas simulaciones hasta alcanzar la

estabilidad y convergencia de la solución usando el ordenador descrito anteriormente.

Tabla 4.4

Tiempo de simulación y duración de corrida de las distintas simulaciones

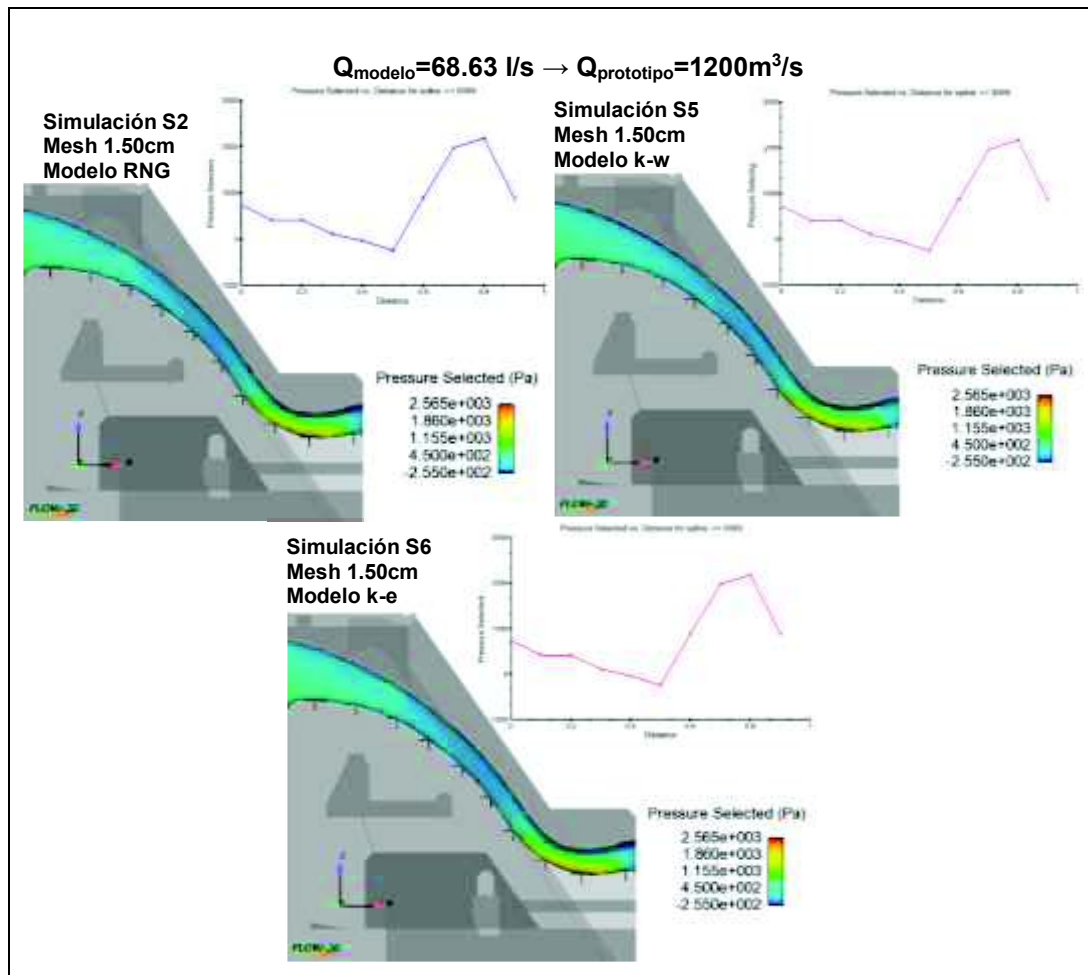
Simulación	Tiempo de simulación s	Duración de corrida h/día	Observación
S2	100	1 día 4:35 h	Simulación estable
S5	100	2 días 14:49 h	Simulación estable
S6	38	3 días 23:59 h	Simulación no estable

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

En la Figura 4.6 muestra el perfil de presiones a lo largo del vertedero derecho y la lámina de agua sobre el perfil con una simbología de colores que varía dependiendo de la presión, para un caudal de 68.63 l/s para los distintos modelos de turbulencia.

Se puede observar que, en los tres modelos de turbulencia, cualitativamente el perfil de presiones a lo largo del vertedero y el perfil de la lámina de agua sobre este tienen una escala de colores similares debido a los valores relativamente pequeños de las presiones.

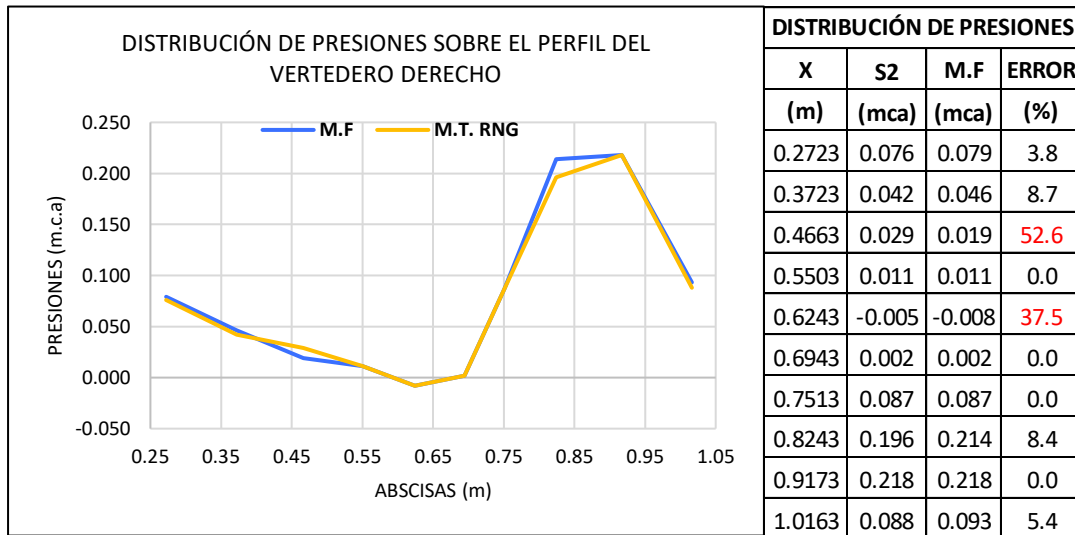
Figura 4.6 Perfil de presiones a lo largo del vertedero derecho para las simulaciones S2, S5 y S6



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

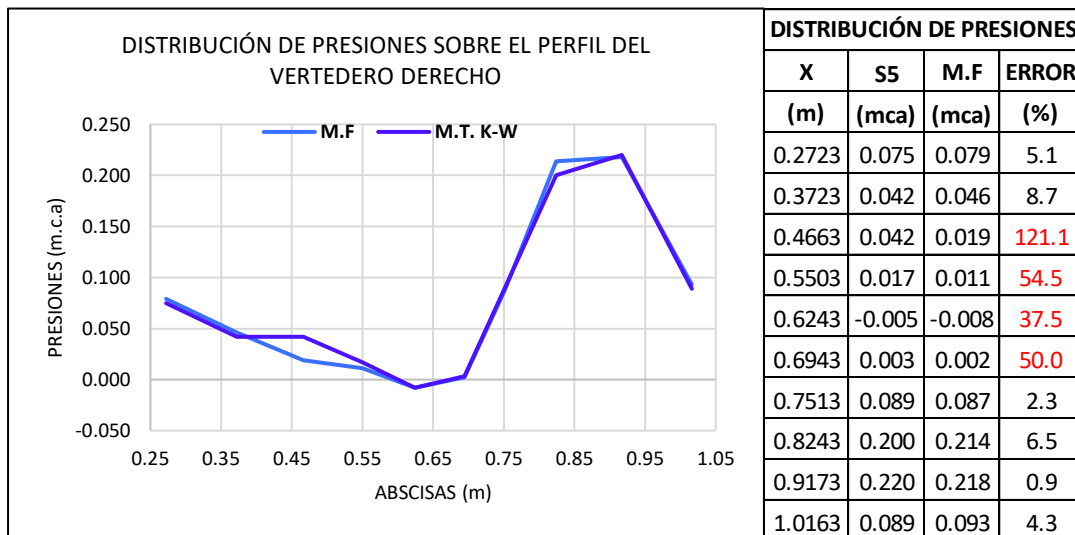
En la Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se presentan el perfil de las presiones sobre el vertedero derecho para las distintas simulaciones comparado con el perfil obtenido en el modelo físico (M.F) y se realiza un análisis cuantitativo del porcentaje (%) de error presente. En el análisis cuantitativo se ha marcado con color rojo los puntos que no cumplen con un margen de error menor al 10% respecto a las presiones del modelo físico.

