



FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

“DISIPACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA MEDIANTE CUENCOS AMORTIGUADORES EN EL CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DEL LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, 2015”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Civil

Autor:

Terrones Ruiz, Nelson Yeltsin

Asesor:

Ing. Luis Vásquez Ramírez

Cajamarca – Perú

2015

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por el Bachiller **Nelson Yeltsin Terrones Ruiz**, denominada:

**“DISIPACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA MEDIANTE CUENCOS
AMORTIGUADORES EN EL CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DEL
LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, 2015”**

Ing. Luis Vázquez Ramírez
ASESOR

Dr. Ing. Orlando Aguilar Aliaga
JURADO
PRESIDENTE

M.sc. Ing. Albertico Bada Aldave
JURADO

Ing. Roger Cerquin Quispe
JURADO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Realidad problemática.....	1
1.2. Formulación del problema.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Limitaciones	4
1.5. Objetivos.....	4
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Bases Teóricas	6
2.2.1. <i>Resalto hidráulico</i>	7
2.2.2. <i>Ecuación general del resalto hidráulico</i>	9
2.2.3. <i>Ecuación del resalto hidráulico para diferentes formas de sección:</i>	14
2.2.4. <i>Formas de resalto en canales con pendiente casi horizontal</i>	17
2.2.5. <i>Estabilidad de resalto hidráulico</i>	19
2.2.6. <i>Disipación de energía hidráulica</i>	22
2.2.7. <i>Resalto hidráulico como dissipador de energía</i>	23
2.2.8. <i>Características del resalto hidráulico</i>	23

2.2.9.	<i>Colchón hidráulico:</i>	26
2.2.10.	<i>Colchón hidráulico con cuenco amortiguador.</i>	27
2.2.11.	<i>Cuencos amortiguadores de resalto hidráulico.</i>	28
2.2.12.	<i>Cuencos amortiguadores de la U.S.B.R.</i>	28
2.2.12.1.	<i>Cuenco Amortiguador Tipo I</i>	29
2.2.12.2.	<i>Cuenco Amortiguador Tipo II</i>	30
2.2.12.3.	<i>Cuenco Amortiguador Tipo III</i>	30
2.2.12.4.	<i>Cuenco Amortiguador Tipo IV</i>	31
2.2.13.	<i>Diseño de cuencos de amortiguamiento.</i>	32
2.2.13.1.	<i>Metodología general</i>	35
2.2.13.2.	<i>Diseño de cuenco tipo I ($1,7 < Fr < 2,5$).</i>	39
2.2.13.3.	<i>Diseño de cuenco tipo II ($Fr > 4,5$).</i>	40
2.2.13.4.	<i>Diseño de cuenco tipo III ($Fr > 4,5$).</i>	41
2.2.13.5.	<i>Diseño de cuenco tipo IV ($2,5 < Fr < 4,5$).</i>	43
2.3.	<i>Definición de términos básicos</i>	44
2.3.1.	<i>Canales.</i>	44
2.3.2.	<i>Flujo crítico, subcrítico y supercrítico.</i>	44
2.3.3.	<i>Factor cinético: número de Froude.</i>	44
2.3.4.	<i>Energía específica.</i>	44
2.3.5.	<i>Régimen crítico.</i>	45
2.3.6.	<i>Régimen subcrítico.</i>	45
2.3.7.	<i>Régimen supercrítico.</i>	45
2.3.8.	<i>Resalto hidráulico.</i>	45
2.3.9.	<i>Perdida de energía</i>	45
2.3.10.	<i>Rebosadero de sobreflujo.</i>	46
2.3.11.	<i>Cuenco amortiguador.</i>	46
CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS		47
3.1.	Formulación de la hipótesis	47
3.2.	Operacionalización de variables.....	47
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS		48
4.1.	Tipo de diseño de investigación.	48

