

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**MODELACIÓN NUMÉRICA EN TRES DIMENSIONES DE FLUJO
EN LAS COMPUERTAS DE LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO
TOACHI - PILATÓN APLICANDO DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD)**

**PROYECTO DE TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
MAGÍSTER EN RECURSOS HÍDRICOS**

ING. CARLOS ANDRÉS AULESTIA ALARCÓN
carlos.andres.aulestia@gmail.com

DIRECTOR: Msc. ING. XIMENA DEL ROCÍO HIDALGO BUSTAMANTE

Quito, julio 2017

DECLARACIÓN

Yo, Carlos Andrés Aulestia Alarcón, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias que se incluyen en este documento.

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

Ing. Carlos Andrés Aulestia Alarcón

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado por Carlos Andrés Aulestia Alarcón bajo mi supervisión.

Msc. Ing. Ximena Hidalgo Bustamante.

DIRECTORA

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional, a mis compañeros de estudio, a mis amigos maestrantes, y a mi bella familia por el apoyo brindado durante el transcurso de toda la Maestría.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, quienes supieron formarme desde muy temprano en mi vida para ser responsable y siempre en busca de conocimiento, a mi hermosa familia, May y José Antonio, que me alentaron siempre a ser mejor persona y profesional, a mis compañeros, con los cuales compartimos la experiencia de prepararnos profesionalmente en la Maestría, y a todas las personas que, sin egoísmo compartieron sus conocimientos y experiencia profesional

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABLAS	XXIV
RESUMEN	XXVI
ABSTRACT	XXVII
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVO GENERAL	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.5 DESCRIPCIÓN DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS Y CFD	4
1.5.1 PROCESO DE SIMULACIÓN	5
1.5.2 APLICACIONES EN LA INGENIERÍA PARA LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.	7

1.6	MODELACIÓN FÍSICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA DE OBRAS HIDRÁULICAS	9
CAPITULO 2	DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL - BASE TEÓRICA	14
2.1	ECUACIONES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	14
2.1.1	ECUACIÓN DE CONTINUIDAD O DE CONSERVACIÓN DE LA MASA	15
2.1.2	GRADO DE CAMBIO SIGUIENDO A UNA PARTÍCULA DE FLUIDO Y PARA UN ELEMENTO DEL FLUIDO	18
2.1.3	ECUACIÓN DE LA CONSERVACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO.....	19
2.1.4	LA ECUACIÓN DE NAVIER – STOKES PARA UN FLUIDO NEWTONIANO	21
2.1.5	FORMA DIFERENCIAL E INTEGRAL DE LA ECUACIÓN GENERAL DEL TRANSPORTE	23
2.2	SOLUCIONES NUMÉRICAS DE LAS ECUACIONES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	24
2.2.1	SIMULACIÓN DE FLUJOS TURBULENTOS	25
2.2.2	ECUACIONES DIFERENCIALES EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS	27
2.2.3	SOLUCIONES NUMÉRICAS A LAS ECUACIONES DIFERENCIALES	28

2.2.4	DISCRETIZACIÓN EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	31
2.3	FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS	33
2.3.1	PROCESO PARA LA RESOLUCIÓN POR EL MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS	35
2.4	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE TURBULENCIA.....	39
2.4.1	CALCULO DE FLUJOS TURBULENTOS	43
2.5	DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DESDE LA PERSPECTIVA DEL SOFTWARE	46
2.5.1	ARQUITECTURA DE UN SOFTWARE CFD.....	46
2.5.2	CARACTERÍSTICAS DE UN SOFTWARE CFD	47
CAPITULO 3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS – BASE TEÓRICA	49
3.1	TIPOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	49
3.2	EL AGUA COMO MEDIO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS...50	
3.2.1	EFFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS	51
3.3	PROPIEDADES BÁSICAS DE LAS PARTÍCULAS	54
3.3.1	TAMAÑO DE LA PARTÍCULA.....	54
3.3.2	FORMA DE UNA PARTÍCULA DE SEDIMENTO	56
3.4	VELOCIDAD TERMINAL DE SEDIMENTACIÓN DE UNA PARTÍCULA	58

3.4.1	VELOCIDAD TERMINAL DE SEDIMENTACIÓN DE UNA PARTÍCULA ESFÉRICA.....	58
3.4.2	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE SEDIMENTO	61
3.5	DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPIOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	62
3.5.1	FUERZA HIDRODINÁMICA DE ARRASTRE Y LEVANTAMIENTO EN UNA PARTÍCULA	63
3.5.2	CONDICIÓN CRÍTICA DE ARRASTRE DE SEDIMENTOS	66
3.5.3	ESFUERZO CORTANTE Y TURBULENCIA.....	67
CAPITULO 4	ESTRUCTURA HIDRÁULICA A MODELAR	72
4.1	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATÓN.....	72
4.1.1	FUNCIONAMIENTO PROGRAMADO DE LAS COMPUERTAS RADIALES	73
4.2	DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO	75
4.3	RESULTADOS DEL MODELO FÍSICO.....	77
4.4	BASES Y CRITERIOS PARA LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO.....	80
CAPITULO 5	MODELO NUMÉRICO DE LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI - PILATÓN EN EL PROGRAMA ANSYS CFX.....	82

5.1	ELABORACIÓN DE LA GEOMETRÍA Y MALLADO DE LA OBRA A MODELAR	84
5.1.1	CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATON	84
5.1.2	CONSTRUCCIÓN DEL MALLADO DE LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATON	86
5.2	CONDICIONES DEL DOMINIO Y CONDICIONES DE BORDE O FRONTERA.	88
5.2.1	DOMINIO	88
5.2.2	BORDE O FRONTERA	89
5.2.3	TIPO DE SIMULACIÓN.....	92
5.3	SELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA	93
5.4	ESCENARIOS A SIMULAR EN LA ESTRUCTURA DEL PROYECTO TOACHI PILATÓN.	95
5.5	CONDICIONES INICIALES PARA LA SIMULACIÓN	95
5.6	SIMULACIÓN, RESULTADOS Y POSTPROCESO.	96
CAPITULO 6	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	99
6.1	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	99
6.2	INFLUENCIA DE LA MALLA EN LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO	104

6.3	ANÁLISIS DEL MODELO DE TURBULENCIA Y CONDICIONES INICIALES SELECCIONADAS.....	105
6.4	COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS CON EL MODELO FÍSICO.....	106
CAPITULO 7	ESTUDIO DE OPERACIÓN DE COMPUERTAS	111
7.1	BREVE RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO FÍSICO.....	111
7.2	PLAN DE SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA OPERACIÓN DE COMPUERTAS.....	113
7.3	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA OPERACIÓN DE COMPUERTAS	113
7.4	PLAN DE OPERACIÓN DE COMPUERTAS.....	159
CAPITULO 8.	CONCLUSIONES.....	165
8.1.	RESPECTO DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS CFD	165
8.2.	RESPECTO AL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	166
8.3.	RESPECTO DE LA SIMULACIÓN DE LAS COMPUERTAS EN LA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATON, Y PLAN DE OPERACIÓN DE COMPUERTAS.	168
CAPITULO 9	RECOMENDACIONES	172
BIBLIOGRAFÍA	173

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 PROCESO PARA SIMULACIÓN CFD	5
FIGURA 1.2 PROCESO DE 3 PASOS PARA CFD.....	6
FIGURA 1.3 CFD EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL	8
FIGURA 1.4 CFD EN INDUSTRIA AUTOMOVILÍSTICA.....	8
FIGURA 1.5 CFD EN EL DISEÑO HIDRÁULICO	9
FIGURA 1.6 MALLADO SIMPLE EN 2D.....	11
FIGURA 1.7 ESQUEMA DE PERFIL DE VELOCIDAD COMPLETAMENTE DESARROLLADO VERSUS PERFIL CONSTANTE.....	13
FIGURA 2.1 ELEMENTO DE FLUIDO PARA LAS LEYES DE CONSERVACIÓN..	17
FIGURA 2.2 FLUJOS ENTRANDO Y SALIENDO DEL ELEMENTO DE FLUIDO...	18
FIGURA 2.3 ECUACIONES DIFERENCIALES Y SUS SOLUCIONES EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS	28
FIGURA 2.4 GRÁFICO REPRESENTATIVO DE LA FUNCIÓN Y SUS PENDIENTES	29
FIGURA 2.5 TIPOLOGÍAS DE ELEMENTOS DE MALLADO: A) HEXAÉDRICO, B) CUÑA, C) PIRÁMIDE, D) TETRAEDRO	32
FIGURA 2.6 REPRESENTACIÓN DE UN DOMINIO DISCRETIZADO.....	33
FIGURA 2.7 DEFINICIÓN DEL VOLUMEN DE CONTROL	34
FIGURA 2.8 MALLA ESTRUCTURADA Y MALLA NO ESTRUCTURADA	34

FIGURA 2.9 ESQUEMA DE RESOLUCIÓN POR EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS	36
FIGURA 2.10 VOLUMEN DE CONTROL ALREDEDOR DE P	37
FIGURA 2.11 ESQUEMA DE CONVECCIÓN.....	38
FIGURA 2.12 ESQUEMA DE DIFUSIÓN.....	38
FIGURA 2.13 ESQUEMA MIXTO	39
FIGURA 2.14 ESPECTRO DE ENERGÍA PARA UN FLUJO TURBULENTO	41
FIGURA 3.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	49
FIGURA 3.2 DENSIDAD Y VISCOSIDAD CINEMÁTICA DEL AGUA PURA CON LA TEMPERATURA	50
FIGURA 3.3 VISCOSIDAD CINEMÁTICA Y DENSIDAD DEL AGUA SALADA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA	52
FIGURA 3.4 REPRESENTACIÓN DE UNA ESFERA CAYENDO EN UN FLUIDO ESTÁTICO A UNA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN w_s	59
FIGURA 3.5 COEFICIENTE DE ARRASTRE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS DE PARTÍCULA PARA FORMA ESFÉRICA.	61
FIGURA 3.6 ACORAZAMIENTO DEL LECHO DEL RIO	63
FIGURA 3.7 ARRASTRE Y LEVANTAMIENTO HIDRODINÁMICO DEBIDO AL FLUJO QUE CIRCULA POR UNA PARTÍCULA	64

FIGURA 3.8 DIAGRAMA DE SHIELDS PARA EL INICIO DEL TRANSPORTE (VANONI, 1964)	69
FIGURA 3.9 DIAGRAMA DE SHIELDS REPRESENTANDO EL PARÁMETRO DE SHIELDS Θ COMO FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS CORTANTE R^* (SHIELDS 1936).	70
FIGURA 3.10 VARIACIÓN DE LAS VELOCIDADES CRITICAS DE ARRASTRE CON DIÁMETRO DE PARTÍCULA MEDIO (VANONI 1977)	70
FIGURA 4.1 IMPLANTACIÓN DE LAS OBRAS EN CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI - PILATON	74
FIGURA 4.2 VISTA DE LA ESTRUCTURA DE CIERRE	77
FIGURA 4.3 CURVA DE DESCARGA COMPUERTA AZUD NUMERO CON 3 APERTURAS	78
FIGURA 4.4 CAUDAL DE 120 M ³ /S, VISTA AGUA ABAJO	79
FIGURA 4.5 CAUDAL DE 300 M ³ /S, VISTA AGUAS ABAJO.	79
FIGURA 5.1 PRESENTACIÓN DEL ANSYS 16.0.....	82
FIGURA 5.2 INTERFAZ DE USUARIO DE ANSYS WORKBENCH.....	83
FIGURA 5.3 DOMINIO 3D EN CAD.....	84
FIGURA 5.4 CAPTURA DE PANTALLA SPACECLAIM.....	85
FIGURA 5.5 MALLADO NO ESTRUCTURADO DE LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATON	87
FIGURA 5.6 REFINADO DEL MALLADO EN LA COMPUERTA A SIMULAR.....	87

FIGURA 5.7 ESQUEMA GENERAL DE LAS CONDICIONES DE BORDE O FRONTERA	90
FIGURA 5.8 CONFIGURACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA	91
FIGURA 5.9 TIME STEP, EN UNA SIMULACIÓN CFD	93
FIGURA 5.10 MODELOS DE TURBULENCIA DISPONIBLES EN ANSYS CFX	94
FIGURA 5.11 CONDICIONES INICIALES PARA SIMULACIÓN TRANSITORIA	96
FIGURA 5.12 VISTA DE RESULTADOS DE FLUJO EN LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATON	97
FIGURA 6.1 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL PERFIL DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN EL MODELO FÍSICO	106
FIGURA 6.2 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL PERFIL DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX	107
FIGURA 6.3 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS LÍNEAS DE CORRIENTE DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX.....	107
FIGURA 6.4 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL PERFIL DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1 Y 2 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX	108
FIGURA 6.5 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS LÍNEAS DE FLUJO DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1 Y 2 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX.....	108

FIGURA 6.6 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL PERFIL DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1, 2 Y 3 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX	109
FIGURA 6.7 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS LÍNEAS DE FLUJO DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1, 2 Y 3 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX	109
FIGURA 6.8 VELOCIDADES DE FLUJO AGUAS ARRIBA DE LA COMPUERTA 1	110
FIGURA 7.1 DISPOSICIÓN FINAL DEL MATERIAL SÓLIDO COLOCADO SOBRE EL CANAL DE APROXIMACIÓN	112
FIGURA 7.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE FLUJO AGUAS ARRIBA DE LA COMPUERTA DE CIERRE 1	114
FIGURA 7.3 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES CERCA DE LA COMPUERTA 1	115
FIGURA 7.4 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES CERCA DE LA COMPUERTA 1 Y 2	116
FIGURA 7.5 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES CERCA DE LA COMPUERTA 1,2 Y 3	117
FIGURA 7.6 VELOCIDAD PARA EL INICIO DEL TRANSPORTE VERSUS DIÁMETRO DE SEDIMENTO	120
FIGURA 7.7 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTA 1 ABIERTA	121

FIGURA 7.8 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1 Y 3 ABIERTAS	121
FIGURA 7.9 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1, 2 Y 3 ABIERTAS	122
FIGURA 7.10 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTA 1 ABIERTA	123
FIGURA 7.11 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1 Y 3 ABIERTAS	123
FIGURA 7.12 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1, 2 Y 3 ABIERTAS	124
FIGURA 7.13 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTA 1 ABIERTA.....	125
FIGURA 7.14 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1 Y 3 ABIERTAS.....	125
FIGURA 7.15 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1, 2 Y 3 ABIERTAS.....	126

FIGURA 7.16 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTA 1 ABIERTA.....	127
FIGURA 7.17 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1 Y 3 ABIERTAS.....	127
FIGURA 7.18 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1, 2 Y 3 ABIERTAS.....	128
FIGURA 7.19 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTA 1 ABIERTA.....	129
FIGURA 7.20 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1 Y 3 ABIERTAS.....	129
FIGURA 7.21 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1, 2 Y 3 ABIERTAS.....	130
FIGURA 7.22 VELOCIDADES CRITICAS PAR EL INICIO DEL MOVIMIENTO DE LOS SEDIMENTOS	134
FIGURA 7.23 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	135
FIGURA 7.24 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 1 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	135

FIGURA 7.25 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	136
FIGURA 7.26 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 5 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	136
FIGURA 7.27 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL.....	137
FIGURA 7.28 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 10 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	137
FIGURA 7.29 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL.....	138
FIGURA 7.30 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 50 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	138
FIGURA 7.31 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL.....	139
FIGURA 7.32 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 100 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	139
FIGURA 7.33 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	140
FIGURA 7.34 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	141
FIGURA 7.35 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 1 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	141

FIGURA 7.36 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM COMPUERTA1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	142
FIGURA 7.37 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	142
FIGURA 7.38 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 5 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	143
FIGURA 7.39 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	143
FIGURA 7.40 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	144
FIGURA 7.41 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 10 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	144
FIGURA 7.42 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	145
FIGURA 7.43 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	146
FIGURA 7.44 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 50 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	146
FIGURA 7.45 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	147
FIGURA 7.46 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	147

FIGURA 7.47 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 100 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	148
FIGURA 7.48 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	149
FIGURA 7.49 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM COMPUERTA 2, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	149
FIGURA 7.50 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	150
FIGURA 7.51 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 1 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	150
FIGURA 7.52 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	151
FIGURA 7.53 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM COMPUERTA 2, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	151
FIGURA 7.54 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL	152
FIGURA 7.55 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 5 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	152
FIGURA 7.56 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	153
FIGURA 7.57 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM COMPUERTA 2, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	153

FIGURA 7.58 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	154
FIGURA 7.59 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 10 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	154
FIGURA 7.60 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	155
FIGURA 7.61 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM COMPUERTA 2, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	155
FIGURA 7.62 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	156
FIGURA 7.63 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 50 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	156
FIGURA 7.64 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	157
FIGURA 7.65 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM COMPUERTA 2, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	157
FIGURA 7.66 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL ...	158
FIGURA 7.67 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 100 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA.....	158

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1 ECUACIONES DE NAVIER - STOKES CONTINUIDAD Y MOMENTO	22
TABLA 2.2 CONDICIONES DE BORDE PARA DAR ROBUSTEZ A LA SIMULACIÓN	48
TABLA 3.1. VALORES DE P,Q Y M	62
TABLA 4.1. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y GEOMÉTRICAS DE AZUD....	75
TABLA 4.2. ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DE CIERRE	76
TABLA 5.1 RESUMEN DEL MALLADO PARA EL DOMINIO CON 1 COMPUERTA ABIERTA	88
TABLA 5.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS	89
TABLA 5.3. CONDICIONES DE FRONTERA	91
TABLA 6.1. VERIFICACIÓN DE VOLÚMENES AL INGRESO Y A LA SALIDA. SIMULACIÓN 1.	100
TABLA 6.2. VERIFICACIÓN DEL RESULTADO DE CALADO OBTENIDO EN ANSYS CFX Y EN LABORATORIO.....	100
TABLA 6.3. VERIFICACIÓN DE VOLÚMENES AL INGRESO Y A LA SALIDA, SIMULACIÓN 2.	101
TABLA 6.4. VERIFICACIÓN DEL RESULTADO DE CALADO OBTENIDO EN ANSYS CFX Y EN LABORATORIO.....	102
TABLA 6.5. VERIFICACIÓN DE VOLÚMENES AL INGRESO Y A LA SALIDA, SIMULACIÓN 3.	103

TABLA 6.6. VERIFICACIÓN DEL RESULTADO DE CALADO OBTENIDO EN ANSYS CFX Y EN LABORATORIO.....	103
TABLA 7.1. DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO PARA INICIO DEL TRANSPORTE.....	119
TABLA 7.2. DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD CRITICA PARA INICIO DEL MOVIMIENTO	133
TABLA 7.3. POSICIÓN DE LAS COMPUERTAS DE CIERRE DE LOS VERTEDEROS	162
TABLA 7.4. CAUDALES SOBRE LOS VERTEDEROS CON LAS LA OPERACIÓN DE COMPUERTAS PLANTEADA.....	162
TABLA 7.5. POSICIÓN ALTERNATIVA 1 DE LAS COMPUERTAS DE CIERRE DE LOS VERTEDEROS	163
TABLA 7.6. POSICIÓN ALTERNATIVA 2 DE LAS COMPUERTAS DE CIERRE DE LOS VERTEDEROS	164

RESUMEN

Actualmente, existe un gran interés en el desarrollo de la tecnología computacional para resolver todo tipo de problemas en la ingeniería y el diseño, permitiendo analizar una gran cantidad de información en tiempos cortos, permitiendo a su vez generar mejores diseños, más confiables y en muchos casos más económicos y funcionales. En el campo de la dinámica de fluidos computacional ha existido un gran avance en la resolución de las ecuaciones complejas que gobiernan a los fluidos mediante el uso de modelos numéricos que pueden, con cierto grado de aproximación, entregar resultados confiables del funcionamiento hidráulico de las estructuras complejas analizadas. Estas herramientas se encuentran ya al alcance de los usuarios comunes, y permiten, con el uso apropiado y una correcta validación con un modelo físico, verificar el funcionamiento y optimizar las dimensiones de las estructuras hidráulicas de las obras civiles que requieren ser estudiadas con el paso del agua sobre estas. La presente investigación se concentra en analizar la base teórica de la dinámica de fluidos computacional (CFD), que permite la solución de fluidos en movimiento mediante modelos numéricos; y determinar su aplicación en el diseño y optimización de obras hidráulicas, específicamente en la captación del proyecto hidroeléctrico Toachi Pilaton, con el propósito de generar un plan de operación de las compuertas de limpieza. Se establecerán conclusiones sobre la confiabilidad de los resultados de un modelo numérico en el diseño y optimización de obras hidráulicas, y se generará un plan de operación de compuertas de lavado de la captación, correlacionando los valores obtenidos en la simulación con la teoría del transporte de sedimentos.

ABSTRACT

In present times, there is a great interest in the development of computational technology to solve all kinds of problems in engineering and design, allowing to analyze a great amount of information in short times, permitting in turn to generate better designs, more reliable and in many cases more economical and functional analysis. In the field of computational fluid dynamics, there has been a breakthrough in solving complex equations that govern fluids with numerical models, which can, with some degree of approximation, deliver reliable results of the hydraulic operation of the Complex structures analyzed. These tools are already available to ordinary users and allow, with the proper use and correct validation with a physical model, to verify the operation and optimize the dimensions of the hydraulic structures of the civil structures that need to be studied with the flow of water on them. The present research will concentrate on analyzing the theoretical basis of computational fluid dynamics (CFD), which allows the fluid solution in mid-moving numerical models; And determine its application in the design and optimization of hydraulic structures, specifically in the intake structure of the Toachi Pilaton hydroelectric project, with the purpose of generating a plan of operation of the radial cleaning gates. Conclusions will be established on the reliability of the results of a numerical model in the design and optimization of hydraulic structures, and a plan will be generated for the operation of flushing gates, correlating the values obtained in the simulation with the transport theory of Sediments.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La dinámica de fluidos es una rama de la ciencia encargada del movimiento del fluido, y en ciertos casos se incluye la transferencia del calor como parte del análisis. La dinámica de fluidos está gobernada por varias ecuaciones que satisfacen la conservación de la masa, del momento y de la energía, y esta ciencia es utilizada en un sinnúmero de ramas de la ingeniería como son la industria aeroespacial, la industria automovilística, etc. y en nuestro caso para la resolución de problemas en la ingeniería civil en las infraestructuras hidráulicas y mecánicas.

A través de la historia existieron varias personas que hicieron contribuciones importantes a la mecánica de fluidos; personas como Arquímedes, Newton, Leib, Bernoulli, Euler, Navier, Stokes, Reynolds, Prandtl, Taylor entre otros. Muchas de estas personas eran matemáticos, y dieron una gran contribución debido a que la mecánica de fluidos en el último siglo ha tenido un análisis principalmente matemático.

En el campo de la dinámica de fluidos, en el principio fue utilizada una aproximación analítica, la cual mediante estimaciones ingenieriles y asunciones, simplificaba los fenómenos complejos tridimensionales en ecuaciones muy simples en una o dos dimensiones, lo que permitía con lápiz, papel y diagramas de cuerpo libre realizar cálculos a mano; pero muchas veces este tipo de aproximación era muy limitada en representar toda la complejidad de un fenómeno de dinámica de fluidos en sus 3 dimensiones, por lo que fueron utilizados modelos físicos a escala para llenar el vacío que las ecuaciones simplificadas fallaban en representar. En la actualidad ha existido un gran avance en la resolución de las ecuaciones complejas que gobiernan a los fluidos mediante el uso de modelos numéricos, que pueden, con

cierto grado de aproximación, entregar resultados confiables del comportamiento hidráulico de las estructuras complejas analizadas. Estas herramientas se encuentran ya al alcance de los usuarios comunes, y permiten, con el uso apropiado y una correcta validación con un modelo físico, verificar el funcionamiento y optimizar las dimensiones de las estructuras hidráulicas de las obras civiles que requieren ser estudiadas con el paso del agua sobre estas.

Actualmente, existe un gran interés global en el desarrollo de la tecnología computacional para resolver todo tipo de problemas en la ingeniería y el diseño, permitiendo analizar una gran cantidad de información en tiempos cortos, y a su vez generar mejores diseños, más confiables y en muchos casos más económicos. Para el caso de la ingeniería hidráulica, existen muchas alternativas en el mercado, así como software libre disponible para la realización de modelos con dinámica de fluidos computacional CFD, y en el presente trabajo fue utilizado el software comercial ANSYS CFX, y con los resultados obtenidos en el modelo físico de la captación del proyecto Toachi Pilatón.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Como objetivo general de esta tesis tenemos:

- Mediante el uso de un software para modelos numéricos tridimensionales, generar un modelo CFD de la captación del proyecto Toachi Pilatón con el objetivo de generar un plan de operación de las compuertas de limpieza.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos de la presente tesis tenemos:

- Analizar la base teórica de la dinámica de fluidos computacional (CFD), que permite la realización de simulaciones numéricas de fluidos.
- Analizar la base teórica del transporte de sedimentos, y el inicio del movimiento de partículas en agua.
- Implementar en un modelo numérico, la estructura hidráulica de captación del proyecto Toachi Pilatón, utilizando el programa ANSYS CFX.
- Establecer las ventajas y limitaciones del modelo CFD de la estructura hidráulica propuesta en ANSYS CFX, y validar los resultados obtenidos con el modelo físico a escala reducida.
- Evaluar el comportamiento hidráulico de la estructura modelada, establecer conclusiones.
- Evaluar el funcionamiento de las compuertas del cierre de la captación del proyecto Toachi Pilatón con el modelo numérico (CFD) propuesto.
- Establecer un plan de operación para las compuertas de lavado de la captación del proyecto Toachi Pilatón.

1.4 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente tesis busca, mediante el análisis de dinámica de fluidos computacionales (CFD) en tres dimensiones, en primera instancia validar los resultados de la simulación y el modelo numerico, y en segunda instancia generar un plan de manejo de compuertas de limpieza para la obra analizada, que es la captación del proyecto Toachi Pilaton.

El alcance de la presente tesis es analizar la base teórica de la dinámica de fluidos computacional (CFD), que permite la solución de fluidos en movimiento mediante modelos numéricos; generar un modelo CFD y determinar su aplicación en el diseño y optimización de obras hidráulicas. Establecer conclusiones sobre la confiabilidad de los resultados de un modelo numérico en el diseño y optimización de obras hidráulicas.

1.5 DESCRIPCIÓN DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS Y CFD

La dinámica de fluidos provee de una predicción cualitativa y cuantitativa de los fluidos mediante:

- la modelación matemática con las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan a los fluidos
- los métodos numéricos con los que se resuelve las ecuaciones que gobiernan a los fluidos que pueden ser ecuaciones diferenciales parciales en forma integral o en forma diferencial.
- las herramientas de software que permiten un preproceso, la solución de las ecuaciones matemáticas que gobiernan a los fluidos y un postproceso de la información.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se define como la ciencia que predice el comportamiento del flujo de fluidos en un medio, la transferencia de calor,

transferencia de masa, reacciones químicas y fenómenos relacionados mediante la solución de ecuaciones matemáticas que gobiernan a estos procesos con el uso de métodos numéricos, a través de un computador.

1.5.1 PROCESO DE SIMULACIÓN

Para el proceso de simulación primero se construye una geometría a ser estudiada con la dinámica de fluidos computacional, ésta geometría es descompuesta en pequeños fragmentos que llamamos mallado; mediante éste mallado lo que realmente se consigue es definir puntos donde se quiere que el análisis para la solución numérica de las ecuaciones sea realizado, luego se definen las condiciones de borde para la simulación para luego proceder a la resolución del problema mediante un computador, y finalmente se visualizan los resultados de la simulación, ya sea en los puntos analizados, o mediante el uso de herramientas gráficas para mejorar la comprensión espacial del fenómeno simulado. Este proceso es representado en la figura 1.

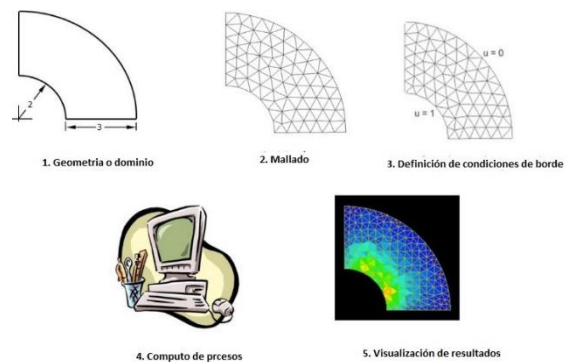


FIGURA 1.1 PROCESO PARA SIMULACIÓN CFD

FUENTE (CCTech, 2015), ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

En la Figura 1 se tiene: 1) construcción de la geometría. 2) construcción del mallado. 3) definición de las condiciones de borde. 4) computo de procesos 5) resultados de la simulación. La dinámica de fluidos computacional (Computational

Fluid Dynamics), es entonces, un proceso de tres pasos los cuales son: el preprocesamiento, la resolución, y el postprocesamiento. La figura 2 muestra en un diagrama el proceso para la modelación y resolución de un problema de dinámica de fluidos computacional.

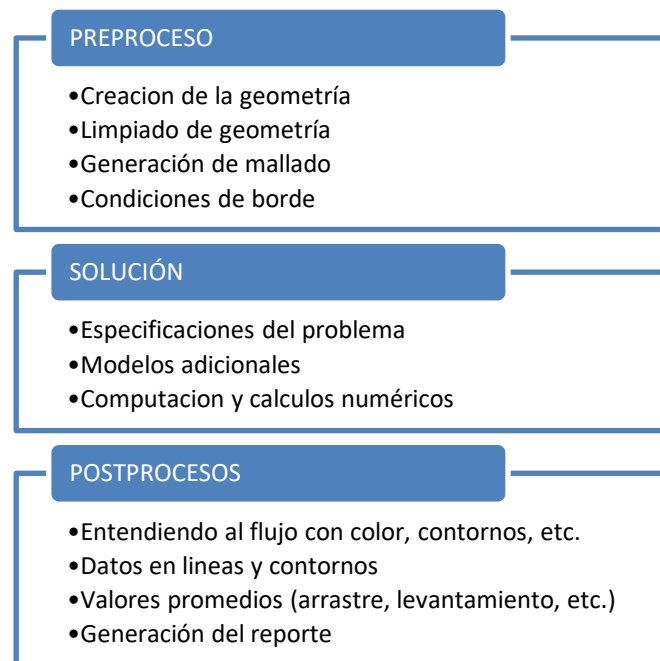


FIGURA 1.2 PROCESO DE 3 PASOS PARA CFD

*FUENTE (CCTech, 2015), ELABORADO POR:
CARLOS ANDRÉS AULESTIA*

En el preprocesamiento se define la geometría, y también se pulida la geometría del dominio para tratar de que sean simulados únicamente los fenómenos que nos interesa, y no micro fenómenos causados por pequeñas imperfecciones; después la geometría es descompuesta en el malla donde se definen los puntos a ser resueltos por el software, y para concluir el preprocesamiento se definen las condiciones de borde.

En la etapa de cálculo y solución, se solicita al programa que resuelva el problema planteado; también se puede incorporar modelos adicionales si la física del problema lo necesita.

En la etapa de postprocesamiento se revisan los resultados obtenidos mediante impresiones a color, o líneas de contorno que facilitan el interpretar el movimiento del fluido; también se puede obtener valores promedio, y finalmente se tiene la generación de reportes para la simulación.

1.5.2 APLICACIONES EN LA INGENIERÍA PARA LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.

La dinámica de fluidos computacional tiene sus aplicaciones en muchísimas ramas del diseño y la ingeniería. Entre algunas de las aplicaciones que se puede nombrar tenemos por ejemplo un diseño de un ambiente para vivir más cómodo y seguro por parte de los arquitectos, un diseño en los vehículos que mejore las características aerodinámicas, permite diseñar mejores sistemas de refrigeración para procesadores; la dinámica de fluidos computacional permite a los ingenieros químicos maximizar la durabilidad de sus equipos, permite a los ingenieros petroleros desarrollar estrategias óptimas de recuperación de petróleo, permite a los Cirujanos curar arterias taponadas, permite a los meteorólogos la predicción del clima y la prevención de desastres naturales, etc. Quizás la aplicación más antigua y más desarrollada para la dinámica de fluidos computacional es en la industria aeroespacial que desde hace más de 6 décadas realiza varios tipos de simulación como son: la aerodinámica exterior de una aeronave, el extinguir un incendio, propulsión, etc. en la figura 3 se muestran simulaciones en la industria aeroespacial.

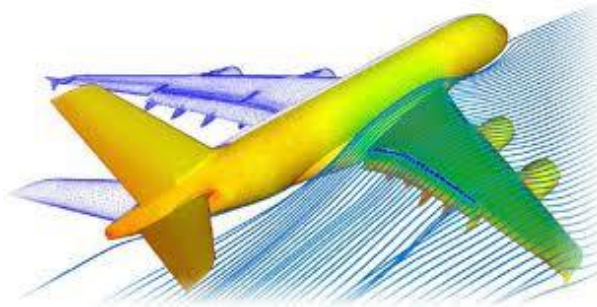


FIGURA 1.3 CFD EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL

FUENTE (HiTechCFD, 2013)

Otra de las aplicaciones más conocida es en la industria automovilística, en los sistemas de manejo de aire, sistemas de refrigeración, la aerodinámica externa, filtros de aceite, cámaras de combustión, confort del pasajero etc. en la figura 4 se muestran simulaciones en la industria automovilística.

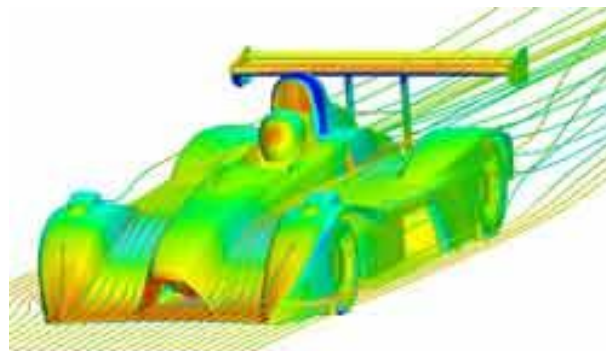


FIGURA 1.4 CFD EN INDUSTRIA AUTOMOVILÍSTICA

FUENTE (Pro S3, 2013)

.Dentro de la ingeniería hidráulica, aplicada a estructuras civiles, se tienen asimismo un sinnúmero de aplicaciones y análisis que se pueden realizar como son velocidades de flujo, direcciones de corriente, presiones, turbulencia, etc.

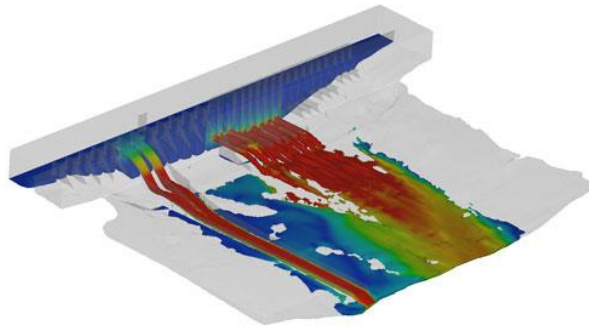


FIGURA 1.5 CFD EN EL DISEÑO HIDRÁULICO

FUENTE (FLOW3D, 2012)

1.6 MODELACIÓN FÍSICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA DE OBRAS HIDRÁULICAS

La modelación física ha sido siempre la herramienta por excelencia para la verificación del comportamiento hidráulico de una estructura. Esta permite en un modelo con cierta escala, realizar mediciones de presión y niveles, así como del comportamiento hidráulico de las estructuras, sin embargo tiene sus restricciones para su validación. El régimen en el flujo, tanto en la escala como en el prototipo deberá ser el mismo: Laminar o turbulento, uniforme o no uniforme, permanente o no permanente, irrotacional o rotacional, subcrítico o supercrítico.

El caso más común en el modelamiento físico es con el uso de la similitud en Froude, y para obtener el mismo coeficiente de pérdida por fricción tanto en el modelo como en el prototipo, se distorsiona la rugosidad relativa. La tensión superficial es casi siempre insignificante en los prototipos de grandes dimensiones, pero puede resultar representativo en los modelos cuando son muy pequeños.

Los modelos hidráulicos permitieron realizar formulaciones y simplificaciones a varios fenómenos hidráulicos que se producen en varias estructuras como vertederos, orificios, canales, estructuras especiales, etc; sin embargo, estas

simplificaciones acarrear un problema al aplicar estas ecuaciones y confiar en los resultados sin una validación en la obra particular (sin considerar que el flujo es tridimensional). Es por eso que la necesidad de la modelación hidráulica de obras es indispensable para la total comprensión y el correcto funcionamiento de ésta ante todas las posibles condiciones a las que esté sometida. El problema básico de realizar un modelo hidráulico es el costo de este, pues podría resultar bastante caro si se decide simular enteramente todo un sistema, por lo que siempre se opta por simular solo unas partes importantes de este. Otro problema de la modelación física es el tiempo que toma la realización de esta, situación que a su vez resulta en un costo adicional.

La alternativa complementaria a la modelación física de obras, es la modelación numérica, que ha ganado mucho terreno estos últimos años por su gran potencial de simulación de fenómenos, y por la creciente capacidad de los ordenadores en los que se puede realizar estos procesos.

El análisis numérico de un problema debe cumplir con varios requisitos, como son: Los principios de la conservación de la masa, del momento y de la energía debe ser satisfecha en la región de interés. Se realizan simplificaciones al problema para hacerlo tratable, como flujo permanente, flujo incompresible, no viscoso, unidimensional, bidimensional o tridimensional. Se debe dar condiciones apropiadas de contorno, así como las condiciones iniciales.

La dinámica de fluidos computacional aplica métodos numéricos, en los que se discretiza el dominio, para desarrollar ecuaciones algebraicas, que se aproximan a la solución de las ecuaciones diferenciales de la mecánica de fluidos para el dominio estudiado.

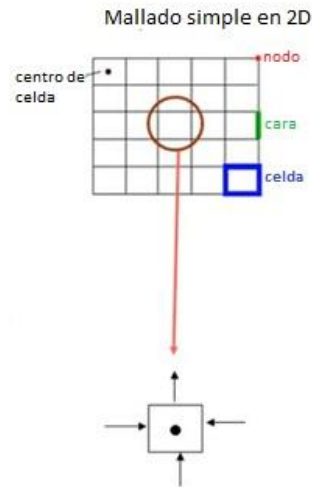


FIGURA 1.6 MALLADO SIMPLE EN 2D

FUENTE: (CCTech, 2015), ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

El sistema de ecuaciones es resuelto numéricamente en un computador para las variables del fluido en el dominio, en cada nodo o celda de la discretización.

Las ecuaciones de Navier – Stokes son un conjunto de ecuaciones expresadas en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido; éstas ecuaciones gobiernan el comportamiento de la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos.

Ecuación de Navier – Stokes para flujo permanente

$$\oint \rho \Phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\Phi} \nabla \Phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\Phi} dV \quad (1.1)$$

Simplificación numérica de la ecuación para un dominio N definido.

$$\sum_f^{Nfaces} \rho_f \vec{v}_f \Phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{Nfaces} \Gamma_\Phi (\nabla \Phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_\Phi V \quad (1.2)$$

La ecuación de Navier Stokes se expresa en forma de sumatorias para los diferentes puntos de la discretización o malla, estas ecuaciones algebraicas son resueltas con procesos iterativos, las cuales arrojan valores que son visualizados en la etapa del postproceso.

La dinámica de fluidos computacional CFD presenta ciertas ventajas respecto de una modelación física, como son el bajo costo de una simulación, comparado con el costo elevado de experimentación para la obtención de datos esenciales para la ingeniería y diseño, y el costo de las simulaciones probablemente disminuirá, en cuanto las computadoras se vuelvan más poderosas. Las simulaciones CFD pueden ser ejecutadas en un corto periodo de tiempo, y cambios pueden ser introducidos en el diseño en etapas tempranas, además, permiten simulaciones de condiciones imposibles de obtener en modelos físicos en laboratorios, como son flujos a velocidades hipersónicas a Mach 20. Las simulaciones CFD permiten teóricamente simular cualquier condición física.

Las limitaciones y errores que tienen las simulaciones CFD están dadas por los modelos físicos en los cuales se basan; debido a que es dependiente de los procesos reales como pueden ser turbulencia, compresibilidad, química, flujo multifásico, etc. Las soluciones que se obtienen a través de la dinámica de fluidos computacional, son tan precisas como el modelo físico en la cual están basadas, por lo que es importante la selección del software adecuado que posea la capacidad de simular las condiciones necesarias de un dominio adecuadamente, así como la experticia del simulador en introducir las condiciones adecuadas para tener una buena simulación. Los errores que se introducen al resolver las ecuaciones a través de un computador siempre existirán, son llamados los errores numéricos y se los puede clasificar en 2 tipos:

- Errores de redondeo, debido a la limitación del computador, ya que el computador redondea hasta cierto punto decimal. Sin embargo estos errores son insignificantes comparados con la información que se obtiene en una simulación CFD, o sea estos errores realmente no son significativos comparados con el otro tipo de errores que se encuentra en una simulación CFD.
- Errores de truncamiento, ocasionados por el método numérico seleccionado, y las simplificaciones asumidas en la simulación, estos errores resultan significativos cuando se quiere una precisión alta, y cuando éste es el caso, el software juega un papel importante en la reducción del error por truncamiento, ya sea refinando la malla del dominio hasta el punto en que la solución se vuelve independiente del mallado. Es a nivel del usuario el utilizar las física apropiada para la simulación, así como dar las condiciones apropiadas de borde para eliminar los posibles errores de truncamiento.