Figura 4.7 Perfil de presiones de la simulación S2 con modelo de turbulencia RNG



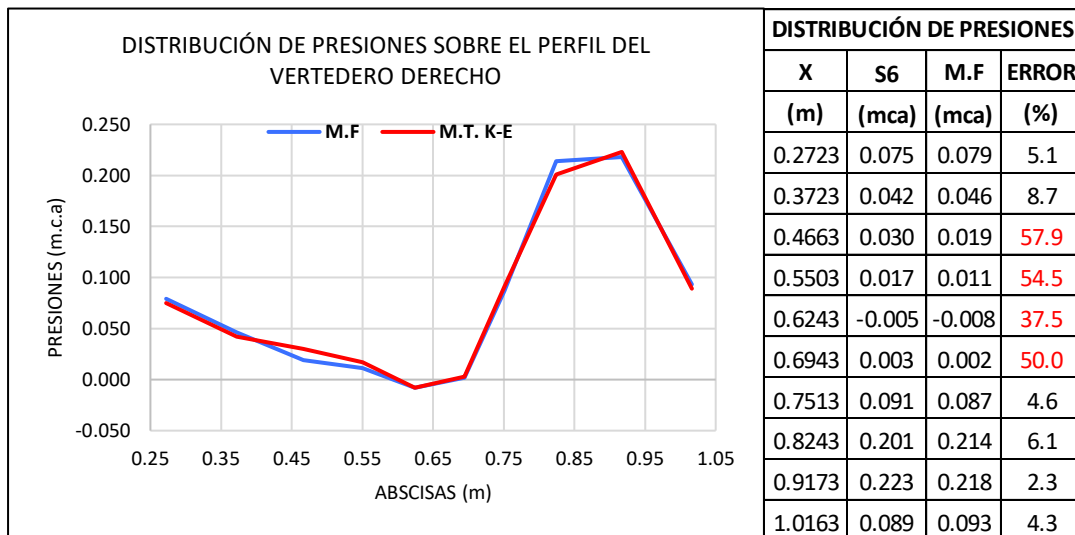
ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 4.8 Perfil de presiones de la simulación S5 con modelo de turbulencia k-w



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Figura 4.9 Perfil de presiones de la simulación S6 con modelo de turbulencia k-e



ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Se puede observar que es una constante que, en los dos primeros puntos, los resultados para los distintos modelos de turbulencia siempre se cumplen, esto se debe a que estos puntos se ubican sobre la cresta donde el flujo presente es subcrítico y donde no se desarrolla aún la capa límite turbulenta, por lo que prácticamente no se diferenciaría los resultados para los distintos modelos.

A partir del tercer punto donde se toman las presiones, los resultados de las distintas simulaciones empiezan a cambiar puesto que el flujo presente es supercrítico, y realizando una comparación de los valores porcentuales del error presentes, se determina que el modelo RNG es el más aproximado los resultados del modelo físico. El modelo k-w presenta un error mayor al 10% en cuatro de los 10 puntos, y el modelo k-e también presenta los mismos errores, pero este modelo no es recomendado para la modelación de los vertederos de excesos porque no llega a la convergencia y estabilidad.

CAPÍTULO V

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO Y COMPARACIÓN CON LOS DEL MODELO FÍSICO

5.1 RESULTADOS DE CALADOS DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS PARA CADA UNO DE LOS CAUDALES ENSAYADOS

Como se especificó en la guía metodológica (Capítulo III, Sección 3.2.6), los calados sobre la cresta, perfil, saltos en esquí y deflectores de los vertederos de excesos se determinaron en ciertos puntos de dichas estructuras, brindando resultados confiables en relación con los obtenidos en la modelación física realizada anteriormente. Por tal razón, las coordenadas de dichos puntos se mantienen y se aplican a cada simulación de los caudales ensayados. Los resultados logrados en cada una de estas simulaciones se muestran en las Tablas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10.

Tabla 5.1

Resultados de calados para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.06863 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO	VARIABLE	M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	% ERROR
	Carga sobre la cresta [cm]	12.62	12.80	1.41
	Carga sobre el perfil [cm]	4.81	5.30	9.25
	SALTO EN ESQUÍ			
	Calado esquí 1 [cm]	5.35	5.00	7.00
	Calado deflector [cm]	1.60	1.50	6.67
	Calado esquí 2 [cm]	5.94	6.00	1.00
	Calado deflector [cm]	1.80	1.70	5.88
	Calado esquí 3 [cm]	5.67	5.80	2.24

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.2

Resultados de calados para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.06863 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS IZQUIERDO	VARIABLE	M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	% ERROR
	Carga sobre la cresta [cm]	12.63	12.80	1.33
	Carga sobre el perfil [cm]	5.52	6.00	8.00
	SALTO EN ESQUÍ			
	Calado esquí 1 [cm]	5.37	5.00	7.40
	Calado deflector [cm]	1.56	1.50	4.00
	Calado esquí 2 [cm]	5.96	5.90	1.02
	Calado deflector [cm]	1.53	1.40	9.29
	Calado esquí 3 [cm]	5.42	5.50	1.45

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.3

Resultados de calados para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.05651 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO	VARIABLE	M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	% ERROR
	Carga sobre la cresta [cm]	11.14	11.40	2.28
	Carga sobre el perfil [cm]	3.67	4.00	8.25
	SALTO EN ESQUÍ			
	Calado esquí 1 [cm]	4.71	5.00	5.80
	Calado deflector [cm]	1.07	1.00	7.00
	Calado esquí 2 [cm]	5.10	5.30	3.77
	Calado deflector [cm]	1.40	1.30	7.69
	Calado esquí 3 [cm]	5.10	5.60	8.93

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.4

Resultados de calados para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.05651 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS IZQUIERDO	VARIABLE	M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	% ERROR
	Carga sobre la cresta [cm]	11.13	11.70	4.87
	Carga sobre el perfil [cm]	3.71	4.00	7.37
	SALTO EN ESQUÍ			
	Calado esquí 1 [cm]	4.68	5.00	6.40
	Calado deflector [cm]	1.22	1.20	1.67
	Calado esquí 2 [cm]	5.14	5.30	3.02
	Calado deflector [cm]	1.16	1.10	5.45
	Calado esquí 3 [cm]	5.20	5.50	5.45

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.5

Resultados de calados para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.04021 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO	VARIABLE	M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	% ERROR
	Carga sobre la cresta [cm]	9.06	8.80	2.95
	Carga sobre el perfil [cm]	3.10	3.30	6.06
	SALTO EN ESQUÍ			
	Calado esquí 1 [cm]	3.12	3.30	5.45
	Calado deflector [cm]	0.85	0.80	6.25
	Calado esquí 2 [cm]	4.60	4.30	6.98
	Calado deflector [cm]	0.84	0.80	5.00
	Calado esquí 3 [cm]	3.54	3.40	4.12

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.6

Resultados de calados para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.04021 [m^3/s]$

VERTEDEROS DE EXCESOS IZQUIERDO	VARIABLE	M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	% ERROR
	Carga sobre la cresta [cm]	9.06	8.80	2.95
	Carga sobre el perfil [cm]	3.20	3.40	5.88
	SALTO EN ESQUÍ			
	Calado esquí 1 [cm]	3.32	3.60	7.78
	Calado deflector [cm]	0.82	0.80	2.50
	Calado esquí 2 [cm]	4.25	4.00	6.25
	Calado deflector [cm]	0.85	0.80	6.25
	Calado esquí 3 [cm]	3.54	3.40	4.12

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.7

Resultados de calados para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.02826 [m^3/s]$

VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO	VARIABLE	M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	% ERROR
	Carga sobre la cresta [cm]	6.21	5.70	8.95
	Carga sobre el perfil [cm]	2.55	2.80	8.93
	SALTO EN ESQUÍ			
	Calado esquí 1 [cm]	2.90	3.20	9.38
	Calado deflector [cm]	0.65	0.60	8.33
	Calado esquí 2 [cm]	3.55	3.30	7.58
	Calado deflector [cm]	0.64	0.60	6.67
	Calado esquí 3 [cm]	2.48	2.70	8.15

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.8

Resultados de calados para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.02826 [m^3/s]$

VERTEDEROS DE EXCESOS IZQUIERDO	VARIABLE	M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	% ERROR
	Carga sobre la cresta [cm]	6.80	6.50	4.62
	Carga sobre el perfil [cm]	2.65	2.90	8.62
	SALTO EN ESQUÍ			
	Calado esquí 1 [cm]	2.53	2.60	2.69
	Calado deflector [cm]	0.65	0.60	8.33
	Calado esquí 2 [cm]	3.78	3.50	8.00
	Calado deflector [cm]	0.65	0.60	8.33
	Calado esquí 3 [cm]	2.72	3.00	9.33

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.9

Resultados de calados para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.01495 [m^3/s]$

VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO	VARIABLE	M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	% ERROR
	Carga sobre la cresta [cm]	3.89	3.60	8.06
	Carga sobre el perfil [cm]	1.72	1.90	9.47
	SALTO EN ESQUÍ			
	Calado esquí 1 [cm]	1.21	1.30	6.92
	Calado deflector [cm]	0.43	0.40	7.50
	Calado esquí 2 [cm]	1.85	1.70	8.82
	Calado deflector [cm]	0.42	0.40	5.00
	Calado esquí 3 [cm]	1.35	1.40	3.57

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.10

Resultados de calados para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.01495 [m^3/s]$

VERTEDEROS DE EXCESOS IZQUIERDO	VARIABLE	M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	% ERROR
	Carga sobre la cresta [cm]	4.50	4.70	4.26
	Carga sobre el perfil [cm]	1.31	1.40	6.59
	SALTO EN ESQUÍ			
	Calado esquí 1 [cm]	1.56	1.70	8.24
	Calado deflector [cm]	0.54	0.50	8.00
	Calado esquí 2 [cm]	1.99	2.00	0.50
	Calado deflector [cm]	0.53	0.50	6.00
	Calado esquí 3 [cm]	1.26	1.30	3.08

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Como se pudo apreciar en cada una de las tablas de resultados, ninguno sobrepasa el 10% de error comparado con el modelo físico, es por tal motivo que se los considera válidos.

5.2 RESULTADOS DE PRESIONES MEDIDAS A LO LARGO DEL PERFIL DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS PARA CADA UNO DE LOS CAUDALES ENSAYADOS

Para determinar las presiones en los 10 puntos situados a lo largo del perfil de los vertederos de excesos, fue necesaria la realización de un elemento “Spline” para cada vertedero, la cual es una polilínea que une dichos puntos. Este procedimiento se lo realizó en el Capítulo III (Metodología-Sección 3.2.7).

Una vez realizado esto, se empleó el comando “Probe” seleccionando el elemento “Spline” correspondiente al vertedero en el cual se pretenden obtener los resultados para finalmente seleccionar la variable a calcular: “Pressure”.

Como se observó que los resultados para el caudal descrito en la metodología ($Q=0.06863 \text{ m}^3/\text{s}$) eran confiables en contraste con los del modelo físico, los mismos elementos “Spline” se emplearon para las simulaciones de cada caudal ensayado.

Tabla 5.11

Resultados de presiones para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.06863 \text{ [m}^3/\text{s]}$

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO	PUNTOS	LECTURAS PIEZOMÉTRICAS		% ERROR
		M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	
		1	0.0860	
2	0.0460	0.0460	0.00	
3	0.0200	0.0190	5.26	
4	0.0110	0.0110	0.00	
5	-0.0080	-0.0080	0.00	
6	0.0019	0.0020	5.00	
7	0.0950	0.0870	9.20	
8	0.2240	0.2140	4.67	
9	0.2080	0.2180	4.59	
10	0.0850	0.0930	8.60	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.12

Resultados de presiones para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.06863 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS IZQUIERDO	PUNTOS	LECTURAS PIEZOMÉTRICAS		% ERROR
		M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	
	1	0.0860	0.0820	4.88
2	0.0460	0.0490	6.12	
3	0.0220	0.0220	0.00	
4	0.0032	0.0030	6.67	
5	-0.0110	-0.0110	0.00	
6	-0.0330	-0.0320	3.13	
7	0.0780	0.0820	4.88	
8	0.2160	0.2070	4.35	
9	0.2040	0.2140	4.67	
10	0.1000	0.1040	3.85	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.13

Resultados de presiones para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.05651 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO	PUNTOS	LECTURAS PIEZOMÉTRICAS		% ERROR
		M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	
	1	0.0770	0.0760	1.32
2	0.0420	0.0420	0.00	
3	0.0170	0.0160	6.25	
4	0.0120	0.0130	7.69	
5	-0.0060	-0.0060	0.00	
6	0.0021	0.0020	5.00	
7	0.0720	0.0710	1.41	
8	0.2040	0.2060	0.97	
9	0.2060	0.1910	7.85	
10	0.0880	0.0840	4.76	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.14

Resultados de presiones para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.05651 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS IZQUIERDO	PUNTOS	LECTURAS PIEZOMÉTRICAS		% ERROR
		M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	
	1	0.0770	0.0760	1.32
2	0.0420	0.0450	6.67	
3	0.0202	0.0210	3.81	
4	0.0065	0.0060	8.33	
5	-0.0040	-0.0040	0.00	
6	-0.0300	-0.0320	6.25	
7	0.0660	0.0650	1.54	
8	0.1680	0.1770	5.08	
9	0.1750	0.1890	7.41	
10	0.0800	0.0830	3.61	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.15

Resultados de presiones para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.04021 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS IZQUIERDO	PUNTOS	LECTURAS PIEZOMÉTRICAS		% ERROR
		M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	
		1	0.070	
2	0.033	0.034	2.94	
3	0.015	0.015	1.33	
4	0.008	0.008	5.00	
5	-0.004	-0.004	0.00	
6	-0.003	-0.003	0.00	
7	0.034	0.036	5.56	
8	0.127	0.118	7.63	
9	0.120	0.132	9.09	
10	0.075	0.069	8.70	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.16

Resultados de presiones para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.04021 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS IZQUIERDO	PUNTOS	LECTURAS PIEZOMÉTRICAS		% ERROR
		M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	
		1	0.0700	
2	0.0340	0.0370	8.11	
3	0.0152	0.0160	5.00	
4	0.0054	0.0050	8.00	
5	-0.0040	-0.0040	0.00	
6	-0.0265	-0.0290	8.62	
7	0.0335	0.0320	4.69	
8	0.1200	0.1110	8.11	
9	0.1180	0.1280	7.81	
10	0.0830	0.0760	9.21	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.17

Resultados de presiones para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.02826 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO	PUNTOS	LECTURAS PIEZOMÉTRICAS		% ERROR
		M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	
		1	0.0550	
2	0.0250	0.0270	7.41	
3	0.0128	0.0140	8.57	
4	0.0055	0.0060	8.33	
5	-0.0030	-0.0030	0.00	
6	0.0010	0.0010	0.00	
7	0.0288	0.0270	6.67	
8	0.0874	0.0860	1.63	
9	0.1080	0.1010	6.93	
10	0.0530	0.0580	8.62	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.18

Resultados de presiones para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.02826 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO	PUNTOS	LECTURAS PIEZOMÉTRICAS		% ERROR
		M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	
		1	0.0550	
2	0.0300	0.0300	0.00	
3	0.0128	0.0140	8.57	
4	0.0051	0.0050	2.00	
5	0.0000	0.0000	0.00	
6	-0.0180	-0.0180	0.00	
7	0.0280	0.0260	7.69	
8	0.0780	0.0710	9.86	
9	0.0910	0.0990	8.08	
10	0.0650	0.0600	8.33	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.19

Resultados de presiones para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.01495 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO	PUNTOS	LECTURAS PIEZOMÉTRICAS		% ERROR
		M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	
		1	0.0370	
2	0.0200	0.0190	5.26	
3	0.0074	0.0080	7.50	
4	0.0021	0.0020	5.00	
5	-0.0040	-0.0040	0.00	
6	-0.0030	-0.0030	0.00	
7	0.0185	0.0200	7.50	
8	0.0350	0.0380	7.89	
9	0.0490	0.0450	8.89	
10	0.0400	0.0370	8.11	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.20

Resultados de presiones para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.01495 [m^3/s]$

VERTEDERO DE EXCESOS IZQUIERDO	PUNTOS	LECTURAS PIEZOMÉTRICAS		% ERROR
		M. NUMÉRICO	M. FÍSICO	
		1	0.0370	
2	0.0163	0.0180	9.44	
3	0.0073	0.0080	8.75	
4	0.0021	0.0020	5.00	
5	0.0000	0.0000	0.00	
6	-0.0180	-0.0180	0.00	
7	-0.0030	-0.0030	0.00	
8	0.0190	0.0180	5.56	
9	0.0480	0.0440	9.09	
10	0.0435	0.0400	8.75	

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Como se observa en cada una de las tablas de resultados de presiones, ninguno sobrepasa el 10% de error comparado con el modelo físico, es por tal motivo que se los considera válidos.

