

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD CIENCIA Y TEGNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**DISEÑO VIRTUAL DEL CANAL REHBOCK COMO HERRAMIENTA
DIDÁCTICA, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL “SOFTWARE
SOLIDWORKS”, PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE
INGENIERÍA CIVIL**

POR:

KARLA IRENE ANTELO

CIV-502 PROYECTO DE INGENIERÍA CIVIL II

SEMESTRE I- 2025

TARIJA- BOLIVIA

DEDICATORIA:

A mi madre, por ser el pilar fundamental en mi vida y mi más constante inspiración. Su amor, fe y perseverancia me sostuvieron en cada momento de duda y me dieron la fuerza para llegar hasta aquí. Esta tesis es tanto un logro personal como un homenaje a su incansable ejemplo de fortaleza y dedicación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I. GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES	1
1.3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.3.1. Planteamiento del problema	3
1.3.2. Formulación del problema.....	4
1.3.3. Sistematización del problema	4
1.4. OBJETIVO	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. JUSTIFICACIÓN	5
1.5.1. Teórica	6
1.5.2. Metodológica	6
1.5.3. Práctica	7
1.6. HIPÓTESIS	7
CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL	9
2.1. MARCO TEÓRICO	9
2.2. MARCO CONCEPTUAL	10
Resalto hidráulico:.....	10
Número de Froude:.....	10
Herramienta Didáctica:	10
Laboratorio Virtual:.....	10
SolidWorks Flow Simulation	11
SolidWorks Flow Simulation Validación	11
Modelo CFD Validado:	11
2.3. MARCO ESPACIAL	12
2.4. MARCO TEMPORAL	12
CAPÍTULO III: FUNDAMENTO TEÓRICO	13
3.1. Laboratorio Virtual	13
3.2. Características principales del resalto hidráulico	14

3.2.2.	Ecuación de Bélanger	18
3.2.3.	Pérdida de energía (ΔE) y eficiencia (η)	18
3.2.4.	Longitud del resalto	20
3.3.	Modelismo o Simulación	23
3.4.	Dinámica de Fluido Computacional (CFD)	24
3.4.1.	Ecuación de Navier Stokes	25
3.5.	Solidworks	27
3.5.1.	Solidworks Flow Simulation	28
CAPÍTULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA		30
4.1.	ENSAYO EXPERIMENTAL	30
4.1.1.	Características de Canal Rehbock instalado en UAJMS	30
4.2.	Instrumentos de medición	31
4.2.1.	Desarrollo de la práctica de laboratorio “Resalto hidráulico”	31
4.2.2.	Resultados de la práctica	32
4.3.	MODELACIÓN 3D EN SOLIDWORKS	33
4.3.1.	Croquis en 3D	34
4.3.2.	Extruir saliente/base	35
4.3.3.	Extruir corte	36
4.3.4.	Vertedero	37
4.3.5.	Compuerta deslizante	38
4.3.6.	Marco fijo de compuerta	39
4.4.	ENSAMBLAJE DE PIEZAS	39
4.5.	SIMULACIÓN EN SOLIDWORKS	40
4.5.1.	Nuevo proyecto Wizard	40
4.5.2.	Dominio computacional	42
4.6.	CONDICIONES DE CONTORNO	45
4.6.1.	Boundary Conditions	45
4.6.2.	Pressure opening	46
4.6.3.	Walls	47
4.6.4.	Goals	48
4.6.5.	Run	48
4.6.6.	Malla	49

CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	50
5.1. ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES CFD.....	50
5.1.1. Simulación con “Ideal Walls”	50
5.1.2. Tabla de resultados “Ideal Walls” por método de líneas verticales	65
5.1.3. Simulación considerando la rugosidad, “Real Walls”	66
5.1.4. Resultados tomando en cuenta la rugosidad, “Real Walls”	68
5.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIONES CFD, BAJO DISTINTOS ESCENARIOS.....	72
5.2.1. Observación del resalto en simulación Vs. experimental.....	72
5.2.2. Predicción y sensibilidad al caudal del modelo con Ideal Walls.....	75
5.2.3. Validación modelo con Paredes Reales y Reducción del Error Relativo.....	75
5.2.4. Demostración gráfica de validación modelo “Real Walls”	77
5.2.5. Validación del modelo para la Disipación de Energía por ecuación.....	82
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
6.1. CONCLUSIONES	84
6.2. RECOMENDACIONES.....	85
Bibliografía.....	87
Webgrafía	89

ANEXOS

ANEXO I. Memoria fotográfica de la práctica de laboratorio.

ANEXO II. Guía para simulación del resalto hidráulico

Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Clasificación de resalto hidráulico.</i>	17
<i>Tabla 2: Características del canal Rehbock.</i>	30
<i>Tabla 3: Registro de datos tomados en la práctica.</i>	32
<i>Tabla 4: Tabla de resultados de la práctica</i>	33
<i>Tabla 5: Datos para condiciones iniciales.</i>	45
<i>Tabla 6: Reporte de velocidades.</i>	54
<i>Tabla 7: Comparación de tirantes.</i>	55
<i>Tabla 8: Tirantes por líneas Vs. tirantes experimentales.</i>	58
<i>Tabla 9: Datos de entrada para Q_3</i>	59
<i>Tabla 10: Tirantes por líneas Vs. tirantes experimentales para Q_3.</i>	62
<i>Tabla 11: Resultados de Resalto hidráulico con Ideal Walls.</i>	66
<i>Tabla 12: Datos de entrada para Real Walls.</i>	68
<i>Tabla 13: Resultados Real Walls para Q_1.</i>	69
<i>Tabla 14: Resultados Real Walls para Q_2.</i>	70
<i>Tabla 15: Resultados Real Walls para Q_3.</i>	71
<i>Tabla 16: Resultados de resalto Real Walls.</i>	71
<i>Tabla 17: Comparación Cualitativa de resalto experimental Vs. resalto simulado.</i>	72
<i>Tabla 18: Análisis de resultados finales.</i>	73
<i>Tabla 19: Error relativo de valores de Y_1, Y_2, L,</i>	74
<i>Tabla 20: Datos para gráficos comparativos.</i>	77
<i>Tabla 21: ΔE experimental Vs. ΔE Real Walls.</i>	82