Otras FUENTES de errores en la simulación se deben a las condiciones de borde ingresadas; tal como en un modelo físico, las soluciones CFD son tan buenas como las condiciones iniciales de contorno dadas en el modelo numérico. Por ejemplo, un perfil de velocidad en el ingreso completamente desarrollado entregará mejores resultados que un perfil uniforme.

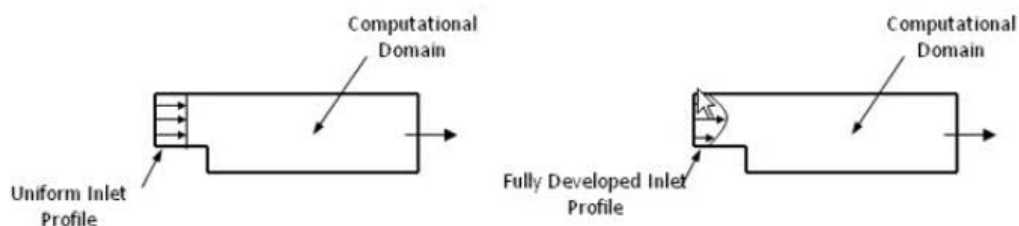


FIGURA 1.7 ESQUEMA DE PERFIL DE VELOCIDAD COMPLETAMENTE DESARROLLADO VERSUS PERFIL CONSTANTE

FUENTE: (CCTech, 2015)

CAPITULO 2

DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

- BASE TEÓRICA

2.1 ECUACIONES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

En la dinámica de fluidos computacional, se resuelven las ecuaciones generales de la conservación para el movimiento de un fluido, siguiendo los siguientes principios:

- Principio de la conservación de la masa, resuelta mediante las ecuaciones de continuidad
- Segunda ley de Newton, resuelta mediante soluciones numéricas a la ecuación de Navier - Stokes o ecuaciones de Euler.
- Principios de la conservación de la energía, resuelta con la conservación de la energía.
- Ecuaciones de estado o de comportamiento del fluido.
- Ecuaciones constitutivas del medio.

La ecuación general del transporte del fluido, en su forma general contiene un término transitorio, un término de advección, un término de difusión y un término FUENTE.

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}}_{\text{término transitorio}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\Phi\vec{v})}_{\text{término de advección}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma\nabla\Phi)}_{\text{término de difusión}} + \underbrace{S_\Phi}_{\text{término fuente}} \quad (2.1)$$

En esta ecuación una cantidad Φ o variable macroscópica local en el fluido es transportada por su campo de velocidad, por su capacidad de difundirse, y también si existen fuentes. El cambio de estas variables está gobernada por el término transitorio. Para la obtención de la ecuación de conservación de la masa, reemplazamos $\Phi = 1$, y para la conservación del momento, o la segunda ley de Newton $\Phi = u, v, w$ para un balance de fuerzas en X, Y, Z.

Existen situaciones en donde interesa resolver la ecuación de la conservación de la energía, para estos casos $\Phi = C_p T$, la cual puede resolver la ecuación térmica de la energía, o la ecuación total de la energía en donde puede haber intercambio de energía mecánica y térmica. Adicional a esta ecuación se tienen otras ecuaciones para simulaciones de casos particulares como fracciones de masa de diferentes fluidos, turbulencia, combustión, etc.

En la dinámica de fluidos computacional, las ecuaciones utilizadas para determinar el comportamiento de los fluidos se las conoce como ecuaciones de Navier - Stokes, que son aplicables a fluidos newtonianos. La forma más aplicada de estas ecuaciones es la simplificación de la ecuación de Navier - Stokes para fluidos incompresible, en donde se asume a la densidad del fluido como constante, y la ecuación de energía se separa de las ecuaciones de continuidad y momento si las propiedades del fluido son constantes.

2.1.1 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD O DE CONSERVACIÓN DE LA MASA

La ecuación de conservación de la masa considera que en un sistema cerrado, la masa permanece constante, independiente de los procesos que se produzcan dentro del sistema.

La ecuación de la conservación de la masa en su forma diferencial sería:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

o en una forma más compacta

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.3)$$

dónde:

ρ : *densidad*

t : *tiempo*

u : *Componente de la velocidad en x*

v : *Componente de la velocidad en y*

w : *Componente de la velocidad en w*

∇ : *Operador vectorial nabra*

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$$

\vec{v} : *vector velocidad*

$$\vec{v} = ui + vj + wk$$

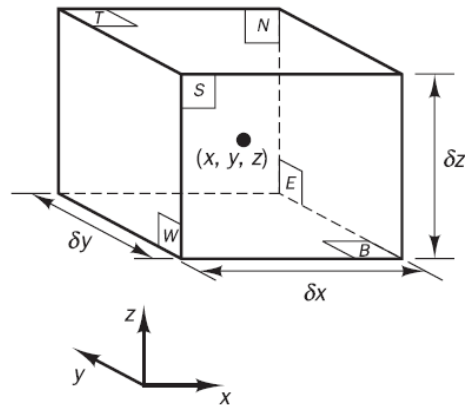


FIGURA 2.1 ELEMENTO DE FLUIDO PARA LAS LEYES DE CONSERVACIÓN

FUENTE: (W Malalasekera, 2007)

El producto escalar $\nabla \cdot \vec{v}$ es denominado divergencia del vector \vec{v} y su notación sería:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div}(\vec{v}) \quad (2.4)$$

Para un flujo incompresible, la densidad ρ es una constante, y la ecuación se convierte en:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

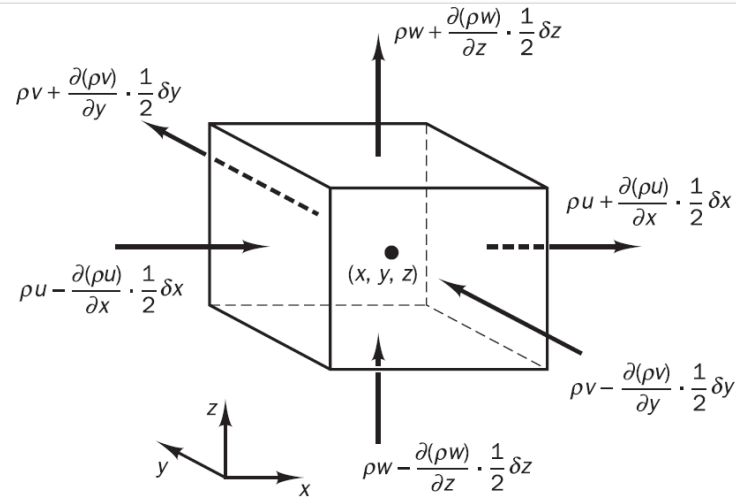


FIGURA 2.2 FLUJOS ENTRANDO Y SALIENDO DEL ELEMENTO DE FLUIDO

FUENTE: (W Malalasekera, 2007)

2.1.2 GRADO DE CAMBIO SIGUIENDO A UNA PARTÍCULA DE FLUIDO Y PARA UN ELEMENTO DEL FLUIDO

Siendo el valor de la propiedad por unidad de masa de un fluido Φ , la derivada total de Φ respecto del tiempo siguiendo a una partícula es $\frac{D\Phi}{Dt}$. El grado de cambio de la propiedad Φ por unidad de masa será:

$$\frac{D\Phi}{Dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \vec{v}\nabla\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \vec{v}\text{grad } \Phi \quad (2.6)$$

La ecuación de la conservación de la masa contiene a la masa por unidad de volumen ρ como la cantidad conservativa:

$$\rho \frac{D\Phi}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \vec{v}\text{grad } \Phi \right) \quad (2.7)$$

Se puede reescribir la ecuación anterior como: el grado de incremento de Φ del elemento de fluido, más el grado neto de fluido de Φ fuera del elemento de fluido, es igual al grado de incremento de Φ para una partícula de fluido.

$$\rho \frac{D\Phi}{Dt} = \frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\Phi\vec{v}) = \rho \left(\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \vec{v} \text{grad } \Phi \right) + \underbrace{\Phi \left(\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{v}) \right)}_{\text{Igual a 0 por conservación de masas}} \quad (2.8)$$

2.1.3 ECUACIÓN DE LA CONSERVACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La segunda ley de Newton establece que la variación del momento de una partícula de fluido es igual a la suma de las fuerzas en esa partícula, estas fuerzas pueden ser de superficie, de volumen o másicas.

Las fuerzas de superficie por lo general son:

- Fuerzas de presión
- Fuerzas viscosas
- Fuerza de gravedad

Las fuerzas másicas por lo general son:

- Fuerzas centrífugas
- Fuerza de coriolis
- Fuerza Electromagnética

Es práctica común el resaltar las contribuciones debido a las fuerzas de superficie en términos separados en la ecuación de conservación del momento, y se incluyen los efectos de las fuerzas másicas como términos FUENTES.

La componente en x de la ecuación del momento será:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.9)$$

La componente en y de la ecuación del momento será:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.10)$$

La componente en z de la ecuación del momento será:

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.11)$$

dónde:

$\rho \frac{Du}{Dt}, \rho \frac{Dv}{Dt}, \rho \frac{Dw}{Dt}$: incremento de los momentos x -, y -, z -, por unidad de

volumen de una partícula de fluido.

p : *esfuerzo de presión*

τ : *esfuerzo viscoso*

τ_{ij} : *notación sufija que indica la dirección del esfuerzo viscoso*

(el sufijo ij en τ_{ij} indica que la componente del esfuerzo actúa en

la dirección j -, normal a la dirección i -.)

Los efectos de los esfuerzos superficiales son considerados explícitamente en los términos FUENTE S_{Mx}, S_{My} y S_{Mz} , incluidas las contribuciones de las fuerzas másicas.

Por ejemplo, la fuerza másica debida a la gravedad es modelada con $S_{Mz} = 0$, $S_{Mz} = 0$ y $S_{Mz} = -\rho g$.

2.1.4 LA ECUACIÓN DE NAVIER – STOKES PARA UN FLUIDO NEWTONIANO

Las formas más útiles para las ecuaciones de la conservación para los fluidos se obtienen introduciendo un modelo adecuado para el esfuerzo viscoso τ_{ij} . Dado que todos los gases y la mayoría de los fluidos son isotrópicos, se asume esta condición para todos los fluidos. En los fluidos Newtonianos, los esfuerzos viscosos son proporcionales a los grados de deformación. La ley de Newton de la viscosidad en tres dimensiones para fluidos compresibles envuelven a dos constantes de proporcionalidad. La primera es la viscosidad dinámica μ que relaciona el esfuerzo a la deformación lineal, y la segunda viscosidad λ que relaciona el esfuerzo a la deformación volumétrica. No se conoce mucho sobre la segunda viscosidad λ porque su efecto es pequeño en la práctica. Para gases, una buena aproximación de trabajo puede ser obtenida tomando el valor $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ (Schlichting 1979). Una consideración práctica comúnmente aplicada es que los líquidos son incompresibles, por lo que las componentes de la ecuación del esfuerzo viscoso son:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) + SMx \quad (2.12)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } v) + SMy \quad (2.13)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad } w) + SMw \quad (2.14)$$

Las formas conservativas de las ecuaciones que gobiernan el flujo de los fluidos son:

TABLA 2.1 ECUACIONES DE NAVIER - STOKES CONTINUIDAD Y MOMENTO

Continuidad	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0$
Momento x	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) + SM_x$
Momento y	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) + SM_y$
Momento z	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) + SM_z$

FUENTE: (W Malalasekera, 2007) ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

2.1.5 FORMA DIFERENCIAL E INTEGRAL DE LA ECUACIÓN GENERAL DEL TRANSPORTE

Si se introduce un valor de la propiedad por unidad de masa Φ en la ecuación de la continuidad para todos los fluidos, la ecuación quedaría:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}}_{\substack{\text{grado de incremento} \\ \text{de } \Phi \text{ en el fluido} \\ \text{(termino transitorio)}}} + \underbrace{\text{div}(\rho\Phi\vec{v})}_{\substack{\text{grado neto del} \\ \text{flujo de } \Phi \text{ fuera del} \\ \text{elemento de fluido} \\ \text{(termino convectivo)}}} = \underbrace{\text{div}(\Gamma \text{ grad } \Phi)}_{\substack{\text{grado de incremento} \\ \text{de } \Phi \text{ debido a la difusión} \\ \text{(termino difusivo)}}} + \underbrace{S_{\Phi}}_{\substack{\text{grado de incremento} \\ \text{de } \Phi \text{ debido a fuentes} \\ \text{(termino fuente)}}} \quad (2.15)$$

Esta ecuación es llamada “ecuación del transporte” para la propiedad Φ , en donde Γ es el coeficiente de difusión. La clave para la resolución de esta ecuación por el método de los volúmenes finitos es la integración de la ecuación del transporte en un volumen de control en tres dimensiones.

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \text{div}(\rho\Phi\vec{v}) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \text{ grad } \Phi) dV + \int_{CV} S_{\Phi} dV \quad (2.16)$$

La integral de volumen del termino convectivo, y la integral de volumen del termino difusivo se reescriben como integrales sobre la superficie envolvente del volumen de control mediante el teorema de divergencia de Gauss. El teorema de divergencia de Gauss sostiene que la integral de la divergencia de un vector \vec{a} sobre un volumen, es igual a la componente de \vec{a} en la dirección normal a la superficie que envuelve al volumen integrado (sumado) sobre la superficie total A.

$$\int_{CV} \text{div}(\vec{a}) dV = \int_{SA} \vec{n} \cdot \vec{a} dA \quad \therefore \quad \begin{array}{l} \vec{n} \cdot \vec{a} : \text{componente del vector } \vec{a} \text{ en la dirección} \\ \text{del vector } \vec{n} \text{ normal al elemento de superficie } dA \end{array}$$

La ecuación para el transporte quedaría reescrita así:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{\dot{C}V} \rho \Phi dV \right) + \int_A \vec{n}(\rho \Phi \vec{v}) dA = \int_A \vec{n}(\Gamma grad \Phi) dA + \int_{\dot{C}V} S_{\Phi} dV \quad (2.17)$$

En problemas dependientes del tiempo, es necesario también integrar con respecto al tiempo t en un pequeño intervalo Δt desde t a $t + \Delta t$. Esto nos entrega la forma integral más general de la ecuación del transporte.

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{\dot{C}V} \rho \Phi dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_A \vec{n}(\rho \Phi \vec{v}) dA dt = \int_{\Delta t} \int_A \vec{n}(\Gamma grad \Phi) dA dt + \int_{\Delta t} \int_{\dot{C}V} S_{\Phi} dV dt \quad (2.18)$$

2.2 SOLUCIONES NUMÉRICAS DE LAS ECUACIONES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Las ecuaciones de Navier - Stokes, que gobiernan el movimiento de los fluidos pueden ser expresadas como ecuaciones diferenciales de dos tipos, ecuaciones diferenciales ordinarias y ecuaciones diferenciales parciales. Las ecuaciones diferenciales ordinarias usualmente comprenden de solo una diferenciación de las variables dependientes con respecto a una sola variable independiente, mientras que las ecuaciones diferenciales parciales que consisten de las variables dependientes, como velocidad, presión, etc. diferenciadas a más de una variable independiente, como el tiempo, coordenadas espaciales x y z .

En la dinámica de fluidos computacional, se resuelven las ecuaciones matemáticas que gobiernan el flujo de los fluidos, la transferencia de calor, y fenómenos relacionados para un problema físico dado, siendo la forma más común de estas ecuaciones, las ecuaciones de Navier - Stokes, aplicables a fluidos newtonianos, y abarcan a un amplio rango de física en el problema. Una versión simplificada de estas ecuaciones es la ecuación de Navier -Stokes para flujo incompresible, en donde se asume a la densidad como constante, y la ecuación de la energía es

independiente de la ecuación de la continuidad y del momento si todas las propiedades del fluido son constantes. Una versión aún más simplificada es la ecuación de Euler, en donde se desprecian todos los términos viscosos, además no contienen el término difusivo en la ecuación; esta ecuación puede dar aproximaciones razonables para flujos a gran velocidad en capas delgadas.

Otras ecuaciones y modelos que se pueden incluir en el problema son los modelos de turbulencia, las ecuaciones para flujos multifásicos, las ecuaciones de fase discreta para partículas en el fluido, etc.

2.2.1 SIMULACIÓN DE FLUJOS TURBULENTOS

La turbulencia de un flujo es un estado caracterizado por un movimiento fluctuante o caótico del fluido, este estado se da cuando el número de Reynolds excede cierto valor. De acuerdo con Holman (2002), en el caso del flujo en tuberías, un número de Reynolds mayor a 4000 genera un flujo turbulento; pero es importante acotar que el número de Reynolds de transición o Reynolds crítico es diferente para cada geometría (Shih, 2012). Cuando las fuerzas inerciales en un fluido son mucho mayores que las fuerzas viscosas, o sea existe un dominio de las fuerzas inerciales en el flujo, se producen eddys caóticos, vorticidades así como otro tipo de inestabilidades; por lo que los flujos turbulentos son considerados como fenómenos no permanentes y no periódicos.

2.2.1.1 Solución numérica de los flujos turbulentos

La ecuación de Navier – Stokes puede ser usada para predecir numéricamente flujos turbulentos, pero las escalas de espacio y tiempo de la turbulencia son muy pequeñas comparadas con el dominio del flujo. El tamaño de las escalas más grandes del movimiento de un fluido son llamados eddys, estas escalas están determinadas por toda la geometría del dominio del fluido; por ejemplo, en el flujo en una tubería con diámetro dado, el tamaño de la escala más pequeña está dada por el número de Reynolds, cuando el número de Reynolds se incrementa, escalas

cada vez más pequeñas del flujo son visibles, por lo que el número de Reynolds es un indicador del rango de escalas de un fluido en un dominio (CCTech, 2015).

Un número de Reynolds grande puede significar que las fuerzas viscosas no son importantes a gran escala del fluido debido a la predominancia de las fuerzas inerciales sobre las fuerzas viscosas, las escalas del movimiento del fluido no son disipadas, no existe suficiente viscosidad para disipar el movimiento, por lo que la energía cinética debe escalar en cascada desde estas escalas grandes progresivamente a escalas más pequeñas, hasta que un cierto nivel es alcanzado en donde la escala es suficientemente pequeña para que la viscosidad se vuelva importante; o sea que las fuerzas viscosas están en el orden de las fuerzas inerciales. Es a esta escala donde la disipación de energía por acción de la viscosidad finalmente toma lugar. El número de Reynolds por lo tanto indica a que escala esta disipación ocurre.

Las escalas en el espacio y el tiempo de la turbulencia en un flujo son muy pequeñas respecto del dominio del flujo, como se explicó anteriormente; para resolverlas numéricamente habría que considerar que:

- La escala de los eddys más pequeños de turbulencia son aproximadamente mil veces más pequeños que la escala del dominio del flujo.
- Si 10 puntos son necesarios para resolver un eddy de turbulencia, entonces alrededor de 100.000 puntos son necesitados para resolver solo un centímetro cúbico de espacio.

Resolver numéricamente flujos no permanentes con un número muy grande de mallas es una tarea que consume gran tiempo y recursos computacionales, por lo que el realizar una simulación numérica directa de un flujo turbulento utilizando la ecuación de Navier – Stokes no es práctico actualmente.

Para resolver estos fenómenos complejos de turbulencia se utilizan los llamados modelos de turbulencia, que básicamente promedian en el tiempo la ecuación de Navier – Stokes para remover la componente de alta frecuencia, no permanente,

del movimiento turbulento del fluido. Estos modelos son básicamente empíricos y se los discutirá más adelante en este capítulo.

2.2.2 ECUACIONES DIFERENCIALES EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS

Como se explicó anteriormente, se tienen dos tipos de ecuaciones diferenciales en la dinámica de fluidos, las ecuaciones diferenciales ordinarias, y las ecuaciones diferenciales parciales.

Las ecuaciones diferenciales ordinarias entregan soluciones analíticas, con trucos de integración en las soluciones. Pueden ser resueltos en paquetes computacionales como Matlab, con métodos de solución simples como el método de Euler, o el esquema de Runge Kutta, pero en problemas simples se puede recurrir a cálculos a mano y trucos de integración para su resolución.

Las ecuaciones diferenciales parciales son mucho más complicadas, y son las que se encuentran en el flujo de un fluido, puesto que el elemento del fluido es distorsionado en el espacio y en el tiempo; por lo que se tienen a las variables como la presión y la velocidad siendo diferenciadas con respecto no solo al tiempo, sino al tiempo y a la posición en el espacio. Una solución analítica actualmente es muy difícil, y en la gran mayoría de los casos imposible; se pueden usar simplificaciones como la combinación de variables o la transformación de Laplace en problemas simples como en el flujo a través de un canal, pero en la mayoría de los casos se realizarán soluciones numéricas, las cuales son complicadas y requieren pasos adicionales como la generación de un mallado, que simplemente es una discretización del problema (CCTech, 2015). Los métodos de solución numérica más comunes para problemas de dinámica de fluidos son:

- Método de diferencias finitas
- Método de volúmenes finitos
- Método de elementos finitos

A continuación se presenta un cuadro donde resume los tipos de ecuaciones diferenciales para la dinámica de fluidos y como resolverlos.

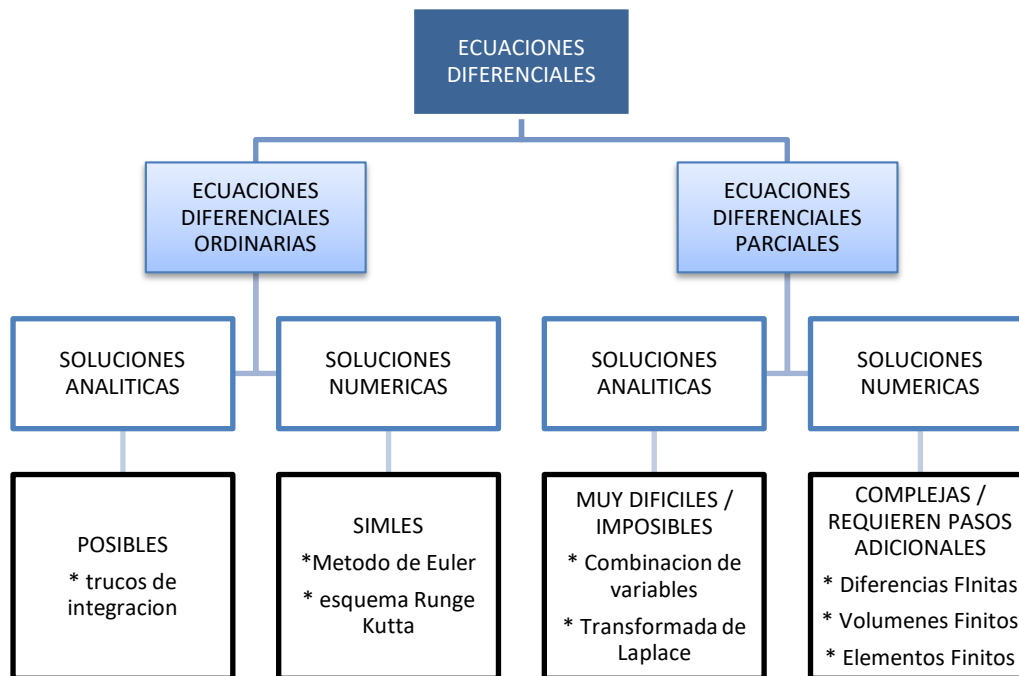


FIGURA 2.3 ECUACIONES DIFERENCIALES Y SUS SOLUCIONES EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS

FUENTE: (CCTech, 2015) ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

2.2.3 SOLUCIONES NUMÉRICAS A LAS ECUACIONES DIFERENCIALES

Para comprender el proceso de resolución de una ecuación diferencial por métodos numéricos se presenta un ejemplo simple.

Ejemplo:

$$\underbrace{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 2 = 0}_{\text{ecuación}} \quad \therefore \quad \underbrace{0 < x < 1}_{\text{dominio}}$$

Condiciones de borde

$$\begin{cases} u = 0 & \text{cuando } x = 0 \\ u = 0 & \text{cuando } x = 1 \end{cases}$$

Solución exacta

$$u = x^2 - x$$

Para este ejemplo se utiliza el método de las diferencias finitas, las ecuaciones diferenciales para $\frac{du}{dx}$ y para $\frac{d^2u}{dx^2}$ son escritas como:

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i \approx \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} \quad \text{diferencial adelante}$$

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i \approx \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} \quad \text{diferencial atrás}$$

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i \approx \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} \quad \text{diferencial central}$$

Estas ecuaciones representan a las pendientes entre las coordenadas $i - 1, i, i + 1$.

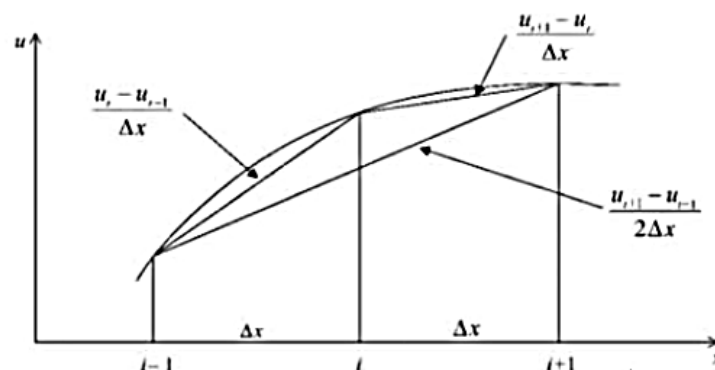


FIGURA 2.4 GRÁFICO REPRESENTATIVO DE LA FUNCIÓN Y SUS PENDIENTES

FUENTE: (CCTech, 2015)

$$\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{du}{dx} \right) \cong \frac{1}{\Delta x} \left[\left(\frac{du}{dx} \right)_{i+1} - \left(\frac{du}{dx} \right)_i \right] = \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} - \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} \right)$$

Nótese que no se ha incluido los términos de segundo orden, solo se asume a $\frac{d}{dx} \left(\frac{du}{dx} \right)$ como una ecuación diferencial, por lo que se tiene un error de truncamiento.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 2 = 0 \Rightarrow \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2} = 2$$

$$u_i = \frac{(u_{i+1} + u_{i-1} - 2\Delta x^2)}{2}$$

Pero

$$u_{i+1} = 0, u_{i-1} = 0 \quad \text{para } x = 0 \text{ y } x = 1$$

La solución: a $x = \frac{1}{2}$ con $\Delta x = \frac{1}{2}$

$$u_i = -\frac{1}{4}$$

La solución exacta para $x = \frac{1}{2}$ es

$$u_{x=\frac{1}{2}} = (x^2 - x)_{x=\frac{1}{2}} = -\frac{1}{4}$$

Se verifica que la solución exacta o aritmética es igual a la solución numérica, por lo que se puede concluir que la solución numérica puede dar la solución exacta en algunos casos o en ciertos puntos. En la solución exacta simplemente se reemplaza el valor de x , y se obtiene la solución, mientras que en la solución numérica tenemos la solución en un solo punto en el que se ingresa las condiciones de borde $u_{i+1} = 0, u_{i-1} = 0$, y se tiene solo un valor intermedio $\Delta x = \frac{1}{2}$, por lo que para este punto se pudo obtener la solución exacta.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) principalmente involucra a las ecuaciones diferenciales parciales, y las técnicas más comunes para resolver estas ecuaciones son las diferencias finitas, los volúmenes finitos y los elementos finitos como fue mencionado previamente. Todos estos métodos numéricos utilizan un esquema de solución de las ecuaciones similar al ejemplo presentado, por lo que resulta indispensable la generación del mallado en el espacio x , y , z para discretizar el dominio y colocar los puntos en donde las ecuaciones diferenciales parciales serán resueltas por los métodos numéricos.

2.2.4 DISCRETIZACIÓN EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Las soluciones exactas en la dinámica de fluidos computacional solo existen para una pequeña clase de flujos simples, como un flujo laminar atravesando una placa plana. Una solución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales parciales consiste de un set de números de los cuales la distribución de la variable Φ puede ser obtenida para el set de números. La variable Φ es determinada en un número finito de ubicaciones conocidos como puntos del mallado o celdas. Este número puede ser grande o pequeño.

La discretización es el método para ir aproximando las ecuaciones diferenciales por medio de un sistema de ecuaciones algebraicas para las variables en algunos sitios de localizaciones discretizadas en el espacio y en el tiempo. Las localizaciones discretizadas son puntos de la malla o celda.

La información continua de las soluciones exactas de las ecuaciones diferenciales parciales es reemplazada con valores discretos.

2.2.4.1 *Discretización espacial*

La discretización del dominio es una subdivisión en pequeños subdominios que son denominados celdas, y son compuestos de formas geométricas como hexaedros, tetraedros e incluso formas polihedricas en algunos casos, y éstos forman la malla o el mallado del dominio. El tipo de discretización espacial depende del tipo de

discretización de las ecuaciones empleado; para el caso de los volúmenes finitos se definen los puntos de control en el centro o en los vértices del volumen, y aquí se almacenan las variables de flujo. Las clasificaciones de mallados son basadas en la conectividad o en el tipo de geometrías o elementos que la conforman.

En la clasificación basada en la conectividad se tienen mallas estructuradas, mallas no estructuradas y mallas híbridas. El mallado estructurado se caracteriza principalmente por la ordenación regular de los elementos, los cuales pueden ser expresados en una matriz; esto restringe el tipo de elementos a hexaedros para las tres dimensiones, y cada punto de la malla es identificado por los índices i, j, k , en coordenadas cartesianas. EL mallado no estructurado se caracteriza por una conectividad no regular la cual dificulta su expresión en forma de matriz, y el tipo de elementos que utiliza es cualquier geometría que el programa pueda resolver. La ventaja de las mallas no estructuradas es que tienen la capacidad de ser generadas automáticamente, independiente del dominio. El mallado híbrido es una mezcla de ambos tipos de mallado.

En la clasificación basada en elementos en las tres dimensiones, los nodos de la malla no están obligados a residir en un solo plano, siendo los elementos más habituales los hexaedros, tetraedros, pirámides de base cuadrada y triángulos extrusionados o prismas triangulares; la figura siguiente muestra gráficamente las ventajas e inconvenientes de cada una de las geometrías.

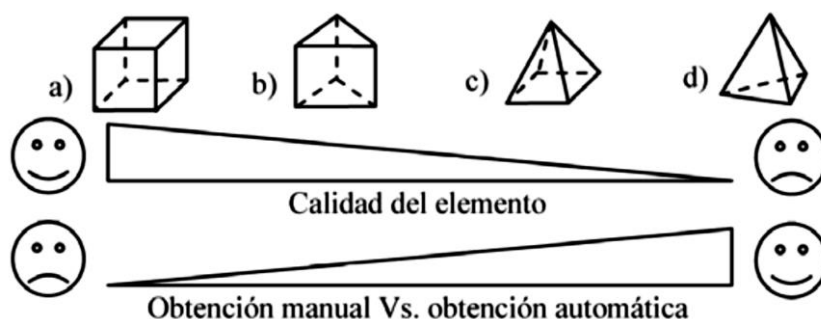


FIGURA 2.5 TIPOLOGÍAS DE ELEMENTOS DE MALLADO: A) HEXAÉDRICO, B) CUÑA, C) PIRÁMIDE, D) TETRAEDRO

FUENTE: (Sánchez, 2012)

Para resolver un problema de dinámica de fluidos computacional (CFD) se debe transformar el modelo físico en una forma en que las ecuaciones que gobiernan la física del fluido puedan ser resueltas, refiriéndose a un dominio discretizado.

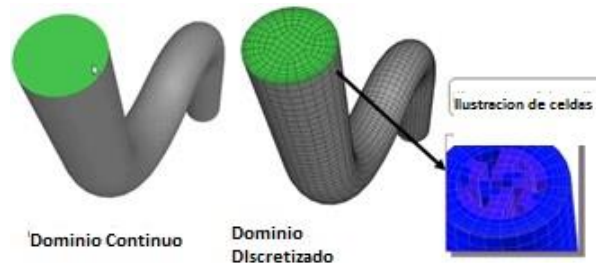


FIGURA 2.6 REPRESENTACIÓN DE UN DOMINIO DISCRETIZADO

FUENTE: (CCTech, 2015) ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

2.3 FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS

Los inicios del método de los volúmenes finitos se encuentran en el método de las diferencias finitas, El primer uso documentado fue por Evans y Harlow en 1957 en Los Alamos, y también por Gentry, Mertin y Daley en 1966. Era un método atractivo porque permitía que las variables puedan ser no diferenciables como en pequeñas olas de choque y en ciertas discontinuidades, y adicional, la masa, el momento y la energía siempre serian conservativas. A finales de los años 70 e inicios de los años 80 se vio un importante desarrollo en el acople de mallados en los contornos o bordes. A principio de los años 90 el método de solución de mallados no estructurados apareció, y básicamente este es el método que la mayoría de paquetes computacionales resuelve actualmente.

Básicamente, el método de los volúmenes finitos divide el dominio en un número determinado de volúmenes de control no solapados o sobrepuestos, con el nodo de control en el centro o en los vértices. Para ANSYS CFX el nodo de control se encuentra en los vértices del volumen finito. La ecuación diferencial a resolver se

integra sobre cada volumen de control. Por simplicidad se muestra en la siguiente figura una malla en dos dimensiones para ilustrar el proceso.

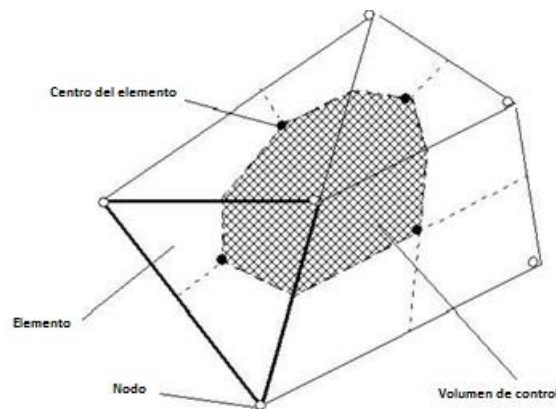


FIGURA 2.7 DEFINICIÓN DEL VOLUMEN DE CONTROL

FUENTE: (ANSYS, 2009) ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

En el gráfico, todas las soluciones de las variables y las propiedades del fluido son almacenadas en los nodos de los vértices. Un volumen de control dado por el área sombreada es construido alrededor de cada nodo de la malla utilizando la mediana dual, que es definida por líneas que unen el centro de los bordes y el centro de los elementos rodeando al nodo.

El método de los volúmenes finitos puede resolver mallados estructurados y no estructurados, en la figura siguiente se muestran ejemplos de los mallados estructurados y no estructurados para un dominio.

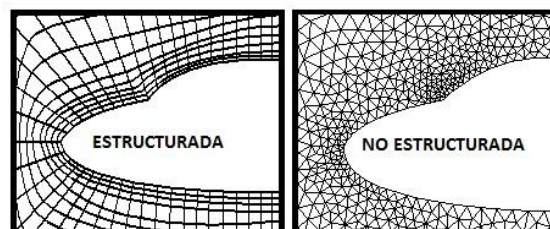


FIGURA 2.8 MALLA ESTRUCTURADA Y MALLA NO ESTRUCTURADA

FUENTE: (Jean Clucas, 1999) ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para la resolución numérica, se integran las ecuaciones diferenciales sobre el volumen de control y se aplica el teorema de divergencia de Gauss, luego, para evaluar los términos derivados, los valores en las caras del volumen de control son necesarios, por lo que se debe asumir como varían los valores. El resultado es un conjunto de ecuaciones algebraicas, una para cada volumen de control, y estas pueden ser resueltas iterativamente o simultáneamente.

2.3.1 PROCESO PARA LA RESOLUCIÓN POR EL MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS

La estrategia para la resolución de un problema mediante el método de los volúmenes finitos puede resumirse en encontrar las ecuaciones lineales algebraicas de cada volumen de control del mallado. Primero se tiene la ecuación general del transporte de fluido, que es el principio que gobierna el movimiento de los fluidos, expresadas en la forma diferencial parcial, esta ecuación es transformada a la forma integral de volumen de las ecuaciones diferenciales parciales, después, aplicando el teorema de divergencia de Gauss sobre los términos de advección y difusión en la ecuación se obtiene, para estos términos, integrales de superficie, que representarían a las superficies del volumen finito, por lo que ahora se tendría una mezcla de integrales de área con integrales de volumen. Cuando se aplican estas ecuaciones en la geometría discretizada, se obtienen las sumatorias, por lo que se tendrían las formas discretizadas con sumatorias, y mediante el uso de técnicas de aproximación de caras, se obtienen finalmente las ecuaciones lineales algebraicas de las ecuaciones discretizadas.

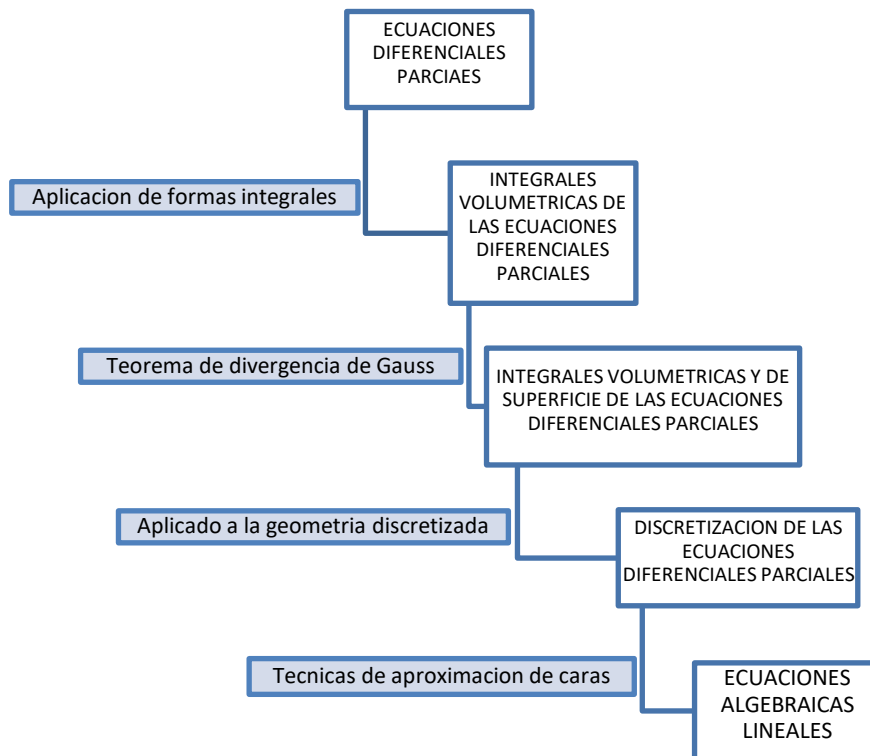


FIGURA 2.9 ESQUEMA DE RESOLUCIÓN POR EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS

FUENTE: (CCTech, 2015) ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el entendimiento de la resolución numérica de las ecuaciones discretizadas para problemas de convección y difusión, escribiremos las ecuaciones en una dimensión. En la ausencia de fuentes, la ecuación de convección y difusión para una propiedad Φ en un campo de u de un flujo permanente unidimensional puede ser escrita como:

$$\frac{d}{dx}(\rho u \Phi) = \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\Phi}{dx} \right) \quad (2.19)$$

El flujo debe satisfacer la ecuación de continuidad

$$\frac{d}{dx}(\rho u) = 0 \quad (2.20)$$

El gráfico siguiente muestra el volumen de control en una dimensión. Se tienen el nodo central P, los nodos vecinos son W y E, y las caras del volumen de control son w y e.