5.3 RESULTADOS DE LOS ALCANCES MÁXIMOS DE LOS CHORROS DE DESCARGA PROVENIENTES DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS PARA CADA UNO DE LOS CAUDALES ENSAYADOS

Los alcances máximos de los chorros provenientes de los vertederos de excesos de la presa Toachi se exponen en las Tablas 5.21 y 5.22. En la Tabla 5.21, se hace una comparación de los resultados del modelo numérico con los del modelo físico, y en la Tabla 5.22, se compara los resultados alcanzados en el modelo numérico y la fórmula empírica de Elevatorsky.

Tabla 5.21

Alcance máximo de los chorros de descarga provenientes de los vertederos de excesos para cada caudal ensayado. Modelo Físico y Modelo Numérico

Caudal [m ³ /s]	Alcance Máximo [m]		% ERROR
	Modelo Físico	Modelo Numérico	
0.06863	1.240	1.120	9.68
0.05651	1.200	1.100	8.33
0.04021	1.095	1.018	7.03
0.02826	1.040	1.020	1.92
0.01496	0.970	0.880	9.28

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

De la tabla 5.21 se concluye que existe una semejanza entre los resultados obtenidos en las dos metodologías de modelación, dando un error menor al 10%, por ende, se considera válidos los resultados.

Para determinar el alcance máximo de los chorros se ha empleado la relación de Elevatorsky. Su expresión viene dada por:

$$L_t = 1.9 * h * \text{sen} (2\theta) \quad (5.1)$$

Donde:

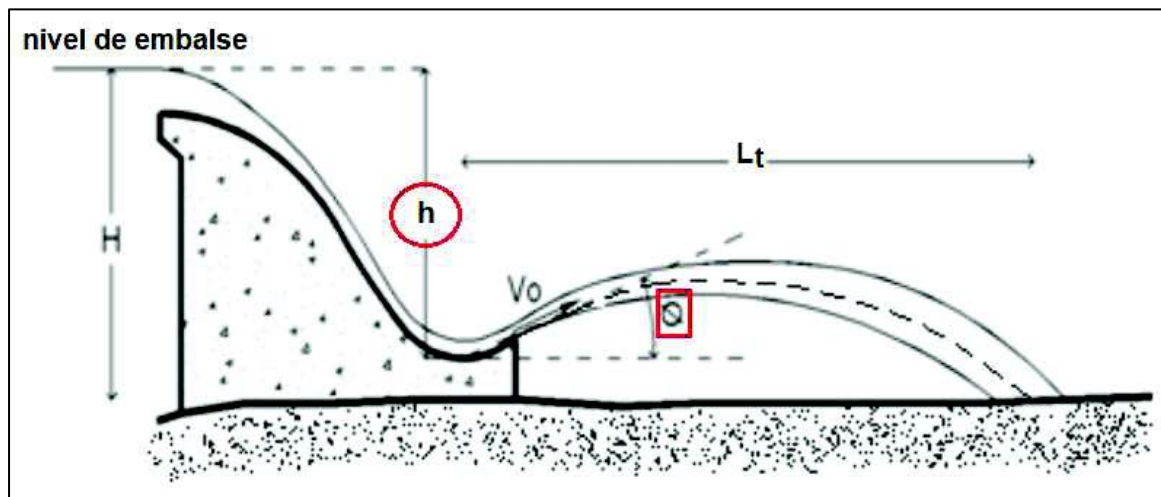
L_t : Longitud de la trayectoria del chorro [m]

h : Diferencia entre el nivel máximo en el embalse y el punto más bajo en la cubeta [m]

ϕ : Ángulo de salida del chorro, en este caso: 37°

La Figura 5.1 muestra las variables tomadas en cuenta en la ecuación de Elevatorsky:

Figura 5.1 Nomenclatura empleada en la literatura técnica para la evaluación del alcance de los chorros de descarga



(Rodríguez, 2013)/MODIFICADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.22

Alcance máximo de los chorros de descarga provenientes de los vertederos de excesos para cada caudal ensayado. Fórmula de Elevatorsky y Modelo Numérico

Caudal [m ³ /s]	Alcance Máximo [m]		% ERROR
	Teórico (Elevatorsky)	Modelo Numérico	
0.06863	1.010	1.120	10.89
0.05651	0.982	1.100	12.02
0.04021	0.932	1.018	9.23
0.02826	0.890	1.020	14.61
0.01496	0.830	0.880	6.02

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

En la tabla 5.22 se puede observar que el error entre los resultados logrados en la modelación numérica y los conseguidos por medio de la evaluación teórica de Elevatorsky es mayor al 10%, esto debido a que en dicha expresión se considera un lanzamiento parabólico de la partícula, cuando en realidad existen varios

factores que afectan el alcance de los chorros de agua, como son la fricción agua-concreto, la entrada de aire en la lámina de agua sobre la presa, la fricción agua-aire después del lanzamiento del chorro, y la consideración errónea de partícula y no como masa de agua, entre otros.

5.4 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS PARA DISTINTAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para determinar la seguridad y eficiencia hidráulica de los vertederos de excesos de la presa Toachi es necesario el cálculo del índice de cavitación; por lo que a continuación, se detalla el procedimiento para determinar dicho índice.

Se toma como referencia la expresión descrita en el Capítulo II (Ecuación 2.4)

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{\rho V_0^2}{2}}$$

Donde: σ : índice de cavitación, p_0 es la presión absoluta (Pa), p_v es la presión de vaporización (Pa), V_0 es la velocidad del flujo (m/s) y ρ es la densidad del fluido (kg/m³).

La fórmula anteriormente citada se empleará para determinar el índice de cavitación para cada uno de los caudales ensayados y para cada vertedero de excesos. Tales resultados se indican en las Tablas:

Datos iniciales:

- Densidad: 1000 [kg/m³]
- Presión de vaporización: 2339.30 [Pa]

Los datos de velocidad fueron obtenidos con el mismo procedimiento realizado para encontrar las presiones en los 10 puntos, con la variación de que al final se selecciona la variable "Velocity".