4.2.	Material de estudio.....	48
4.2.1.	<i>Unidad de estudio.....</i>	48
4.2.2.	<i>Población.....</i>	48
4.2.3.	<i>Muestra.....</i>	48
4.3.	Técnicas, procedimientos e instrumentos.....	48
4.3.1.	<i>Para recolectar datos.....</i>	48
4.3.2.	<i>Para analizar información.....</i>	49
4.3.3.	<i>Procedimientos:.....</i>	50
4.3.3.1.	<i>Descripción del canal de pendiente variable.....</i>	50
4.3.3.2.	<i>Descripción de la medición con limnómetro:.....</i>	51
4.3.3.3.	<i>Ajuste experimental de la ecuación del caudal de descarga para rebosaderos de doble curvatura.....</i>	51
4.3.3.4.	<i>Ensayos en cuencos amortiguadores.....</i>	53
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....		57
5.1.	Ajuste experimental de la ecuación del caudal de descarga para rebosaderos de doble curvatura.....	57
5.2.	Características físicas para el cálculo de la disipación de energía hidráulica.....	58
5.2.1.	<i>Rebosadero sin cuenco amortiguador.....</i>	58
5.2.2.	<i>Rebosadero con cuenco amortiguador.....</i>	60
5.3.	Cálculo de la disipación de energía hidráulica.....	62
5.4.	Longitud de resalto hidráulico.....	65
5.5.	Relación entre la disipación de energía (ΔE) y el caudal (Q).....	67
5.6.	Relación entre la disipación de energía (ΔE) y el número de Froude (F_{r1}).....	68
5.7.	Relación entre la longitud de resalto hidráulico (L_r) y el caudal (Q).....	68
5.8.	Relación entre la longitud de resalto hidráulico (L_r) y la disipación de energía (ΔE).....	69
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN.....		73
6.1.	Ajuste experimental de la ecuación del caudal de descarga para rebosaderos de doble curvatura.....	73
6.2.	Características físicas para el cálculo de la disipación de energía hidráulica.....	73
6.3.	Cálculo de la disipación de energía hidráulica.....	74

6.4.	Longitud de resalto hidráulico.....	76
6.5.	Relación entre la disipación de energía (ΔE) y el caudal (Q).	76
6.6.	Relación entre la disipación de energía (ΔE) y el número de Froude (F_{r1}).....	77
6.7.	Relación entre la longitud de resalto hidráulico (Lr) y el caudal (Q).	77
6.8.	Relación entre la longitud de resalto hidráulico (Lr) y la disipación de energía (ΔE)	78
CONCLUSIONES		80
RECOMENDACIONES		82
BIBLIOGRAFÍA		83
ANEXOS.....		85
Anexo N° 01: Formato de diseño D2 – 01: Metodología general para el diseño de rebosadero y rápida.....		85
Anexo N° 02: Formato de diseño D2 – 02: Cálculo de tirantes de diseño		86
Anexo N° 03: Formato de diseño D2 – 03: Diseño de cuenco amortiguador tipo I		87
Anexo N° 04: Formato de diseño D2 – 04: Diseño de cuenco amortiguador tipo II		88
Anexo N° 05: Formato de diseño D2 – 05: Diseño de cuenco amortiguador tipo III		89
Anexo N° 06: Formato de diseño D2 – 06: Diseño de cuenco amortiguador tipo IV.....		91
Anexo N° 07: Datos experimentales (F2-00 al F2-30)		92
PANEL FOTOGRÁFICO.....		124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Clasificación de resalto hidráulico en canales rectangulares horizontales (Chow 1973)	19
Tabla N° 2: Variación de la longitud de resalto hidráulico en canal rectangular	24
Tabla N° 3: Coeficiente de caudal de una cresta de doble curvatura (cresta de doble curvatura con cara vertical).....	36
Tabla N° 4: Datos experimentales para el ajuste de la ecuación de caudal de descarga para rebosadero de doble curvatura.	57
Tabla N° 5: Características físicas principales del resalto para rebosadero sin cuenco amortiguador.....	59
Tabla N° 6: Características físicas principales del resalto para cuenco amortiguador tipo I	60
Tabla N° 7: Características físicas principales del resalto para cuenco amortiguador tipo II	61
Tabla N° 8: Características físicas principales del resalto para cuenco amortiguador tipo III	61
Tabla N° 9: Características físicas principales del resalto para cuenco amortiguador tipo IV	62
Tabla N° 10: Cálculo de la disipación de energía hidráulica en rebosadero sin cuenco amortiguador.....	62
Tabla N° 11: Cálculo de la disipación de energía hidráulica en cuenco amortiguador tipo I	63
Tabla N° 12: Cálculo de la disipación de energía hidráulica en cuenco amortiguador tipo II	63
Tabla N° 13: Cálculo de la disipación de energía hidráulica en cuenco amortiguador tipo III	63
Tabla N° 14: Cálculo de la disipación de energía hidráulica en cuenco amortiguador tipo IV	64
Tabla N° 15: Longitud del resalto hidráulico en rebosadero sin cuenco amortiguador	65
Tabla N° 16: Longitud del resalto hidráulico en cuenco amortiguador tipo I	65
Tabla N° 17: Longitud del resalto hidráulico en cuenco amortiguador tipo II	66
Tabla N° 18: Longitud del resalto hidráulico en cuenco amortiguador tipo III	66
Tabla N° 19: Longitud del resalto hidráulico en cuenco amortiguador tipo IV	66
Tabla N° 20: Longitud de diseño de los cuencos amortiguadores	67