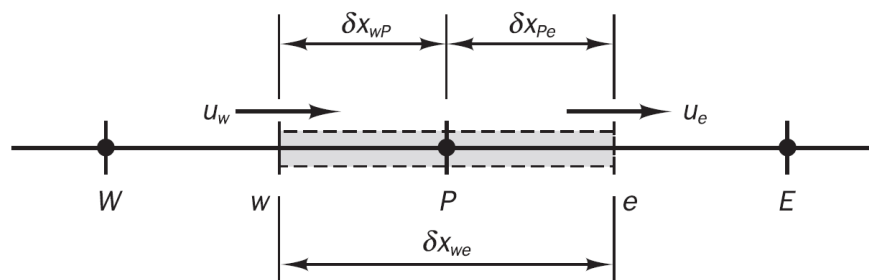


FIGURA 2.10 VOLUMEN DE CONTROL ALREDEDOR DE P

FUENTE: (W Malalasekera, 2007)

Es conveniente definir dos variables F y D para representar la masa convectiva del flujo por unidad de área y la conductancia de la difusión en las caras de la celda

$$F = \rho u \quad \therefore \quad D = \frac{\Gamma}{\delta x}$$

La ecuación de convección y difusión en su forma integral es escrita como:

$$F_e \Phi_e - F_w \Phi_w = D_e (\Phi_e - \Phi_p) - D_w (\Phi_p - \Phi_w) \quad (2.21)$$

Y la ecuación integrada de la continuidad quedaría:

$$F_e - F_w = 0 \quad (2.22)$$

Se asume que el campo de velocidad es conocido de alguna forma, por lo que se debe calcular la propiedad transportada Φ en las caras e y w. El problema se da en como representar Φ_e y Φ_w en función del Φ_p o valor central, para esto se tiene las técnicas de aproximación de caras o técnicas de discretización.

La convección ocasiona que la propiedad del flujo sea transferida a lo largo de la dirección de la velocidad.

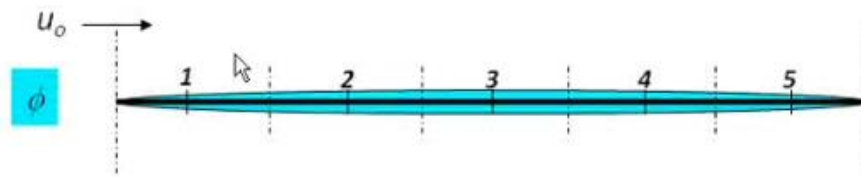


FIGURA 2.11 ESQUEMA DE CONVECCIÓN

FUENTE: (CCTech, 2015)

La difusión ocasiona que la propiedad sea transportada uniformemente alrededor de cada elemento.

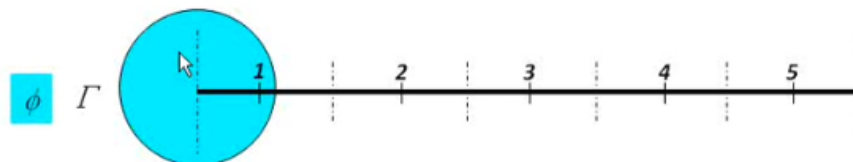


FIGURA 2.12 ESQUEMA DE DIFUSIÓN

FUENTE: (CCTech, 2015)

Lo que generalmente se tiene en el transporte en los fluidos es una mezcla de ambos.

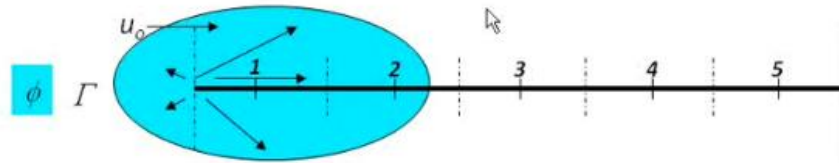


FIGURA 2.13 ESQUEMA MIXTO

FUENTE: (CCTech, 2015)

2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE TURBULENCIA

Todos los fluidos encontrados en la práctica de ingeniería, como el flujo de jets, tuberías y contornos en forma de discos, ya sean en dos o en tres dimensiones, se convierten en inestables cuando sobrepasan cierto número de Reynolds. Cuando el flujo tiene un Reynolds alto, el flujo se vuelve turbulento, un estado de movimiento caótico y al azar se desarrolla en el cual la velocidad y la presión cambian continuamente con respecto al tiempo en grandes regiones del flujo. El número de Reynolds de un flujo representa una medida de la importancia relativa de las fuerzas inerciales asociadas con el efecto convectivo, respecto de las fuerzas viscosas. En experimentos en algunos sistemas de fluidos es observado que, con valores menores que el número de Reynolds crítico Re_{crit} , el flujo es suave y capas ordenadas del flujo circulan adyacentes una de otra en una manera ordenada; si las condiciones de borde no cambian con respecto al tiempo el flujo es permanente y este régimen es conocido como flujo laminar. Con valores de Reynolds mayores al Re_{crit} , una serie complicada de eventos se dan lugar lo que eventualmente conlleva a un cambio radical de la característica del flujo; en el estado final el comportamiento del flujo es aleatorio y caótico, el movimiento se convierte en no permanente intrínsecamente, incluso con condiciones de borde constantes impuestas, la velocidad y todas las otras propiedades del fluido varían en una manera aleatoria y caótica, este régimen es llamado flujo turbulento. Incluso en flujos en donde la velocidad y la presión varían únicamente en una o en dos

dimensiones, las fluctuaciones turbulentas siempre tienen características en tres dimensiones, por lo que la visualización del flujo turbulento revela estructuras de flujo rotacional, llamados eddys turbulentos, con una amplia escala de longitudes. Partículas de fluido que están inicialmente separadas por una distancia considerable pueden ser acercadas por el movimiento de eddys en flujos turbulentos, como consecuencia, el calor, la masa y el momento son intercambiados efectivamente.

La velocidad característica v y la longitud característica ℓ de los eddys grandes son del mismo orden que la escala de velocidad U y la escala de longitud L del flujo principal. Dado que un número de Reynolds de un eddy grande $Re_\ell = \frac{v\ell}{\nu}$ formado de la combinación de estas escalas de eddys con la viscosidad cinemática será grande en todos los flujos turbulentos, y dado que no es tan diferente en magnitud que $\frac{UL}{\nu}$ que es grande también, sugiere que los eddys grandes son dominados por las fuerzas inerciales, y los efectos viscosos son despreciables; como consecuencia los eddys grandes son efectivamente no viscosos, y el momento angular es conservado durante el estiramiento de los vórtices, esto ocasiona que la velocidad rotacional se incremente y el radio de la sección transversal se reduzca. El trabajo de estiramiento de los eddys en el flujo principal provee la energía que mantiene la turbulencia. Los eddys pequeños son de alguna manera estirados en eddys grandes y más débiles con el flujo principal, de esta manera la energía cinética es manejada y disminuida desde los eddys grandes progresivamente a eddys más pequeños en lo que se llama cascada de energía. Todas las propiedades fluctuantes de un flujo turbulento contienen energía en un amplio rango de frecuencias o números de onda $= \frac{2\pi f}{U}$ donde f es la frecuencia.

La energía espectral $E(k)$ es mostrada como función del número de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ donde λ es la longitud de onda de los eddys. La energía espectral $E(k)$ con unidades m^3/s^2 es la energía cinética por unidad de masa y por unidad de fluctuaciones del número de onda alrededor del número de onda k . La figura siguiente muestra el espectro de energía de la turbulencia aguas abajo de una celda.

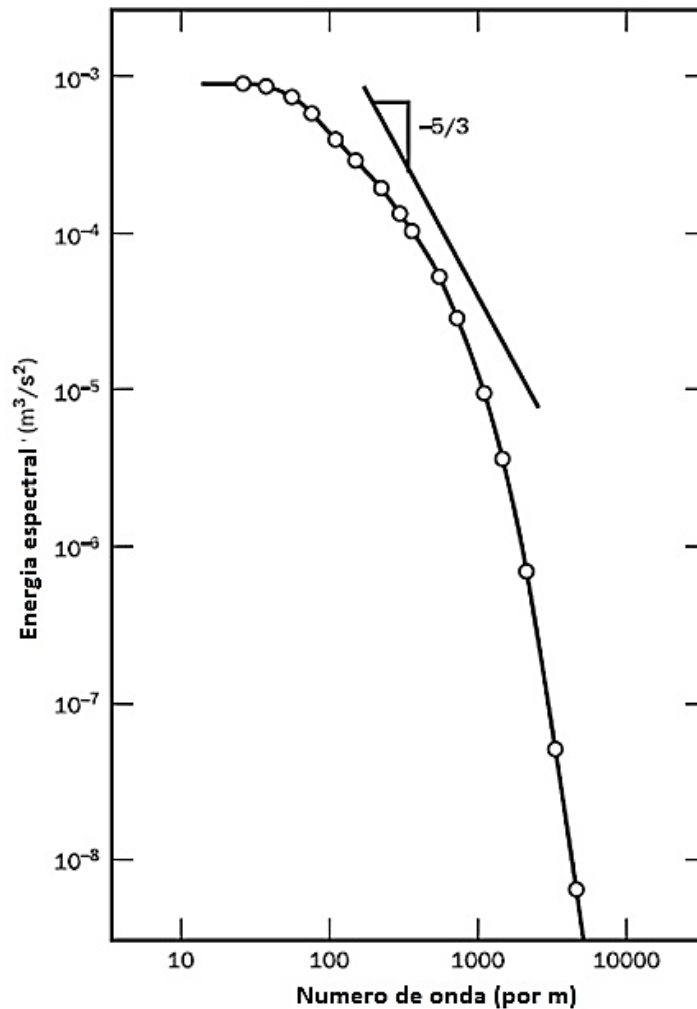


FIGURA 2.14 ESPECTRO DE ENERGÍA PARA UN FLUJO TURBULENTO

FUENTE: (W Malalasekera, 2007) ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

La figura anterior muestra que la energía contiene picos a los números de onda bajos, por lo que los eddys grandes son los más energéticos, ellos adquieren la energía mediante interacciones con el flujo principal. El valor de $E(k)$ disminuye rápidamente a medida que el número de onda se incrementa, por lo que los eddys pequeños son los que tienen el menor contenido de energía.

Las escalas mas pequeñas del movimiento en un flujo turbulento, con longitudes del orden de 0,1 a 0,01 mm y frecuencias de aproximadamente 10 kHz, estan dominados por los efectos viscosos. El numero de Reynolds Re_η de los eddys pequeños basados en sus velocidades características v , y longitudes

características η es igual a 1, $Re_\eta = \frac{v\eta}{\nu} = 1$, por lo que las escalas mas pequeñas presentes en un flujo turbulento, son en las que la inercia y los efectos viscosos son de igual fuerza. estas escalas son llamadas microescalas de Kolmogorov, en honor al científico Ruso que investigó a profundidad la estructura de la turbulencia. En estas escalas el trabajo es realizado en contra del esfuerzo viscoso, de tal forma que la energía asociada con el movimiento de eddys de escala pequeña es disipada y convertida en energía térmica interna; esta disipacion resulta en un aumento de pérdidas de energía asociada con los flujos turbulentos. Las microescalas de Kolmogorov pueden ser expresadas en términos del grado de disipación de energía de un flujo turbulento y la viscosidad del fluido, la cual usa la noción de que en todo flujo turbulento el grado de producción de energía turbulenta tiene que estar en balance con el grado de disipación para prevenir un crecimiento ilimitado de energía turbulenta. Las relaciones entre las escalas pequeñas de longitud, tiempo y velocidad (η, τ, v) y las escalas grandes de longitud, tiempo y velocidad (ℓ, T, ϑ) son:

$$\text{relacion de escalas de longitud} \quad \frac{\eta}{\ell} \approx Re_\ell^{-3/4}$$

$$\text{relacion de escalas de tiempo} \quad \frac{\tau}{T} \approx Re_\ell^{-1/2}$$

$$\text{relacion de escalas de velocidad} \quad \frac{v}{\vartheta} \approx Re_\ell^{-1/4}$$

El comportamiento de los eddys grandes es independiente de la viscosidad y debe depender de la escala de velocidad ϑ y la escala de longitud ℓ , por lo que se esperaría que el contenido de la energía espectral de estos eddys se debería comportar respondiendo a la siguiente función: $E(k) = \alpha \vartheta^2 \ell$, donde $k = \frac{1}{\ell}$. Debido a que la escala de la longitud ℓ es relacionada con la escala de longitud del proceso de producción de turbulencia, se espera que la estructura de los eddys grandes sea altamente anisotrópico, o sea que las fluctuaciones son diferentes en direcciones diferentes, y el fenómeno es afectado fuertemente por las condiciones de borde.

Kolmogorov propuso que la estructura de los eddys pequeños y su energía espectral $E\left(k = \frac{1}{\eta}\right)$ debe depender únicamente del grado de disipación de la energía turbulenta ε con unidades en $\frac{m^2}{s^3}$ y de la viscosidad cinemática del fluido. La relación para la energía espectral de los eddys pequeños sería: $E\left(k = \frac{1}{\eta}\right) \propto \nu^{5/4} \varepsilon^{1/4}$. A números de Reynolds altos del flujo, los eddys pequeños en un flujo turbulento son isotrópicos.

Finalmente, Kolmogorov derivó las propiedades espectrales universales de vórtices o eddys de tamaño intermedio, los cuales son suficientemente grandes para que su comportamiento no sea afectado por la acción viscosa como en los eddys grandes, pero suficientemente pequeños para que los detalles de su comportamiento puedan ser expresados como una función del grado de disipación de energía ε como en los eddys pequeños. La escala de longitud apropiada de estos eddys es $1/k$ y la energía espectral de estos eddys (el rango subinercial) satisface la siguiente relación $E(k) = \alpha k^{-5/3} \varepsilon^{2/3}$. Medidas muestran que la constante $\alpha = 1.5$. En la figura anterior se incluye una línea con pendiente de $-5/3$, indicando que, para las mediciones mostradas, la separación de la escala es insuficiente para un subrango inercial claro. El traslape ocurre entre los grandes y los pequeños eddys, y está localizado aproximadamente en $k \approx 1000$.

2.4.1 CALCULO DE FLUJOS TURBULENTOS

La turbulencia ocasiona la aparición de eddys en el flujo con un amplio rango de escalas de longitud y de tiempo, los cuales interactúan de una manera dinámica compleja, por lo que grandes esfuerzos han sido realizados para crear métodos numéricos para capturar los efectos importantes debidos a la turbulencia. Los métodos numéricos de turbulencia pueden ser divididos en las siguientes tres categorías:

- Modelos de turbulencia RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations)
- Modelos de turbulencia LES (Large eddy simulation)

- Modelos de turbulencia DNS (Direct numerical simulation)

2.4.1.1 Modelos de turbulencia RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations)

En estos modelos se da una especial atención en el flujo principal, y en los efectos de la turbulencia en las propiedades del flujo principal. Previo a la aplicación de los métodos numéricos, las ecuaciones de Navier – Stokes son promediadas en el tiempo, por lo que algunos términos extras en las ecuaciones promediadas en el tiempo aparecen debido a la interacción entre varias fluctuaciones turbulentas; estos términos extras son modelados con los modelos de turbulencia RANS. Los recursos computacionales requeridos para obtener resultados muy aproximados en los cálculos computacionales del flujo son relativamente modestos, por lo que esta aproximación ha sido muy utilizada en cálculos de flujo en ingeniería en las últimas tres décadas. Algunos de estos modelos son:

- Mixing length model
- The k – ε model
- Reynolds stress equation models
- Advanced turbulence models

El campo del modelamiento de la turbulencia ha provisto de un área de intensa investigación dentro de la dinámica de fluidos computacional, y dentro de la comunidad de la ingeniería. La industria en general, tiene muchos problemas de flujos que deben ser resueltos, por lo que la selección de un modelo adecuado de turbulencia es indispensable en la entrega de resultados acertados. El modelo k – ε es todavía muy utilizado en las aplicaciones de la industria, y entrega resultados útiles, a pesar de sus límites de validación (W Malalasekera, 2007), pero, afortunadamente, muchos sectores que requieren simulaciones CFD están interesados en una clase limitada de flujos, como el flujo del petróleo en los oleoductos, turbinas para energía eléctrica, etc.

2.4.1.2 Modelos de turbulencia LES (*Large eddy simulation*)

Este es un modelo intermedio de cálculo de turbulencia, el cual rastrea el comportamiento de los eddys grandes. Este método realiza un filtro en el espacio de la ecuación de Navier – Stokes para flujo inestacionario previo al inicio del cómputo, este filtro ingresa a los eddys grandes y rechaza a los eddys pequeños. Los efectos en el resultado del omitir a los eddys pequeños del flujo calculado con el flujo principal más los eddys grandes, es incluido por medio de un modelo de subgrilla. Las ecuaciones de flujo inestacionario deben ser resueltas, por lo que las demandas en recursos computacionales en términos de espacio de almacenamiento y volumen de cálculo son mayores, sin embargo, en los tiempos actuales esta técnica ha empezado a abordar problemas CFD con geometrías complejas con resultados satisfactorios. Algunos de estos modelos son:

- Smagorinsky–Lilly SGS model
- Higher-order SGS models
- Advanced SGS models

La naturaleza inestacionaria inherente de los modelos LES sugiere que los requerimientos computacionales deberían ser mayores comparados con los modelos clásicos, este precisamente es el caso cuando se comparan los modelos LES con los modelos de dos ecuaciones $k - \varepsilon$ y $k - \omega$; sin embargo, el modelo Reynolds stress equation requiere la solución de siete ecuaciones parciales diferenciales adicionales, y los modelos LES pueden necesitar el doble de requerimiento computacional comparado con el modelo Reynolds stress equation para el mismo cálculo. Si se considera esta pequeña diferencia en requerimientos computacionales, el planteamiento de resolución cambia al conseguir una solución muy acertada con la habilidad de los modelos LES de resolver ciertos parámetros dependientes del tiempo. Los flujos en donde los vórtices de gran escala tienen una influencia substancial en el desarrollo del flujo es recomendado modelarlos con LES, como el desprendimiento de vórtices en bordes, flujo en conductos difusivos, flujo en cambios de dirección en tuberías, etc. la inclusión de los modelos LES en los programas CFD comerciales es reciente, por lo que el rango de experiencias de validación es limitada.

2.4.1.3 Modelos de turbulencia DNS (Direct numerical simulation)

Esta simulación calcula el flujo principal y todas las fluctuaciones turbulentas en velocidad. Las ecuaciones de Navier – Stokes para flujo inestacionario son resueltas en un mallado espacial lo suficientemente fino para que se pueda resolver las escalas de longitud de Kolmogorov en donde la disipación de la energía se da lugar, y con intervalos de tiempo lo suficientemente pequeños para resolver el periodo de la fluctuación más rápida. El costo computacional de estos cálculos es elevado, por lo que este método no es utilizado para aplicaciones de flujo de tipo industrial, ni de ingeniería en general.

2.5 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DESDE LA PERSPECTIVA DEL SOFTWARE

Cada programa para análisis de tipo CFD tiene una arquitectura propia, y una interfaz de usuario propia también, la cual permite a los usuarios la comunicación y el ingreso de los parámetros para la simulación; adicional, todo software CFD tiene su código FUENTE, y en muchos casos es posible su edición, y en otros solo es posible la realización de una personalización de un procedimiento.

2.5.1 ARQUITECTURA DE UN SOFTWARE CFD

Todo programa de CFD tiene como componentes un archivo de entrada y un archivo de salida, dentro del archivo de entrada se definen muchos parámetros como el modelo físico, en donde se tienen parámetros físicos como el flujo, definido por la ecuación de Navier Stokes; es importante que un software permita la edición de ciertos parámetros, como el tipo de ecuaciones a ser resueltas, y la definición del dominio y las condiciones de borde.

El software CFD debe tener la capacidad de manejo de la información, la cual permitirá discretizar la gran cantidad de información computada en información útil

y procesable para el usuario, para que ésta pueda ser analizada, a esto se llama postproceso y el software debe tener una interfaz amigable que permita la comprensión de los resultados de un análisis.

Muchos programas CFD en el mercado permiten la personalización de procesos, esto se refiere a la automatización de cierto proceso repetitivo, para minimizar la intervención del usuario; también se pueden añadir nuevas subrutinas, y la exportación de resultados a otras plataformas y programas.

2.5.2 CARACTERÍSTICAS DE UN SOFTWARE CFD

Los programas para análisis de dinámica de fluidos computacional hoy en día deben tener la capacidad de manejar:

- El modelamiento del flujo de un fluido y la transferencia de calor en geometrías complejas
- El manejo de diferentes tipos y tamaños de mallado (tetraedros, hexaedros, pirámides, grillas mixtas)
- El manejo de diferentes tipos de simulación como un flujo multifásico, cavitación, combustión

El lenguaje de programación del código FUENTE es importante en el software para la personalización de los procesos; es en este lenguaje que las ecuaciones parciales diferenciales de la dinámica de fluidos son resueltas, por ejemplo, ANSYS FLUENT tiene como lenguaje FUENTE C, y ANSYS CFX tiene como lenguaje FUENTE FORTRAN 90. Adicional se busca exactitud en los resultados, robustez en las simulaciones y rapidez en los procesos, y en la actualidad se han popularizado las capacidades de simulación remota, y procesamiento paralelo.

Para poder obtener una simulación robusta, o sea, que el programa no colapse durante el proceso de cómputo, existen recomendaciones de condiciones de borde a simular (ver tabla 2.2):

TABLA 2.2 CONDICIONES DE BORDE PARA DAR ROBUSTEZ A LA SIMULACIÓN

ROBUSTEZ	INGRESO	SALIDA	OBSERVACIONES
Más robusta	Velocidad, Cantidad de fluido	Presión estática	La presión total al ingreso es un resultado implícito de la predicción.
Robusta	Presión total	Velocidad, Cantidad de fluido	La presión estática a la salida y la velocidad al ingreso son parte de la solución
Sensible a las condiciones iniciales estimadas	Presión total	Presión estática	El flujo de masa del sistema es parte de la solución
Poco fiable	Presión estática	Presión estática	Estas condiciones no son recomendadas. El nivel total de presión al ingreso y la cantidad de fluido son un resultado implícito de las estimaciones.

FUENTE: (CCTech, 2015) ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de la presente investigación, al conocer los caudales a analizarse es recomendable tener una simulación muy robusta, por lo que se recomienda simular el dominio colocando la cantidad de fluido al ingreso del dominio, y una presión estática a la salida del dominio para obtener una simulación muy robusta, en la cual la presión total al ingreso es un resultado implícito de la simulación.

CAPITULO 3

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS – BASE TEÓRICA

3.1 TIPOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos en ríos en términos de carga total, comprende la totalidad de material transportado a través del agua que fluye, y está compuesto de carga disuelta, carga suspendida y carga de fondo.

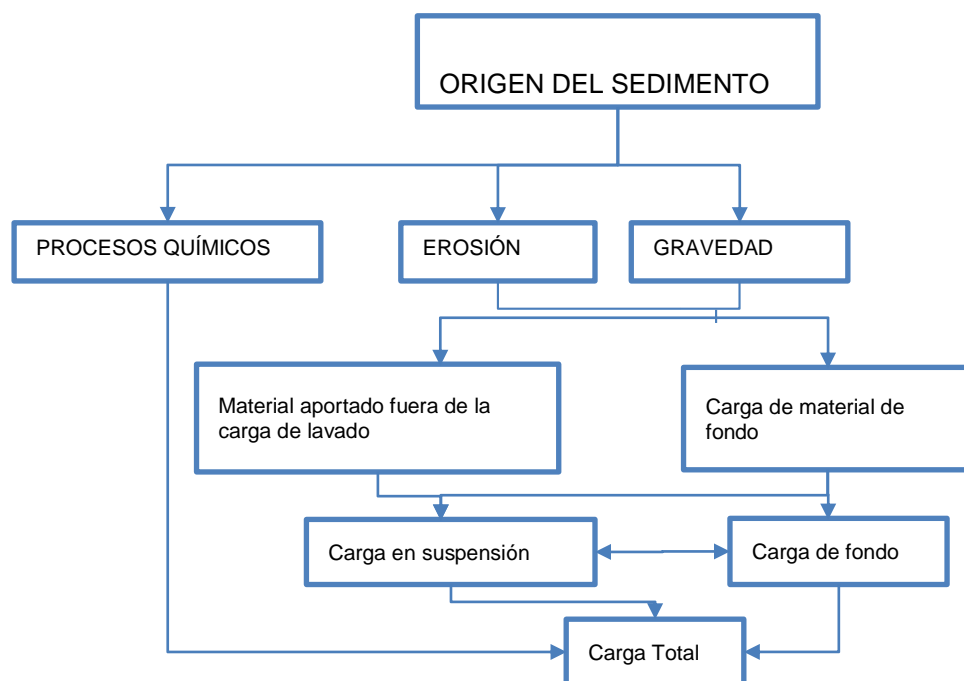


FIGURA 3.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

FUENTE: (Bechteler, 2006) ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

La carga disuelta es generalmente producida por desintegración química y puede contener sustancias orgánicas disueltas. La carga suspendida consiste en partículas sólidas mantenidas en suspensión por efectos de la densidad menor a la del agua, o por efectos de turbulencia y difusión. Los tamaños de las partículas varían entre el rango del limo y la arcilla, hasta la arena. La carga de fondo puede incluir arenas, como gravas y cantos rodados, y depende de la velocidad de flujo. El transporte de la carga de fondo es intermitente.

La carga en suspensión es primordialmente transportada a la velocidad del flujo, sin contacto con el fondo, mientras que la carga de fondo es transportada en contacto con el fondo del cauce, por lo que se mueve a una velocidad mucho menor que la velocidad del flujo. Este criterio permite discretizar el análisis entre carga suspendida y carga de fondo.

3.2 EL AGUA COMO MEDIO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

La propiedad física más importante del agua en el contexto del transporte de sedimentos es la densidad ρ_w , y la viscosidad ν , que son funciones principalmente de la temperatura y en menor medida de la presión.

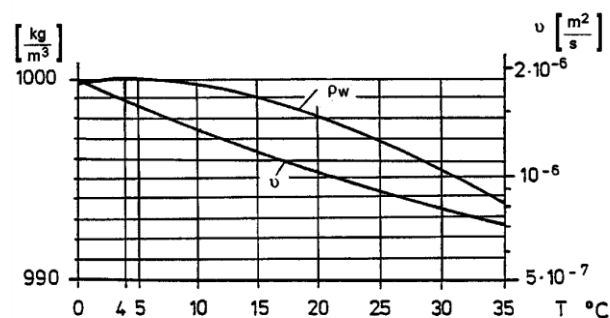


FIGURA 3.2 DENSIDAD Y VISCOSIDAD CINEMÁTICA DEL AGUA PURA CON LA TEMPERATURA

FUENTE: (Bechteler, 2006)

3.2.1 EFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS

3.2.1.1 *Tipos de fluido agua – solidos*

Graf (1998) distinguió tres tipos de fluido agua – solido:

Fluido Newtoniano: cuando la concentración de solidos $C \ll 1 \%$, y la diferencia de densidad entre el agua pura y la mezcla es $\Delta\rho \ll 16 \text{ kg/m}^3$.

Fluido Casi Newtoniano: cuando la concentración de solidos $C < 8 \%$, y la diferencia de densidad entre el agua pura y la mezcla es $\Delta\rho < 130 \text{ kg/m}^3$. Esto incluye el transporte de sedimentos en suspensión concentrada y corrientes turbulentas.

Fluido No Newtoniano: cuando la concentración de solidos $C > 8 \%$, y la diferencia de densidad entre el agua pura y la mezcla es $\Delta\rho > 130 \text{ kg/m}^3$. Esto incluye el transporte de sedimentos en suspensión hiperconcentrada (corrientes de agua con pendientes suaves y concentración alta de sedimentos finos) y corrientes turbulentas; también incluye flujos de lodos y escombros en donde todas las partículas de todos los tamaños participan del movimiento.

3.2.1.2 *Fluidos con concentraciones bajas.*

Los factores de relevancia en las bajas concentraciones en el agua son el contenido de sal y partículas sólidas. Ambas, la densidad y la viscosidad cinemática se incrementan junto con el incremento de la concentración de sal, como se muestra en la figura siguiente.

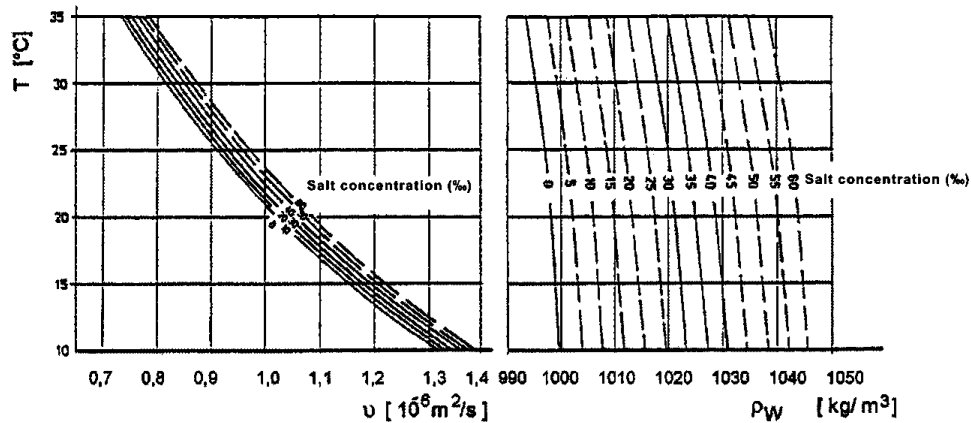


FIGURA 3.3 VISCOSIDAD CINEMÁTICA Y DENSIDAD DEL AGUA SALADA
EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

FUENTE: (Bechteler, 2006)

Para el caso de los sólidos suspendidos, la densidad se incrementa en función de la concentración volumétrica, y responde a la siguiente función:

$$\rho = \rho_w \cdot (1 - C) + \rho_f \cdot C \quad (3.1)$$

donde:

ρ : Densidad agua y solido suspendido

C : concentracion de solidos suspendidos $C = \left[\frac{(^{\circ}/_{00})}{1000} \right]$

ρ_f : densidad de la particula

La influencia de las partículas suspendidas en la viscosidad no puede ser calculada por medios matemáticos, pero ensayos han demostrado que la viscosidad disminuye inicialmente, posiblemente provocado por la amortiguación de la turbulencia, y luego se incrementa para concentraciones elevadas (Bechteler, 2006).

La viscosidad es dependiente de la temperatura, pero independiente de la presión. La dependencia de la viscosidad cinemática con respecto de la temperatura, para agua de río está dada por:

$$\nu = [1.14 - 3.1 \times 10^{-2}(t - 15) + 6.8 \times 10^{-4}(t - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (3.2)$$

donde:

t : temperatura en °C

3.2.1.3 Fluidos con concentraciones altas

Altos niveles de concentración de sedimentos, como ocurre en flujos con escombros, no muestran una relación lineal entre los esfuerzos cortantes en los contornos, y la gradiente de velocidad del fluido, como se da en los fluidos Newtonianos; a estos se los considera como fluidos no newtonianos con un comportamiento reológico diferente.

3.3 PROPIEDADES BÁSICAS DE LAS PARTÍCULAS

3.3.1 TAMAÑO DE LA PARTÍCULA

La propiedad principal que caracteriza a una partícula es el diámetro, es el parámetro más importante para el análisis del transporte de sedimentos. El modo para el transporte de sedimentos y sus mecanismos son parcialmente dependientes del tamaño de la partícula a ser transportada, y puede ser representada de diferentes formas:

Diámetro nominal

Diámetro de la misma superficie

Diámetro de tamiz

Diámetro de igual caída

Diámetro de igual sedimentación

El diámetro nominal (d_n) es el diámetro de la esfera que tiene el mismo volumen que el de la partícula de sedimento.

$$d_n = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} \quad (3.3)$$

donde:

V : *volumen de la partícula de sedimento*

El volumen apropiado puede ser calculado considerando a una partícula de sedimento como una elipsoide, y su volumen será:

$$V \approx \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3}{6} \quad (3.4)$$

donde:

$a_1 \cdot a_2 \cdot a_3$: Longitudes mayor, intermedia y menor respectivamente

sobre ejes mutuamente perpendiculares de un sistema cartesiano

El diámetro de la misma superficie (d_a) es el diámetro de una esfera que tiene la misma superficie que el de la partícula de sedimento.

$$d_a = \left(\frac{S}{\pi}\right)^{0.5} \quad (3.5)$$

donde

S : superficie total de la partícula de sedimento

En diámetro de igual superficie es utilizado usualmente para caracterizar a las partículas de forma plana.

El diámetro de tamiz (d_m) es el diámetro de la esfera que iguala a la longitud de un lado de una apertura cuadrada de tamiz, por la cual una partícula dada de sedimento puede apenas atravesar. Para tamaños de sedimento de fondos naturales de causes (0.2 – 20 mm), el diámetro de tamiz es aproximadamente calculado con:

$$d = 0.9 d_n \quad (3.6)$$

El diámetro de igual caída (d_t) es el diámetro de una esfera que tiene una densidad relativa de 2.65 y una velocidad terminal de caída igual a la dada por la partícula de sedimento en agua pura y quieta a 4° C.

El diámetro de igual sedimentación (d_w) es el diámetro de una esfera que tiene una velocidad terminal de caída y densidad relativa igual a la de la partícula de sedimento en el mismo fluido, bajo la misma presión atmosférica y temperatura.

3.3.2 FORMA DE UNA PARTÍCULA DE SEDIMENTO

La forma de una partícula de sedimento se refiere a la forma geométrica general, independiente de su tamaño o composición. En el análisis de sedimentos, uno de los parámetros de forma más relevantes es la esfericidad (S_c), la cual se define como la relación de la superficie de una esfera del mismo volumen que el de una partícula de sedimento, con respecto a la superficie real de la partícula de sedimento. La esfericidad básicamente caracteriza el movimiento de una partícula sedimentando relativo con el fluido. Debido a que la superficie real de una partícula pequeña es difícil de determinar, Wadell (1932) redefinió a la esfericidad como:

$$S_c = \left(\frac{V}{V_c}\right)^{1/3} \quad (3.7)$$

donde:

V_c : volumen de la esfera que circunscribe a la partícula

La esfericidad puede ser calculada aproximadamente con la siguiente relación:

$$S_c \approx d_n/a_1 \quad (3.8)$$

Krumbein (1941) también desarrollo una expresión para determinar la esfericidad:

$$S_c = \left(\frac{a_2 \cdot a_3}{a_1^2} \right)^{1/3} \quad (3.9)$$

Otro parámetro de forma relevante es la redondez, y se define como el radio promedio de la curvatura de varios bordes de una partícula de sedimento con respecto al radio de un círculo inscrito en el área proyectada máxima de una partícula. A diferencia de la esfericidad, la redondez resulta ser un parámetro trivial en la hidrodinámica del transporte de sedimentos.

Las partículas con forma irregular son usualmente definidas por el Factor de forma de Corey S_p (Vanoni 1977).

$$S_p = \frac{a_3}{(a_1 \cdot a_2)^{0.5}} \quad (3.10)$$

El factor de forma de Corey, el cual siempre es menor que la unidad, generalmente tiene el valor de 0.7 para partículas naturalmente desgastadas. La desventaja de factor de Corey es que no toma en cuenta la distribución de la superficie y el volumen de la partícula, por ejemplo, un cubo y una esfera tienen el mismo factor de forma de Corey iguala 1; pero las características hidrodinámicas como las fuerzas de arrastre y sustentación inducidas en una partícula en forma de cubo son diferentes a las de una partícula esférica. Para superar esta dificultad, Alger y Simons (1968) propusieron un parámetro de forma S_{sp} que está dado por:

$$S_{sp} = S_p \frac{d_a}{d_n} \quad (3.11)$$

3.4 VELOCIDAD TERMINAL DE SEDIMENTACIÓN DE UNA PARTÍCULA

La velocidad gravitacional de sedimentación es uno de los parámetros clave en el transporte de sedimentos. Actúa como una fuerza de recuperación, empujando contra la fuerza de arrastre entrante turbulenta que actúa sobre la partícula de sedimento. Considerando que en el proceso de transporte de sedimentos naturales, los sedimentos de río rara vez son esféricos, la velocidad de caída de una esfera rígida es utilizada usualmente como una aproximación en la predicción de la velocidad de sedimentación de una partícula en flujos naturales.

3.4.1 VELOCIDAD TERMINAL DE SEDIMENTACIÓN DE UNA PARTÍCULA ESFÉRICA

En la hidrodinámica, una partícula cae con su velocidad terminal de sedimentación si su velocidad es constante; esto es debido al arrastre ejercido por el fluido por el cual la partícula cae. Cuando la partícula que cae se acelera debido a la gravedad, la fuerza de arrastre que actúa sobre la partícula se incrementa junto con el incremento en la velocidad, causando que la aceleración de la partícula, y a su vez, la fuerza inercial actuando en la partícula se reduzca; dando como resultado que la partícula deja de acelerar y continua cayendo a una velocidad constante, llamándose a esta velocidad, la velocidad terminal de sedimentación o la velocidad de sedimentación. Una partícula cayendo en un fluido, adquiere su velocidad de sedimentación w_s cuando la fuerza gravitacional sumergida de la partícula F_G iguala la fuerza ascendente de arrastre F_D , como se muestra en la siguiente figura.

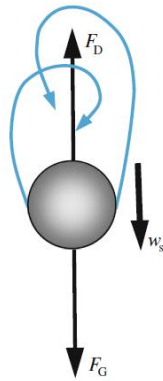


FIGURA 3.4 REPRESENTACIÓN DE UNA ESFERA CAYENDO EN UN FLUIDO ESTÁTICO A UNA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN w_s

FUENTE: (Subhasish Dey, 2014)

Para una partícula esférica cayendo a su velocidad terminal de sedimentación w_s en una columna de agua, la siguiente ecuación es obtenida:

$$\underbrace{\Delta \rho g \frac{\pi}{6} d^3}_{F_G} = \underbrace{C_D \frac{\rho}{2} w_s^2 \frac{\pi}{4} d^2}_{F_D} \quad (3.12)$$

dónde:

$$\Delta = s - 1$$

ρ : densidad del agua

d : diametro de la particula cayendo

C_D : coeficiente de arrastre

Despreciando todos los términos inerciales, Stokes (1851) analizo la ecuación de Navier - Stokes para el rango de flujo laminar para un número de Reynolds de partícula $R_e (= w_s d / \nu) < 1$, ayudado por una función de corriente para derivar una

solución para el arrastre como $F_D = 3\pi\mu d w_s$, y entrega un coeficiente de arrastre expresado como:

$$C_D = \frac{24}{R_e} \quad (3.13)$$

Oseen (1927) incluyó algunos términos inerciales en la resolución de la ecuación de Navier – Stokes para obtener el coeficiente de arrastre como:

$$C_D = \frac{24}{R_e} \left(1 + \frac{3}{16} R_e \right) \quad (3.14)$$

La ecuación de Oseen es aplicable para números de Reynolds menores o iguales que 2. Schiller y Naumann (1933) utilizaron datos experimentales para Reynolds menores que 800, para desarrollar una curva con la siguiente relación:

$$C_D = \frac{24}{R_e} (1 + 0.15 \cdot R_e^{0.687}) \quad (3.15)$$

Rouse (1938) utilizó la información experimental disponible para preparar una curva de coeficiente de arrastre versus el número de Reynolds, para la estimación de la velocidad terminal de sedimentación de una esfera, la figura se muestra a continuación:

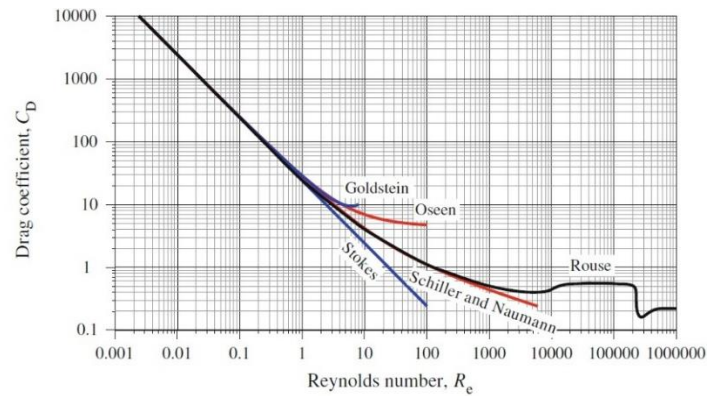


FIGURA 3.5 COEFICIENTE DE ARRASTRE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS DE PARTÍCULA PARA FORMA ESFÉRICA.