Tabla 5.23

Índice de cavitación para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.06863$ [m³/s]

Presiones [m.c.a]		Velocidad [m ³ /s]		Presión Absoluta [Pa]	Índice de Cavitación
Q= 0.06863 [m ³ /s]	Q= 1213.16 [m ³ /s]	Q= 0.06863 [m ³ /s]	Q= 1213.16 [m ³ /s]		
Modelo Numérico	Prototipo	Modelo Numérico	Prototipo	Prototipo	
0.0860	4.300	0.297	2.100	143467.339	63.997
0.0460	2.300	1.309	9.256	123854.579	2.837
0.0200	1.000	1.562	11.045	111106.285	1.783
0.0110	0.550	1.773	12.537	106693.414	1.328
-0.0080	-0.400	2.437	17.232	97377.353	0.640
0.0019	0.095	2.694	19.049	102231.512	0.551
0.0950	4.750	1.327	9.381	147880.210	3.308
0.2240	11.200	2.270	16.048	211131.361	1.621
0.2080	10.400	2.757	19.498	203286.257	1.057
0.0850	4.250	1.473	10.414	142977.020	2.593

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.24

Índice de cavitación para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.06863$ [m³/s]

Presiones [m.c.a]		Velocidad [m ³ /s]		Presión Absoluta [Pa]	Índice de Cavitación
Q= 0.06863 [m ³ /s]	Q= 1213.16 [m ³ /s]	Q= 0.06863 [m ³ /s]	Q= 1213.16 [m ³ /s]		
Modelo Numérico	Prototipo	Modelo Numérico	Prototipo	Prototipo	
0.0860	4.300	0.298	2.107	143467.339	63.568
0.0460	2.300	1.312	9.277	123854.579	2.824
0.0220	1.100	1.562	11.045	112086.923	1.799
0.0032	0.160	1.774	12.544	102868.926	1.278
-0.0110	-0.550	2.439	17.246	95906.396	0.629
-0.0330	-1.650	2.696	19.064	85119.378	0.456
0.0780	3.900	1.327	9.383	139544.787	3.117
0.2160	10.800	2.276	16.094	207208.809	1.582
0.2040	10.200	2.759	19.509	201324.981	1.046
0.1000	5.000	1.475	10.430	150331.805	2.721

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.25

Índice de cavitación para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.05651$ [m³/s]

Presiones [m.c.a]		Velocidad [m ³ /s]		Presión Absoluta [Pa]	Índice de Cavitación
Q= 0.05651 [m ³ /s]	Q= 998.97 [m ³ /s]	Q= 0.05651 [m ³ /s]	Q= 998.97 [m ³ /s]		
Modelo Numérico	Prototipo	Modelo Numérico	Prototipo	Prototipo	
0.0770	3.850	0.355	2.510	139054.468	43.393
0.0420	2.100	1.281	9.058	121893.303	2.914
0.0170	0.850	1.509	10.670	109635.328	1.885
0.0120	0.600	1.722	12.176	107183.733	1.414
-0.0060	-0.300	2.386	16.872	98357.991	0.675
0.0021	0.105	2.661	18.816	102329.575	0.565
0.0720	3.600	1.357	9.595	136602.873	2.916
0.2040	10.200	2.322	16.419	201324.981	1.476
0.2060	10.300	2.773	19.608	202305.619	1.040
0.0880	4.400	1.449	10.246	144447.977	2.707

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.26

Índice de cavitación para el vertedero de excesos izquierdo. $Q = 0.05651 [m^3/s]$

Presiones [m.c.a]		Velocidad [m ³ /s]		Presión Absoluta [Pa]	Índice de Cavitación
Q= 0.05651 [m ³ /s]	Q= 998.97 [m ³ /s]	Q= 0.05651 [m ³ /s]	Q= 998.97 [m ³ /s]		
Modelo Numérico	Prototipo	Modelo Numérico	Prototipo	Prototipo	
0.0770	3.850	0.359	2.539	139054.468	42.431
0.0420	2.100	1.285	9.086	121893.303	2.896
0.0202	1.010	1.510	10.677	111204.349	1.910
0.0065	0.325	1.725	12.198	104486.979	1.373
-0.0040	-0.200	2.388	16.886	99338.629	0.680
-0.0300	-1.500	2.669	18.873	86590.335	0.473
0.0660	3.300	1.361	9.624	133660.959	2.836
0.1680	8.400	2.326	16.447	183673.497	1.341
0.1750	8.750	2.769	19.580	187105.730	0.964
0.0800	4.000	1.451	10.260	140525.425	2.625

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.27

Índice de cavitación para el vertedero de excesos derecho. $Q = 0.04021 [m^3/s]$

Presiones [m.c.a]		Velocidad [m ³ /s]		Presión Absoluta [Pa]	Índice de Cavitación
Q= 0.04021 [m ³ /s]	Q= 710.85 [m ³ /s]	Q= 0.04021 [m ³ /s]	Q= 710.85 [m ³ /s]		
Modelo Numérico	Prototipo	Modelo Numérico	Prototipo	Prototipo	
0.0700	3.500	0.443	3.132	135622.235	27.166
0.0330	1.650	1.206	8.528	117480.432	3.167
0.0150	0.750	1.419	10.034	108654.690	2.112
0.0080	0.400	1.648	11.653	105222.457	1.515
-0.0040	-0.200	2.311	16.341	99338.629	0.726
-0.0030	-0.150	2.616	18.498	99828.948	0.570
0.0340	1.700	1.383	9.779	117970.751	2.418
0.1270	6.350	2.412	17.055	163570.418	1.109
0.1200	6.000	2.840	20.082	160138.185	0.783
0.0750	3.750	1.428	10.097	138073.830	2.663

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.28

Índice de cavitación para el vertedero de excesos izquierdo. $Q = 0.04021 [m^3/s]$

Presiones [m.c.a]		Velocidad [m ³ /s]		Presión Absoluta [Pa]	Índice de Cavitación
Q= 0.04021 [m ³ /s]	Q= 710.85 [m ³ /s]	Q= 0.04021 [m ³ /s]	Q= 710.85 [m ³ /s]		
Modelo Numérico	Prototipo	Modelo Numérico	Prototipo	Prototipo	
0.0700	3.500	0.446	3.154	135622.235	26.802
0.0340	1.700	1.207	8.535	117970.751	3.175
0.0152	0.760	1.418	10.027	108752.754	2.117
0.0054	0.270	1.649	11.660	103947.628	1.495
-0.0040	-0.200	2.309	16.327	99338.629	0.728
-0.0265	-1.325	2.614	18.484	88306.452	0.503
0.0335	1.675	1.381	9.765	117725.592	2.420
0.1200	6.000	2.415	17.077	160138.185	1.082
0.1180	5.900	2.834	20.039	159157.547	0.781
0.0830	4.150	1.430	10.112	141996.382	2.732

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.29

Índice de cavitación para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.02826 [m^3/s]$

Presiones [m.c.a]		Velocidad [m ³ /s]		Presión Absoluta [Pa]	Índice de Cavitación
Q= 0.02826 [m ³ /s]	Q= 499.57 [m ³ /s]	Q= 0.02826 [m ³ /s]	Q= 499.57 [m ³ /s]		
Modelo Numérico	Prototipo	Modelo Numérico	Prototipo	Prototipo	
0.0550	2.750	0.469	3.316	128267.450	22.900
0.0250	1.250	1.134	8.019	113557.880	3.459
0.0128	0.640	1.338	9.461	107575.989	2.351
0.0055	0.275	1.589	11.236	103996.660	1.610
-0.0030	-0.150	2.262	15.995	99828.948	0.762
0.0010	0.050	2.578	18.229	101790.224	0.599
0.0288	1.440	1.401	9.907	115421.093	2.304
0.0874	4.370	2.470	17.466	144153.786	0.930
0.1080	5.400	2.878	20.351	154254.357	0.734
0.0530	2.650	1.405	9.935	127286.812	2.532

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.30

Índice de cavitación para el vertedero de excesos izquierdo. $Q= 0.02826 [m^3/s]$

Presiones [m.c.a]		Velocidad [m ³ /s]		Presión Absoluta [Pa]	Índice de Cavitación
Q= 0.02826 [m ³ /s]	Q= 499.57 [m ³ /s]	Q= 0.02826 [m ³ /s]	Q= 499.57 [m ³ /s]		
Modelo Numérico	Prototipo	Modelo Numérico	Prototipo	Prototipo	
0.0550	2.750	0.470	3.323	128267.450	22.803
0.0300	1.500	1.135	8.026	116009.475	3.530
0.0128	0.640	1.338	9.461	107575.989	2.351
0.0051	0.255	1.588	11.229	103800.532	1.609
0.0000	0.000	2.259	15.974	101299.905	0.776
-0.0180	-0.900	2.579	18.236	92474.163	0.542
0.0280	1.400	1.400	9.899	115028.837	2.300
0.0780	3.900	2.469	17.458	139544.787	0.900
0.0910	4.550	2.880	20.365	145918.934	0.692
0.0650	3.250	1.406	9.942	133170.640	2.647