Índice de Figuras

<i>Figura 1: Esquema del proceso del resalto hidráulico.</i>	14
<i>Figura 2: Resalto hidráulico.</i>	15
<i>Figura 3: Resalto hidráulico en canal Rehbock.</i>	15
<i>Figura 4: Curva de energía específica para un resalto hidráulico.</i>	19
<i>Figura 5: Longitud del resalto hidráulico.</i>	20
<i>Figura 6: Visualización de la entrada y salida de presión en la tubería.</i>	29
<i>Figura 7: Esquema de canal Rehbock.</i>	30
<i>Figura 8: Medición de tirantes conjugados.</i>	32
<i>Figura 9: Pantalla inicial de trabajo.</i>	34
<i>Figura 10: Vista de plano alzado.</i>	35
<i>Figura 11: Croquizado del canal</i>	35
<i>Figura 12: Extruir saliente/base del canal</i>	36
<i>Figura 13: Extruir corte del canal.</i>	36
<i>Figura 14: Construcción de los apoyos del canal</i>	37
<i>Figura 15: Canal modelado.</i>	37
<i>Figura 16: Croquis del vertedero.</i>	38
<i>Figura 17: Detalles de la compuerta deslizante.</i>	38
<i>Figura 18: Marco fijo para compuerta.</i>	39
<i>Figura 19: Ensamblaje de canal Rehbock.</i>	39
<i>Figura 20: creación de Wizard.</i>	40
<i>Figura 21: Tipo de análisis a realizar.</i>	41
<i>Figura 22: Elección sistema de unidades.</i>	41
<i>Figura 23: Características del fluido.</i>	42
<i>Figura 24: Campo computacional.</i>	42
<i>Figura 25: Campo computacional ajustado.</i>	43
<i>Figura 26: Revisión de errores geométricos</i>	43
<i>Figura 27: Pared delgada como tapa.</i>	44
<i>Figura 28: Validación de geometría para simulación.</i>	45
<i>Figura 29: Condición inicial.</i>	46
<i>Figura 30: Pressure Opening.</i>	47

<i>Figura 31: Tipo de paredes del canal.</i>	48
<i>Figura 32: Iteración Flow Simulation (caudal 1).</i>	49
<i>Figura 33: Refinamiento del mallado.</i>	49
<i>Figura 34: Elección de paredes para Ideal Walls.</i>	50
<i>Figura 35: Velocidad a la salida de la compuerta.</i>	51
<i>Figura 36: Refinamiento de malla.</i>	51
<i>Figura 37: Cut Plots antes de compuerta.</i>	52
<i>Figura 38: Cut Plots después de la compuerta.</i>	52
<i>Figura 39: Gráfica de variación de velocidades.</i>	53
<i>Figura 40: Goals point, velocidades en el resalto.</i>	53
<i>Figura 41: Medición manual de tirantes conjugados.</i>	54
<i>Figura 42: Iteraciones para caudal 2.</i>	56
<i>Figura 43: Visualización de velocidad para un caudal 2.</i>	56
<i>Figura 44: Variación de velocidad en salida de compuerta.</i>	57
<i>Figura 45: Vista de perfil de velocidad.</i>	57
<i>Figura 46: Método de líneas para tirantes.</i>	58
<i>Figura 47: Variación de la velocidad global según iteraciones.</i>	59
<i>Figura 48: Altura compuerta fija.</i>	59
<i>Figura 49: Iteraciones para un Q_3.</i>	60
<i>Figura 50: Trayectoria del flujo para un Q_3.</i>	60
<i>Figura 51: Vistas laterales de velocidades.</i>	61
<i>Figura 52: Medición gráfica de tirantes conjugados para Q_3.</i>	62
<i>Figura 53: Gráfica de velocidad global según iteraciones.</i>	63
<i>Figura 54: Iteraciones de velocidades mínimas.</i>	63
<i>Figura 55: Gráfica de velocidades en lo ancho de la compuerta deslizante.</i>	64
<i>Figura 56: Mallado en plano medio del canal.</i>	65
<i>Figura 57: Condiciones de borde con rugosidad.</i>	67
<i>Figura 58: Paredes reales en canal.</i>	67
<i>Figura 59: Resultados con rugosidad.</i>	68
<i>Figura 60: Comprobación tirante (Y_2)</i>	69
<i>Figura 61: Tirante 1 para caudal 1.</i>	70

<i>Figura 62: Tirante 1 y 2 para Real Walls.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 63: Comparación (Y_1 Vs Y_2)</i>	<i>78</i>
<i>Figura 64: Tendencia de errores Ideal Walls.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 65: Tendencia de errores Real Walls.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 66: Gráfica errores relativos para Ideal Walls.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 67: Gráfica errores relativos Real Walls.</i>	<i>81</i>