FUENTE: (Subhasish Dey, 2014)

3.4.2 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE SEDIMENTO

Rubey (1933) fue el primero en introducir una fórmula para la determinación de la velocidad terminal de sedimentación de las partículas de grava, arena y arcilla. Desde entonces muchos investigadores plantearon muchas relaciones semiteóricas y empíricas para la velocidad terminal de sedimentación de las partículas de sedimento. Generalmente, el coeficiente de arrastre, de acuerdo con Cheng (1997) puede generalizarse como:

$$C_D = \left[\left(\frac{P}{R_e} \right)^{1/m} + Q^{1/m} \right]^m \quad (3.16)$$

Donde P y Q son los coeficientes, y m es un exponente. El número de Reynolds de la partícula R_e es estimado usando el diámetro nominal d_n de las partículas de sedimento como $R_e = w_s d_n / \nu$. La tabla siguiente recopila los valores de P, Q y m obtenidos de fórmulas dadas por diferentes investigadores para partículas de

sedimento con desgaste natural, con un factor de forma $S_p \approx 0.7$, el parámetro de partícula adimensional D_* se lo determina con la siguiente expresión:

$$D_* = d_n \left(\frac{\Delta g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (3.17)$$

TABLA 3.1. VALORES DE P, Q Y M

Referencias	P	Q	M
Rubey (1933)	24 (para $d_n \leq 1 \text{ mm}$) y 0 (para $d_n > 1 \text{ mm}$)	2.1	1
Zhang (1961)	34	1.2	1
Zanke (1977)	24 (para $d_n \leq 1 \text{ mm}$) y 0 (para $d_n > 1 \text{ mm}$)	1.1	1
Raudkivi (1990)	32	1.2	1
Fredsøe y Deigaard (1992)	36	1.4	1
Julien (1998)	24	1.5	1
Cheng (1997)	32	1	1.5
Soulsby (1997)	26.4	1.27	1
She (2005)	35	1.56	1
Wu y Wang (2006)	$53.5 \exp(-0.65 S_p)$	$5.65 \exp(-2.5 S_p)$	$0.7 + 0.9 S_p$
Camenen (2007)	24.6	0.96	1.53

FUENTE: (Subhasish Dey, 2014)

3.5 DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPIOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

Calcular el transporte de sedimentos requiere conocimiento de las condiciones en las cuales las partículas de sedimento comienzan a moverse, pero debido al gran número de parámetros gobernando al movimiento incipiente, no es posible una definición determinística. El cálculo de las condiciones de flujo muchas veces se basan en asunciones ideales, como una distribución logarítmica de la velocidad, etc, pero también las propiedades de los sedimentos son muy difíciles de describir

con exactitud, y además incluyen una multitud de coeficientes como parámetros de forma, tamaño de la partícula, distribución, grado de compactación, etc.

Mientras que los ríos en planicies tienden a mostrar un material de fondo homogéneo, sedimentos encontrados en ríos de montaña a altitudes medias y altas se caracterizan por un amplio rango de tamaños de partículas, las cuales favorecen la formación de características especiales tal como el acorazamiento como se muestra en la siguiente figura. El presente trabajo se enfoca en las condiciones necesarias para el inicio del movimiento de las partículas de sedimento con diámetros específicos, asumiendo que tendremos partículas esféricas como sedimentos.

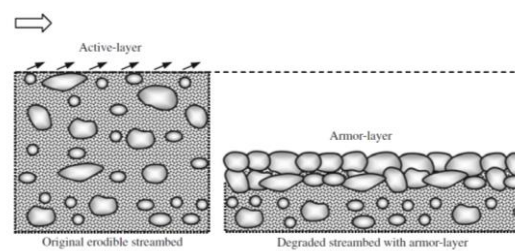


FIGURA 3.6 ACORAZAMIENTO DEL LECHO DEL RIO

FUENTE: (Subhasish Dey, 2014)

3.5.1 FUERZA HIDRODINÁMICA DE ARRASTRE Y LEVANTAMIENTO EN UNA PARTÍCULA

Cuando un flujo de fluido real envuelve a una partícula sólida, la fuerza hidrodinámica de resistencia contribuye en dos maneras; en primer lugar, la resistencia debido a la viscosidad es desarrollada en la pared de la partícula en forma de esfuerzos cortantes, y en segundo lugar, el diferencial de intensidades de presiones actúan en una componente normal a la pared del sedimento. La integración de ambas fuerzas sobre la superficie total de la partícula compone a la fuerza hidrodinámica total. La componente de la fuerza hidrodinámica en la dirección del flujo se llama arrastre, y la fuerza con dirección normal a la dirección

del flujo es llamada levantamiento, la cual es la fuerza en la cual el fluido tiende a levantar a la partícula, tal y como se muestra en la figura siguiente.

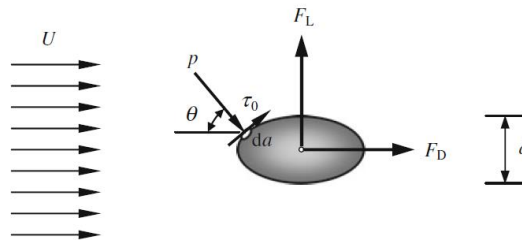


FIGURA 3.7 ARRASTRE Y LEVANTAMIENTO HIDRODINÁMICO DEBIDO AL FLUJO QUE CIRCULA POR UNA PARTÍCULA

FUENTE: (Subhasish Dey, 2014)

El arrastre de un cuerpo de una partícula está dado por dos contribuciones, el arrastre por la fricción de la superficie, y el arrastre por la presión; aunque el arrastre es la suma de las componentes del esfuerzo cortante τ_0 y la presión p en la dirección del flujo, respectivamente. En la figura anterior, τ_0 y p actúan en un área da tangencialmente y normalmente respectivamente, y la fuerza de arrastre está dada por la ecuación siguiente, en donde a es el área total de superficie.

$$F_D = \underbrace{\int_a \tau_0 \sin\theta \, da}_{\text{arrastre por fricción}} + \underbrace{\int_a p \cos\theta \, da}_{\text{arrastre por presión}} \quad (3.18)$$

La ecuación de arriba sugiere que ambas contribuciones del arrastre pueden teóricamente ser calculadas, sin embargo requiere conocimiento de la distribución de esfuerzo cortante sobre la superficie de la partícula y la distribución de presión alrededor de la partícula; pero, las integrales de la ecuación anterior no pueden ser evaluadas con facilidad, debido a que la descripción de τ_0 y p se vuelve incierta debido a el fenómeno de separación de la capa envolvente, por lo que resulta más simple la medición del arrastre experimentalmente y expresarlo como una función

de la fuerza de la presión dinámica $\left(\rho U^2/2\right)A$, donde A es el área proyectada de la partícula en un plano, que es normal a la dirección del flujo, por lo que la fuerza de arrastre se la expresaría de la siguiente manera:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \quad (3.19)$$

donde:

C_D : *coeficiente de arrastre determinado experimentalmente*

El levantamiento es una de las componentes de la fuerza hidrodinámica de una partícula siendo atravesada por un fluido, actúa en dirección normal a la dirección de flujo. La fuerza total de levantamiento es la integral de las fuerzas de presión normales a la dirección del flujo.

$$F_L = \int_a p \operatorname{sen}\theta \, da \quad (3.20)$$

Análogo a lo expresado para la fuerza de arrastre, la fuerza de levantamiento puede ser expresada como función de la fuerza por la presión dinámica $\left(\rho U^2/2\right)A$, donde A es el área de la proyección.

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 A \quad (3.21)$$

donde:

C_L : *coeficiente de levantamiento determinado experimentalmente*

Adicional, cuando una partícula esférica pequeña que gira con una velocidad angular ω es colocada sobre una corriente libre uniforme, adicional al arrastre, un levantamiento debido al efecto Magnus actúa sobre la partícula. Rubinow y Keller (1961) formularon este efecto de la siguiente forma:

$$F_L = \frac{\pi}{8} \rho d^3 U \omega \quad (3.22)$$

Es pertinente mencionar que el levantamiento debido al efecto Magnus en un cilindro rotando en un fluido ideal no viscoso es dado por $F_L = \rho U \Gamma$, donde Γ es la circulación del cilindro.

3.5.2 CONDICIÓN CRÍTICA DE ARRASTRE DE SEDIMENTOS

Cuando un flujo o corriente interactúa con una capa límite de material suelto, compuesto de partículas, fuerzas hidrodinámicas son formadas sobre la partícula de sedimento en el contorno del lecho de fondo; con un aumento en la velocidad de flujo, las partículas de sedimento en la superficie del lecho son arrastradas intermitentemente y al azar si la fuerza hidrodinámica de arrastre y levantamiento inducida excede cierto valor límite que supera a la fuerza estabilizante que es el peso sumergido de la partícula. Esta condición que es adecuada para el inicio del transporte del sedimento es denominada condición crítica de arrastre de sedimentos. Es importante la aclaración de que, el esfuerzo cortante en exceso inducido sobre el lecho de la corriente con relación al esfuerzo en la condición crítica es el que gobierna el mecanismo del transporte de sedimentos.

En 1753, Brahmns propuso que la velocidad de un flujo requerida para comenzar el movimiento de una partícula es proporcional al peso de la partícula elevado a la potencia de un sexto; luego en 1914, Forchheimer explico sobre la influencia del tamaño del sedimento, su clasificación y el acorazamiento en el lecho del cauce. El estudio doctoral realizado por Shields en 1936 con respecto al transporte de sedimentos fue una contribución fenomenal en el campo. El diagrama de Shields

representa la variación del esfuerzo cortante no dimensional del lecho (o parámetro crítico de Shields) con respecto al número de Reynolds del cortante correspondiente a la condición crítica del transporte del sedimento. Esta investigación es considerada la referencia de cualquier investigación de transporte de sedimentos; sin embargo, algunos investigadores han identificado algunas limitaciones ya que el diagrama concuerda en menor medida con los gráficos de datos experimentales en flujos suaves y flujos rápidos.

Muchos intentos se han realizado para modificar el diagrama de Shields, conduciendo experimentos adicionales y analizando al problema teóricamente basándose en aproximaciones determinísticas y probabilísticas. La temática del transporte de sedimentos ha tenido avances progresivos, ya que el entendimiento apropiado del fenómeno del transporte de sedimentos requiere un periodo considerable de tiempo, y en muchos casos, resultados y teorías han sido completados o modificados por otros investigadores mucho después, y en otros casos, las teorías y datos han sido dados como obsoletos; sin embargo algunos son todavía aplicables.

3.5.3 ESFUERZO CORTANTE Y TURBULENCIA

El esfuerzo cortante es la fuerza promedio por área ejercida por el agua sobre el lecho del río, esta depende del grado en el cual la velocidad cambia de cero en el fondo sobre el lecho, hasta el flujo libre sobre el lecho. En ríos y cauces naturales, el esfuerzo cortante es el resultado también de la turbulencia, la cual transfiere el momento hacia el lecho. Mientras mayor sea la turbulencia, mayor es la dimensión de las partículas que pueden ser movidas por una fuerza cortante promedio. Mediciones directas de la turbulencia son complicadas en la mayoría de los casos, pero la turbulencia afecta la distribución de la velocidad cerca al lecho, por lo que si es conocida la velocidad promedio en dos puntos cerca del lecho, es posible la evaluación del efecto de la turbulencia y el cálculo del esfuerzo cortante en el lecho con el uso de las siguientes formulas:

$$u_* = 0.17 \frac{(u_1 - u_2)}{\log(z_1 - z_2)} \quad (3.23)$$

$$\tau_0 = u_*^2 \cdot \rho_w \quad (3.24)$$

dónde:

u_* : *parametro de la velocidad de corte*

u_1, u_2 : *velocidades medidas*

z_1, z_2 : *distancias correspondientes desde el lecho*

ρ_w : *densidad del agua*

En un flujo uniforme, cuando el lecho y la superficie libre son paralelos, el esfuerzo cortante en el lecho es calculado directamente combinando la pendiente S , y el radio hidráulico R .

$$\tau_0 = g \cdot \rho_w \cdot R \cdot S \quad (3.25)$$

Shields combinó las expresiones para las fuerzas desestabilizantes del arrastre y el levantamiento, versus el peso y la fricción como fuerzas estabilizantes; la expresión para el equilibrio de las partículas será:

$$C_s = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot d} \quad (3.26)$$

Los valores de C_s bajo la curva indican una estabilidad en contra del inicio del movimiento. El diagrama esta realizado para sedimentos uniformes, pero puede ser utilizado para sedimentos mixtos con una buena aproximación utilizando el d_{60}

como d (el 60% más fino). Para usos prácticos se puede utilizar $C_c = 0.06$ para diámetros mayores a 1mm.

El diagrama de Shields se muestra a continuación:

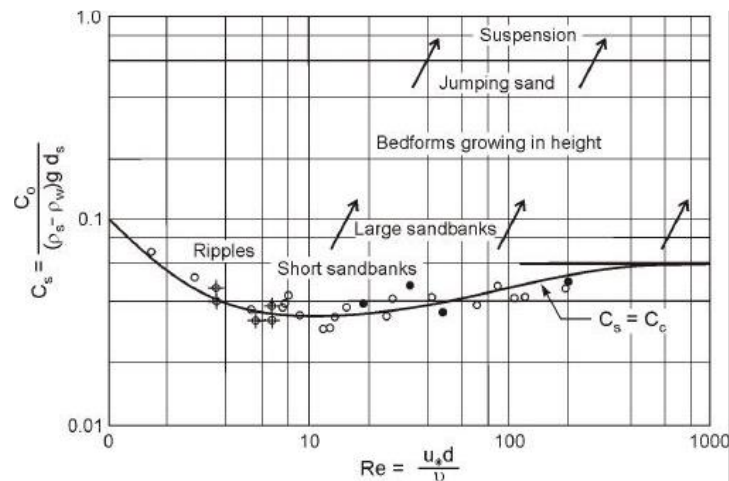


FIGURA 3.8 DIAGRAMA DE SHIELDS PARA EL INICIO DEL TRANSPORTE
(VANONI, 1964)

FUENTE: (ASCE Task Committee to Expand and Update Manual 54, 2008)

El parámetro de Shields θ , que relaciona el esfuerzo cortante en el lecho, y el diámetro de la partícula es expresado como una función de R_* .

$$\theta = \frac{\tau_0}{\Delta \rho g d} \quad (3.27)$$

La relación entre θ_c y R_* fue determinada experimentalmente. $\theta_c = f(R_*)$

La figura siguiente muestra los resultados experimentales de Shields y de otros experimentos para el inicio del movimiento de partículas. Esta figura representa el criterio para el inicio del transporte de sedimentos. Para un tamaño dado de partícula, la condición de flujo correspondiente a la región sobre la curva representa el transporte de sedimentos, mientras que la región bajo la curva representa la condición de no transporte de sedimentos.

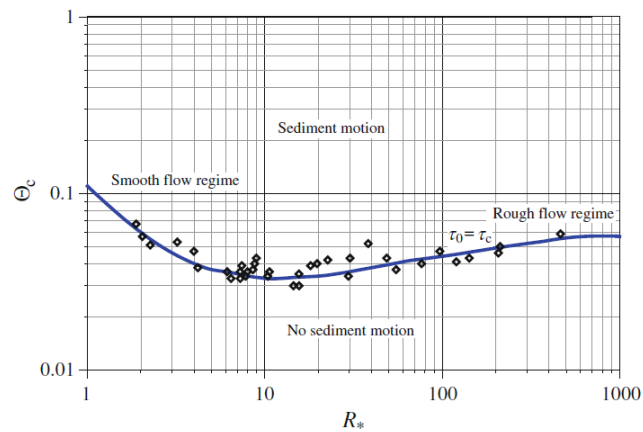


FIGURA 3.9 DIAGRAMA DE SHIELDS REPRESENTANDO EL PARÁMETRO DE SHIELDS θ COMO FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS CORTANTE R^* (SHIELDS 1936).

FUENTE: (Subhasish Dey, 2014)

La figura obtenida por los estudios de Hjulström (1935), Shields (1936), Mavis y Laushey (1966) correlaciona la velocidad crítica de arrastre para el inicio del movimiento con el diámetro de la partícula, como fue demostrado por el comité de sedimentación del ASCE (Vanoni 1977).

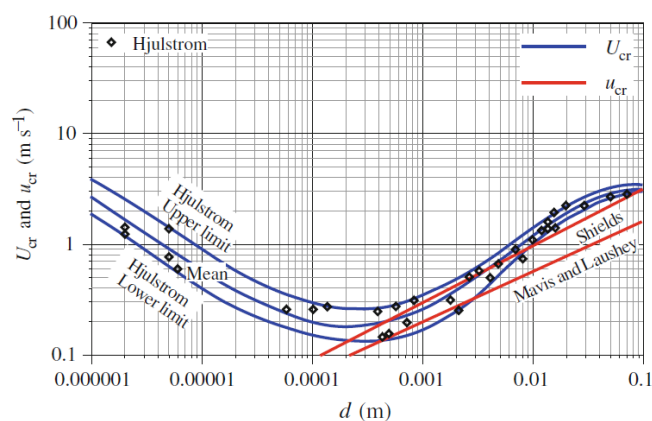


FIGURA 3.10 VARIACIÓN DE LAS VELOCIDADES CRÍTICAS DE ARRASTRE CON DIÁMETRO DE PARTÍCULA MEDIO (VANONI 1977)

FUENTE: (Subhasish Dey, 2014)

Una correlación empírica fue propuesta por Zanke (1977, 2002), ésta entrega resultados similares a los propuestos por el grafico de Hjulström.

$$V_{cr} = \alpha * \left(\sqrt{\rho' \cdot g \cdot d} + 5.25 \frac{v}{d} c \right) \quad (3.28)$$

dónde:

V_{cr} : *velocidad critica del flujo principal para el inicio del movimiento*

α : *coeficientes para los limites superior (2.8) e inferior(1.5) del grafico*

c : *coeficiente de correccion por cohesion, $c = 1$ para arenas*

La fórmula presentada por Zanke es válida para profundidades entre 0.7 metros y 2 metros, para profundidades mayores se debe corregir la velocidad por el siguiente factor, con lo que la velocidad crítica para el inicio del movimiento se incrementa:

$$\left(\frac{h}{0.4} \right)^{1/6} \quad (3.29)$$

CAPITULO 4

ESTRUCTURA HIDRÁULICA A MODELAR

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATÓN

El proyecto de Hidroeléctrico Toachi-Pilatón es uno de los proyectos hidroeléctricos planificados para el desarrollo energético del Ecuador, está ubicado en los límites de las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi, en los cantones Mejía, Santo Domingo y Sigchos, respectivamente, y sus parroquias Manuel Cornejo Astorga, Alluriquín y Palo Quemado. La cuenca del río Pilatón antes de su confluencia con el río Toachi tiene una longitud aproximada de 40 Km con un área de drenaje de 521 Km². Tiene como obras principales una captación, con un azud móvil, una presa de hormigón y dos centrales de generación hidroeléctrica denominadas Sarapullo que genera 49 MW, y Alluriquín que genera 204 MW, con un total de 253 MW de potencia instalada; también tiene túneles de conducción a presión que conectan las obras de toma y la presa con las centrales hidroeléctricas.

La estructura de interés a simular en esta investigación es el Azud de derivación. Esta estructura está conformada por 3 azudes o vertederos separados mediante pilas y muros, el paso de agua por los azudes es controlado por compuertas radiales y clapetas, las cuales se utilizan para regular caudales y mantener el nivel de operación de la central; estas 3 compuertas funcionan mediante un programa de operaciones que depende del caudal que varía desde 40 m³/s hasta el caudal máximo de crecida proyectado para el río Pilatón el cual es 480 m³/s. El perfil seleccionado para el proyecto es el tipo WES del USACE, cuya ecuación es:

$$X^n = K \cdot Hd^{n-1} \cdot Y \quad (4.1)$$

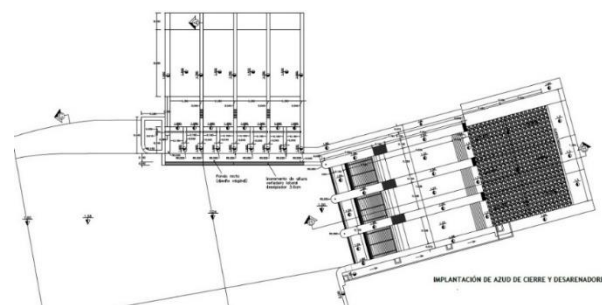
El caudal que fluye sobre el vertedero de descarga, disipa su energía en el estanque aguas abajo, con la formación de un resalto hidráulico. Cada vertedero del azud está controlado por una compuerta radial que incluye en su parte superior una clapeta con el objetivo de mantener el nivel de operación en 1105 m.s.n.m. y que se derive los 40 m³/s que corresponde al caudal óptimo de derivación, y si este caudal es superado, el exceso será controlado mediante las clapetas, que se abatirán de tal forma que eliminen el exceso y se mantenga el nivel de operación.

Una de las funciones proyectadas de las compuertas radiales, junto con el control de los caudales de crecida también es permitir el lavado programado del material del arrastre de fondo que se depositara aguas arriba del azud y este lavado se lo realizará mediante aperturas parciales o totales de las compuertas en invierno cuando el río trae más agua con una concentración de sedimentos mayor. Para evitar problemas de operación de las compuertas radiales con los sedimentos, en la memoria técnica para el diseño de la captación del río Pilaton se recomienda que no se debe dejar llenar más arriba del nivel 1100 m.s.n.m., es decir 0.40 m desde la cresta del vertedero (Hidrotopi - EPN, 2012). Estas compuertas tienen las siguientes dimensiones: B x H = 8.20 m x 5.20 m con su clapeta de 1.40 m de altura.

4.1.1 FUNCIONAMIENTO PROGRAMADO DE LAS COMPUERTAS RADIALES

Con una visión desde aguas arriba del azud de derivación se nombran a los vertederos con sus respectivas compuertas, como número 1 al izquierdo, número 2 al central, y número 3 al derecho. Cuando el nivel de agua en captación siga subiendo de la cota 1105 m.s.n.m., se abre la primera compuerta del azud 1 variando desde una altura 0 m referencial, hasta una altura de 1.80 m logrando que se mantenga el nivel de operación, el cual permitiría descargar 100 m³/s y el sistema funciona con 40 m³/s en la derivación, 100 m³/s que pasa por el azud 1 izquierdo, y se tiene un total de 140 m³/s. Para cuando el nivel de agua siga subiendo debido a un incremento en el caudal del río, se abrirá la compuerta radial derecha 3 paulatinamente de forma que va controlando el nivel de operación, igual

que en la compuerta 1 hasta una altura máxima de 1.80 m, también descargará 100 m³/s entonces el sistema quedará repartido de la siguiente manera: 40 m³/s para la derivación, 100 m³/s para el azud 1 izquierda, 100 m³/s para el azud 3 derecho, se tiene un total de 240 m³/s. Cuando el nivel de agua, abiertas ambas compuertas tienda a subir, se opera la compuerta central 2, abriéndola de manera que se controle el nivel de operación hasta una altura de 1.80 m como en las otras 2 compuertas, por la cual descargará 100 m³/s y , el sistema quedara repartido de la siguiente manera, 40 m³/s para la derivación, 100 m³/s para la compuerta radial 1 derecha, 100 m³/s para la compuerta radial 3 izquierda, 100 m³/s para la compuerta radial 2 central, se tiene un caudal total de 340 m³/s. Si no son suficientes estas operaciones para controlar el nivel de operación se abrirá las compuertas radiales superando los 1.80 m, se continuara abriendo las compuertas hasta llegar a una apertura completa en donde pasara el caudal de crecida 480 m³/s para un periodo de retorno de 500 años. Para este caudal de 480 m³/s se deberá detener el funcionamiento de las turbinas de la central Sarapullo y se deberá cerrar las compuertas de ingreso de los desarenadores para prevenir daños en los equipos. Un esquema en planta de las obras se presenta en la siguiente figura.



**FIGURA 4.1 IMPLANTACIÓN DE LAS OBRAS EN CAPTACIÓN DEL PROYECTO
TOACHI - PILATON**

FUENTE: (Hidrotoapi - EPN, 2012)

4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO

Para el modelo físico de la Captación Pilatón, al ser el flujo en superficie libre, y sus fenómenos dominantes representados por las fuerzas de gravedad y el número de Froude, se adopta el criterio de similitud de Froude donde los cambios de fuerza inercial se debe exclusivamente al efecto de la fuerza de gravedad y estas son preponderantes, siendo el efecto de las demás fuerzas (viscosidad, tensión superficial y compresibilidad del agua) no representativo del fenómeno a modelar. Con respecto al número de Reynolds, se opta por realizar una similitud restringida, en donde la rugosidad tiende a entregar un número de Reynolds similar a la del prototipo. Con respecto a la tensión superficial, la dimensión del modelo debe ser tal que la influencia de esta tensión no resulte representativa en el fenómeno simulado. En la presente investigación el autor se concentra en la capacidad de arrastre en las compuertas radiales del Azud móvil; en la siguiente tabla se presentan los datos principales del diseño y del modelo del Azud móvil.

TABLA 4.1. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y GEOMÉTRICAS DE AZUD

Caudal de diseño (m ³ /s)	Qd	160
Altura paramento (m)	P	1.00
Ancho (m)	B	8.20
Nivel plataforma de aproximación (m.s.n.m.)		1099.00
Nivel cresta del vertedero (m.s.n.m.)		1100.00
Parámetros de cálculo del vertedero:		
Carga de agua (m)	Hd	5.00
Coeficiente de descarga	C	2.00
Numero de contracciones	N	2
Ancho neto (m)	Bn	7.20
Caudal (m ³ /s)	Q	160.99
Niveles calculados:		
Nivel máximo de crecida (m.s.n.m.)		1105.00
Nivel corona Muro (m.s.n.m.)		1108.00
Geometría del perfil Creager:		
K		2.00
n		1.85

FUENTE: (Ortega Patricio - Izurieta, 2012)

El modelo hidráulico fue realizado a escala 1:25, y está compuesto de los siguientes elementos:

- 3 azudes perfil tipo WES, USACE
- 3 pilas de sección semicircular
- 3 Compuertas radiales con clapetas
- 3 estanques disipadores de energía.

Las dimensiones de los elementos en el Prototipo y modelo se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 4.2. ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DE CIERRE

	DESCRIPCIÓN	PROTOTIPO (m)	MODELO (cm)
Vertederos	Ancho	8.20	32.80
	Longitud	48.70	194.80
	Carga de Diseño	5	20
	Material		Acrílico
Pilas	Ancho	2.50	10.00
	Alto	9.00	36.00
	Radio	1.25	5.00
	Material		Madera
Compuertas radiales con clapeta	Base	8.20	32.80
	Altura	5.20	20.80
	Clapeta	1.40	5.60
	Material		Acrílico
Estanques disipadores de energía	Longitud	27.00	108.00
	Calado de entrada	1.29	5.15
	Calado conjugado	7.15	28.60
	Pendiente de	4.35 %	4.35 %
	Pendiente de salida	3.85 %	3.85 %
	Material		Acrílico

FUENTE: (Ortega Patricio - Izurieta, 2012)

El esquema de las obras de cierre se presenta a continuación:

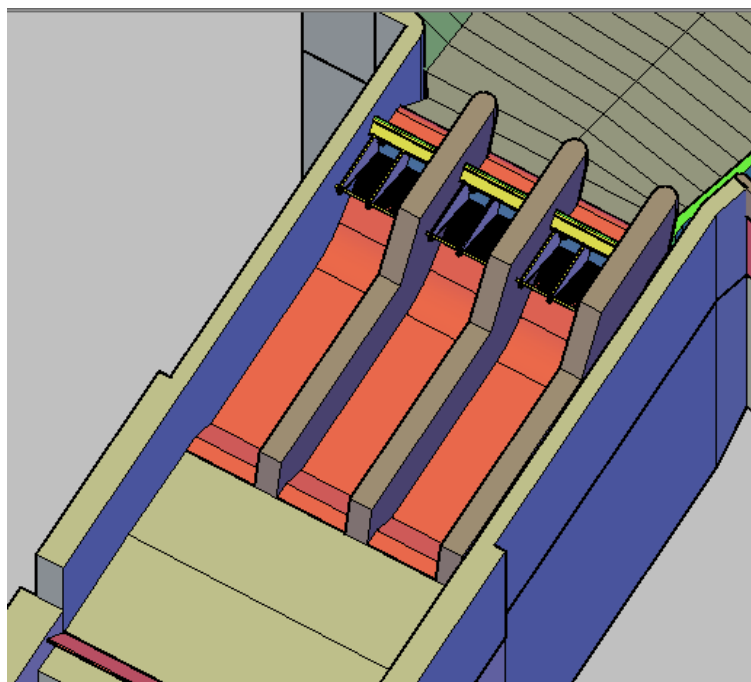


FIGURA 4.2 VISTA DE LA ESTRUCTURA DE CIERRE

FUENTE: (Ortega Patricio - Izurieta, 2012)

4.3 RESULTADOS DEL MODELO FÍSICO

El modelo físico y los estudios se realizaron en 3 diferentes etapas; en la primera etapa se determinan los coeficientes de descarga de las estructuras, en la segunda etapa se determinó el funcionamiento del sistema de captación, y en la tercera etapa se realizaron pruebas con material sólido. Los coeficientes de los vertederos de descarga con las compuertas radiales dieron resultados similares a los coeficientes teóricos utilizados para el diseño considerando la apertura de 1.80 m. El coeficiente utilizado por los diseñadores de la Captación Pilatón varía de 0.66 a 0.67 para las diferentes aperturas de operación, y el coeficiente obtenido de resultados experimentales en laboratorio varía de 0.64 a 0.65 (Ortega Patricio - Izurieta, 2012), concluyendo que los coeficientes de descarga varían de acuerdo a la apertura con la

que opere la compuerta como es de esperarse; por lo tanto se tienen valores muy próximos a los utilizados en los diseños y se puede concluir que los coeficientes obtenidos en el laboratorio son válidos, y la variación y error que pudiera existir se puede explicar por la apreciación del operador en la recolección de datos. En la figura siguiente se presenta un resumen de los coeficientes a diferentes aperturas para el sistema compuerta y azud.

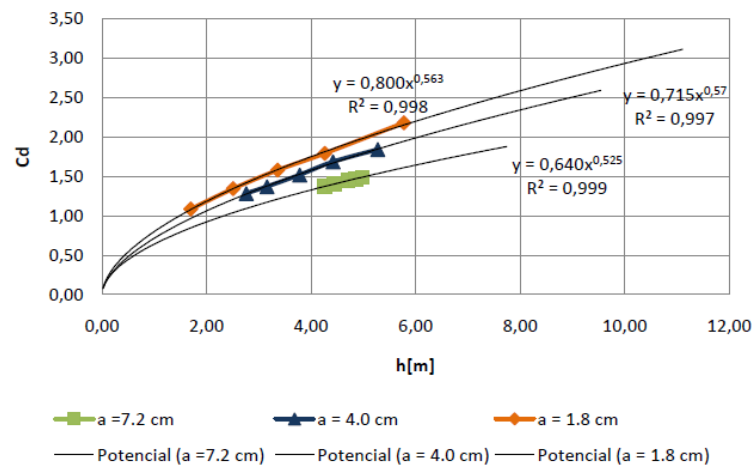


FIGURA 4.3 CURVA DE DESCARGA COMPUERTA AZUD NUMERO CON 3 APERTURAS

FUENTE: (Ortega Patricio - Izurieta, 2012)

Las pruebas en el modelo físico incluyeron una variedad de caudales de funcionamiento, y los coeficientes de descarga obtenidos en laboratorio servirán de base para la validación de modelo numérico para el funcionamiento de las compuertas radiales del cierre. Varias imágenes de las etapas de pruebas se muestran a continuación:

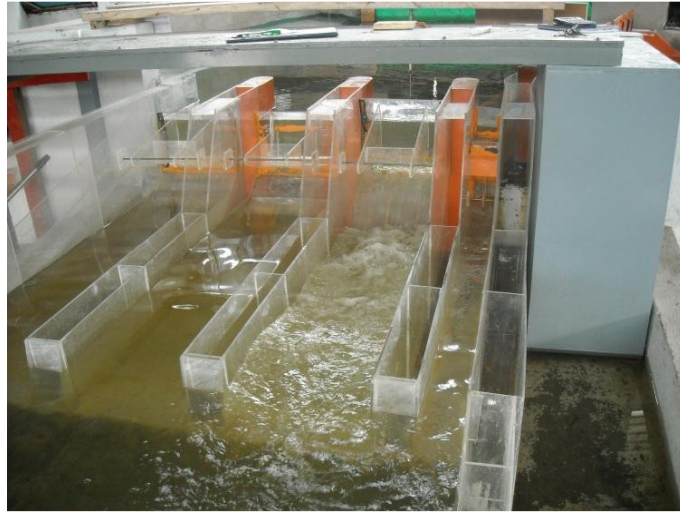


FIGURA 4.4 CAUDAL DE 120 M³/S, VISTA AGUA ABAJO

FUENTE: (Ortega Patricio - Izurieta, 2012)

Para la prueba de la imagen anterior, por el sistema circulaban 120 m³/s repartidos 40 m³/s en la captación, y los 80 m³/s restantes vertidos por la compuerta y el azud 1. En la figura siguiente se muestra la prueba para 300 m³/s.



FIGURA 4.5 CAUDAL DE 300 M³/S, VISTA AGUAS ABAJO.

FUENTE: (Ortega Patricio - Izurieta, 2012)

Para la prueba de la imagen anterior, en el sistema circulan 300 m³/s repartidos 40 m³/s en la captación, por el vertedero 1 circulan 100 m³/s, por el vertedero 3 circulan 100 m³/s, y por el vertedero central circulan 60 m³/s.

Como resultado de la primera etapa de pruebas, se obtuvieron las curvas de descarga para las estructuras analizadas (Hidrotoapi - EPN, 2012), y la curva de descarga para las compuertas radiales obtenida se presenta a continuación:

$$Q = 62.423 \cdot a^{0.7992} \quad (4.2)$$

donde:

a: apertura de las compuertas en metros

Cabe recalcar que en las pruebas realizadas en el modelo físico, no se observaron desprendimientos de la lámina en los azudes, y los coeficientes obtenidos en el modelo son semejantes a los utilizados en los diseños. La contracción por efecto de las pilas al atravesar los caudales solo es apreciada a partir de los 340 m³/s, en la que el efecto se localiza sobre el cimacio y no se transmite aguas debajo de la estructura (Ortega Patricio - Izurieta, 2012).

4.4 BASES Y CRITERIOS PARA LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO.

Siempre que se comienza a realizar simulaciones del tipo CFD con un software, es importante entrar en una etapa de validación de resultados; esto quiere decir que se debe verificar que el programa sea capaz de representar fielmente los fenómenos esperados en una estructura hidráulica, y la mejor opción para esto es el tener un modelo físico con el cual comparar resultados, y establecer conclusiones. Otra alternativa es validar con otro software en donde se realiza la misma simulación y se comparan los resultados para validarlo.

En la actualidad, los paquetes computacionales y los computadores más potentes permiten realizar simulaciones más precisas, y entregan mejores resultados a medida que avanzan en el desarrollo del código de resolución, e incluso en muchos casos en donde no es posible el tener resultados de laboratorio, estas simulaciones son capaces de entregar resultados muy precisos.

CAPITULO 5

MODELO NUMÉRICO DE LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI - PILATÓN EN EL PROGRAMA ANSYS CFX

ANSYS Inc. es una compañía establecida en Estados Unidos que se especializa en simulaciones para la ingeniería, bajo la teoría de los elementos finitos para la solución de estructuras, y bajo la teoría de los volúmenes finitos para la dinámica de fluidos. Tiene como sus principales códigos para CFD a Fluent y a CFX, ambos basados en el método de volúmenes finitos para la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes. El software de ANSYS para la dinámica de fluidos computacional es capaz de entregar resultados validos muy cercanos a lo esperado en la realidad, y para el caso de la presente investigación en la estructura prototipo de la captación del proyecto Toachi Pilaton.

La plataforma de ANSYS para trabajos de simulación es amigable con el usuario y posee herramientas que permiten la simplificación de procesos, especialmente en la generación del mallado del dominio, y para la visualización de resultados.



FIGURA 5.1 PRESENTACIÓN DEL ANSYS 16.0

FUENTE: (ANSYS, ANSYS Workbenck 16.0)

La plataforma de trabajo de ANSYS es llamada Workbenck, es el núcleo de la interfaz entre el usuario y el computador para la realización de las simulaciones, se basa en modelos de datos comunes y compatibles entre las aplicaciones integradas dentro de ANSYS, entre las cuales se encuentran las aplicaciones para edición de geometría o dominio, las aplicaciones del mallado, y los códigos y aplicaciones para las simulaciones a realizarse, como CFX.

En la siguiente figura se presenta una captura de pantalla de la interfaz gráfica para las simulaciones en ANSYS WORKBENCH.

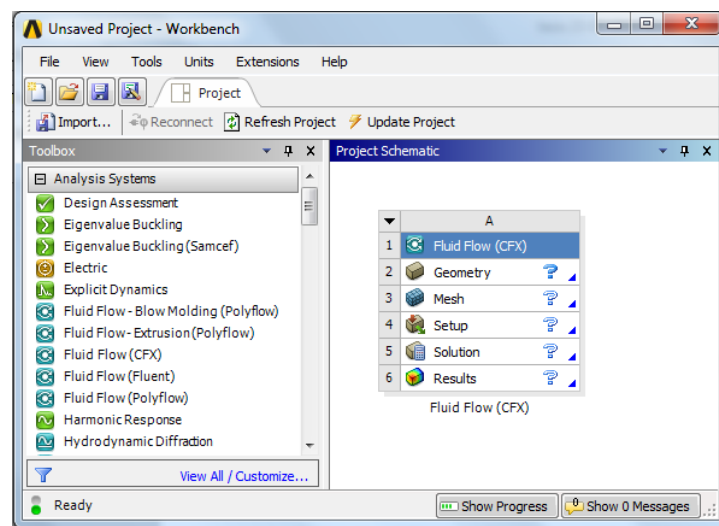


FIGURA 5.2 INTERFAZ DE USUARIO DE ANSYS WORKBENCH

FUENTE: (ANSYS, ANSYS Workbenck 16.0)

5.1 ELABORACIÓN DE LA GEOMETRÍA Y MALLADO DE LA OBRA A MODELAR

5.1.1 CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATON

Para la elaboración de la geometría, fue construido un modelo en 3 dimensiones de la volumetría de la estructura de captación del proyecto Toachi - Pilaton, en un software CAD por facilidad de manejo en el proceso de construcción de los sólidos. La obra de toma fue modelada con la compuerta 1 abierta a 1.80 metros desde la cresta, y las compuertas 2 y 3 cerradas. El ingreso de las bocatomas a los desarenadores se encuentran cerrados para simplificar la simulación para la compuerta. Una vez se tiene la geometría se construye el dominio, que viene a ser una geometría por donde va a circular nuestro fluido o fluidos.

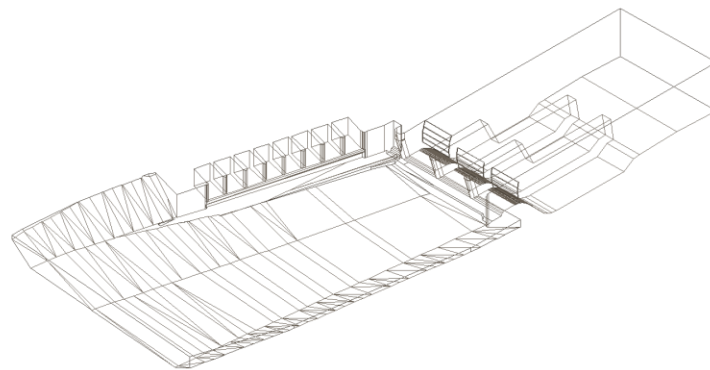


FIGURA 5.3 DOMINIO 3D EN CAD

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

En la construcción del dominio se simplificaron algunas estructuras, y otras se excluyeron debido a que la incidencia en el funcionamiento de las compuertas se lo considera despreciable.

Una de las aplicaciones que ANSYS 16.0 posee para la limpieza de las geometrías es SpaceClaim, esta permite encontrar y eliminar errores en la geometría del sólido para el dominio, así como simplificar ciertos puntos y planos que no tienen incidencia en el desarrollo del flujo, y que podrían provocar problemas en la construcción del mallado, o un refinamiento innecesario.

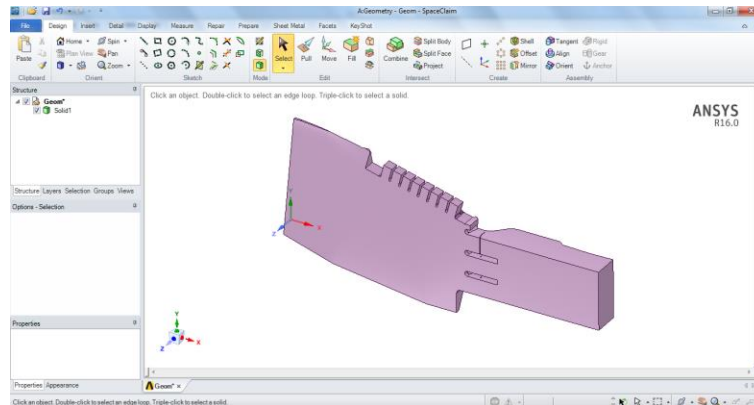


FIGURA 5.4 CAPTURA DE PANTALLA SPACECLAIM

FUENTE: (ANSYS, ANSYS Workbenck 16.0)

La herramienta Design Modeler de ANSYS permite construir geometrías desde cero, o importarlas desde otros programas que generen geometrías compatibles con el formato de ANSYS, y para el presente caso, AutoCAD es compatible con la plataforma de ANSYS. Es en éste punto en donde se debe definir el tipo de dominio para la geometría de la presente investigación, ya sea un sólido o un fluido; esta definición permitirá al programa ANSYS generar un mallado apropiado para el tipo de simulación requerida.

Una vez importada la geometría en Design Modeler, y definido el tipo de dominio como fluido, se puede decir que queda definido el dominio computacional finito, en donde se van a resolver numéricamente las ecuaciones que rigen el movimiento del fluido.