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.31

Índice de cavitación para el vertedero de excesos derecho. $Q= 0.01495 [m^3/s]$

Presiones [m.c.a]		Velocidad [m ³ /s]		Presión Absoluta [Pa]	Índice de Cavitación
Q= 0.01495 [m ³ /s]	Q= 264.35 [m ³ /s]	Q= 0.01495 [m ³ /s]	Q= 264.35 [m ³ /s]		
Modelo Numérico	Prototipo	Modelo Numérico	Prototipo	Prototipo	
0.0370	1.850	0.499	3.528	119441.708	18.812
0.0200	1.000	1.010	7.142	111106.285	4.265
0.0074	0.370	1.226	8.669	104928.266	2.730
0.0021	0.105	1.511	10.684	102329.575	1.752
-0.0040	-0.200	2.227	15.747	99338.629	0.782
-0.0030	-0.150	2.647	18.717	99828.948	0.557
0.0185	0.925	1.485	10.501	110370.807	1.960
0.0350	1.750	2.585	18.279	118461.070	0.695
0.0490	2.450	2.964	20.959	125325.536	0.560
0.0400	2.000	1.418	10.027	120912.665	2.359

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

Tabla 5.32

Índice de cavitación para el vertedero de excesos izquierdo. $Q = 0.01495$ [m³/s]

Presiones [m.c.a]		Velocidad [m ³ /s]		Presión Absoluta [Pa]	Índice de Cavitación
Q= 0.01495 [m ³ /s]	Q= 264.35 [m ³ /s]	Q= 0.01495 [m ³ /s]	Q= 264.35 [m ³ /s]		
Modelo Numérico	Prototipo	Modelo Numérico	Prototipo	Prototipo	
0.0370	1.850	0.499	3.528	119441.708	18.812
0.0163	0.815	1.010	7.142	109292.105	4.194
0.0073	0.365	1.225	8.662	104879.234	2.733
0.0021	0.105	1.511	10.684	102329.575	1.752
0.0000	0.000	2.226	15.740	101299.905	0.799
-0.0180	-0.900	2.646	18.710	92474.163	0.515
-0.0030	-0.150	1.485	10.501	99828.948	1.768
0.0190	0.950	2.591	18.321	110615.966	0.645
0.0480	2.400	2.933	20.739	124835.217	0.570
0.0435	2.175	1.417	10.020	122628.782	2.396

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

En las tablas anteriores se observa que el número de cavitación para todos los caudales y en todos los puntos a lo largo de los vertederos de excesos derecho e izquierdo, siempre son mayores a 0.2 que es el valor de cavitación incipiente, por lo tanto, los vertederos de excesos no están sujetos a sufrir riesgos por cavitación.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Un modelo puede brindar información tanto cuantitativa como cualitativa, como es el caso del presente proyecto, en el cual los resultados del alcance de los chorros provenientes de la descarga de los vertederos de excesos solamente se pueden determinar de manera cualitativa, es decir, el alcance se lo aprecia de manera visual en el programa FLOWSIGHT.
- Para que un modelo nos proporcione resultados útiles y confiables, es indispensable haberle proporcionado un gran número de datos de excelente calidad, en este proyecto, algunos de estos datos son: dimensiones exactas de la Presa Toachi y de sus obras complementarias además las coordenadas del cimacio de los vertederos de excesos para la adecuada construcción del sólido, valores de caudales ensayados y su nivel de ingreso idénticos al del modelo físico para establecer las condiciones iniciales y de contorno.
- El flujo sobre estructuras hidráulicas artificiales se puede describir solamente por medio de expresiones matemáticas complejas, y estas a su vez demandan técnicas numéricas avanzadas para su solución, es allí donde la modelación numérica desempeña un rol importante al discretizar el dominio computacional y aproximar las ecuaciones en derivadas parciales a ecuaciones algebraicas.
- La modelación numérica entrega resultados para todo el dominio computacional, además cuenta con la capacidad de analizar un gran número de variables del flujo como viscosidad dinámica, número de Froude, elevación de la superficie libre, energía cinética turbulenta, carga hidráulica, velocidad, presión y calados, entre otros.
- Los principales impedimentos para que la modelación numérica en tres dimensiones sustituya a la modelación física están dados por el limitado conocimiento de las leyes que rigen los fenómenos a investigarse además

de la potencia de cálculo exigida en el ordenador y la licencia original del programa FLOW-3D, los cuáles solo están disponibles en centros de investigación, por lo que su empleo se encuentra limitado a ciertos usuarios, ya que el costo aproximado de un ordenador similar al utilizado en la presente investigación (WORKSTATION) junto a una licencia académica es de aproximadamente 30 000 dólares.

- El primer paso y el de mayor importancia en la solución de un código de la CFD es la elaboración del mallado del dominio computacional, en este se definen la distribución y número de bloques de malla conjuntamente con el tamaño de las celdas en las que se calculan las variables del flujo, en el proyecto esta etapa tomó alrededor de 45 días.
- En una simulación se debe llegar a un equilibrio entre el tamaño de celda empleado y la duración de cálculo que genere resultados similares a los obtenidos mediante otras metodologías, menor al 10%, por tal razón en la presente investigación se utilizó un tamaño de celda de 1.00 cm con un total de 4.890.756 unidades de celdas, para las cuáles la duración de una corrida fue de aproximadamente 4 días para completar un tiempo de simulación de 100 s.
- En ciertos casos la elaboración del mallado del dominio computacional conlleva más tiempo que el requerido en la simulación, como sucedió en este proyecto en el que la elaboración del mallado tomó 45 días, a diferencia de los 20 días requeridos en la simulación de los 5 caudales.
- Los alcances máximos de los chorros de descarga provenientes de los vertederos de excesos para cada caudal ensayado se determinaron de manera cualitativa y su error absoluto máximo obtenido al ser comparados con resultados del modelo físico es 9.68% (ver Tabla 5.21), siendo menor al error admisible (10%), por lo que se consideran válidos los resultados obtenidos en la modelación numérica.
- El error absoluto máximo de los resultados del modelo numérico comparados con los del modelo físico respecto a presiones (9.86 %) y calados (9.47%) tienen un error menor al 10%, por lo cual el modelo numérico representa de manera conveniente y apropiada la dinámica del flujo.

- El número de núcleos de cálculo de la computadora es la característica más importante al momento de llevar a cabo simulaciones tridimensionales en FLOW-3D, ya que, a mayor número de núcleos, el tiempo de simulación será menor. Cabe destacar que no es necesario una memoria RAM excesiva ni una tarjeta gráfica de alta calidad para llevar a cabo modelaciones en dicho paquete computacional.
- Para disminuir el tiempo de simulación es necesario añadir elementos “domain removing” en lugares donde no sea necesaria la solución de las ecuaciones y por ende tampoco sus resultados. La implementación de estos elementos al modelo numérico redujo el tiempo de simulación en un 40%.
- La alternativa predeterminada de los motores de cálculo del paquete computacional FLOW-3D es un esquema explícito, lo que significa que debe cumplir el criterio de estabilidad empleando la limitación de intervalo de tiempo, es decir un menor tamaño de celda conlleva a un intervalo de tiempo menor. Esto se verifica al comparar las simulaciones S4 (tamaño de celda de 0.7 cm) y S3 (tamaño de celda de 1 cm), en las cuales el intervalo de tiempo es del orden de 10^{-7} y 10^{-5} respectivamente.
- El programa FLOW-3D permite únicamente un mallado estructurado, el cual es más eficiente cuando se realizan el menor número de bloques de malla con continuidad de sus planos y un tamaño adecuado de celdas que cumplan con las relaciones de adyacencia (menor a 1.25) y aspecto (menor a 3.0), además de la relación de adyacencia interbloques (menor a 2.0), dichos criterios se cumplan en todas las simulaciones de la presente investigación.
- En un principio se cree que entre más fino el tamaño de celda de malla, los resultados de la simulación numérica van a ser más próximos a la realidad, comparando la Figura 4.3 (tamaño de celda de malla de 1.5 cm) y la Figura 4.5 (tamaño de celda de malla de 0.7 cm) se comprueba que esto no se cumple siempre, puesto que mejores resultados se obtienen con el mallado más grueso de 1.5 cm respecto a las presiones sobre el vertedero derecho.
- Debido a que las condiciones de contorno definen el problema y la forma en que el sistema computacional determina la convergencia en la presente investigación se han impuesto las siguientes condiciones de borde: caudal

de entrada (volume flow rate), salida de caudal (outflow), simetría (simmetry), pared (wall) y presión específica (specified pressure), esto con el fin de reflejar las condiciones reales del flujo.