5.1.2 CONSTRUCCIÓN DEL MALLADO DE LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATON

EL mallado no es más que la división en volúmenes finitos del dominio a simular, permitiendo al programa la resolución de las ecuaciones de la dinámica de fluidos mediante métodos numéricos en el dominio generado. Para una apropiada generación del mallado es importante tener en cuenta aspectos como:

- Capacidad de memoria del ordenador utilizado.- debido a que durante el proceso de generación del mallado, es la memoria RAM la que más trabaja.
- Calidad y detalle necesario en los resultados que se desean obtener.- ya que simulaciones especiales en altas velocidades, con flujos multifásicos pueden requerir mallas más finas que simulaciones simples.
- Tipo de malla.- ya que si se tiene mallas hexaédricas, por lo general se obtienen soluciones más precisas, que con mallas tetraédricas.

Cada elemento finito está compuesto por celdas, delimitadas por caras o superficies, un centroide, y los vértices que se los conocen como nodos. El programa ANSYS CFX puede simular con mallas estructuradas y con mallas no estructuradas, así como también con mallas híbridas. Para la presente investigación de la captación del proyecto Toachi Pilaton, fue seleccionado un mallado no estructurado, por la complejidad de la geometría a simular, ya que estas se adaptan mejor a los contornos curvos del dominio.

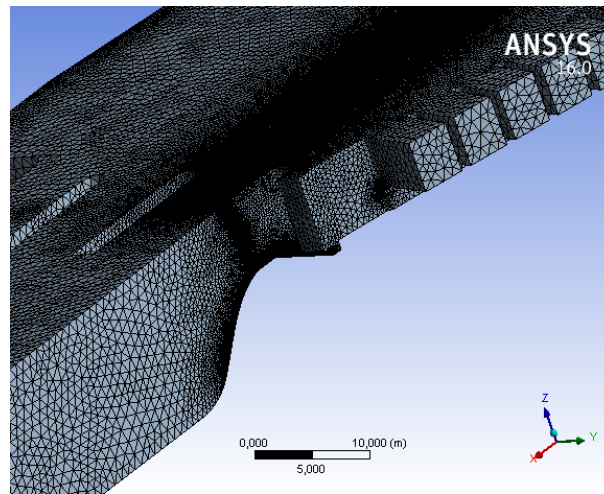


FIGURA 5.5 MALLADO NO ESTRUCTURADO DE LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATON

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para la optimización del mallado para la simulación, se optó por refinar la malla únicamente en los sitios donde resulta determinante la geometría para el comportamiento de fluido, o sea cerca de la compuerta y en el sector de flujo de aproximación, a continuación se presenta una figura del refinado del mallado.

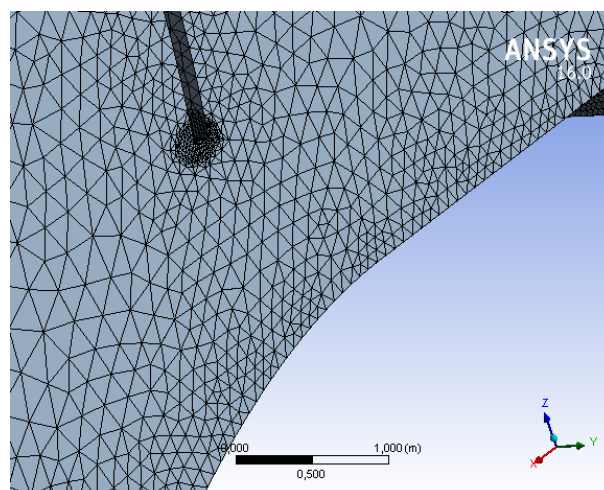


FIGURA 5.6 REFINADO DEL MALLADO EN LA COMPUERTA A SIMULAR

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

El parámetro más importante a verificar en la calidad del mallado es la relación de aspecto, la cual se recomienda sea menor a 100, y si se corre en doble precisión menor a 1000.

El resumen del mallado se presenta a continuación:

TABLA 5.1 RESUMEN DEL MALLADO PARA EL DOMINIO CON 1 COMPUERTA ABIERTA

RESUMEN DEL MALLADO	
Número de elementos	3'173.506
Numero de nodos	608.237
Relación de aspecto promedio	1.92

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

5.2 CONDICIONES DEL DOMINIO Y CONDICIONES DE BORDE O FRONTERA.

5.2.1 DOMINIO

El dominio es la región o espacio en donde las ecuaciones del flujo de fluidos y transferencia de calor son resueltas, los dominios pueden ser del tipo fluido o sólido. Para la simulación, solo los elementos del mallado que son incluidos en el dominio, son tomados para la simulación. El dominio se lo define en dos etapas diferentes, la primera en la determinación de la geometría a simular, y la segunda después de realizado el mallado de la geometría del dominio, en donde se define el tipo de

simulación, el o los fluidos a simular, el tipo de interfaz y otros parámetros adicionales como la morfología del fluido.

Para la simulación de la presente investigación, los fluidos definidos son: agua como fluido primario, y aire a 25 °C como fluido secundario. Se debe simular ambos fluidos en el caso de flujo libre porque en el dominio se presentará una interacción entre ambos, y dependiendo de la geometría, el mallado, las condiciones de borde y las condiciones iniciales, se determinará con la simulación la superficie libre, las velocidades de flujo, presiones, etc. Para la simulación de flujos libres bifásicos, se debe seleccionar módulos de flotabilidad (bouyant model), y el valor a colocar es 1.185 kg/m³. A continuación se presenta una tabla de la configuración de los parámetros de los fluidos a simular:

TABLA 5.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y DE LOS FLUIDOS	
Fluidos	Agua
	Aire a 25 °C
Presión de referencia	1 atmosfera
Bouyant Model (modelo de flotabilidad)	Si
Gravedad en X	0
Gravedad en Y	0
Gravedad en Z	-9.81 m/s ²
Bouyant Density	1.185 kg/m ³
Multifase	Modelo Homogéneo
Transferencia de Calor	No
Turbulencia	Modelo Homogéneo
Modelo de turbulencia	κ - ϵ
Agua y Aire	Fluido continuo
Coefficiente de tensión superficial	0.072 N/m
Fluido principal	Agua
Transferencia interfacial	Superficie libre

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

5.2.2 BORDE O FRONTERA

Las condiciones de borde o frontera del dominio definen los parámetros conocidos para poder configurar la simulación, estos pueden ser la rugosidad de las paredes

de borde, las entradas y salidas de flujo, las caras que representan superficie libre, etc. las condiciones de frontera son muy importantes e influyen directamente en los resultados de la modelación, como es mostrado en la siguiente figura.

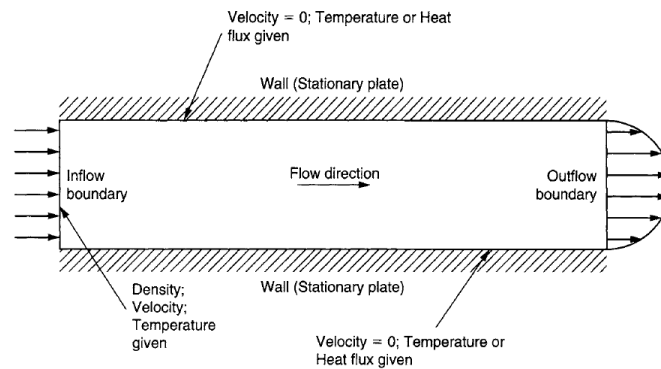


FIGURA 5.7 ESQUEMA GENERAL DE LAS CONDICIONES DE BORDE O FRONTERA

FUENTE: (Jiyuan Tu, 2008)

Se debe diferenciar, entre una condición de entrada, una de salida o si se trata de una frontera sólida. Para la simulación de la presente investigación, se configuraron las paredes de hormigón de las estructuras principales, el fondo del río aguas arriba de las compuertas, la cara de entrada de flujo, la cara de salida de flujo y las caras con superficie libre.

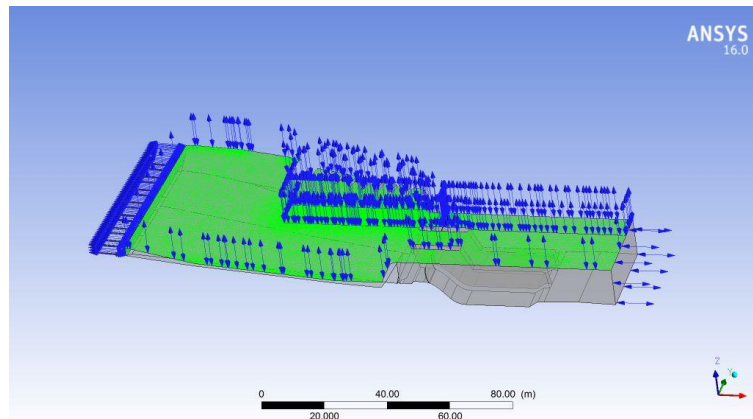


FIGURA 5.8 CONFIGURACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

El parámetro de rugosidad solicitado es el k_s , conocido como rugosidad absoluta; la rugosidad del concreto por lo general varía entre $2 \cdot 10^{-4}$ metros y $3 \cdot 10^{-4}$ metros. Cuando las superficies tienen rugosidades muy grandes, es preferible simular las rugosidades como geometrías en la superficie del dominio, puesto que rugosidades grandes en las superficies del dominio suelen presentar un error en la simulación; esto se puede dar en ríos con pendientes moderadas, y cantos rodados muy grandes. A continuación presentamos la definición de los dominios de la simulación:

TABLA 5.3. CONDICIONES DE FRONTERA

CONDICIONES DE FRONTERA DEL DOMINIO TOACHI	
Ingreso	
Tipo	INLET
Ubicación	Ingreso
Dirección de flujo	Normal
Parámetro	Bulk Mass Flow Rate
Valor	100000 [kgs-1]
Turbulencia	Medium (Intensity = 5%)
Fluido	Agua
Fracción Volumétrica	1
Fluido	Fluid 1
Fracción Volumétrica	0
free	
Tipo	OPENING
Ubicación	Atmosfera

Dirección de flujo	Normal
Parámetro	Opening Pressure and Direction
Valor	0.00 [Pa]
Turbulencia	Medium (Intensity = 5%)
Fluido	Agua
Fracción Volumétrica	0
Fluido	Aire
Fracción Volumétrica	1
Salida	
Tipo	OPENING
Ubicación	Salida
Dirección de flujo	Normal
Parámetro	Opening Pressure and Direction
Valor	0.00 [Pa]
Turbulencia	Medium (Intensity = 5%)
Fluido	Agua
Fracción Volumétrica	0
Fluido	Aire
Fracción Volumétrica	1
Hormigón	
Tipo	WALL
Ubicación	Hormigón
Wall Roughness	Rough Wall
Rugosidad Absoluta	0.00323 [m]
Fluido	agua/aire

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

5.2.3 TIPO DE SIMULACIÓN

ANSYS CFX permite dos tipos de simulación para dinámica de fluidos computacional, STEADY el cual realiza análisis estable o permanente, y TRASIENT que realiza un análisis transitorio, considerando las variaciones del flujo en el espacio del dominio y en el tiempo.

Como fue explicado en capítulos anteriores, para un flujo rápido, turbulento, es necesaria una simulación de tipo Transitoria para captar las posibles fluctuaciones y remolinos que se pueden dar por efecto de la turbulencia en el flujo. El análisis transitorio demanda más recursos computacionales, y es importante determinar un salto de tiempo adecuado para que la solución numérica pueda captar un resultado

con bastante aproximación al resultado real. Es también determinante para la simulación la selección de un adecuado modelo de turbulencia.

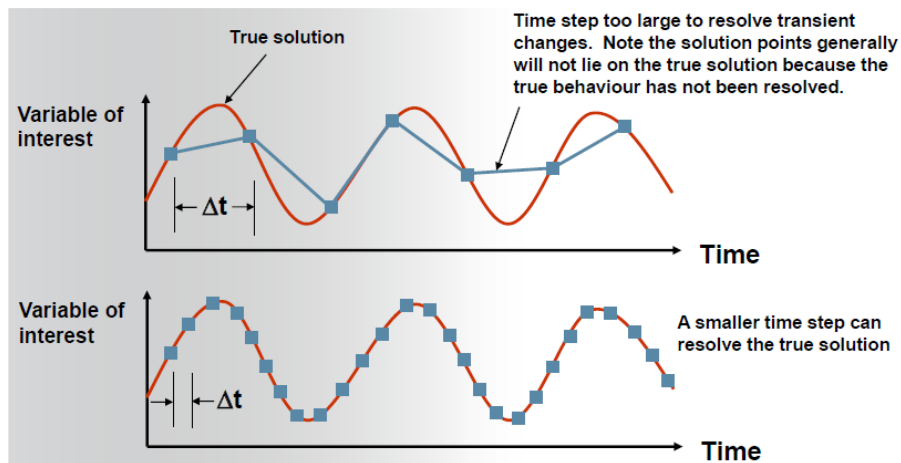


FIGURA 5.9 TIME STEP, EN UNA SIMULACIÓN CFD

FUENTE: (ANSYS, ANSYS CFX - Solver Theory Guide, 2009)

Para la simulación de las compuertas de cierre de la captación del proyecto Toachi Pilaton, el tipo de simulación es Transitorio y el salto de tiempo es de 0.02 segundos, para garantizar que la simulación numérica capte lo más aproximadamente posible la solución real sin consumir recursos adicionales del sistema. Se simuló 100 segundos del paso del caudal en prototipo de 100 m³/s por la estructura con una compuerta abierta, para poder contrastar los resultados con los obtenidos en laboratorio, en el modelo hidráulico de la captación del proyecto Toachi Pilaton.

5.3 SELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA

Como se explicó en capítulos anteriores, existe un sinnúmero de modelos de turbulencia, aplicados a diferentes tipos de simulación, y con diferentes enfoques. ANSYS CFX, al no estar limitado a una sola área de la ingeniería, presenta un sinnúmero de posibles modelos de turbulencia incorporados, los cuales se puede

seleccionar para la simulación. Aunque las expresiones matemáticas resultantes de los modelos de turbulencia pueden ser bastante complejas nunca hay que olvidar que todas ellas contienen constantes ajustables que necesitan ser determinadas como valores que mejor se ajustan al tipo de flujo a simular, y son obtenidas de experimentos que contienen también un grado de incertidumbre. Cada ingeniero es consciente de los peligros de la extrapolación de un modelo empírico más allá de su rango de datos, y estos riesgos se presentan cuando uno abusa de los modelos de turbulencia de esta manera. Simulaciones CFD de "nuevos" flujos turbulentos nunca deben ser aceptadas sin validación de una fuente de alta calidad; la fuente puede ser experimental, pero cada vez más los datos que puede ser generados por medio de experimentos numéricos con simulaciones numéricas directas (DNS), que se utilizan como puntos de referencia.

Un factor determinante para la selección del modelo de turbulencia también es la capacidad computacional con la que se cuenta para realizar la simulación, y para el caso de la presente investigación, es limitada, por lo que un modelo de turbulencia del tipo RANS resulta ser el más adecuado.

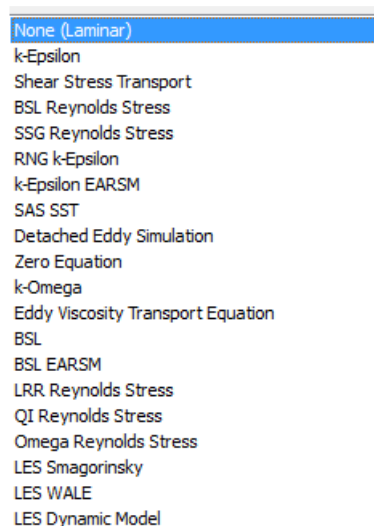


FIGURA 5.10 MODELOS DE TURBULENCIA DISPONIBLES EN ANSYS CFX

FUENTE: (ANSYS, ANSYS Workbenck 16.0)

Para la presente simulación, se escogió el modelo $k - \epsilon$, apropiado para un amplio número de aplicaciones en la ingeniería, y de consumo moderado de recursos computacionales, fue seleccionada como intensidad Medium (Intensity = 5%), esta es una práctica recomendada en manuales y foros de usuarios si no se tiene información sobre la turbulencia en el ingreso (ANSYS, ANSYS CFX - Solver Theory Guide, 2009).


5.4 ESCENARIOS A SIMULAR EN LA ESTRUCTURA DEL PROYECTO TOACHI PILATÓN.

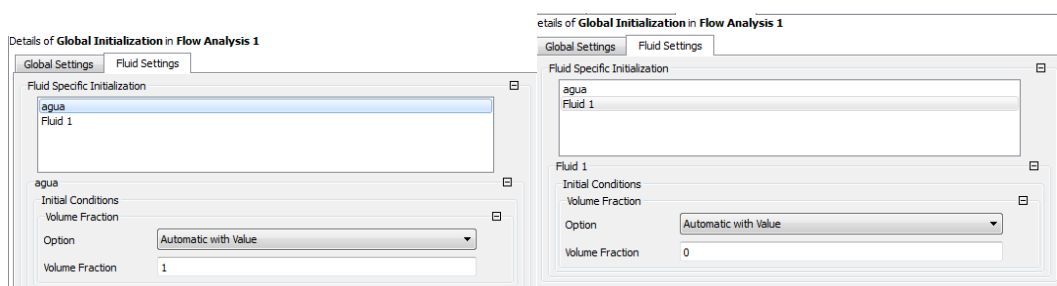
Para la simulación del funcionamiento de las compuertas de la obra de cierre de captación del proyecto Toachi Pilaton, fueron escogidos 3 escenarios para la simulación numérica de su funcionamiento. El primer escenario es la compuerta 1 abierta en 1.80 metros y circulando $100 \text{ m}^3/\text{s}$, el segundo escenario la compuerta 1 y 3 abiertas en 1.80 metros y circulando $200 \text{ m}^3/\text{s}$, y el tercer escenario con las 3 compuertas abiertas en 1.80 metros y circulando $300 \text{ m}^3/\text{s}$. El autor de la presente investigación consideró que estos escenarios, simulados también en laboratorio, en el modelo hidráulico de la captación Toachi Pilaton, son suficientes para determinar las velocidades de flujo, y la capacidad de arrastre de sedimentos que tendrían estas velocidades.

5.5 CONDICIONES INICIALES PARA LA SIMULACIÓN

ANSYS CFX permite realizar simulaciones en STEADY FLOW y también en TRANSIENT FLOW. Como fue mencionado en capítulos anteriores, para el caso de flujos turbulentos se debe simular en flujo transitorio, por lo que se debe configurar las condiciones iniciales de la simulación. Previo a la simulación en flujo transitorio se realizó una simulación en flujo estable, y se utilizó esos parámetros como condición inicial, se ha observado que al realizar este proceso los resultados

convergen más rápido que realizando un llenado desde cero. Una vez obtenidos estos resultados de la simulación en flujo estable, se procedió a configurar las condiciones iniciales del flujo transitorio.

Para configurar las condiciones iniciales, se debe seleccionar el icono  para la configuración de la inicialización, y en el ingreso se parte de condiciones iniciales con valor de velocidad y presión automáticas y fracciones volumétricas de agua = 0 y aire = 1, como se indica a continuación:



*FIGURA 5.11 CONDICIONES INICIALES PARA SIMULACIÓN TRANSITORIA
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA*

5.6 SIMULACIÓN, RESULTADOS Y POSTPROCESO.

Una vez realizado todo el preproceso, incluida la configuración del dominio y tipo de simulación, se inicia la simulación; en éste punto son netamente los recursos computacionales los que realizan en trabajo del cálculo y la resolución numérica de las ecuaciones del flujo, junto con las ecuaciones de la turbulencia. Es importante el monitoreo de las variables de continuidad y momento para la verificación de la estabilidad y convergencia de los resultados.

Al ser una simulación transitoria del flujo, al terminar el tiempo de simulación se obtienen los resultados deseados con sus variaciones en el espacio y en el tiempo, y con estos resultados se realizan los análisis respectivos del comportamiento del

flujo en la estructura hidráulica. Los resultados se los puede analizar en CFX Post, que permite gráficamente visualizar la variación de los valores de las variables seleccionadas en el espacio y en el tiempo.

Los resultados obtenidos en 100 segundos de simulación del flujo de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ circulando sobre la estructura se consideran suficientes para que el flujo se estabilice y se puedan obtener resultados validos de la simulación numérica, tal y como se muestra en la figura siguiente:

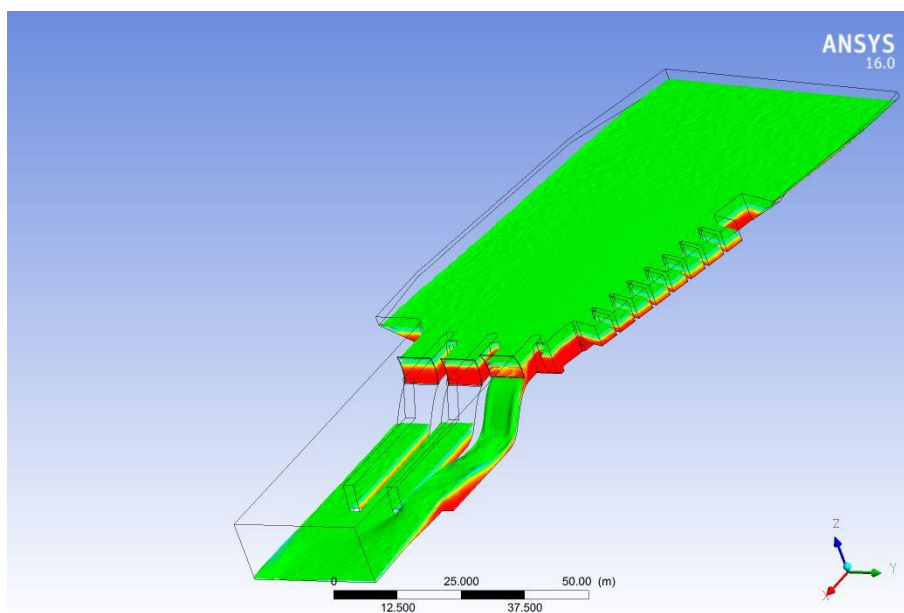


FIGURA 5.12 VISTA DE RESULTADOS DE FLUJO EN LA CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATON

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

En las simulaciones para $200 \text{ m}^3/\text{s}$ y para $300 \text{ m}^3/\text{s}$, fueron programadas condiciones similares, y un tiempo de 100 segundos para garantizar la estabilidad del flujo con las compuertas abiertas. El análisis a realizar para todas las simulaciones tiene 2 etapas, la primera es la validación de los resultados de las simulaciones, teniendo como punto de comparación y validación a los resultados obtenidos en el modelo físico; la segunda es propiamente la obtención de los valores de esfuerzo cortante en el fondo del canal de aproximación aguas arriba de

las compuertas, y las velocidades de flujo aguas arriba de la compuerta capaces de arrastrar los sólidos en suspensión.

Como conclusión respecto de la simulación, se obtienen resultados estables con mayor rapidez, si se realiza una simulación en flujo permanente, y se toma el resultado obtenido como punto de partida para la simulación del flujo inestacionario; esto se debe a que una simulación con un punto de partida volumen cero en la estructura, tendrá primero que llenar su volumen de agua, y luego pasar por un proceso de estabilización del flujo, que tiende a demorar cuando las estructuras son grandes, mientras que un punto de partida con volumen inicial agiliza el proceso a únicamente un tiempo reducido hasta el punto de estabilidad del flujo.

Para la verificación de la estabilidad del flujo se utilizaron los monitores de flujo al ingreso y a la salida de la estructura, y cuando sus valores se estabilizan en el tiempo, se puede considerar que el flujo ha llegado a un punto de estabilidad; se suspende la simulación y se observan los resultados obtenidos con ese punto de referencia.

CAPITULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

Una vez realizada la simulación de flujo en las compuertas de la captación del proyecto Toachi Pilaton, y verificada la consistencia de los valores en el tiempo con los monitores de flujo, se procede a verificar los resultados y se realiza la comparación con los valores obtenidos en el laboratorio de Hidráulica del CIERHI, del modelo físico de la captación del proyecto Toachi Pilaton, extrapolados al prototipo.

6.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El primer paso para la validación del modelo numérico, es la verificación del cumplimiento de la condición de continuidad, es decir que los volúmenes de agua que ingresan sean los mismos volúmenes de agua que salen; para conseguir validar la continuidad existen varios mecanismos dentro de ANSYS CFX. En el caso de la presente investigación se verifican los volúmenes al ingreso y a la salida del dominio. Para la primera simulación, fue ingresado un volumen de 100000 kg/s, equivalente a 100 m³/s de agua circulando sobre la estructura. La compuerta 1 se encuentra abierta a 1.80 m. Los resultados se los presenta en la siguiente tabla.

TABLA 6.1. VERIFICACIÓN DE VOLÚMENES AL INGRESO Y A LA SALIDA. SIMULACIÓN 1.

	VALORES OBTENIDOS
Volumen al inicio	100000 Kg/s
Volumen a la salida	93480 Kg/s
% de variación	6.52 %

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

El punto de validación específico para nuestra simulación es el calado o carga de agua esperado antes de las compuertas. De los resultados obtenidos en el modelo físico se sabe que el calado esperado antes de las compuertas es de 5 metros, medidos hasta la cresta del azud.

TABLA 6.2. VERIFICACIÓN DEL RESULTADO DE CALADO OBTENIDO EN ANSYS CFX Y EN LABORATORIO.

	VALORES OBTENIDOS
Calado medido en laboratorio	5.0 metros
Calado obtenido en ANSYS	4.82 metros
% de variación	3.60 %

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se observa en el análisis comparativo, existe una variación del 6.52 % para el análisis de continuidad, y una variación de 3.60 % respecto del calado. Al ser

estas variaciones pequeñas respecto de los resultados obtenidos en el modelo físico, podemos concluir que los resultados obtenidos en la simulación CFD son válidos.

Para la segunda simulación, fue ingresado un volumen de 200000 kg/s, equivalente a 200 m³/s de agua circulando sobre la estructura. Las compuertas 1 y 3 se encuentran abiertas a 1.80 m. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 6.3. VERIFICACIÓN DE VOLÚMENES AL INGRESO Y A LA SALIDA, SIMULACIÓN 2.

	VALORES OBTENIDOS
Volumen al inicio	200000 Kg/s
Volumen a la salida	197840 Kg/s
% de variación	1.08 %

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

El análisis del calado presentado en la simulación y en laboratorio para la simulación 2 se presenta a continuación:

TABLA 6.4. VERIFICACIÓN DEL RESULTADO DE CALADO OBTENIDO EN ANSYS CFX Y EN LABORATORIO.

	VALORES OBTENIDOS
Calado medido en laboratorio	5.0 metros
Calado obtenido en ANSYS	5.12 metros
% de variación	2.40 %

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se observa en el análisis comparativo de la segunda simulación, existe una variación del 1.08 % para el análisis de continuidad, y una variación de 2.40 % respecto del calado. Al ser estas variaciones pequeñas respecto de los resultados obtenidos en el laboratorio, podemos concluir que los resultados obtenidos en la simulación CFD son válidos.

Para la tercera simulación, fue ingresado un volumen de 300000 kg/s, equivalente a 300 m³/s de agua circulando sobre la estructura. Las compuertas 1, 2 y 3 se encuentran abiertas a 1.80 m. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 6.5. VERIFICACIÓN DE VOLÚMENES AL INGRESO Y A LA SALIDA, SIMULACIÓN 3.

	VALORES OBTENIDOS
Volumen al inicio	300000 Kg/s
Volumen a la salida	295102 Kg/s
% de variación	1.63 %

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

El análisis del calado presentado en la simulación y en laboratorio para la simulación 3 se presenta a continuación:

TABLA 6.6. VERIFICACIÓN DEL RESULTADO DE CALADO OBTENIDO EN ANSYS CFX Y EN LABORATORIO.

	VALORES OBTENIDOS
Calado medido en laboratorio	5.0 metros
Calado obtenido en ANSYS	5.15 metros
% de variación	3.0 %

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se observa en el análisis comparativo de la tercera simulación, existe una variación del 1.63 % para el análisis de continuidad, y una variación de 3.0 % respecto del calado. Al ser estas variaciones pequeñas respecto de los resultados

obtenidos en el laboratorio, podemos concluir que los resultados obtenidos en la simulación CFD son válidos.

Como conclusión, para los parámetros de comparación seleccionados, los errores resultan insignificantes en el contexto del fenómeno macro a analizarse, siendo un error con respecto al calado en la simulación 1 de 3.60 %, en la simulación 2 de 2.40 % y en la simulación 3 de 3.0 %; adicional los errores con respecto a continuidad se explican por la razón de que el volumen en el embalse retiene esa porción del caudal aguas arriba de las compuertas. Siendo los errores de valoración pequeña con respecto al fenómeno estudiado, se concluye que las simulaciones realizadas son válidas para el fenómeno estudiado.

6.2 INFLUENCIA DE LA MALLA EN LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO

El mallado es una de las partes fundamentales en la resolución numérica de las ecuaciones de Navier - Stokes que gobiernan la dinámica de los fluidos, este discretiza el dominio en puntos en donde se resuelven estas ecuaciones, y con el resultado de las celdas próximas a otras se integra la solución numérica en todo el dominio, por lo que mientras más se discretiza el dominio en elementos más pequeños, la solución tiende a ser más exacta, pero consume muchos más recursos computacionales.

En el caso de la presente investigación se seleccionó una malla tetraédrica por la complejidad de la geometría del dominio y la dimensión de la estructura, y se comienza la simulación en el método de resolución con una precisión doble, por lo que, después de realizados los análisis comparativos, los resultados obtenidos en la simulación numérica fueron válidos. Al seleccionar una precisión doble, la relación de aspecto de la malla puede ser de hasta 1000 obteniendo resultados válidos. Adicional, a opinión del autor de la presente investigación, la finura del mallado durante el proceso de simulación debería entregarnos números de Courant

entre 0.5 y 1 para garantizar una solución acertada en una simulación del tipo transitoria, que se la considera variable o inestacionaria en el tiempo, esto va de la mano con la selección apropiada del salto de tiempo para el análisis, el cual debe ser capaz de captar la variabilidad del fenómeno en el tiempo.

6.3 ANÁLISIS DEL MODELO DE TURBULENCIA Y CONDICIONES INICIALES SELECCIONADAS

El modelo de turbulencia seleccionado para la simulación es de tipo RANS, denominado $k - \epsilon$, recomendado para un amplio rango de aplicaciones de ingeniería, con resultados satisfactorios en la mayoría de los casos. Adicional este modelo de turbulencia tiene la ventaja de tener un modesto costo computacional, que en el caso particular de la presente investigación, beneficia en el proceso de simulación al no consumir recursos computacionales y entregar resultados satisfactorios en menores tiempos. Puesto que son desconocidos los niveles de turbulencia en la simulación, fue utilizada una intensidad media (Intensidad = 5%), esto define una intensidad de 5% y una relación de viscosidad μ_t/μ igual a 10, siendo μ_t/μ la relación de viscosidad turbulenta y la viscosidad dinámica molecular.

Para la simulación de la captación del proyecto Toachi Pilatón, este modelo entregó resultados satisfactorios, logrando captar de manera acertada el comportamiento del flujo aguas arriba de la compuerta, en la zona de interés para nuestro estudio.

6.4 COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS CON EL MODELO FÍSICO.

Una vez finalizada la simulación en ANSYS CFX, se procede a comparar los resultados con los obtenidos en el laboratorio, en el modelo físico de la estructura. El comportamiento de la lámina de agua sobre el perfil del vertedero obtenido en laboratorio se muestra a continuación:



FIGURA 6.1 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL PERFIL DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN EL MODELO FÍSICO

FUENTE: (Ortega Patricio - Izurieta, 2012)

Como se observa en la imagen, se tiene un flujo rápido después de la compuerta, con introducción de aire y un efecto de contracción debido al comportamiento como orificio que se forma al abrir la compuerta. En la simulación se obtuvieron resultados similares del comportamiento de la lámina de agua. El primer resultado a observar son las líneas de flujo producidas desde el ingreso del dominio hacia la salida del dominio, mostrando las direcciones del flujo y su comportamiento al atravesar el dominio estudiado, en nuestro caso la estructura de toma del Toachi Pilaton. A continuación se muestran las líneas de flujo producidas para las 3 simulaciones propuestas con compuertas 1 abierta, 1 y 3 abierta, y 1, 2 y 3 abiertas.

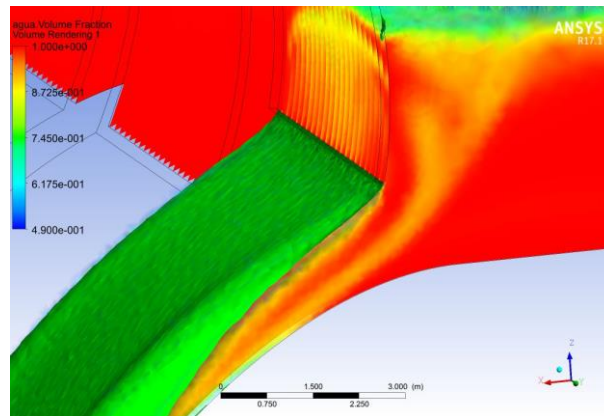


FIGURA 6.2 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL PERFIL DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

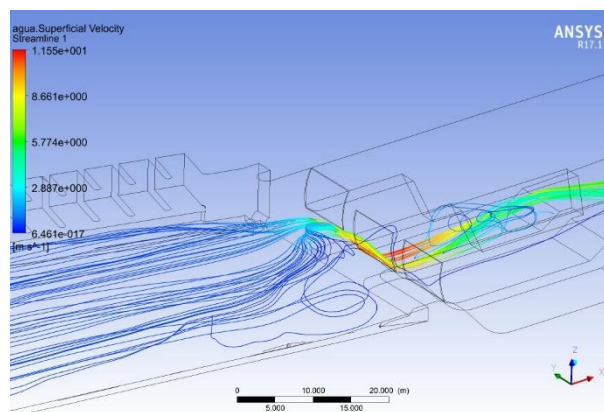


FIGURA 6.3 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS LÍNEAS DE CORRIENTE DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de la compuerta 1 abierta con $100 \text{ m}^3/\text{s}$, las líneas de flujo son irregulares puesto que hay un cambio de dirección brusco en el flujo, por lo que producen arremolinamientos cerca de la compuerta 3 que se encuentra cerrada. Estos arremolinamientos se presentan con velocidades bajas.

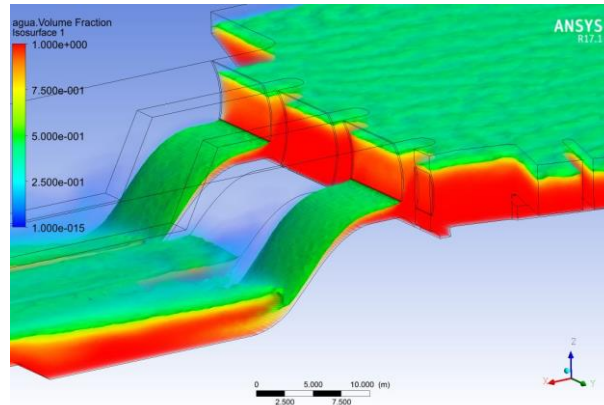


FIGURA 6.4 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL PERFIL DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1 Y 2 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

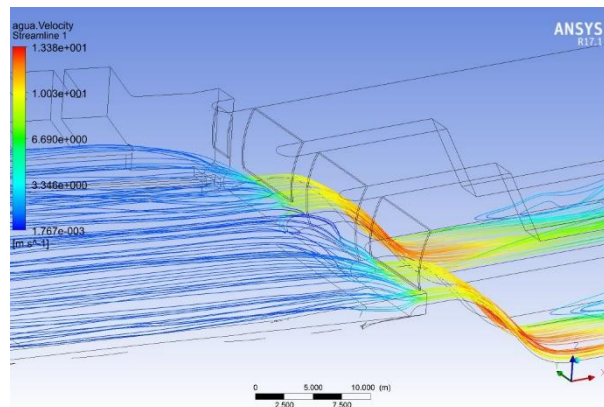


FIGURA 6.5 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS LÍNEAS DE FLUJO DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1 Y 2 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de la compuerta 1 y 3 abiertas con $200 \text{ m}^3/\text{s}$, las líneas de flujo son bastante regulares y en dirección uniforme hacia las compuertas, no se producen arremolinamientos.

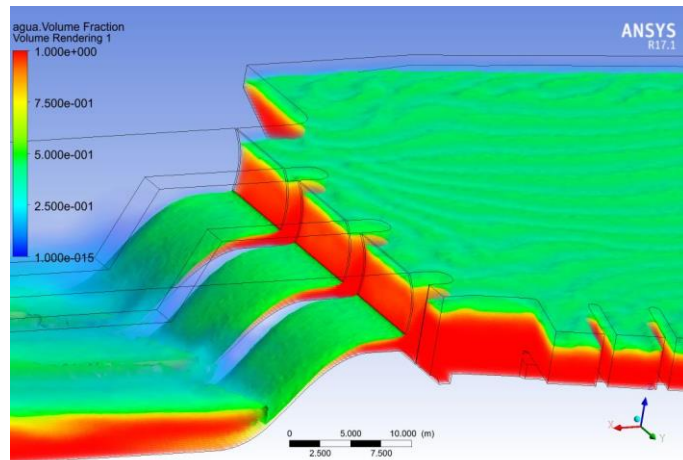


FIGURA 6.6 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL PERFIL DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1, 2 Y 3 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

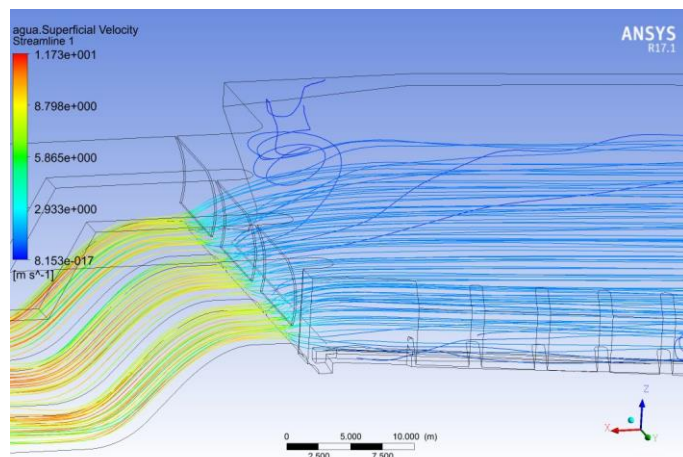


FIGURA 6.7 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS LÍNEAS DE FLUJO DEL VERTEDERO CON LA COMPUERTA RADIAL 1, 2 Y 3 PARCIALMENTE ABIERTA A 1.80 METROS EN ANSYS CFX

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de la compuerta 1, 2 y 3 abiertas con $300 \text{ m}^3/\text{s}$, las líneas de flujo son bastante regulares y en dirección uniforme hacia las compuertas, con producción

de arremolinamientos por efecto del caudal elevado y la turbulencia próxima a la contracción del flujo producto del paso por las compuertas abiertas.

Para poder determinar la capacidad de arrastre, se deben estudiar los esfuerzos cortantes en el fondo del cauce, próximos a las compuertas radiales; y mediante los teoremas postulados por Shields (1936), se determinan las correlaciones entre los esfuerzos cortantes y la capacidad de arrastre de los sólidos. Adicional se estudian las velocidades del flujo que se presentan antes de la compuerta, para ésto se cortan planos en el centro del vertedero y se muestran las velocidades de flujo próximas a las compuertas radiales.

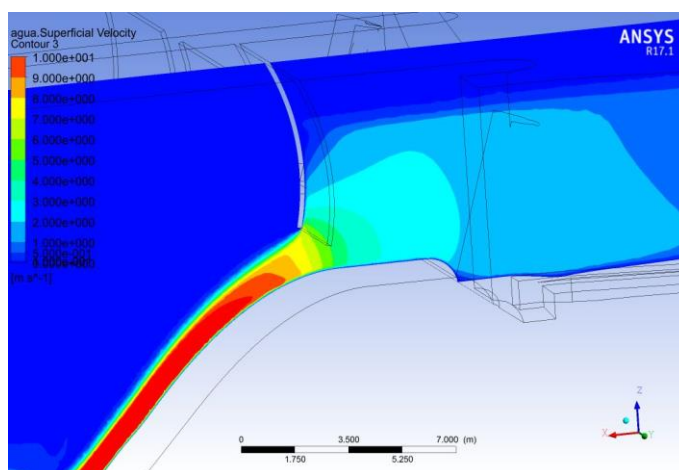


FIGURA 6.8 VELOCIDADES DE FLUJO AGUAS ARRIBA DE LA COMPUERTA 1

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se puede apreciar, el comportamiento del agua sobre el vertedero con la compuerta abierta, se asemeja mucho al obtenido en el modelo físico, y a los resultados teóricos esperados; y con los análisis realizados respecto de la continuidad y el calado detallados en el capítulo siguiente, se puede concluir que la simulación CFD de flujo de la captación del proyecto Toachi Pilaton entrega resultados válidos, los cuales se los puede procesar para obtener la capacidad de arrastre del flujo aguas arriba de las compuertas.

CAPITULO 7

ESTUDIO DE OPERACIÓN DE COMPUERTAS

7.1 BREVE RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO FÍSICO

La modelación física de la captación del proyecto Toachi Pilaton se la realizo en 2 etapas, obteniendo resultados satisfactorios en ambas. En la primera etapa, se verifico el cumplimiento de las similitudes geométricas y dinámicas planteadas, por lo que los resultados obtenidos en el modelo físico son válidos para el prototipo (Hidrotoapi - EPN, 2012).

Se realizaron algunas modificaciones geométricas de la captación, y en la segunda etapa de pruebas se verifico el funcionamiento de las estructuras de expulsión de los sedimentos retenidos frente a los orificios de toma. En la presente investigación el punto de enfoque es en la limpieza del canal de aproximación, correspondientes a las pruebas denominadas B3 en el informe final del estudio en modelo hidráulico, escala 1: 25, de la captación del Río Pilatón (Hidrotoapi - EPN, 2012).

Las pruebas efectuadas consistieron en operaciones de vaciado y llenado del embalse mediante la operación de las compuertas radiales de cierre. En la memoria técnica entregada se recomiendan 3 puntos respecto de los sedimentos en el canal de aproximación:

- 1) que los sedimentos depositados aguas arriba del azud deben eliminarse con aperturas parciales de las compuertas radiales para caudales mayores a 40 m³/s, o con apertura total de compuertas y vaciado completo del embalse cuando se hagan paradas de mantenimiento de la central Sarapullo.

- 2) que se realice la operación de vaciado y llenado del embalse para el lavado de sedimentos, durante las paradas de mantenimiento de la central.
- 3) Se recomienda no se acumulen sedimentos más arriba del nivel 1100.40 msnm (0.40 m sobre la cresta del vertedero), y evitar así potenciales problemas en la apertura de las compuertas radiales.

Después de varias pruebas con diferentes caudales, y con varias operaciones de aperturas y cierres de compuertas se estableció que la limpieza del canal de aproximación propuesta por Hidrotoapi, logra el arrastre del material sólido depositado frente a la estructura de cierre, hasta profundidades por debajo de la cota 1100 m.s.n.m. (cota de la cresta del vertedero del azud). Los volúmenes de material arrastrado dependen fundamentalmente del caudal que transita por el río Pilatón; se llega hasta la cota 1099.49 de nivel de sedimentos para el caudal ensayado de 190 m³/s.



FIGURA 7.1 DISPOSICIÓN FINAL DEL MATERIAL SÓLIDO COLOCADO SOBRE EL CANAL DE APROXIMACIÓN

FUENTE: (Hidrotoapi - EPN, 2012)

Los resultados de las investigaciones realizadas en el modelo físico muestran que la capacidad y el alcance del arrastre de sólidos aguas arriba de las compuertas de

cierre depende proporcionalmente del caudal que ingresa al canal de aproximación; presentándose en cada una de las pruebas, un arrastre de material en la zona alrededor de las pilas de la estructura de cierre.

7.2 PLAN DE SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA OPERACIÓN DE COMPUERTAS.

Una vez validados los resultados obtenidos en la simulación numérica, se procedió a la realización del análisis de las velocidades de flujo que se presenta aguas arriba de las compuertas. Para esto se planteó la apertura de la compuerta 1 con un caudal de 100 m³/s como primera simulación, la apertura de la compuerta 1 y 3 con un caudal de 200 m³/s como segunda simulación, y la apertura de las compuertas 1, 2 y 3 con un caudal de 300 m³/s como tercera simulación. Se determinaran las velocidades que se presentan en el flujo, y se correlacionará con los teoremas de arrastre de sedimentos para la determinación de la capacidad de arrastre que tendría el flujo antes de las compuertas con las velocidades presentes.

Adicional se verificarán los esfuerzos tractivos presentes en la base del canal de aproximación, con los que se puede apreciar en donde se concentran los esfuerzos provocados por las corrientes de limpieza inmediatamente aguas arriba de la compuerta de cierre.

7.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA OPERACIÓN DE COMPUERTAS

Para la presente investigación, se evaluará la capacidad de arrastre que tendrá las compuertas abiertas parcialmente, correlacionándolas con los esfuerzos cortantes en el fondo del canal de aproximación, y las velocidades que se presentan en el flujo antes de las compuertas.

Para determinar los esfuerzos cortantes en el fondo del cauce, se seleccionó todas las áreas correspondientes al cauce del río, y en una segunda instancia al hormigón de los vertederos, y con una subrutina de análisis de CFX post, se muestran los esfuerzos cortantes de las paredes de las áreas seleccionadas, que para el caso de la presente investigación corresponden al fondo del canal de aproximación.

Para determinar la velocidad de flujo y el alcance de éste, se generó sobre el plano que corta longitudinalmente al estructura del azud 1 y su compuerta, un mapa de contornos con las velocidades de flujo; mostrándose velocidades antes de la compuerta entre 0.5 m/s y 3 m/s, y después de la compuerta, sobre la estructura del azud, velocidades mayores que 10 m/s. El parámetro más importante para determinar el arrastre de sedimentos de fondo es el esfuerzo cortante presentado en el fondo y en las paredes del canal de aproximación.

Para la simulación de la compuerta 1 abierta a 1.80 metros, y con un caudal de 100 m³/s se presentaron las siguientes velocidades:

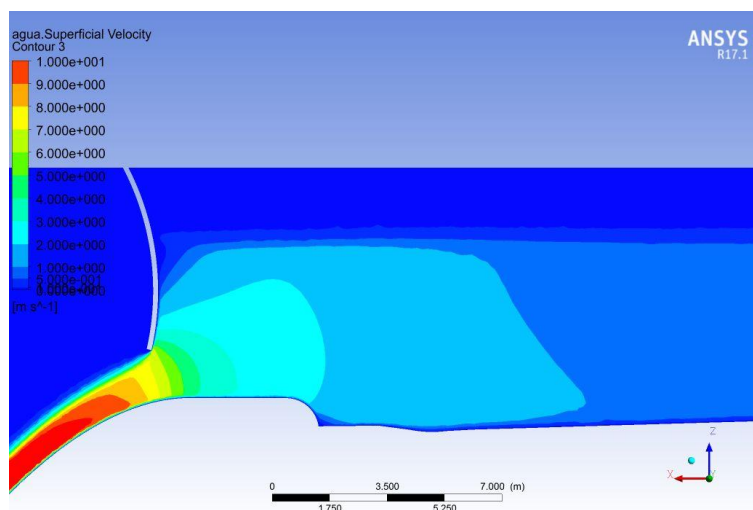


FIGURA 7.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE FLUJO AGUAS ARRIBA DE LA COMPUERTA DE CIERRE 1

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se puede apreciar, las velocidades del flujo, varían entre 0.5 m/s a más de 15 metros aguas arriba de la compuerta 1, hasta velocidades entre 5 y 7 m/s justo

en la compuerta 1. Estas velocidades son las que generan esfuerzos de tracción y levantamiento, arrastran las partículas de cierto diámetro suspendidas en el agua, y no permiten que se depositen en el fondo; asimismo, estas velocidades son capaces de iniciar el movimiento de los sólidos de cierto diámetro depositados en el fondo del canal de aproximación. El alcance del arrastre del flujo aguas arriba de la compuerta es limitado, y se extiende a más de 40 metros, con una velocidad de 0.5 m/s. Los esfuerzos cortantes que produce el flujo rápido del agua al aproximarse a la compuerta provocan un levantamiento de los sedimentos próximos a ésta, lo cual ayuda a que el nivel de sedimentos sobre la compuerta no se eleve a más de 0.40 metros sobre la cresta del vertedero, tal y como fue recomendado en la memoria técnica para el diseño de la captación del río Pilatón para la correcta operación de la compuerta radial durante su apertura ya sea parcial o total (Lombardi S.A. & Hidrotopi Hidrotopi E.P., 2009). En la siguiente figura se muestra la concentración de los esfuerzos cortantes próximos a la compuerta 1 abierta a 1.80 metros.

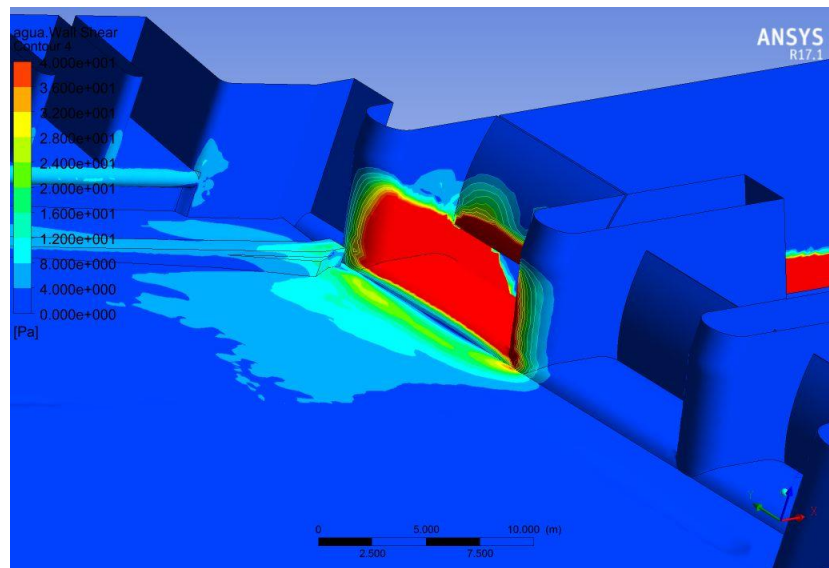


FIGURA 7.3 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES CERCA DE LA COMPUERTA 1

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se observa en la figura, los esfuerzos cortantes se incrementan a medida que se acerca a la apertura de la compuerta radial 1, siendo más fuertes sobre la estructura del azud. Las compuertas contiguas no poseen ningún esfuerzo cortante representativo que indique el inicio del transporte de sedimentos, por lo que se esperaría cierta acumulación de sólidos durante esta operación. En la siguiente figura se muestra la concentración de los esfuerzos cortantes próximos a la compuerta 1 y 3 abierta a 1.80 metros.

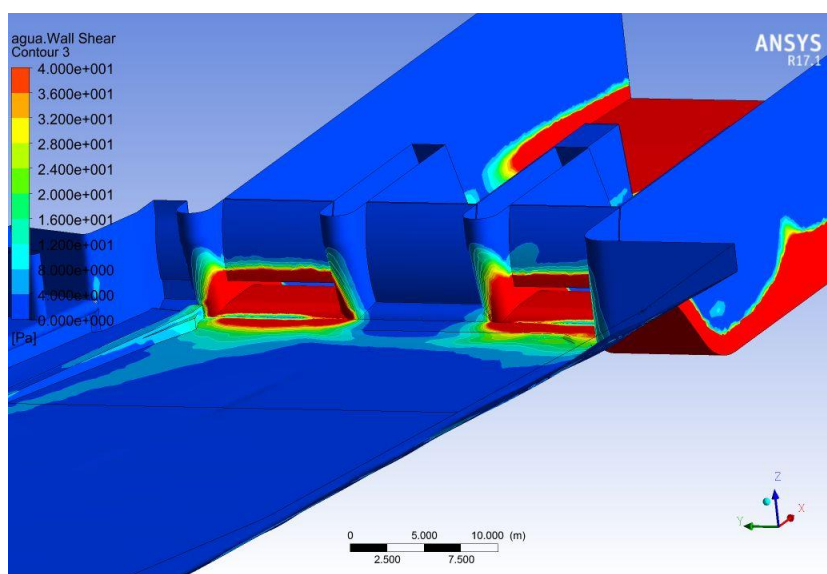


FIGURA 7.4 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES CERCA DE LA COMPUERTA 1 Y 2

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se observa en la figura, los esfuerzos cortantes se incrementan a medida que se acerca a la apertura de la compuerta radial 1 y 3, siendo más fuertes sobre la estructura de los azudes. La compuerta 2 contigua a ambas compuertas abiertas presenta esfuerzos cortantes muy bajos, los cuales indican un posible inicio del transporte de partículas de cierto diámetro, por lo que no se esperaría una acumulación de sólidos durante esta operación. En la siguiente figura se muestra la concentración de los esfuerzos cortantes próximos a la compuerta 1,2 y 3 abierta a 1.80 metros.

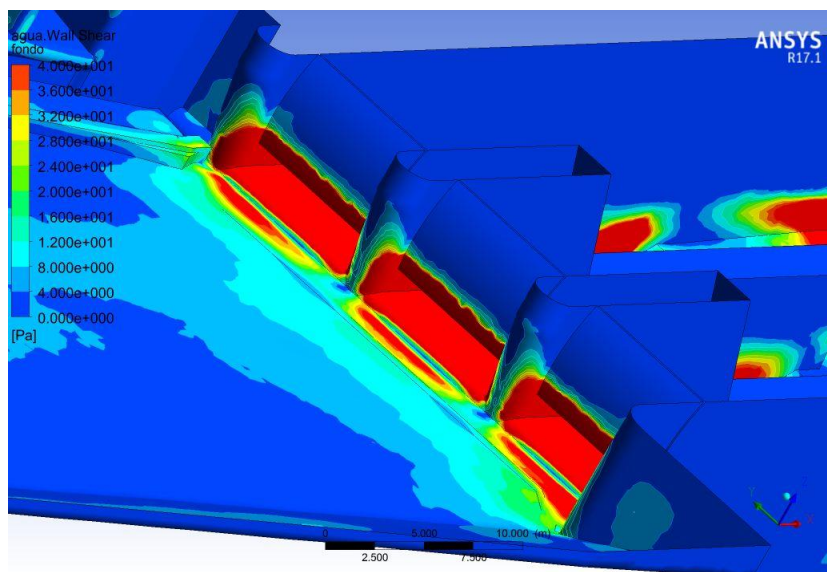


FIGURA 7.5 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES CERCA DE LA COMPUERTA 1,2 Y 3

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se observa en la figura, los esfuerzos cortantes se incrementan a medida que se acerca a la apertura de la compuerta radial 1, 2 y 3, siendo más fuertes sobre las estructura de los azudes y con incidencia en el fondo del cauce próximo a las estructuras de los azudes. El transporte de sedimentos es total durante esta operación, y se garantiza un transporte de solidos depositados aguas arriba de las compuertas radiales.

Para la determinación de la capacidad de arrastre de sedimentos del flujo, fue utilizado el teorema propuesto por Shields, el cual relaciona las fuerzas de arrastre de la partícula con los esfuerzos de fricción resistentes, siendo el esfuerzo cortante el parámetro determinante para el análisis de la fuerza de fricción resistente. El parámetro de Shields θ es el que permite relacionar los esfuerzos de arrastre producidos por el flujo, y los esfuerzos de fricción resistentes, como fue explicado en el capítulo 3. El parámetro de Shields θ es invariable a partir de $R_* > 500$ con un valor de 0,056. Al ser los parámetros τ_0 y u_{*c} implícitos, el proceso para la determinación de su correlación es iterativo. Para la determinación de la velocidad límite para el inicio del movimiento, y el esfuerzo cortante para el inicio del arrastre

de la partícula se utiliza el diagrama de Shields y un proceso iterativo; por ejemplo, para determinar la velocidad de arrastre para una partícula de 1.0 mm de diámetro d_{60} , con densidad relativa de 2.65 y una viscosidad cinemática del agua de $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ se calcula primero R_{*c}

$$R_{*c} = \frac{u_{*c} \cdot d_{60}}{\nu} = \frac{0,05 \cdot 1,0 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 50$$

Con el valor de $R_{*c} = 50$ se determina el parámetro de Shields del diagrama de Shields, $\Theta_c = 0,038$. Se calcula la nueva u_{*c} .

$$u_{*c} = (\Theta_c \cdot \Delta \cdot g \cdot d_{50})^{0,5} = (0,038 \cdot 1,65 \cdot 9,81 \cdot 1,0 \times 10^{-3})^{0,5} = 0,024 \text{ m/s}$$

Con el nuevo valor de $u_{*c} = 0,024 \text{ m/s}$ se calcula R_{*c}

$$R_{*c} = \frac{u_{*c} \cdot d_{60}}{\nu} = \frac{0,024 \cdot 1,0 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 24$$

Con el valor de $R_{*c} = 24$ se determina el parámetro de Shields del diagrama de Shields, $\Theta_c = 0,036$. Después se verifica si la u_{*c} es correcta.

$$u_{*c} = (\Theta_c \cdot \Delta \cdot g \cdot d_{50})^{0,5} = (0,036 \cdot 1,65 \cdot 9,81 \cdot 1,0 \times 10^{-3})^{0,5} = 0,024 \text{ m/s}$$

Para determinar el esfuerzo cortante se utiliza la relación $\tau_0 = u^2 \cdot \rho$

$$\tau_0 = u^2 \cdot \rho = 0,024^2 \cdot 1000 = 0,58 \text{ Pa}$$

Los esfuerzos cortantes obtenidos mediante el teorema de Shields permiten determinar el inicio del transporte de sedimentos de una partícula de diámetro dado; adicional, mediante la determinación de las velocidades críticas para el inicio del movimiento se puede determinar la capacidad de limpieza que tendrán las compuertas de la captación del proyecto Toachi Pilaton.

En la siguiente tabla se muestran los esfuerzos cortantes para el inicio del transporte de las partículas de diámetros representativos.

TABLA 7.1. DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO PARA INICIO DEL TRANSPORTE

Densidad de arena	Densidad relativa sumergida	Densidad del agua	Gravedad	Viscosidad cinemática del agua	Diámetro de la partícula		Velocidad límite para el inicio del movimiento	Re	Parámetro de Shields	Esfuerzo cortante para el inicio del transporte
ρ_f (Kg/m ³)	ρ'	ρ (Kg/m ³)	g (m/s ²)	ν (m ² /s)	d (mm)	d (m)	(m/s)		Θ	τ_0 (Pa)
2650	1.65	1000	9.81	0.000001	1	0.001	0.024	24	0.036	0.58
2650	1.65	1000	9.81	0.000001	5	0.005	0.065	325	0.052	4.21
2650	1.65	1000	9.81	0.000001	10	0.01	0.095	950	0.056	9.06
2650	1.65	1000	9.81	0.000001	15	0.015	0.117	1755	0.056	13.60
2650	1.65	1000	9.81	0.000001	20	0.02	0.135	2700	0.056	18.13
2650	1.65	1000	9.81	0.000001	30	0.03	0.165	4950	0.056	27.19
2650	1.65	1000	9.81	0.000001	50	0.05	0.213	10650	0.056	45.32
2650	1.65	1000	9.81	0.000001	70	0.07	0.252	17640	0.056	63.45
2650	1.65	1000	9.81	0.000001	100	0.1	0.301	30100	0.056	90.64

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

El análisis realizado al transporte de sedimentos mediante Shields permite encontrar correlaciones útiles como la velocidad de flujo versus el inicio del transporte, las cuales pueden ser representadas gráficamente.

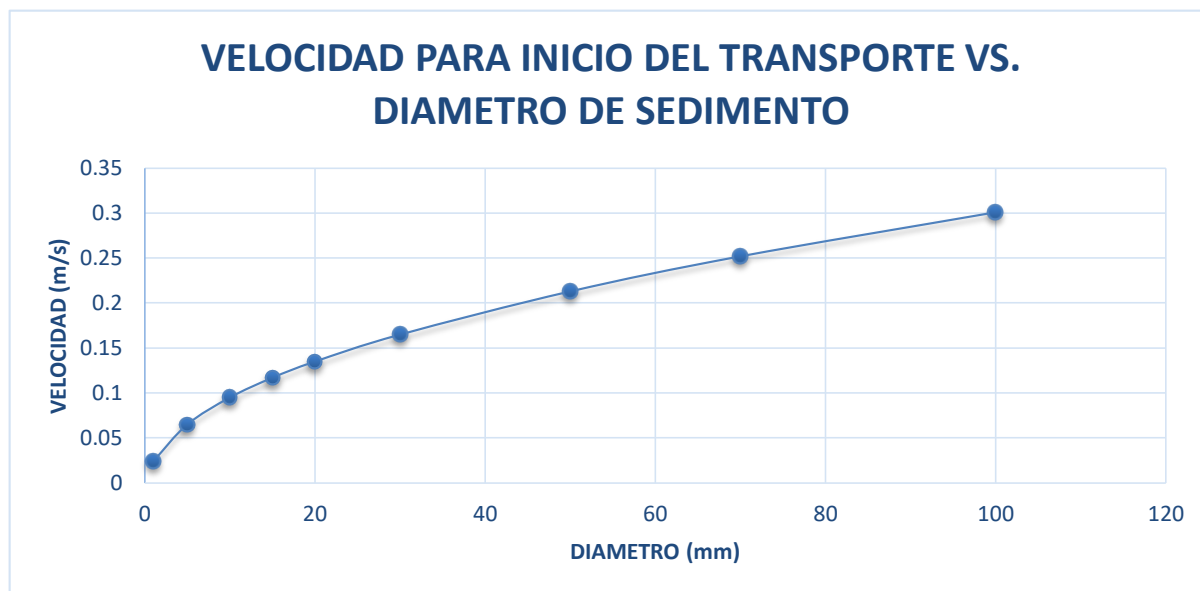


FIGURA 7.6 VELOCIDAD PARA EL INICIO DEL TRANSPORTE VERSUS DIÁMETRO DE SEDIMENTO

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para poder determinar el alcance del arrastre de sedimentos en la estructura de captación del Toachi Pilaton mediante los resultados de esfuerzos cortantes en el fondo, simplemente se presentan los resultados obtenidos de los esfuerzos cortantes de la simulación CFD en ANSYS CFX, con la que se puede determinar el alcance del arrastre para los diámetros dados. Los diámetros a analizar serán 1 mm, 5 mm, 10 mm, 50 mm y 100 mm, se determina el área de influencia de los esfuerzos para el arrastre de los respectivos diámetros y se grafican los resultados en CFX Post, para mejor visualización y entendimiento de éstos.

Para el caso de 1 mm, los esfuerzos cortantes para el inicio del transporte se encuentran en el orden de 0.58 Pa, a continuación se muestra la capacidad de arrastre de sólidos con diámetros de 1 mm para las simulaciones con compuerta 1 abierta, compuerta 1 y 3 abierta, y compuerta 1, 2, 3 abierta.

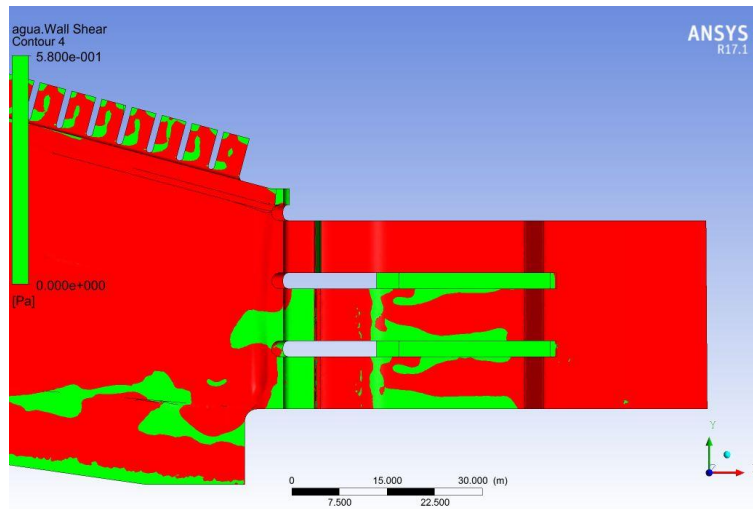


FIGURA 7.7 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTA 1 ABIERTA

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

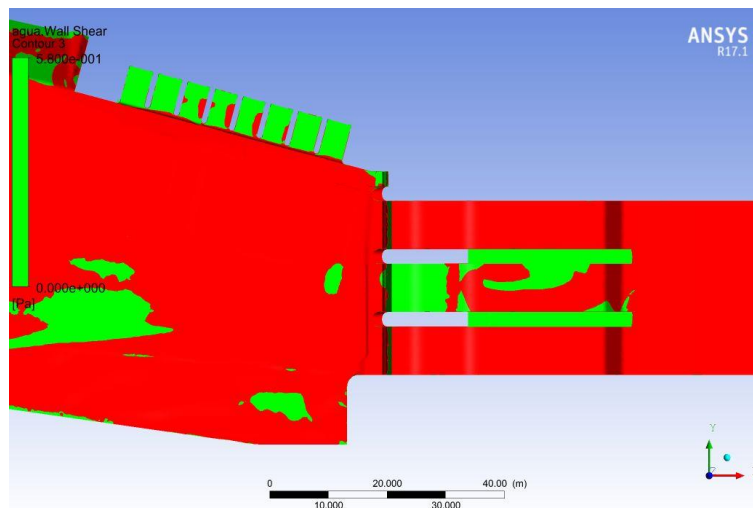


FIGURA 7.8 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1 Y 3 ABIERTAS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

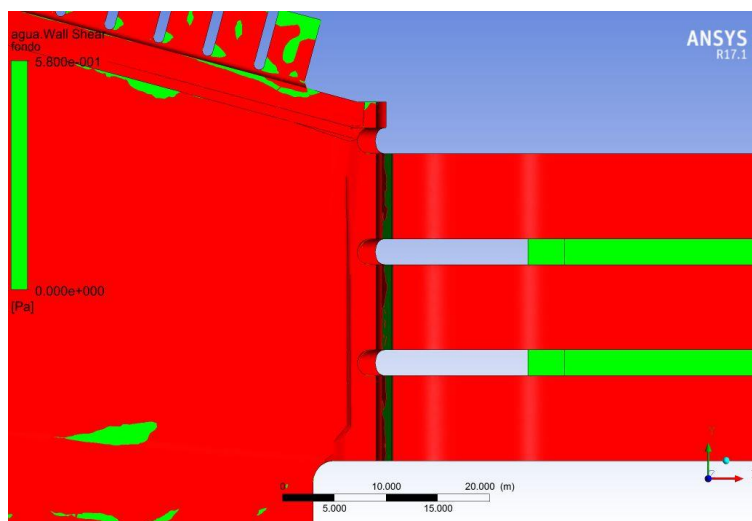


FIGURA 7.9 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1, 2 Y 3 ABIERTAS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se puede apreciar en las gráficas, los esfuerzos cortantes producidos por el flujo rápidos aguas arriba de la compuerta son suficientes para iniciar el arrastre de partículas con diámetro de 1mm en la totalidad del canal de aproximación, salvo pequeños sectores en donde se esperaría una pequeña acumulación de sólidos.

Para el caso de 5 mm, los esfuerzos cortantes para el inicio del transporte son del orden de 4.21 Pa, a continuación se muestra la capacidad de arrastre de sólidos con diámetros de 5 mm para las simulaciones con compuerta 1 abierta, compuerta 1 y 3 abierta, y compuerta 1, 2, 3 abierta.

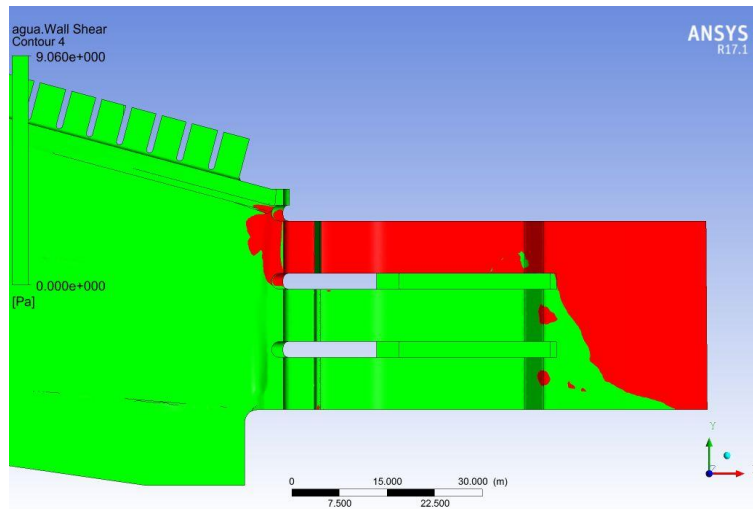


FIGURA 7.10 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTA 1 ABIERTA

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

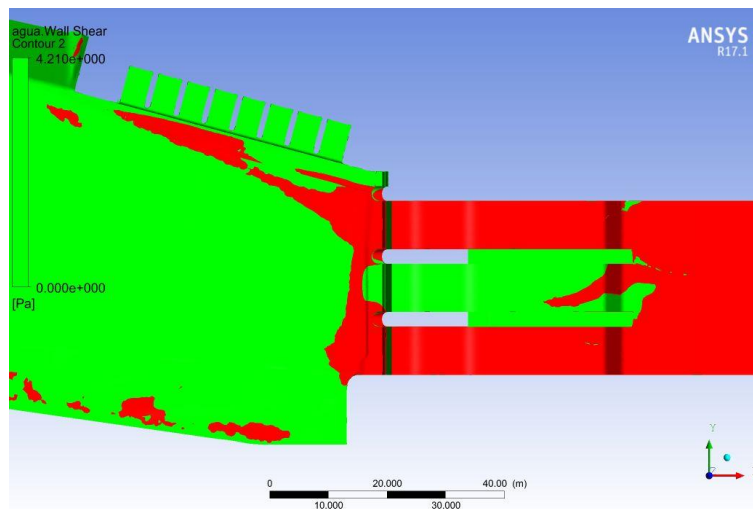


FIGURA 7.11 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1 Y 3 ABIERTAS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

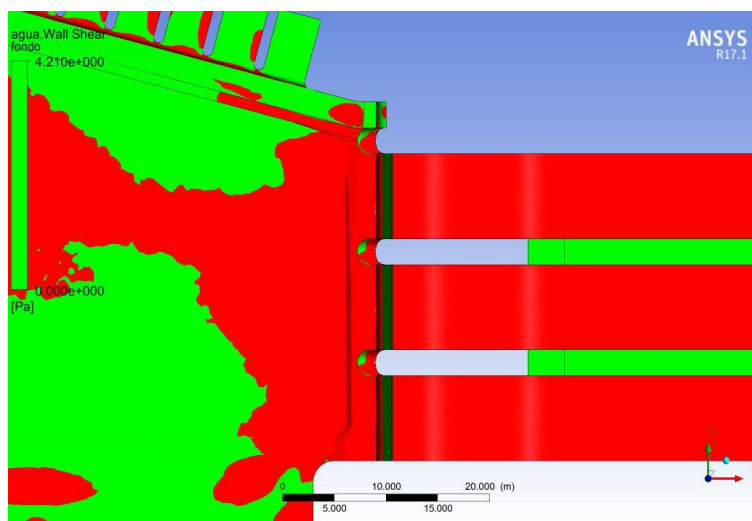


FIGURA 7.12 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1, 2 Y 3 ABIERTAS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se puede apreciar en las gráficas, los esfuerzos cortantes producidos por el flujo rápidos aguas arriba de la compuerta son variables para el inicio del arrastre de partículas de diámetro 5 mm, variando el alcance desde los 25 metros a los 50 metros, pero garantizando la limpieza de los sedimentos aguas arriba de las compuertas. Adicional, para las compuertas 1 y 3 abiertas y un caudal de 200 m³/s, el flujo del agua entrega esfuerzos cortantes concentrados a los 10 metros aguas arriba de la compuerta; esto se explica por la distribución uniforme del flujo, que genera una menor turbulencia, y las velocidades que producen un esfuerzo cortante suficiente para el inicio del transporte se concentran a una distancia de 20 metros aguas arriba de las compuertas.

Para el caso de 10 mm, los esfuerzos cortantes para el inicio del transporte son del orden de 9.06 Pa, a continuación se muestra la capacidad de arrastre de sólidos con diámetros de 10 mm para las simulaciones con compuerta 1 abierta, compuerta 1 y 3 abierta, y compuerta 1, 2, 3 abierta.

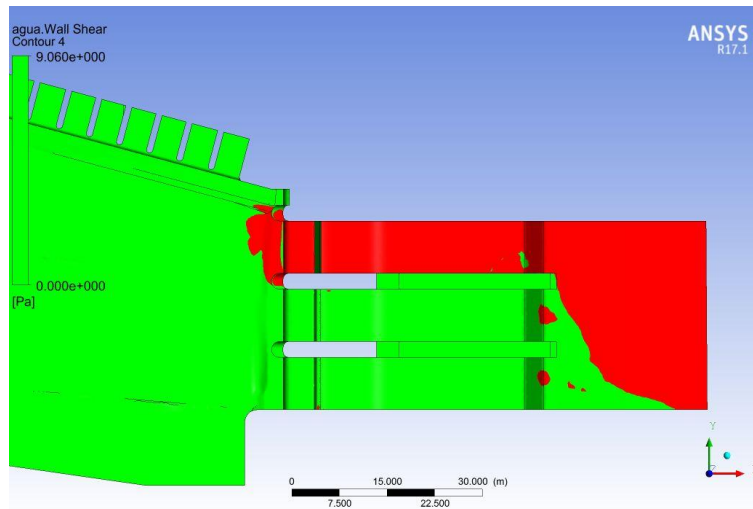


FIGURA 7.13 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM,
POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTA 1
ABIERTA

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

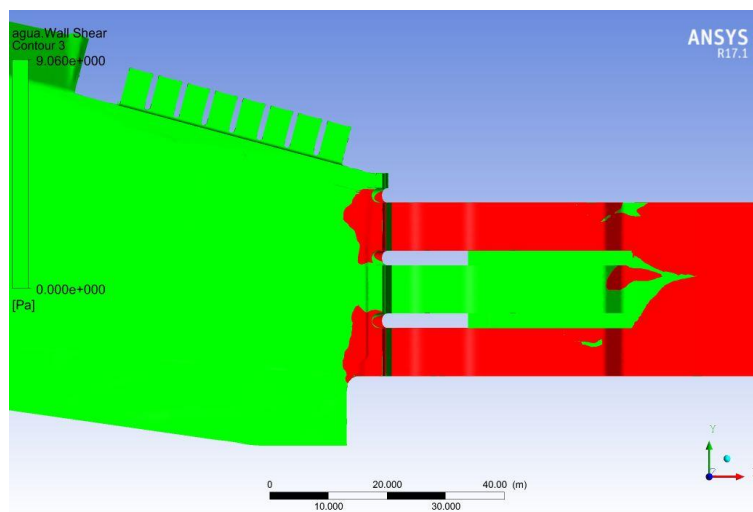


FIGURA 7.14 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM,
POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1 Y 3
ABIERTAS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

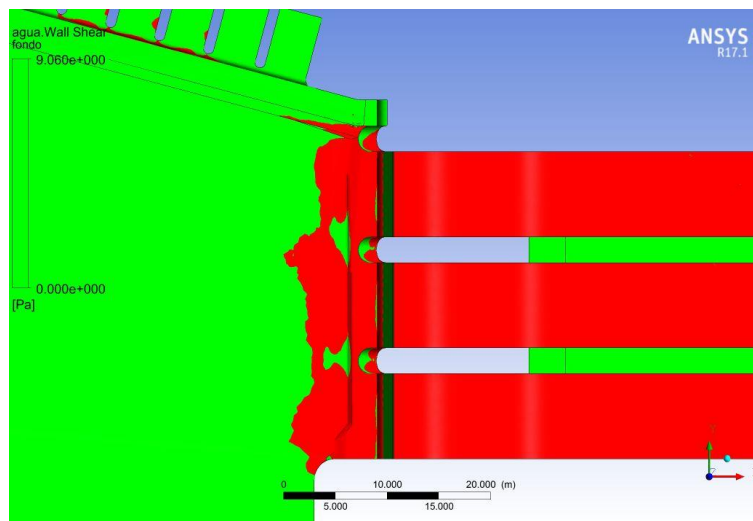


FIGURA 7.15 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1, 2 Y 3 ABIERTAS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se puede apreciar en las gráficas, los esfuerzos cortantes producidos por el flujo rápido de aguas arriba de la compuerta son variables para el inicio del arrastre de partículas de diámetro 10 mm, variando el alcance desde los 15 metros a los 5 metros, siendo el arrastre más eficiente con la apertura de las 3 compuertas y un caudal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, en donde se garantiza una limpieza total de los sedimentos aguas arriba de la compuerta.

Para el caso de 50 mm, los esfuerzos cortantes para el inicio del transporte se encuentran en el orden de 45.32 Pa, a continuación se muestra la capacidad de arrastre de sólidos con diámetros de 50 mm para las simulaciones con compuerta 1 abierta, compuerta 1 y 3 abierta, y compuerta 1, 2, 3 abierta.

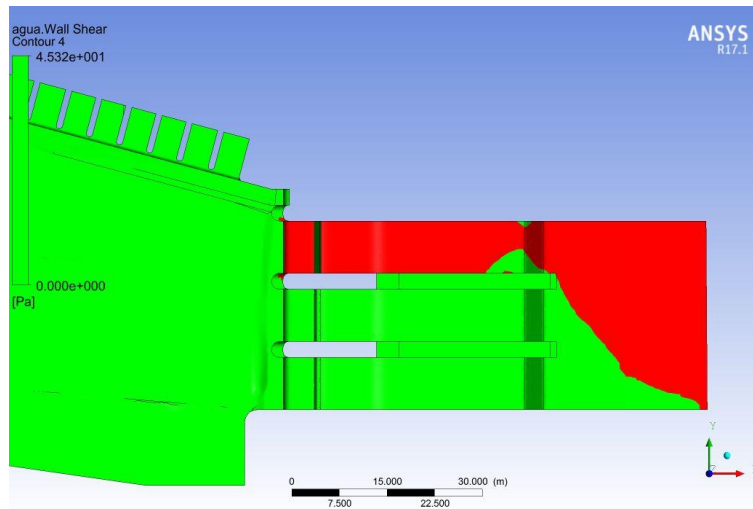


FIGURA 7.16 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM,
POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTA 1
ABIERTA

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

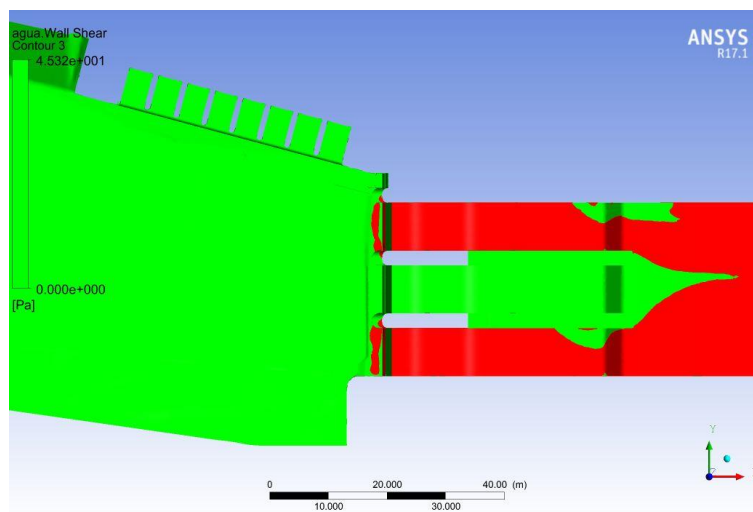


FIGURA 7.17 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM,
POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1 Y 3
ABIERTAS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

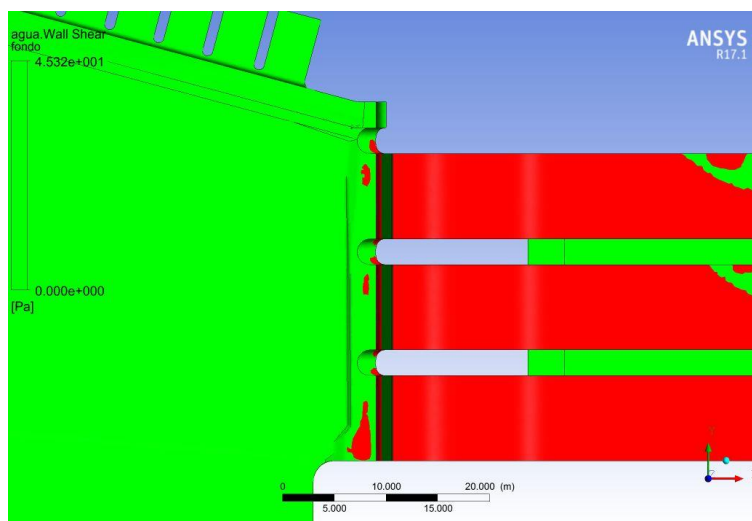


FIGURA 7.18 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1, 2 Y 3 ABIERTAS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se puede apreciar en las gráficas, los esfuerzos cortantes producidos por el flujo rápidos aguas arriba de la compuerta son variables para el inicio del arrastre de partículas de diámetro 50 mm, concentrándose sobre la estructura del azud, y con pequeñas incidencias para las compuertas 1 y 3 abiertas, y para las compuertas 1, 2 y 3 abiertas. El inicio del arrastre es suficiente para garantizar la limpieza de partículas de 50 mm depositadas muy próximas aguas arriba de las compuertas.

Para el caso de 100 mm, los esfuerzos cortantes para el inicio del transporte se encuentran en el orden de 90.60 Pa, a continuación se muestra la capacidad de arrastre de sólidos con diámetros de 100 mm para las simulaciones con compuerta 1 abierta, compuerta 1 y 3 abierta, y compuerta 1, 2, 3 abierta.

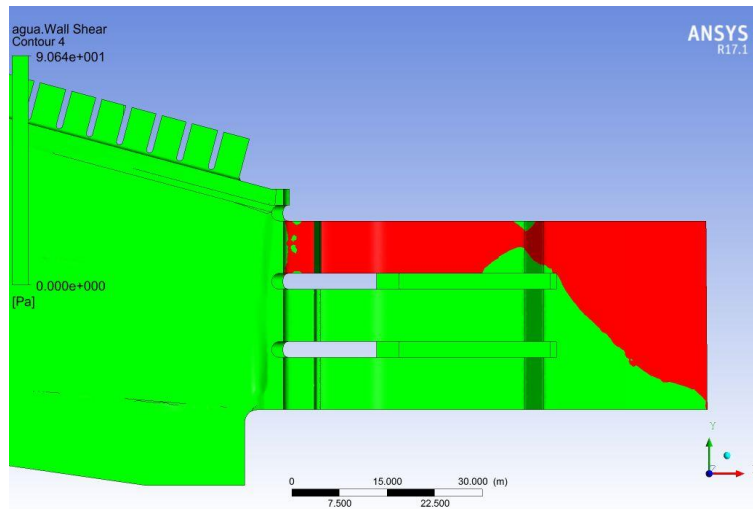


FIGURA 7.19 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM,
POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTA 1
ABIERTA

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

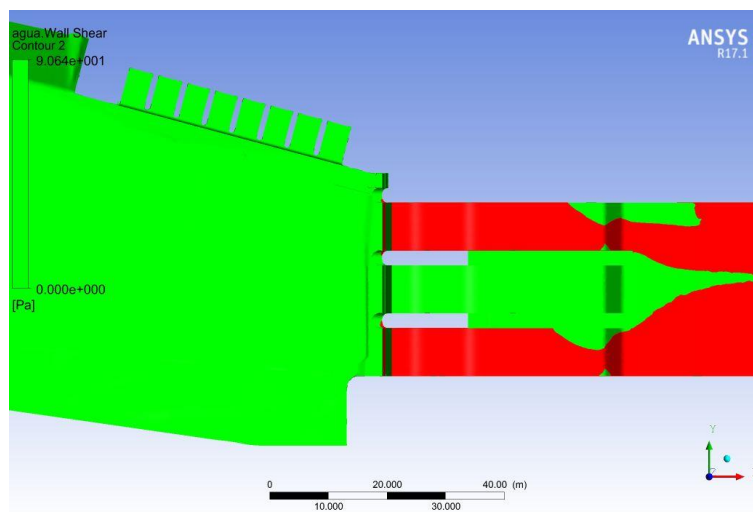


FIGURA 7.20 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM,
POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1 Y 3
ABIERTAS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

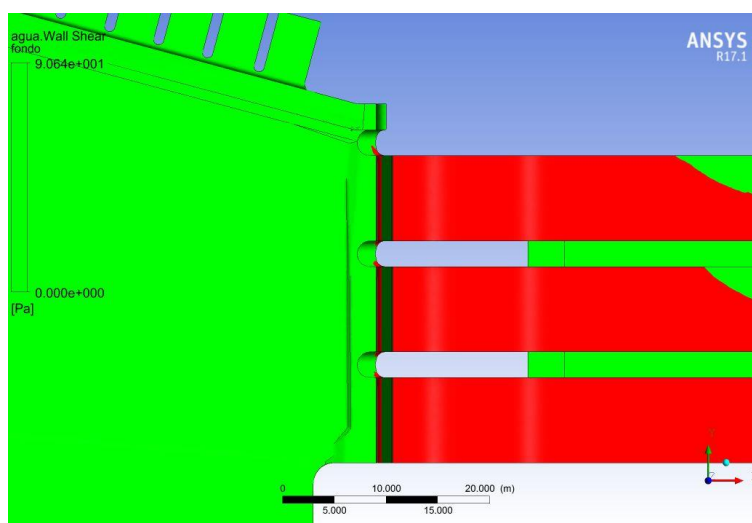


FIGURA 7.21 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM, POR EFECTO DEL ESFUERZO CORTANTE DEL FONDO PARA COMPUERTAS 1, 2 Y 3 ABIERTAS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Como se puede apreciar en las gráficas, para el inicio del arrastre de partículas de diámetro 100 mm, los esfuerzos cortantes producidos por el flujo rápidos aguas arriba de la compuerta están concentrados entre 1 y 2 metros aguas arriba de la compuerta. Para partículas sólidas de este diámetro, el esfuerzo cortante producido por el flujo es suficiente para el inicio del transporte únicamente en las proximidades de las compuertas, con lo que se puede garantizar la limpieza aguas arriba de la compuerta únicamente para la correcta operación. En caso de que partículas de 100 mm o mayores llegaran a depositarse a distancias mayores a 5 metros, se debe realizar un dragado o extracción mecánica de éstos sólidos, puesto que no es posible garantizar una autolimpieza únicamente con la fuerza hidráulica de las compuertas abiertas.

Como conclusión se puede apreciar que, la limpieza con 1 compuerta abierta y caudales de 100 m³/s es recomendada para pequeñas limpiezas de sedimentos depositados aguas arriba de la compuerta específica, porque el cambio en la dirección del flujo genera esfuerzos cortantes que permiten un mayor alcance en la limpieza de los sólidos. Adicional, la limpieza más eficiente se produce con las 3 compuertas abiertas y un caudal de 300 m³/s, obteniendo limpiezas de partículas con diámetros

de 50 mm 1 metro antes del azud, y limpiezas de partículas de 100 mm sobre la cresta del azud. Las compuertas con cualquier operación de apertura para la limpieza garantiza que no se tendrá una deposición mayor a 0.40 metros sobre la cresta del azud, siempre y cuando se realicen las operaciones de apertura y cierre con caudales iguales o mayores que 100 m³/s. para caudales menores, la operación de limpieza contempla varios vaciados y llenados del embalse aguas arriba de la compuerta haciendo menos eficiente en tiempo el proceso de limpieza.

Parte del plan de operación de compuerta, contempla la apertura con caudales de crecida, en donde las velocidades del flujo y la turbulencia impiden la deposición de sólidos en el fondo, por lo que, el análisis de caudales 100, 200 y 300 m³/s, con las compuertas abiertas con el procedimiento previamente descrito, y con la utilización del teorema de Zanke (2002), permite determinar la capacidad de arrastre del flujo, el cual impediría la deposición de los sólidos en el fondo.

Para la determinación de la capacidad de arrastre de sedimentos del flujo, es utilizado el teorema propuesto por Zanke en donde la velocidad de arrastre es el resultado obtenido. Para poder obtener el rango de velocidades de inicio del transporte, primero se determina el tipo de material a ser transportado; en el caso de la presente investigación son arenas y gravas naturales, y con el diámetro de la partícula a ser transportado, se determina el rango de velocidades para el transporte de la partícula. Dentro del rango de velocidades de transporte, la partícula no será depositada en el fondo, y será arrastrada por la corriente, lo que nos garantiza una operación de limpieza preventiva aguas arriba de las compuertas.

Para un diámetro de 5 mm, las velocidades de transporte se determinan de la siguiente manera:

Para el límite superior, $\alpha = 2.8$, y la corrección por cohesión $c = 1$

$$V_{cr} = \alpha * \left(\sqrt{\rho' \cdot g \cdot d} + 5.25 \frac{v}{d} c \right)$$

$$V_{cr} = 2.8 * \left(\sqrt{1.65 \cdot 9.81 \cdot 0.005} + 5.25 \frac{1 * 10^{-6}}{0.005} * 1 \right)$$

$$V_{cr} = 0.80 \text{ m/s}$$

Para el límite inferior, $\alpha = 1.5$, y la corrección por cohesión $c = 1$

$$V_{cr} = \alpha * \left(\sqrt{\rho' \cdot g \cdot d} + 5.25 \frac{v}{d} c \right)$$

$$V_{cr} = 1.5 * \left(\sqrt{1.65 \cdot 9.81 \cdot 0.005} + 5.25 \frac{1 * 10^{-6}}{0.005} * 1 \right)$$

$$V_{cr} = 0.43 \text{ m/s}$$

En la tabla siguiente se muestran los rangos de velocidad para el arrastre de partículas de diámetros dados.

TABLA 7.2. DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD CRÍTICA PARA INICIO DEL MOVIMIENTO

Gravedad	Diámetro de sedimento		Corrección por cohesión	Límite inferior	Límite superior	Viscosidad cinemática	Velocidad crítica para el inicio del movimiento		Velocidad Corregida		Velocidad media
	g (m/s ²)	d (mm)					d (m)	c	$\alpha 1$	$\alpha 2$	
9,81	1	0,001	1	1,5	2,8	0,000001	0,20	0,37	0,25	0,46	0,35
9,81	2	0,002	1	1,5	2,8	0,000001	0,27	0,51	0,34	0,63	0,49
9,81	3	0,003	1	1,5	2,8	0,000001	0,33	0,62	0,41	0,77	0,59
9,81	4	0,004	1	1,5	2,8	0,000001	0,38	0,72	0,47	0,89	0,68
9,81	5	0,005	1	1,5	2,8	0,000001	0,43	0,80	0,53	0,99	0,76
9,81	6	0,006	1	1,5	2,8	0,000001	0,47	0,88	0,58	1,08	0,83
9,81	7	0,007	1	1,5	2,8	0,000001	0,51	0,94	0,63	1,17	0,90
9,81	8	0,008	1	1,5	2,8	0,000001	0,54	1,01	0,67	1,25	0,96
9,81	9	0,009	1	1,5	2,8	0,000001	0,57	1,07	0,71	1,32	1,02
9,81	10	0,01	1	1,5	2,8	0,000001	0,60	1,13	0,75	1,39	1,07
9,81	15	0,015	1	1,5	2,8	0,000001	0,74	1,38	0,91	1,71	1,31
9,81	20	0,02	1	1,5	2,8	0,000001	0,85	1,59	1,06	1,97	1,51
9,81	25	0,025	1	1,5	2,8	0,000001	0,95	1,78	1,18	2,20	1,69
9,81	30	0,03	1	1,5	2,8	0,000001	1,05	1,95	1,29	2,41	1,85
9,81	35	0,035	1	1,5	2,8	0,000001	1,13	2,11	1,40	2,61	2,00
9,81	40	0,04	1	1,5	2,8	0,000001	1,21	2,25	1,49	2,79	2,14
9,81	45	0,045	1	1,5	2,8	0,000001	1,28	2,39	1,58	2,95	2,27
9,81	50	0,05	1	1,5	2,8	0,000001	1,35	2,52	1,67	3,11	2,39
9,81	60	0,06	1	1,5	2,8	0,000001	1,48	2,76	1,83	3,41	2,62
9,81	70	0,07	1	1,5	2,8	0,000001	1,60	2,98	1,97	3,69	2,83
9,81	80	0,08	1	1,5	2,8	0,000001	1,71	3,19	2,11	3,94	3,02
9,81	90	0,09	1	1,5	2,8	0,000001	1,81	3,38	2,24	4,18	3,21
9,81	100	0,1	1	1,5	2,8	0,000001	1,91	3,56	2,36	4,40	3,38

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

El rango de velocidades para el transporte de sedimentos se lo puede representar gráficamente en escala logarítmica, en donde se tienen los diámetros de sedimentos en milímetros, y las velocidades del flujo principal en metros sobre segundos.

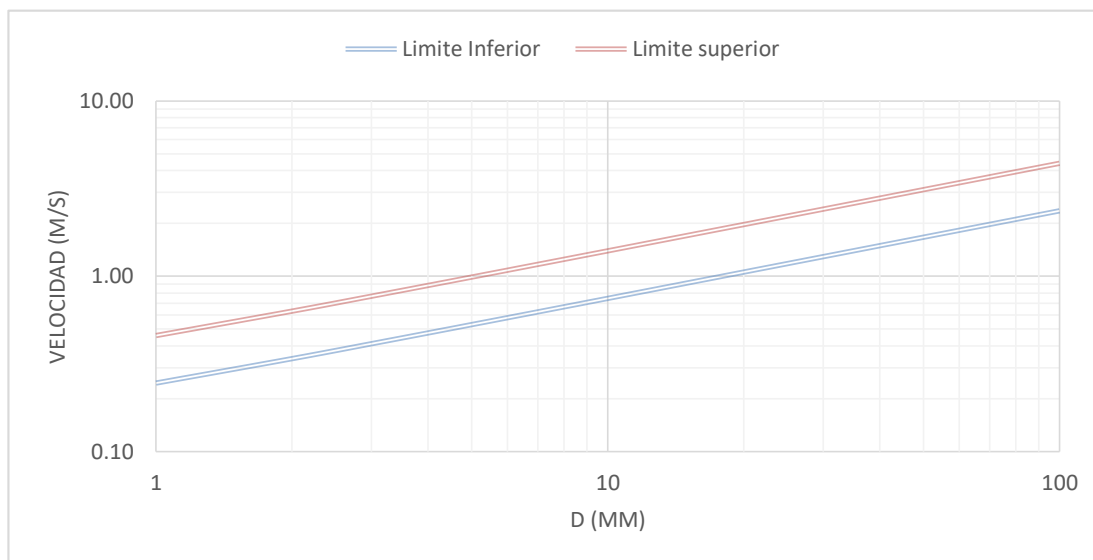


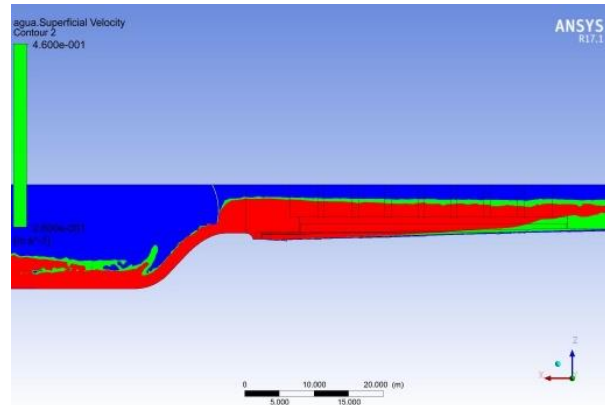
FIGURA 7.22 VELOCIDADES CRITICAS PAR EL INICIO DEL MOVIMIENTO DE LOS SEDIMENTOS

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

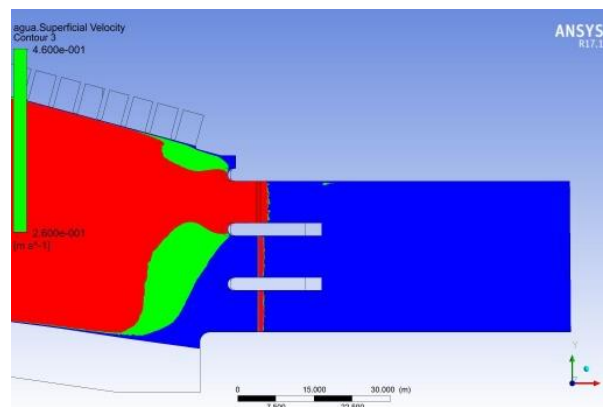
Para poder determinar el alcance del arrastre de sedimentos en la estructura de captación del Toachi Pilaton, fueron utilizados los resultados de velocidades obtenidos de la simulación CFD en ANSYS CFX, con la que determinamos el alcance del arrastre para los diámetros dados. Los diámetros a analizar serán 1 mm, 5 mm, 10 mm, 25 mm, 50 mm y 100 mm, determinaremos el área de influencia de la velocidad crítica para el arrastre de los respectivos diámetros y graficaremos los resultados en CFX Post, para mejor visualización y entendimiento de éstos. El análisis contempla los 3 escenarios; la compuerta 1 abierta, la compuerta 1 y 3 abierta y la compuerta 1, 2 y 3 abierta.

En el primer escenario con la compuerta 1 abierta con un caudal de 100 m³/s se determinan los alcances del arrastre del flujo para los diámetros de partícula dados.

Para el caso de 1 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 0.25 m/s y 0.46 m/s, con una velocidad promedio de 0.36 m/s.

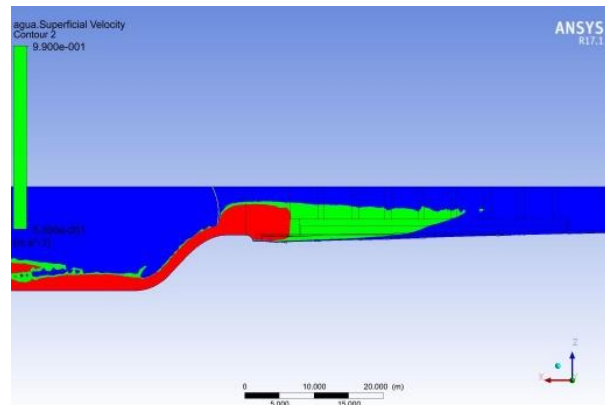


*FIGURA 7.23 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA*

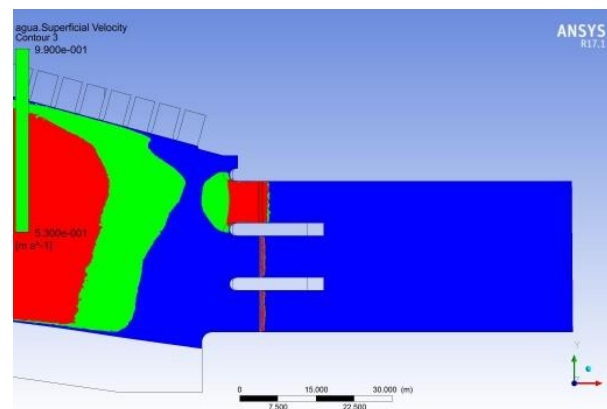


*FIGURA 7.24 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 1 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA*

Para el caso de 5 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 0.53 m/s y 0.99 m/s, con una velocidad promedio de 0.76 m/s.

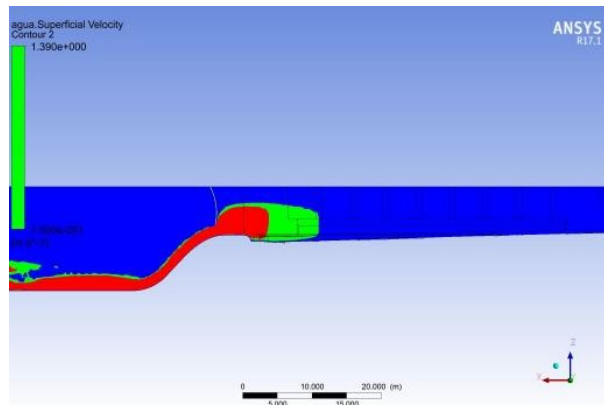


*FIGURA 7.25 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM,
POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA*

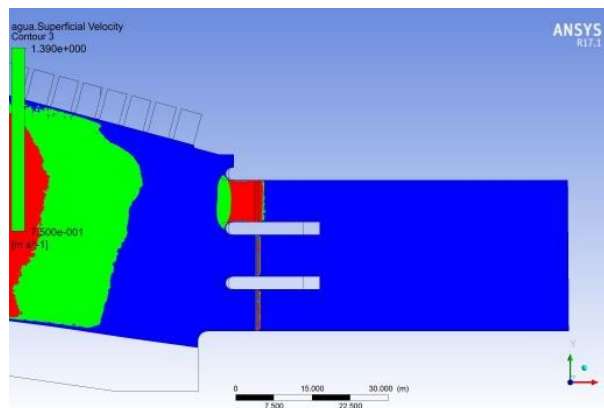


*FIGURA 7.26 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 5 MM, POR EFECTO
DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA*

Para el caso de 10 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 0.75 m/s y 1.39 m/s, con una velocidad promedio de 1.07 m/s.

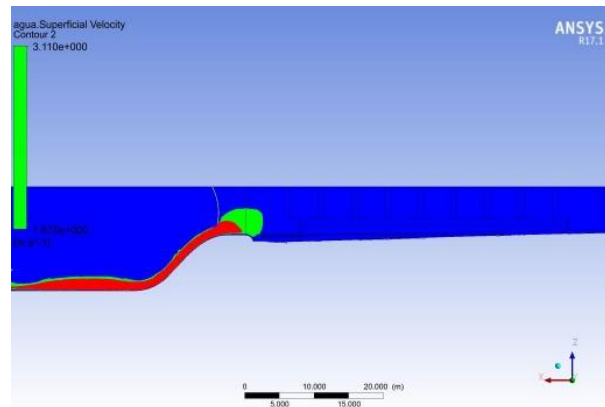


*FIGURA 7.27 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM,
POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA*

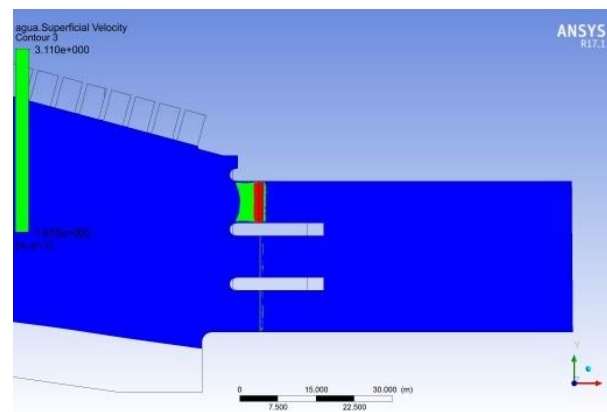


*FIGURA 7.28 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 10 MM, POR EFECTO
DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA*

Para el caso de 50 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 1.67 m/s y 3.11 m/s, con una velocidad promedio de 2.39 m/s.



*FIGURA 7.29 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM,
POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA*



*FIGURA 7.30 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 50 MM, POR EFECTO
DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA*

Para el caso de 100 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 2.36 m/s y 4.40 m/s, con una velocidad promedio de 3.38 m/s.

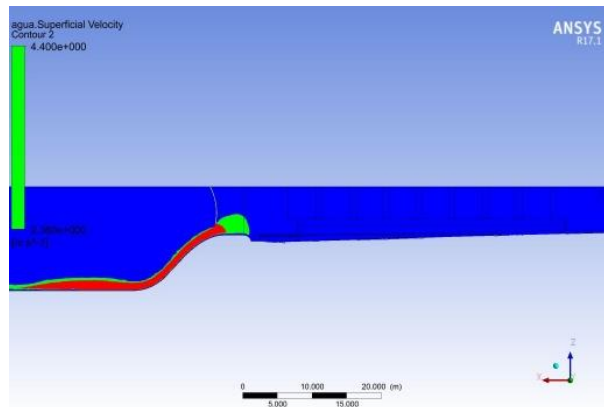


FIGURA 7.31 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

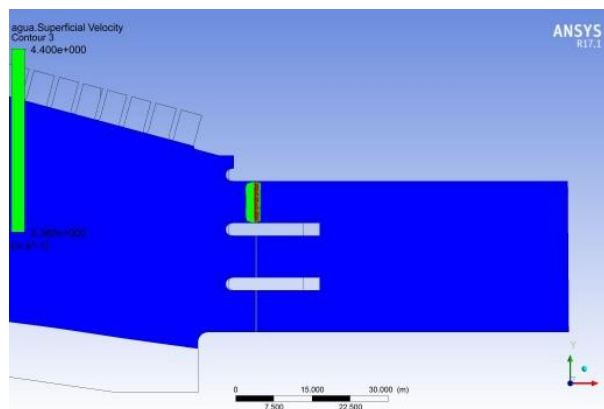


FIGURA 7.32 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 100 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA

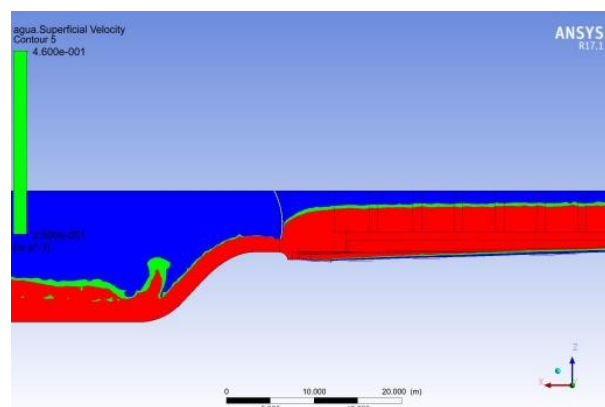
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Con estos mapas de contorno generados con las velocidades límites inferior y superior para el arrastre de las partículas de sedimento de diámetro dado, se puede determinar el alcance del lavado que produciría la apertura de la compuerta 1 a 1.80 metros con un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que, con ésta apertura de compuerta, efectivamente se garantiza un arrastre de partículas de hasta 10 mm, cubriendo en una pequeña parte del área del canal de aproximación, y especialmente un área importante al ingreso de los desarenadores.

Los resultados para las partículas de diámetro igual a 100 mm, muestran que el arrastre generado por el flujo de la compuerta abierta sería capaz de limpiar estas partículas depositadas aguas arriba de la compuerta sin problemas, sin embargo, es poco probable que partículas de ese diámetro se depositen próximas a la compuerta, puesto que serían retenidas en su mayoría por el pequeño embalse que se genera en la obra de cierre.

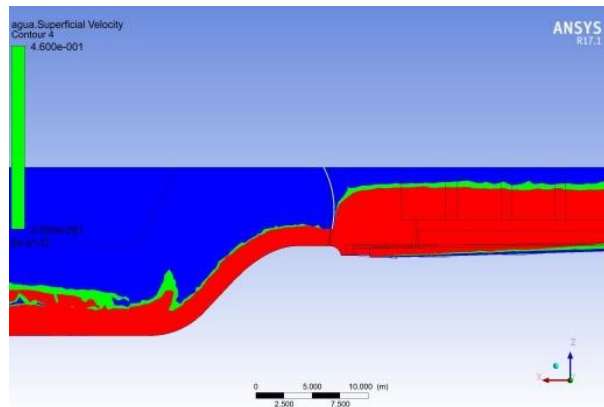
En el segundo escenario con la compuerta 1 y 3 abierta con un caudal de 200 m³/s se determinan los alcances del arrastre del flujo para los diámetros de partícula dados.

Para el caso de 1 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 0.25 m/s y 0.46 m/s, con una velocidad promedio de 0.36 m/s.



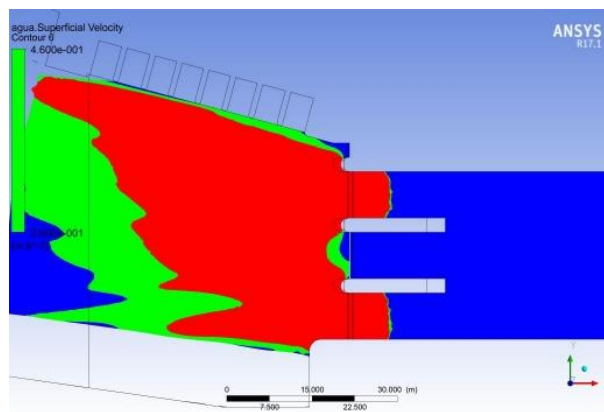
*FIGURA 7.33 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM
COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.34 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM
COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

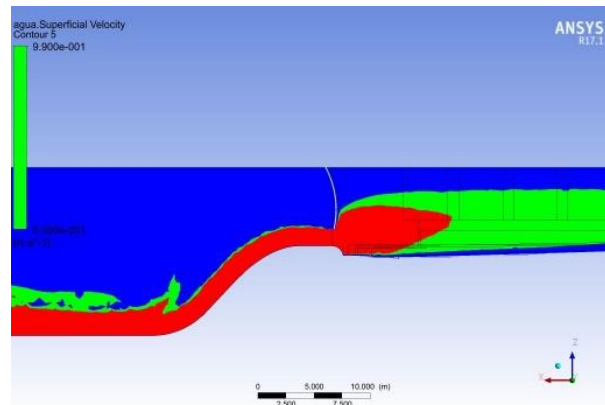
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.35 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 1 MM, POR EFECTO
DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA*

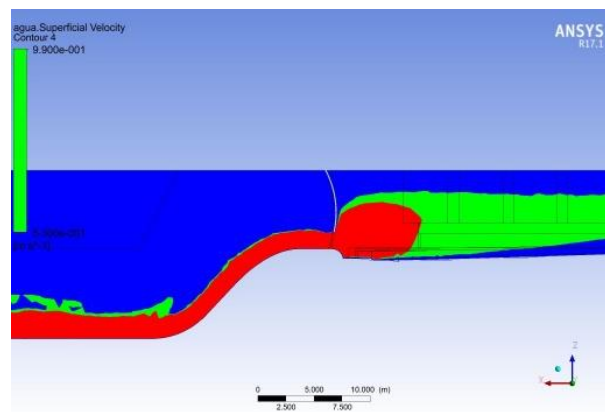
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de 5 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 0.53 m/s y 0.99 m/s, con una velocidad promedio de 0.76 m/s.



*FIGURA 7.36 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM
COMPUERTA1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.37 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM
COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

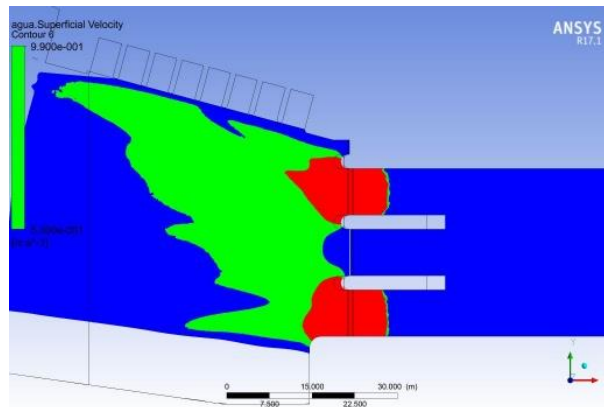


FIGURA 7.38 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 5 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de 10 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 0.75 m/s y 1.39 m/s, con una velocidad promedio de 1.07 m/s.

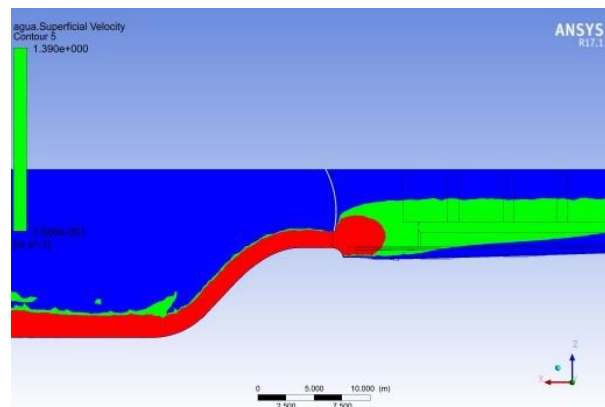
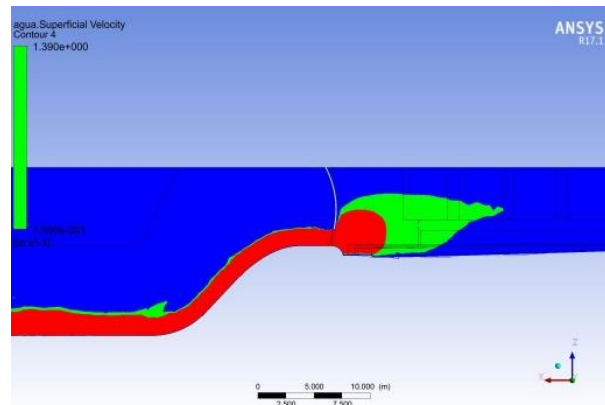


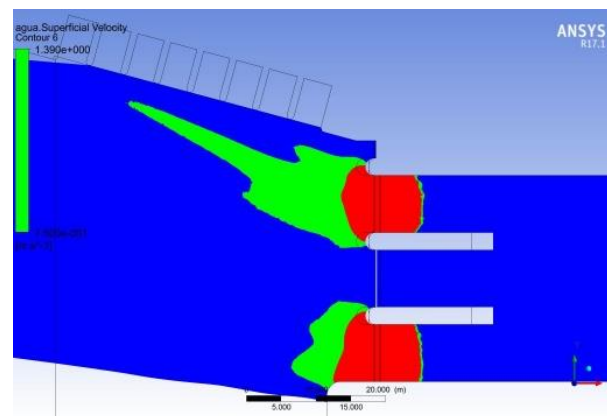
FIGURA 7.39 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.40 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM
COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

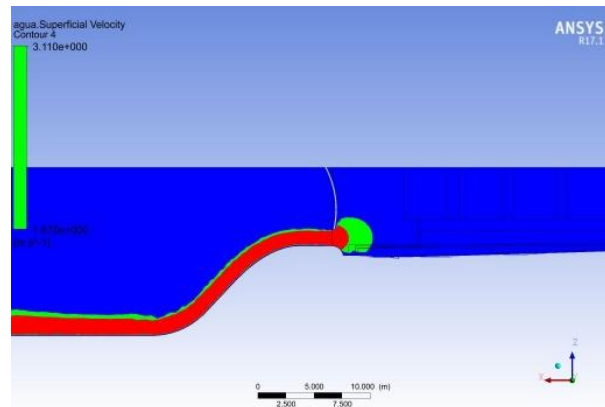
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



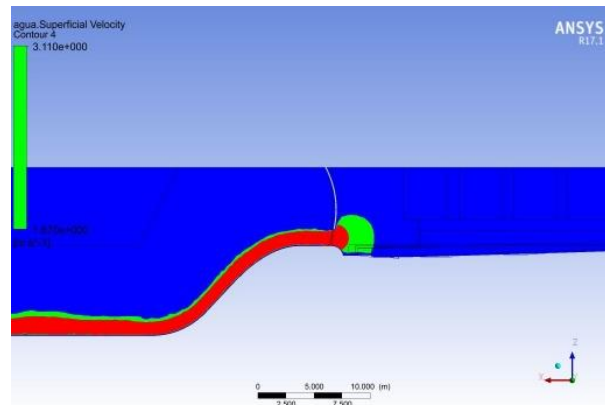
*FIGURA 7.41 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 10 MM, POR EFECTO
DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de 50 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 1.67 m/s y 3.11 m/s, con una velocidad promedio de 2.39 m/s.

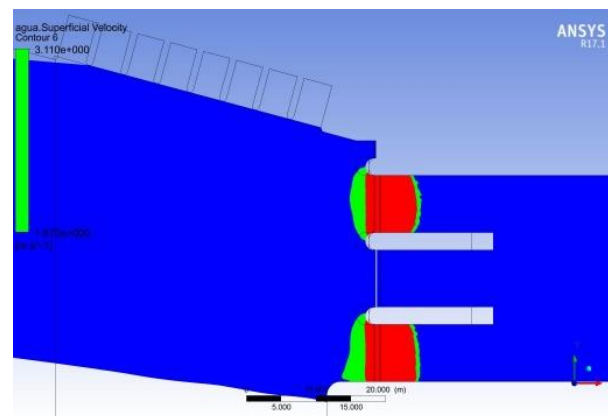


*FIGURA 7.42 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM
COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA*



*FIGURA 7.43 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM
COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

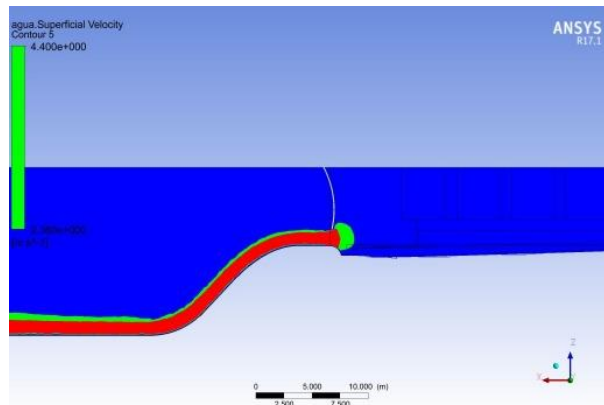
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.44 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 50 MM, POR EFECTO
DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA*

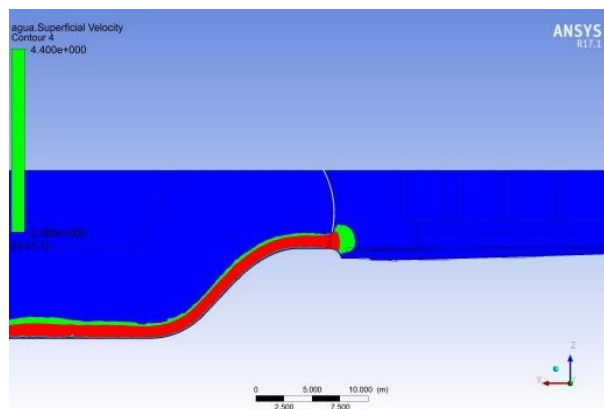
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de 100 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 2.36 m/s y 4.40 m/s, con una velocidad promedio de 3.38 m/s.



*FIGURA 7.45 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM
COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.46 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM
COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

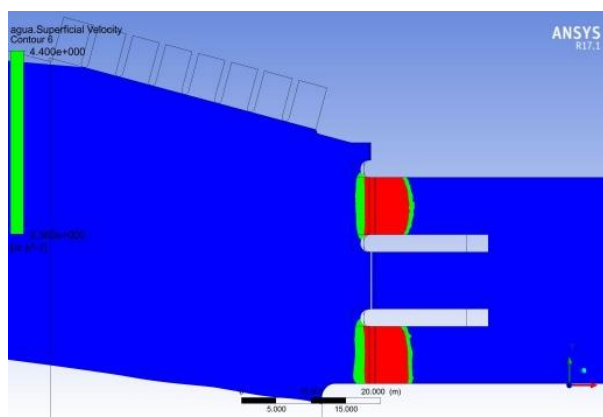


FIGURA 7.47 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 100 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA

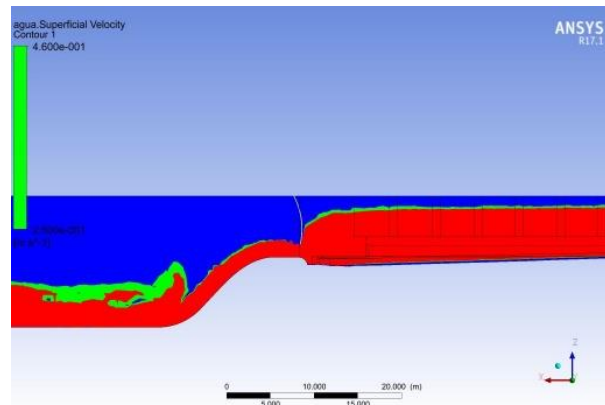
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Con estos mapas de contorno generados con las velocidades límites inferior y superior para el arrastre de las partículas de sedimento de diámetro dado, se puede determinar el alcance del lavado que produciría la apertura de la compuerta 1 y 3 a 1.80 metros con un caudal de 200 m³/s. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que, con ésta apertura de compuerta, efectivamente se garantiza un arrastre de partículas de hasta 20 mm, cubriendo en una pequeña parte del área del canal de aproximación, siendo mayor la incidencia de la velocidad que para el caso anterior con la compuerta 1 abierta y caudal de 100 m³/s .

Los resultados para las partículas de diámetro igual a 100 mm, muestran que el arrastre generado por el flujo de la compuerta abierta sería capaz de limpiar estas partículas depositadas aguas arriba de la compuerta sin problemas, similar al caso anterior con la compuerta 1 abierta y 100 m³/s; sin embargo, es poco probable que partículas de ese diámetro se depositen próximas a la compuerta, puesto que serían retenidas en su mayoría por el pequeño embalse que se genera en la obra de cierre.

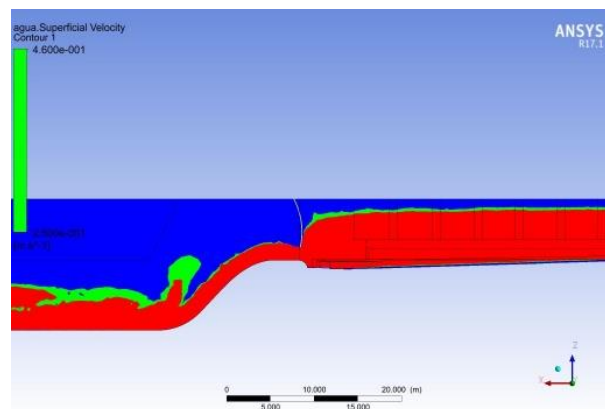
En el tercer escenario con la compuerta 1, 2 y 3 abierta con un caudal de 300 m³/s se determinan los alcances del arrastre del flujo para los diámetros de partícula dados.

Para el caso de 1 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 0.25 m/s y 0.46 m/s, con una velocidad promedio de 0.36 m/s.



*FIGURA 7.48 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM
COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.49 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM
COMPUERTA 2, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

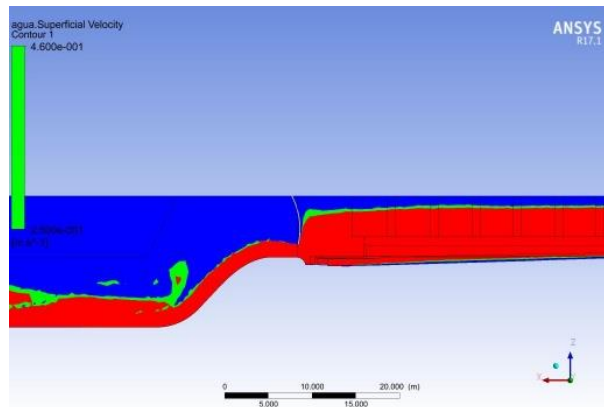


FIGURA 7.50 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 1 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

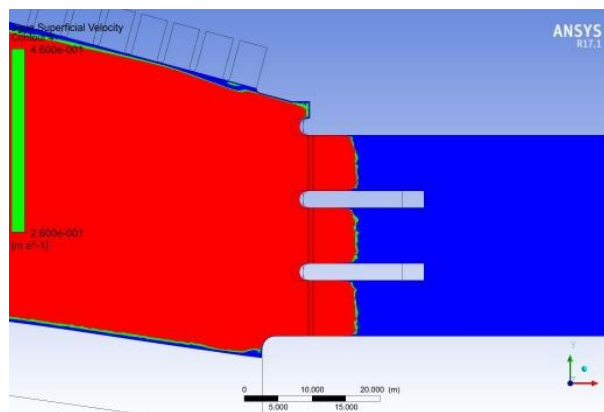
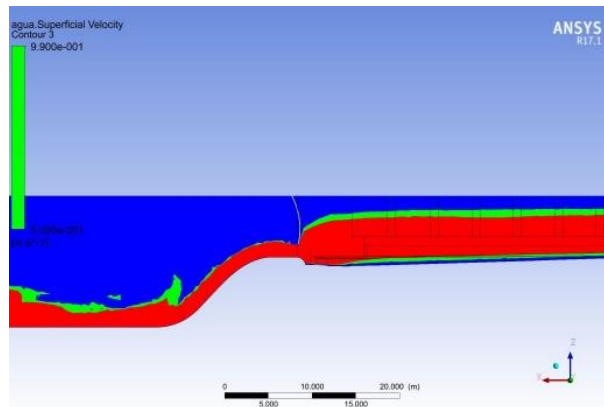


FIGURA 7.51 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 1 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA

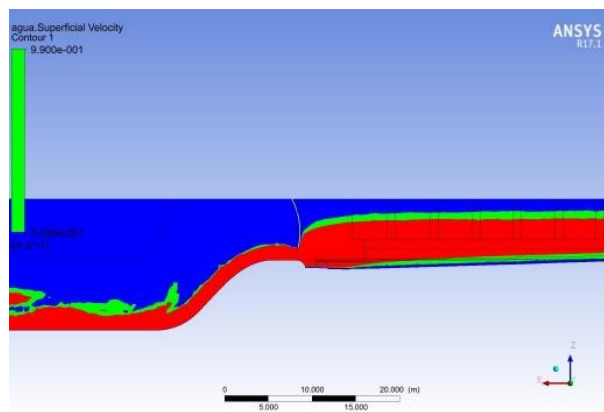
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de 5 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 0.53 m/s y 0.99 m/s, con una velocidad promedio de 0.76 m/s.



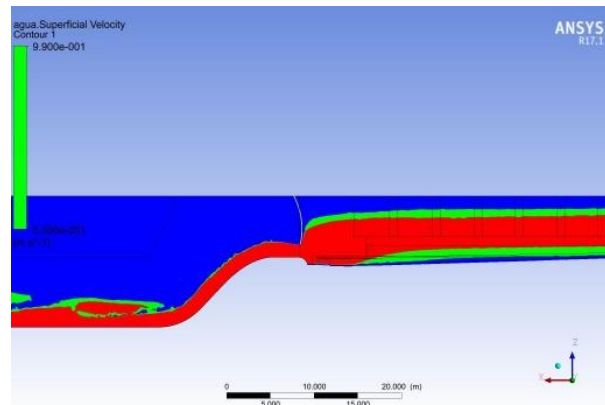
*FIGURA 7.52 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM
COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



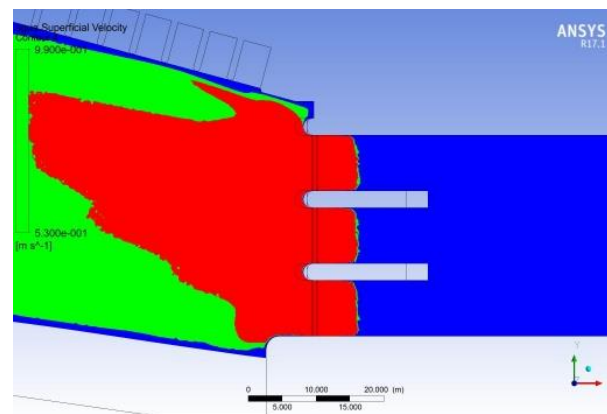
*FIGURA 7.53 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM
COMPUERTA 2, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.54 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 5 MM
COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

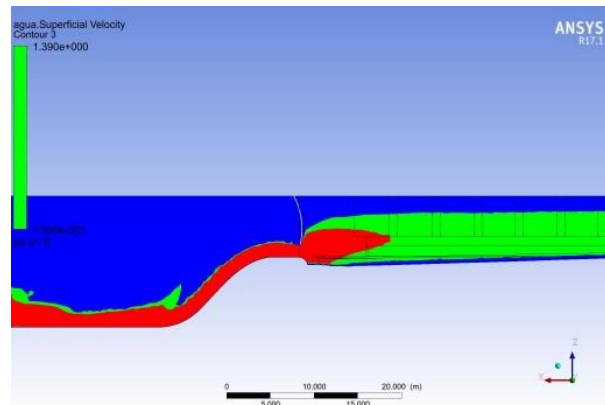
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.55 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 5 MM, POR EFECTO
DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA*

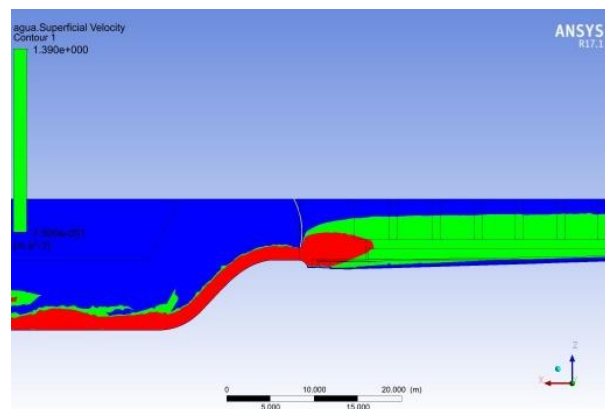
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de 10 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 0.75 m/s y 1.39 m/s, con una velocidad promedio de 1.07 m/s.



*FIGURA 7.56 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM
COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.57 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM
COMPUERTA 2, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

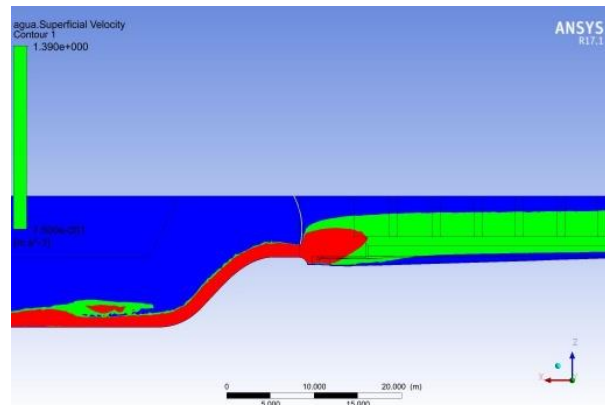


FIGURA 7.58 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 10 MM COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

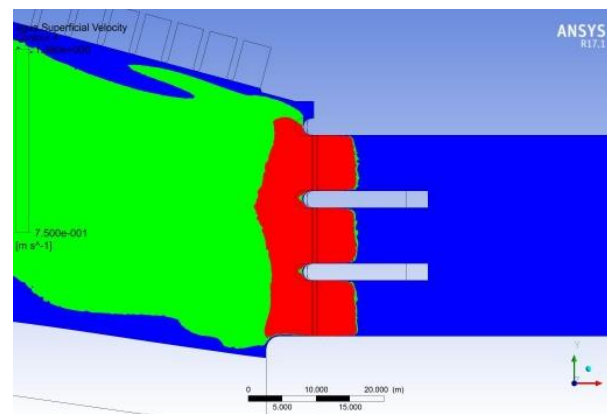
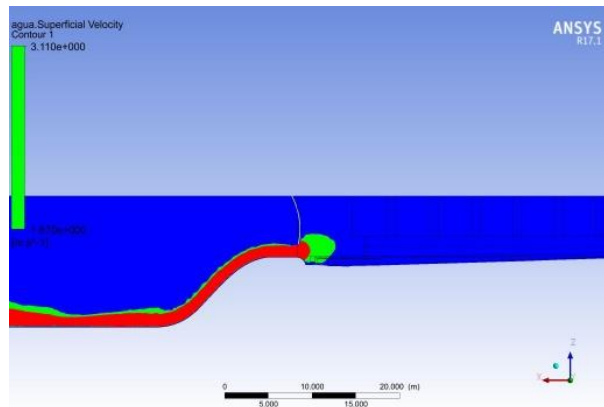


FIGURA 7.59 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 10 MM, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA

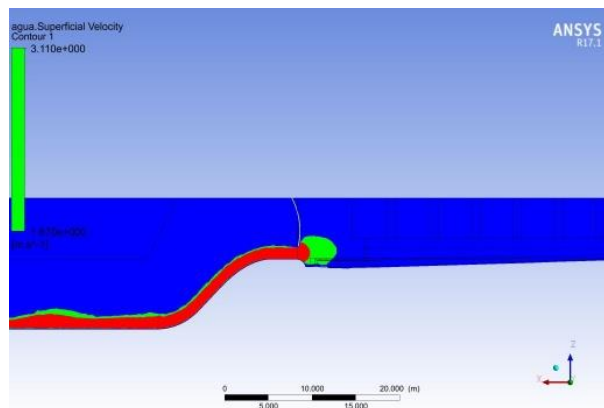
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de 50 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 1.67 m/s y 3.11 m/s, con una velocidad promedio de 2.39 m/s.



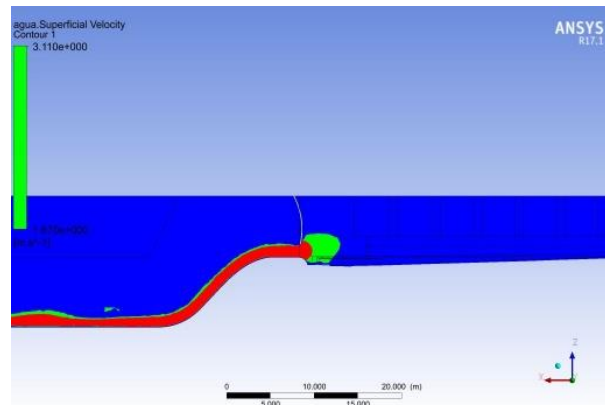
*FIGURA 7.60 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM
COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



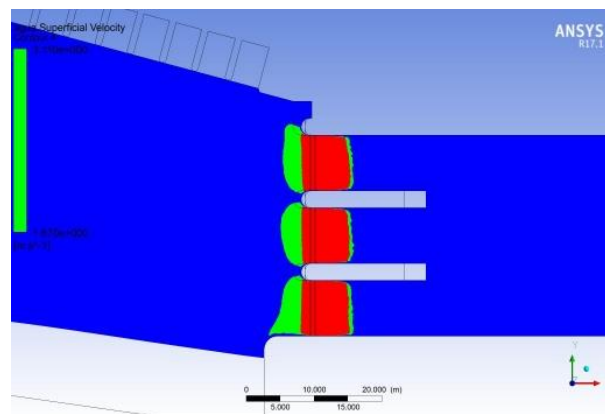
*FIGURA 7.61 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM
COMPUERTA 2, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.62 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 50 MM
COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

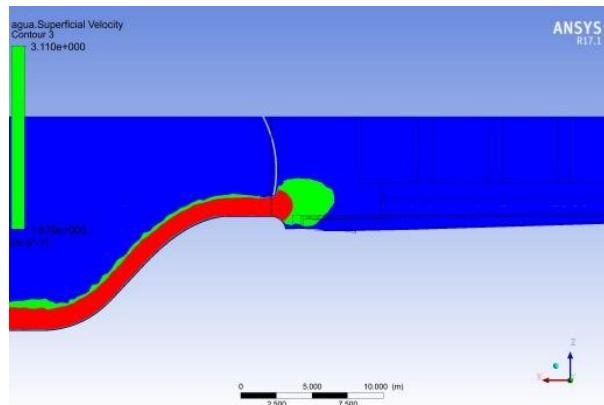
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.63 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 50 MM, POR EFECTO
DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA*

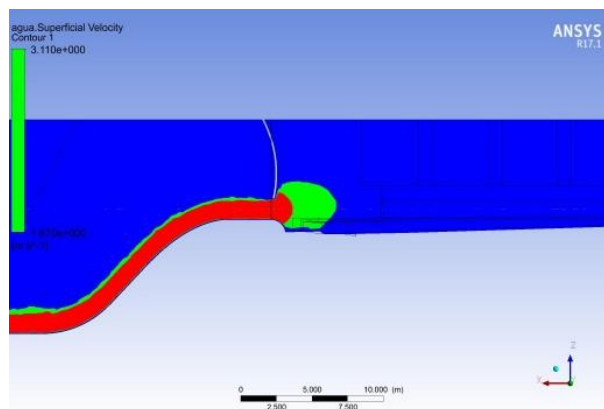
ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Para el caso de 100 mm, las velocidades para el inicio del transporte se encuentran entre 2.36 m/s y 4.40 m/s, con una velocidad promedio de 3.38 m/s.



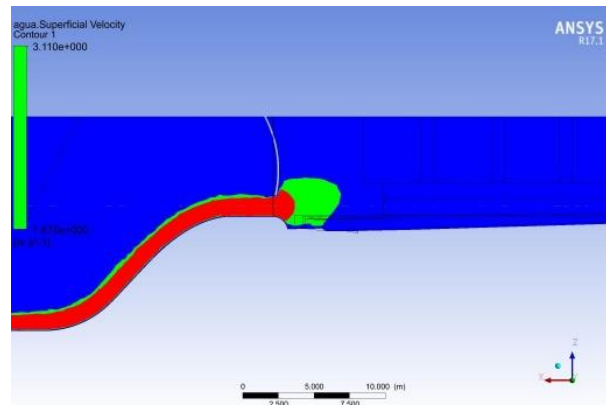
*FIGURA 7.64 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM
COMPUERTA 1, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



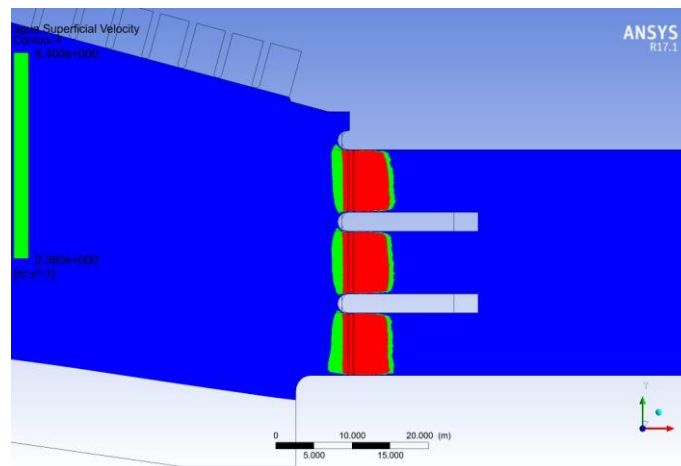
*FIGURA 7.65 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM
COMPUERTA 2, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.66 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE DIÁMETRO 100 MM
COMPUERTA 3, POR EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PERFIL*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA



*FIGURA 7.67 ALCANCE DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE 100 MM, POR EFECTO
DE LA VELOCIDAD DE FLUJO, PLANTA*

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Con estos mapas de contorno generados con las velocidades límites inferior y superior para el arrastre de las partículas de sedimento de diámetro dado, se puede

determinar el alcance del lavado que produciría la apertura de la compuerta 1, 2 y 3 a 1.80 metros con un caudal de 300 m³/s. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que, con ésta apertura de compuerta, efectivamente se garantiza un arrastre de partículas de hasta 50 mm,

Los resultados para las partículas de diámetro igual a 100 mm, muestran que el arrastre generado por el flujo de la compuerta abierta sería capaz de limpiar estas partículas depositadas aguas arriba de la compuerta sin problemas, similar a los casos anteriores; sin embargo, es poco probable que partículas de ese diámetro se depositen próximas a la compuerta, puesto que serían retenidas en su mayoría por el pequeño embalse que se genera en la obra de cierre.

Como conclusión, se ha determinado que a aperturas parciales de las compuertas, existe suficiente velocidad en el flujo para transportar partículas de sedimentos con diámetros de 100 mm sin problemas, con lo que se garantiza la autolimpieza del cauce aguas arriba de las compuertas radiales durante los eventos con caudales de crecida del río Toachi. Adicional, mientras se opere las compuertas durante los eventos de crecida, la autolimpieza del flujo no permitiría la acumulación de sólidos más allá de 0.40 m sobre la cresta del azud; recomendación planteada para una correcta operación de las compuertas.

7.4 PLAN DE OPERACIÓN DE COMPUERTAS.

La operación segura y confiable de todo proyecto hidráulico y especialmente hidroeléctrico, es el objetivo de todos los técnicos diseñadores y constructores. Para lograr esto, un proyecto depende de la operación correcta de las compuertas, y para esto se debe tener un plan operativo general para la seguridad de las obras de captación. La extensión del plan de operaciones depende de la complejidad de la propia estructura. Factores tales como el tamaño, clasificación de peligro, número y tipo de puertas y mecanismos de operación, la ubicación, la hidrología, hidráulica fluvial, y la economía deben ser considerados.

Las compuertas hidráulicas son los medios más comunes por los cuales los operadores regulan el flujo de corriente y asegurar una operación segura del proyecto. Un manual que contenga el plan de operación y control de caudales bien escrito establece los requisitos de operación, procesos, coordinación necesaria con diversas autoridades y procedimientos de operación. Un plan operativo debe documentar todos los aspectos de la operación segura de una obra hidráulica y especialmente las puertas.

El lenguaje del plan de operaciones debe ser fácil de entender, claro y conciso. Aunque los procedimientos se expresan a menudo en términos de ingeniería, estos términos pueden no ser completamente entendidos por el personal de operaciones encargado de las aperturas y cierres de las compuertas, por lo que resulta importante que el lenguaje del plan operativo debe ser comprensible por el personal de operaciones. El plan de operación debe tener un índice de contenidos que permite que el personal operativo pueda encontrar información y procedimientos clave que puede ser necesaria rápidamente. Un manual completo de operaciones debe considerar los siguientes puntos (Task Committee on Condition Assessment of Water Control Gates of the Hydropower Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers, 2012):

- Características de los vertederos y salida de datos
- Las instrucciones para mecanismos operables
- Aperturas hidráulicas y procedimientos de apertura de compuertas para eventos normales y poco frecuentes
- Características hidrológicas de la cuenca
- Remoción de escombros
- Directrices de operación de rutina
- Directrices de operación no rutinarias
- Directrices de mantenimiento
- Directrices de inspección
- Las operaciones de emergencia y directrices de notificación
- Formación y entrenamiento
- Otros

Lamentablemente, el alcance de la presente investigación no contempla todos estos puntos antes mencionados, únicamente contempla las aperturas hidráulicas y procedimientos de apertura de compuertas para eventos normales y poco frecuentes, con énfasis en validar los resultados ya obtenidos en el laboratorio, y estudiar el arrastre de sedimentos con las aperturas de las compuertas. En la operación de lavado del canal de aproximación se debe contemplar 2 escenarios; el primero la limpieza de los sedimentos con caudales del río bajos, en los que se deben realizar operaciones de vaciado y llenado para garantizar la limpieza de los sedimentos aguas arriba de las compuertas radiales, y el segundo escenario es con caudales grandes en el río, con una carga de sedimentos en suspensión elevada, en la cual el mantener la compuerta abierta parcialmente es necesario con el objetivo de evitar la decantación del sólido que se encuentra ya en suspensión, y para arrastrar el sedimento depositado próximo a las compuertas. El plan de operación propuesto para las compuertas no debe tener demasiadas posiciones de operación, puesto que dificulta la planificación y operación de estas, por lo que se proponen únicamente 6 posiciones de operación por compuerta, las cuales serían más que suficientes para abarcar un amplio rango de eventos hidrológicos, así como para realizar operaciones de limpieza del canal de aproximación con caudales bajos.

Las compuertas radiales de cierre sobre los vertederos se las numera de derecha a izquierda, desde la perspectiva aguas arriba, siendo compuerta 1, compuerta 2 y compuerta 3 respectivamente. Durante la operación de las compuertas, se determinan 12 posiciones, con las aperturas varias de las 3 compuertas, empezando con la apertura de la compuerta 1, seguida por la compuerta 3 y finalmente la compuerta 2.

TABLA 7.3. POSICIÓN DE LAS COMPUERTAS DE CIERRE DE LOS VERTEDEROS

Posición numero	Apertura Compuerta numero		
	1 (m)	2(m)	3 (m)
1	0.50	0.00	0.00
2	1.00	0.00	0.00
3	1.80	0.00	0.00
4	1.80	0.00	0.50
5	1.80	0.00	1.00
6	1.80	0.00	1.80
7	1.80	0.50	1.80
8	1.80	1.00	1.80
9	1.80	1.80	1.80
10	2.00	2.00	2.00
11	2.50	2.50	2.50
12	3.00	3.00	3.00

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

Los caudales que se esperan manejar con este plan de operación se presentan a continuación:

TABLA 7.4. CAUDALES SOBRE LOS VERTEDEROS CON LAS LA OPERACIÓN DE COMPUERTAS PLANTEADA

Posición numero	Caudales Compuertas			Total (m ³ /s)
	1 (m ³ /s)	2 (m ³ /s)	3 (m ³ /s)	
1	31	0	0	31
2	60	0	0	60
3	100	0	0	100
4	100	0	31	131
5	100	0	60	159
6	100	0	100	200
7	100	31	100	231
8	100	60	100	259
9	100	100	100	300
10	109	109	109	327
11	130	130	130	391
12	149	149	149	447

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

El caudal de ingreso a los desarenadores ($40 \text{ m}^3/\text{s}$) no se lo está tomando en cuenta en el análisis del funcionamiento de las compuertas radiales de cierre, por lo que si se piensa operar las compuertas radiales sin parar operaciones, se deberán sumar los $40 \text{ m}^3/\text{s}$ del caudal de captación, adicional los caudales pequeños se los manejaran con las clapetas, y durante su funcionamiento no se debería operar las compuertas radiales para el lavado de canal de aproximación.

Al plan presentado anteriormente se puede realizar variaciones en caso de ser necesario operar primero la compuerta 3 o la compuerta 2, en cuyo caso los planes de operación serian de esta manera:

TABLA 7.5. POSICIÓN ALTERNATIVA 1 DE LAS COMPUERTAS DE CIERRE DE LOS VERTEDEROS

Posición numero	Apertura Compuerta numero		
	1 (m)	2 (m)	3 (m)
1	0.00	0.00	0.50
2	0.00	0.00	1.00
3	0.00	0.00	1.80
4	0.50	0.00	1.80
5	1.00	0.00	1.80
6	1.80	0.00	1.80
7	1.80	0.50	1.80
8	1.80	1.00	1.80
9	1.80	1.80	1.80
10	2.00	2.00	2.00
11	2.50	2.50	2.50
12	3.00	3.00	3.00

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

TABLA 7.6. POSICIÓN ALTERNATIVA 2 DE LAS COMPUERTAS DE CIERRE DE LOS VERTEDEROS

Posición numero	Apertura Compuerta numero		
	1 (m)	2 (m)	3 (m)
1	0.00	0.00	0.50
2	0.00	0.00	1.00
3	0.00	0.00	1.80
4	0.50	0.00	1.80
5	1.00	0.00	1.80
6	1.80	0.00	1.80
7	1.80	0.50	1.80
8	1.80	1.00	1.80
9	1.80	1.80	1.80
10	2.00	2.00	2.00
11	2.50	2.50	2.50
12	3.00	3.00	3.00

ELABORADO POR: CARLOS ANDRÉS AULESTIA

CAPITULO 8. CONCLUSIONES

8.1. RESPECTO DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS CFD

- Hoy en día, existe un importante desarrollo en la tecnología computacional, con el objeto de generar herramientas útiles para la toma de decisiones en todas las ramas de la ingeniería, y particularmente, la dinámica de fluidos computacional CFD ha tenido un importante desarrollo en los últimos 30 años, permitiendo realizar un sinnúmero análisis antes imposibles, y con resultados muy exactos, satisfactorios y útiles en la toma de decisiones de diseño.
- El campo de la hidráulica y del diseño hidráulico ya ha incursionado en las simulaciones CFD, como una herramienta complementaria de los laboratorios de hidráulica, en donde los fenómenos son representados a escala, con un costo elevado. El análisis CFD ayuda a la toma de decisiones, y en gran medida a la reducción de costos en las etapas de diseño y verificación.
- ANSYS CFX, siendo un software consolidado en el mercado, permite un sinnúmero de posibles tipos de simulación, con un amplio rango de aplicaciones para la ingeniería, y en nuestro caso particular para la simulación de flujo libre sobre una estructura; con el particular de que solo es posible simular flujos bifásicos (agua/aire) como superficie libre.
- Antes de comenzar a modelar con la dinámica de fluidos computacional CFD, es importante conocer la teoría del cálculo y resolución numérica con el método que el software seleccionado aplica para hallar la solución numérica del dominio simulado, para tener una buena comprensión del funcionamiento del programa y las limitaciones que este tiene al momento del ingreso de datos y la obtención de resultados, y en el caso de ANSYS CFX, es importante conocer la resolución numérica de las ecuaciones de Navier Stokes mediante los volúmenes finitos.
- La simulación numérica con el software ANSYS CFX, es capaz de reproducir acertadamente los fenómenos de flujo dentro de un dominio simulado, integrando

dentro de la simulación las condiciones de frontera, y los modelos de turbulencia adecuados.

- Los resultados entregados por cualquier software CFD deben ser validados por un modelo físico, o en su defecto por otros modelos numéricos en donde el proceso de validación ya haya sido efectuado.
- Para la selección del tipo de mallado, es preferible utilizar geometrías hexaédricas y tamaños pequeños de malla desde el punto de vista precisión del resultado, con mejores convergencias, sin embargo, al tener recursos computacionales limitados un mallado híbrido o tetraédrico puede entregar soluciones validas también, con ciertos cuidados al ingreso de los parámetros del dominio, como fue demostrado en la presente investigación.
- La selección del modelo de turbulencia debe obedecer al tipo de simulación a realizar, la calidad de los resultados a obtener, y los recursos computacionales disponibles. Para una gran gama de simulaciones, un modelo de turbulencia tipo RANS como el $k - \epsilon$ es más que suficiente, pero en simulaciones en donde exista disipación, y transferencia de calor, los modelos LES pueden resultar más fiables.

8.2. RESPECTO AL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

- Calcular el transporte de sedimentos requiere conocimiento de las condiciones en las cuales las partículas de sedimento comienzan a moverse, pero debido al gran número de parámetros gobernando al movimiento incipiente, no es posible una definición determinística.
- La mayor parte de la teoría del transporte de sedimentos se basa en análisis estadísticos, y tiene una aproximación probabilística, ya que el entendimiento apropiado del fenómeno del transporte de sedimentos requiere un periodo considerable de tiempo, y en muchos casos, resultados y teorías han sido completados o modificados por otros investigadores mucho después, por lo que podemos concluir que es un campo en donde hace falta mucha investigación para poder tener teoremas de resolución que satisfagan todos los parámetros envueltos en el transporte de sedimentos.

- El teorema postulado por Shields, en donde se determina el inicio del transporte de sedimentos correlacionado las velocidades de flujo, con los esfuerzos desestabilizantes que produce en la partícula o esfuerzos de arrastre es la base para todo estudio de transporte de sedimentos; y aunque el esfuerzo de levantamiento no es tomado en cuenta en el análisis, su efecto se encuentra implícito en el proceso de calibración de Θ con los datos experimentales.
- El teorema de Shields correlaciona los esfuerzos de arrastre y los esfuerzos resistentes por fricción de las partículas para el inicio del transporte, siendo los esfuerzos resistentes por fricción dependientes de la rugosidad del fondo para el inicio del transporte, y a su vez los esfuerzos cortantes producidos por la interacción del flujo y la rugosidad del fondo.
- Las investigaciones realizadas por Shields son la base para cualquier estudio de transporte de sedimentos, y en nuestro caso, al utilizar la fórmula propuesta por Zanke, nos aproximamos a los resultados obtenidos en estas y posteriores investigaciones.
- El análisis propuesto para la presente investigación correlaciona las velocidades producidas en el flujo, con su capacidad de arrastre; y mediante la simulación CFD de la captación, se generaron mapas de contorno para delimitar las zonas de arrastre de determinados diámetros de partícula, logrando identificar el alcance de la capacidad de arrastre, a las aperturas estudiadas de las compuertas.
- Después de realizado el análisis de las velocidades de flujo, y su capacidad de arrastre para la estructura estudiada, observamos que la capacidad de limpieza de la compuerta 1, con una apertura de 1.80 metros y un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, es hasta partículas de diámetro 10 mm, siendo más eficiente para partículas de diámetros de 5 mm y menores.

8.3. RESPECTO DE LA SIMULACIÓN DE LAS COMPUERTAS EN LA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN DEL PROYECTO TOACHI PILATON, Y PLAN DE OPERACIÓN DE COMPUERTAS.

- ANSYS CFX, en simulaciones de tipo CFD, permite obtener resultados de diferentes análisis, como son velocidades de flujo, fases de flujo, etc; incluida en estos análisis se tiene al esfuerzo cortante de las paredes o contornos, en donde directamente nos entrega los esfuerzos cortantes producidos por la interacción del flujo y las paredes del contorno.
- Los esfuerzos cortantes obtenidos como resultado, permiten la determinación de las áreas de esfuerzos necesarios para el inicio del transporte de partículas de diámetros dados; siendo los diámetros analizados de 1, 5, 10, 50 y 100 milímetros, puesto que son representativos en el contexto global del transporte de sedimentos de un cauce natural. Estos diámetros permiten la determinación de la capacidad de autolimpieza que tiene el flujo al atravesar las compuertas radiales abiertas de la captación del proyecto Toachi Pilaton.
- Los esfuerzos cortantes producidos por el flujo a través de las compuertas abiertas en el fondo del canal de aproximación son irregulares, y su determinación está sujeta a la interacción del flujo, la estructura y los contornos del fondo.
- Con la compuerta 1 abierta y un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, al existir arremolinamientos y cambios de dirección bruscos en el flujo, se determinó que esta operación es adecuada para el inicio del transporte de partículas de sedimento depositadas aguas arriba de la compuerta hasta 5 metros aguas arriba de la estructura, con partículas con diámetros de 50 mm, e incluso de 100 mm, con una menor capacidad de arrastre para este último caso.
- La condición más eficiente para el inicio del transporte de sedimentos se presenta con el caudal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ y la apertura de las 3 compuertas radiales, en donde el flujo rápido es capaz de producir mayores esfuerzos cortantes en el fondo del cauce, siendo suficientes para remover partículas con diámetros de 10 mm desde los 10 metros de distancia aguas arriba de las compuertas.
- Partículas con diámetros de 100 mm o mayores pueden ser arrastradas por las corrientes producidas por el flujo al atravesar las compuertas en cualquiera de las

condiciones estudiadas, y su alcance se limita a el azud, con una pequeña influencia aguas arriba para el caso de las compuertas 1, 2 y 3 abiertas y un caudal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$; sin embargo, no se espera que partículas de esta dimensión lleguen a ser depositadas sobre la cresta del azud, y se espera que sean retenidas en el embalse que se produce aguas arriba de las compuertas.

- El análisis de velocidades de flujo permite determinar si la partícula es arrastrada por la corriente, o es depositada en el fondo del cauce, por lo que la realización de este análisis con ANSYS CFX permite determinar si las velocidades de flujo con los caudales analizados de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, $200 \text{ m}^3/\text{s}$ y $300 \text{ m}^3/\text{s}$, para las compuertas 1 abierta, compuerta 1 y 3 abierta, y compuerta 1, 2 y 3 abierta respectivamente serán suficientes para no permitir la sedimentación de los sólidos arrastrados por la corriente del cauce.
- Mediante la modelación física de la captación del proyecto Toachi Pilaton en los laboratorios de Hidráulica delo CIERHI EPN se determinó los coeficientes de descarga de las compuertas radiales; y mediante la modelación numérica se ha corroborado los resultados obtenidos en la modelación física, por lo que los caudales descargados por las compuertas radiales abiertas a 1. 80 metros en la modelación numérica se los considera válidos para la realización de análisis de velocidad del flujo.
- La incidencia del arrastre de la velocidad de flujo tiende a ser un poco mayor a la de los esfuerzos cortantes en el fondo del cauce para el inicio del transporte de sedimentos, puesto que al acercarnos al fondo las velocidades de la corriente disminuyen por efectos de la interacción del fluido con la rugosidad de la superficie; sin embargo, se puede concluir que los esfuerzos cortantes para el inicio del transporte de sedimentos, y las velocidades de flujo para el transporte de sedimentos, al ser fenómenos intrínsecamente relacionados, las velocidades en el flujo pueden aportar más a la limpieza preventiva al no permitir que los sólidos arrastrados por la corriente durante las crecidas sean depositados aguas arriba de las compuertas, y su análisis en esta investigación ha sido independiente de los esfuerzos cortantes.
- Las velocidades de flujo aguas arriba de la compuerta son del orden de hasta 8 m/s , y a medida que se alejan del as compuertas, la velocidad disminuye, junto con la capacidad de arrastre del flujo. Las velocidades producidas por el flujo

aguas arriba de las compuertas es suficiente para garantizar el arrastre de partículas de hasta 100 mm; sin embargo, analizando las gráficas de contorno presentadas en ANSYS CFX se observa que el arrastre de partículas de 10 mm es más eficiente en toda la zona aguas arriba de las compuertas hasta a 10 metros de distancia.

- El plan de operación de compuertas presentado contempla 3 variantes y 12 posiciones por variante, con lo que las compuertas se pueden operar con 36 diferentes posiciones para el manejo de los caudales de crecida y la limpieza del canal de aproximación a las compuertas.
- La presente investigación se concentró en la apertura de las compuertas a 1.80 metros; sin embargo, con aperturas menores se presentarían velocidades similares y esfuerzos cortantes similares en las zonas próximas a la compuerta, con lo que se pueden realizar operaciones de limpieza preventivas con caudales un poco menores a los presentados en esta investigación.
- Como conclusión respecto del estudio realizado, los esfuerzos cortantes del fondo y las velocidades en el flujo aguas arriba de las compuertas abiertas garantizan la generación de las condiciones para el inicio del transporte de partículas depositadas de sedimentos con diámetros inclusive de 100 mm, por lo que, con una operación frecuente de limpieza, los sedimentos arrastrados por la corriente del río Toachi serán lavados, y no se acumularán a más de 0.40 metro sobre la cresta del vertedero, con lo que se evitarán posibles problemas en la apertura de las compuertas radiales.
- El plan de operación de compuertas propuesto consta de 3 alternativas y 12 posiciones por alternativa, siendo las 2 primeras posiciones para caudales menores que $140 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando que por la bocatoma ingresará $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Estas posiciones sirven como reguladoras de nivel y caudal en la bocatoma, funcionando en conjunto con las clapetas de la captación; sin embargo, estas posiciones se las puede utilizar para pequeñas limpiezas en tiempos de estiaje en el Río Toachi.
- Las posiciones 3, 4 y 5, pueden resultar muy útiles para la limpieza de los sólidos con caudales de crecidas normales esperadas dentro del funcionamiento, con caudales desde los $140 \text{ m}^3/\text{s}$, hasta los $200 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Toachi, obteniendo la

limpieza de los sólidos aguas arriba de la compuerta 1, y un lavado menor tras la compuerta 3.

- Las posiciones de compuerta desde la 6 a la 9, son para el manejo de caudales de crecida entre 240 m³/s y 340 m³/s, permitiendo el ingreso de 40 m³/s por la bocatoma; sin embargo, es importante determinar si es conveniente operar la central hidroeléctrica en este rango de caudales, puesto que la concentración de sólidos de arrastre en el agua puede acelerar el desgaste de las turbinas hidráulicas.
- Las posiciones 10, 11 y 12 son para el manejo de caudales de crecida poco frecuentes en el río Toachi, pero con gran concentración de sólidos en el agua, por lo que se recomienda suspender las operaciones por el alto riesgo de desgaste de las turbinas por erosión ocasionada por los sólidos que arrastra el flujo. Las compuertas radiales abiertas garantizan que no se depositara el material directamente aguas arriba de la compuerta, como fue demostrado en la presente investigación.

CAPITULO 9 RECOMENDACIONES

- La simulación de un flujo libre con inclusión de aire es siempre recomendada ante una simulación monofásica (flujo bifásico), debido a la disipación de energía que puede existir en los flujos con velocidades altas en donde el fenómeno de inclusión de aire y la disipación es determinante para la obtención de resultados precisos.
- Es importante tener una metodología de validación de resultados obtenidos mediante simulaciones del tipo CFD, una de estas es obviamente la comparación de estos resultados con los obtenidos en un modelo físico, pero es recomendable tener también otras alternativas para validar las simulaciones CFD que no incurran en costosos modelos, como pueden ser simulaciones con varios programas CFD, pero una de las alternativas a estudiar a futuro es una simulación numérica del tipo DSN para validar los resultados obtenidos.
- Los resultados obtenidos mediante una simulación CFD permiten la toma de decisiones de diseño de una manera mas rápida que con un modelo físico a escala, pero es siempre recomendado en obras de importancia la modelación física, dado que esta permite en primer lugar la validación de la simulación numérica, y en segundo lugar permite un desarrollo investigativo integral en el estudio de los fenómenos hidráulicos analizados.

BIBLIOGRAFÍA

ANSYS. (2009). *ANSYS CFX - Solver Theory Guide*.

ANSYS. (n.d.). ANSYS Workbenck 16.0.

ASCE Task Committee to Expand and Update Manual 54. (2008). *Sedimentation Engineering, Processes, Measurements, Modeling, and Practice*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.

Bechteler, W. (2006). *Sediment Sources and Transport Processes*. Neubiberg.

CCTech. (2015). *LearnCax*. Retrieved from https://www.learncax.com/class/www/student.php?view_unit=1055

FLOW3D. (2012). Retrieved from PRLOG: <http://www.prlog.org/12022405-flow-science-recipient-of-intels-voyager-award-at-sc-12.html>

Hidrotoapi - EPN. (2012). *Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilaton*. Quito.

HiTechCFD. (2013, Marzo 16). *PRLOG*. Retrieved from <http://www.prlog.org/12099970-hitech-cfd-recommends-aerodynamics-applications-for-computational-fluid-dynamics-cfd.html>

Holman. (2002). *Heat Transfer*.

Jean Clucas, P. W. (1999, Agosto 3). *FAST User Guide*. Retrieved from https://www.nas.nasa.gov/Software/FAST/RND-93-010.walatkac-lucas/htmldocs/chp_16.surferu.html

Jiyuan Tu. (2008). *Computational Fluid Dinamics A Practical Approach*.

Lombardi S.A. & Hidrotoapi Hidrotoapi E.P. (2009). *Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón,*.

Ortega Patricio - Izurieta, L. (2012). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FLUJO DE APROXIMACIÓN HACIA LA CAPTACIÓN PILATÓN Y EN EL INGRESO DE LOS DESARENADORES DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN*. Quito.

Pro S3. (2013). Retrieved from <http://www.pros3.it/?q=node/32>

Sánchez, J. M. (2012). Trabajo final del período formativo. *Tesis*.

Shih, M. C. (2012). *Mechanics of Fluids*.

Subhasish Dey. (2014). *Fluvial Hydrodynamics, Hydrodynamic and Sediment*. Kharagpur: Springer.

Task Committee on Condition Assessment of Water Control Gates of the Hydropower Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers. (2012). *Water Control Gates*. Reston, Virginia, United States of America: American Society of Civil Engineers.

W Malalasekera, H. K. (2007). *An Introduction to Computer Fluid Dynamics - The Finite Volume*. Pearson Education Limited.