- En la activación de modelos físicos para la simulación de vertederos de excesos de un modelo físico a escala en el programa FLOW-3D es necesario activar la fuerza de gravedad, el flujo viscoso y modelo de turbulencia, la evaluación de la densidad del fluido y el modelo de entrada de aire, no se ha visto necesario activar el hinchamiento de flujo ya que no se presentan las características de un flujo con entrada de aire, ya que cualitativamente el agua de la modelación física no es blanca y cuantitativamente los resultados de calados presentados en el Capítulo V son muy cercanos a los de la modelación física.
- Una modelación ideal se la realizaría con una DNS porque resuelve todo el espectro de las fluctuaciones turbulentas tanto temporales como espaciales, pero debido a las limitaciones de los ordenadores de la actualidad y el tiempo que lleva, esto no es posible, para la modelación de los vertederos de excesos comparando resultados de las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 el mejor modelo de turbulencia para modelar estos fenómenos del flujo sobre vertederos es el modelo RNG ya que su aplicación resulta adecuada en flujos transitoriamente turbulentos y flujos en curvas.
- En la literatura se habla de que el modelo k- ϵ es el modelo más simplificado dentro de RANS, y por ello se cree que es útil en la simulación de la mayoría de los fenómenos, pero en la Tabla 4.4 se muestra que la simulación S6 correspondiente a este modelo no es una simulación estable y no llega a la convergencia en la simulación de vertederos de excesos tipo cimacio.
- El diseño de los vertederos de excesos de la presa Toachi presenta un buen comportamiento hidráulico, ya que en la simulación numérica no se presentaron problemas de desbordes de la lámina de agua, además el análisis de índice de cavitación nos indica que no existe el riesgo a sufrir daños por efectos de cavitación puesto que el índice de cavitación máximo y mínimo es de 64 y 0.46 respectivamente, que son mayores al umbral mínimo de 0.2 establecido como el valor de cavitación incipiente.

6.2 RECOMENDACIONES

- En la actualidad se puede recomendar que tanto la modelación física como la numérica se complementen entre sí, con el objetivo de poder reproducir a detalle el comportamiento de un fenómeno determinado que tenga relación con el movimiento de fluidos.
- Las simulaciones tridimensionales son muy costosas computacionalmente, por lo que, para realizar modelaciones semejantes al tema, es recomendable contar con ordenadores de similares o superiores características al utilizado en la investigación, memoria RAM de 256 GB y un procesador Intel® Xeon® E5-2687W v4 3GHz de 12 núcleos, es así que para llevar a cabo la simulación de los diferentes escenarios se requiere un tiempo de 1000 horas.
- Se recomienda continuar con investigaciones referentes al tema, es decir, realizar la modelación numérica de las demás obras complementarias de la Presa Toachi, de esta manera se podrá corroborar los resultados obtenidos mediante las investigaciones experimentales.
- Es recomendable siempre realizar un chequeo previo del modelo numérico a simularse, ya que se puede apreciar los errores que se pueden generar en el transcurso de la modelación, así como también observar si la calidad del mallado es el adecuado, y de ser necesario aplicar las debidas correcciones.
- El dibujo en tres dimensiones de la presa o cualquier otra estructura a ser modelada debe dibujarse con alto grado de detalle en formato de objeto sólido en el programa AutoCAD para posteriormente ser transformado a estereolitografía (. stl), para que sea compatible con el programa FLOW-3D y así los resultados obtenidos en el dominio discretizado sean confiables.
- El usuario al tratar de mallar las áreas de interés, por lo general crea una gran cantidad de bloques de malla, se recomienda crear el menor número de bloques de malla, porque la solución se interpola al pasar de un bloque a otro generando errores, y utilizar elementos “domaing removing” para evitar que el programa solucione áreas innecesarias.
- Se recomienda la continuidad de celdas entre bloques de malla, una buena simetría del mallado disminuye errores que se presentan en el programa,

como el error de f-packing que conduce a un paso de tiempo muy pequeño, lo que conlleva a que la simulación tome más tiempo y en ocasiones la solución no converja.

- El programa FLOW-3D permite observar el paso del tiempo conforme avanza la simulación, se recomienda detener la simulación cuando esta toma valores del orden de 10^{-6} , ya que al caer en este valor existe la posibilidad que la solución no converja o tome demasiado tiempo.
- Se recomienda que el tiempo de simulación sea el necesario para que se cumpla la conservación de masa, es decir, que el caudal de entrada sea semejante al caudal de salida.

BIBLIOGRAFÍA

- 3D CAD PORTAL. (2018). 3D CAD PORTAL. Obtenido de 3D CAD PORTAL: <http://www.3dcadportal.com/magmasoft.html>
- Arreguín, F. (2000). *Obras de excedencia*. (J. Hernández, V. Alcocer, & A. Requejo, Edits.) México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Aulestia, C. (2017). *Modelación numérica en tres dimensiones de flujo en las compuertas de la captación del proyecto Toachi-Pilatón aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD)*. Tesis previa a la obtención del grado de magíster en recursos hídricos, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador.
- Badano, N., & Menéndez, Á. (2014). *Evaluación de metodologías para la modelación Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) de la capa límite en conductos circulares*. Buenos Aires, Argentina.
- Balairón, L., López, D., Morán, R., Ramos, T., & Toledo, M. (2014). *Avances en investigación aplicada mediante modelación física y numérica en el diseño de la ingeniería de presas*. En *Ingeniería del Agua* (págs. 55-66). Madrid, España: UPV, FFIA.
- Benayas, R. (20 de Noviembre de 2014). *Grupo TYC GIS Formación*. Obtenido de *Cursos Gis.com*: <https://www.cursosgis.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>
- Caicedo, B., Velasquez, R., & Monroy, J. (2004). *Modelación física en centrífuga*. Tesis, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Capote, J., Alvear, D., Abreu, O., Lázaro, M., & Espina, P. (2008). *Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones de incendios*. En *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería* (Vol. III, págs. 227-234). Cantabria, España.
- Carrillo, J. (2014). *Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de ingeniería Civil, Cartagena, España.
- Casa, E. (2016). *Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD)*. Programa FLOW-3D. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador.

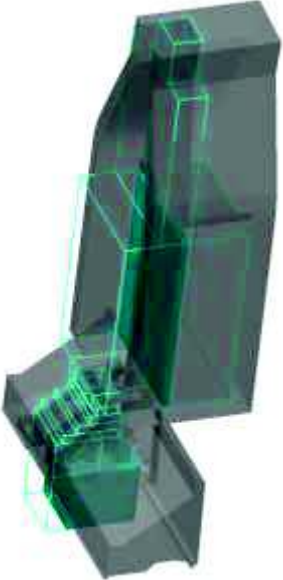

- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Generación de la malla e independencia de la malla*. En P. Roig (Ed.), *Mecánica de Fluidos* (V. Campos, Trad., Primera ed., págs. 821-828). México D.F, México: Mc Graw Hill.
- Chanson, H. (2002). *Hidráulica de Flujo en Canales Abiertos*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. (M. Suárez, Ed.) Bogotá: McGraw-Hill.
- CIERHI, E. (2013). *Presa Toachi y obras complementarias, Verificación experimental del funcionamiento con la versión final de la geometría. Informe técnico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito*.
- Díaz, A. (2000). *Métodos de mallado y algoritmos adaptativos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el método de elementos finitos. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Departamento de Comunicaciones, Valencia, España*.
- EPMAPS. (2016). *Rápida Lisa de la Quebrada el Batán*. Quito: EPMAPS.
- Fernández, J. (2012). *Dinámica de Fluidos Computacional. En Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos (Primera ed., págs. 1-46)*. Barcelona, España: Reverté.
- Flow Science, Inc. (2016). *FLOW-3D v11.2.0 Documentation*. Santa Fé, Nuevo México: Los Alamos National Laboratory.
- Guaya, C., & Montalván, É. (2018). *Modelación numérica bidimensional del río Garrapata en la Provincia de Manabí aplicando el programa IBER. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, mención Hidráulica, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito*.
- Hermosa, D. (2013). *Estudio experimental en modelo físico sobre el desarrollo del cuenco de socavación al pie de la Presa Toachi. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, mención Hidráulica, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito*.
- Huilca, D. (2013). *Estudio experimental sobre el flujo en los vertederos de excesos y desagües de fondo de la Presa Toachi, aprovechamiento hidroeléctrico Toachi-Pilatón. Trabajo de graduación previo la obtención del título de Ingeniero Civil, opción Hidráulica, Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Carre de Ingeniería Civil, Quito*.

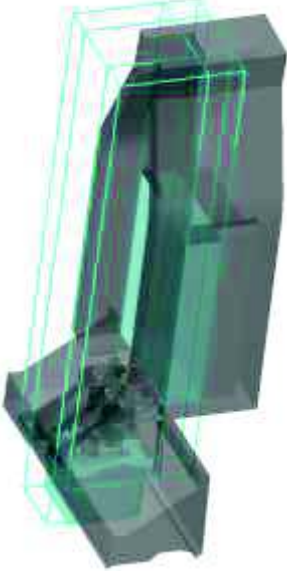
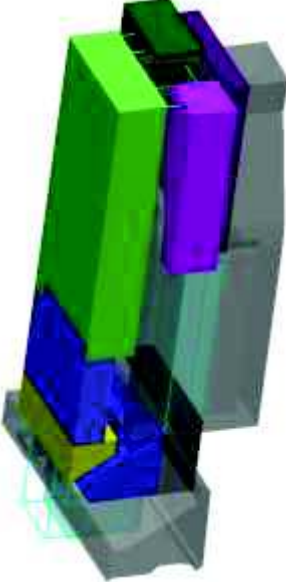
- Khatsuria, R. M. (2005). Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. (M. D. Meyer, Ed.) New York, United States of America: Marcel Dekker.*
- Lopardo, R. (1995). La formación del ingeniero hidráulico para el siglo XXI. En Ingeniería del Agua (Vol. II, págs. 67-76). La Plata, Argentina.*
- Mateos, C. (2000). La modelación física en las obras hidráulicas (Vol. VII).*
- Mays, L. W. (2004). Hydraulic Design Handbook. (Knovel, Ed.) Norwich, NY: McGraw-Hill.*
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2014). CELEC-EP. Obtenido de CELEC-EP: <http://www.energia.gob.ec/toachi-pilatón/>*
- Niño, Y. (2008). Método de los volúmenes finitos. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.*
- Novak, P., Moffat, I., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2007). Hydraulic Structures. New York: Taylor & Francis.*
- Pulcha, D. (2014). Modelación matemática bi-dimensional de estructuras hidráulicas. Aplicación a modelos físicos de las bocatomas Chao-Virú, Achirina, Atacayán y Batea Comezango. Tesis previa a la obtención de título de ingeniero civil, Universidad de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú.*
- Rocha, A. (2003). Los modelos como herramienta valiosa para el diseño hidráulico. Universidad Nacional de Ingeniería, Laboratorio Nacional de Hidráulica, Lima, Perú.*
- Rodríguez, D. (2013). Estudio experimental sobre el alcance y la dirección del chorro a la salida de los vertederos de excesos de la Presa Toachi, proyecto Toachi Pilatón. Trabajo de graduación previo la obtención del título de Ingeniero Civil, opción Hidráulica, Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador.*
- Rosales, J. (2013). Flujo agua-aire en vertedores. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. México: Universidad Nacional Autónoma de México.*
- Sánchez, J. (2004). Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas. Proyecto de fin de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla, Departamento de Ingeniería del diseño, Sevilla, España.*
- Suxo, F. (2016). Solución de ecuaciones diferenciales parciales con condiciones de contorno abiertas por el método de Monte Carlo. Revista Boliviana de Física 29, 6-16.*

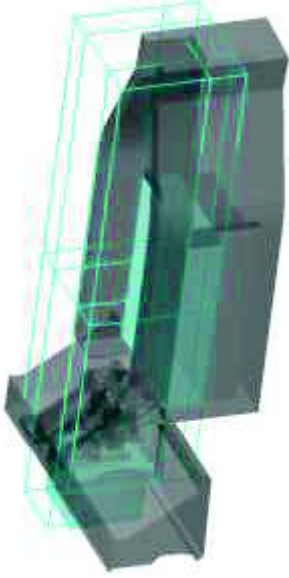
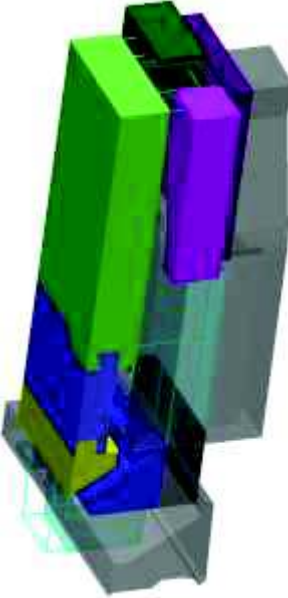
- Tarifa, E. (2001). *Teoría de modelos y simulación*. Universidad Nacional de Jujuy, Facultad de Ingeniería, Argentina.
- Tinetti, F. (2009). *Programación en Clusters*. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Toapaxi, J. (2014). *Bases y criterios para el dimensionamiento hidráulico de formas especiales de saltos en esquí en presas*. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1990). *Hydraulic Design of Spillways*. Whashington: U.S. Army Corps of Engineers.
- U.S. Bureau of Reclamation. (2007). *Diseño de pequeñas presas (Primera ed.)*. (E. Martínez, P. Batanero, I. Martínez, E. Martínez, & G. Elena, Edits.) Madrid: Bellisco.
- U.S. Bureau of Reclamation. (2014). *Appurtenant Structures for Dams (Spillways and Outlet Works) Design Standard*. Waterways and Concrete Dams Group. Washington: U.S. Bureau of Reclamation.
- Vásquez, J. (2003). *Modelación Numérica en Hidráulica*. Universidad de Piura, Lima, Perú.
- Vergara, M. (1993). *Modelos físicos reducidos*. En E. García (Ed.), *Técnicas de modelación en hidráulica* (págs. 1-7). Mexico, D.F: Alfaomega.

ANEXOS

ANEXO 1
ELABORACIÓN DEL MALLADO

Mallado	N° de bloques de malla (u)	Tamaño de celda mínimo (cm)	N° de celdas (u)	Intervalo de tiempo (seg)	Momentum Advection	Observaciones
	10	0.5	6 351 889	10^{-7}	One fluid, free surface	Resultados con error mayor al 10%, pérdida de planos de malla entre bloques adyacentes, errores de f-packing, existen fugas de agua por la estructura
	4	1	5 226 830	10^{-6}	One fluid, free surface	Resultados con error mayor al 10%, pérdida de planos de malla entre bloques adyacentes, errores de f-packing, existen fugas de agua por la estructura.

Mallado	N° de bloques de malla (u)	Tamaño de celda mínimo (cm)	N° de celdas (u)	Intervalo de tiempo (seg)	Momentum Advection	Observaciones
	2	1.5	3 349 784	10 ⁻⁵	Split Lagrangian method	Resultados cercanos a la modelación física, no existen fugas de agua.
	2	1.5	3 349 784	10 ⁻⁵	Split Lagrangian method	Resultados cercanos a la modelación física, se implementan "domain removing" para reducir el tiempo de corrida, al tratar de mallar con un tamaño mínimo de celda de 1 cm el número de celdas aumenta a 11 146 800.

Mallado	N° de bloques de malla (u)	Tamaño de celda mínimo (cm)	N° de celdas (u)	Intervalo de tiempo (seg)	Momentum Advection	Observaciones
	3	1	4 890 756	10 ⁻⁵	Split Lagrangian method	Resultados con error menor al 10%, no existen fugas de agua, se implementan "domain removing" para reducir el tiempo de corrida.
	3	1	4 890 756	10 ⁻⁵	Split Lagrangian method	Resultados con error menor al 10%, no existen fugas de agua, se implementan "domain removing" para reducir el tiempo de corrida.

ELABORADO POR: Chandi & Escobar

ANEXO 2
DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA