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura N° 1: Resalto hidráulico.....	8
Figura N° 2: Elementos del resalto hidráulico.....	8
Figura N° 3: Volumen de control.	9
Figura N° 4: Curvas de fuerza específica y energía específica en el resalto hidráulico.	11
Figura N° 5: Sección transversal de un canal.....	12
Figura N° 6: Secciones del resalto hidráulico.	20
Figura N° 7: $E2 > En$ - Resalto barrido.....	21
Figura N° 8: $E2 = En$ - Resalto claro.....	21
Figura N° 9: $E2 < En$ - Resalto ahogado.....	22
Figura N° 10: Longitud de resalto en canales con pendiente según el U.S Bureau of Reclamación.....	25
Figura N° 11: Tirante conjugado necesario < tirante existente aguas abajo. No se forma resalto hidráulico.....	26
Figura N° 12: Esquema de un cuenco de amortiguación de resalto hidráulico	28
Figura N° 13: Cuenco de amortiguamiento Tipo I.....	29
Figura N° 14: Dimensiones del cuenco Tipo II	30
Figura N° 15: Dimensiones del cuenco Tipo III.....	31
Figura N° 16: Dimensiones del cuenco Tipo IV	32
Figura N° 17: Esquema de cuenco amortiguador.....	32
Figura N° 18: Detalles en los dientes deflectores	33
Figura N° 19: Detalles de los bloque de impacto.....	34
Figura N° 20: Detalles de un umbral terminal.....	34
Figura N° 21: Rebosadero con cresta de doble curvatura	37
Figura N° 22: Ecuación de energía para el cálculo de tirantes conjugados	38
Figura N° 23: Características de Diseño del Cuenco Amortiguador Tipo I.....	40
Figura N° 24: Características de Diseño del Cuenco Amortiguador Tipo II.....	41
Figura N° 25: Características de Diseño del Cuenco Amortiguador Tipo III.....	42
Figura N° 26: Características de Diseño del Cuenco Amortiguador Tipo IV	43
Gráfico N° 1: Ajuste experimental - relación caudal unitario (q) vs carga hidráulica (H) ..	58
Gráfico N° 2: Relación entre la disipación de energía hidráulica y el caudal por tipo de cuenco amortiguador	67
Gráfico N° 3: Comportamiento de la disipación de energía por tipo de cuenco en función al número de Froude	68

Gráfico N° 4: Comportamiento de la longitud de resalto por tipo de cuenco en función del caudal	69
Gráfico N° 5: Comportamiento de la longitud de resalto y de la disipación de energía para el rebosadero sin cuenco amortiguador	70
Gráfico N° 6: Comportamiento de la longitud de resalto y de la disipación de energía para el cuenco tipo I.....	70
Gráfico N° 7: Comportamiento de la longitud de resalto y de la disipación de energía para el cuenco tipo II.....	71
Gráfico N° 8: Comportamiento de la longitud de resalto y de la disipación de energía para el cuenco tipo III.....	71
Gráfico N° 9: Comportamiento de la longitud de resalto y de la disipación de energía para el cuenco tipo IV.....	72

RESUMEN

La presente investigación está enfocada en determinar de manera experimental la disipación de energía hidráulica para diferentes tipos de cuencos amortiguadores. Para tal propósito, se desarrolló en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada del Norte una serie de ensayos bajo seis condiciones de flujo, de manera que, se obtuvo seis datos experimentales por cuenco. Las estructuras en estudio son los cuencos tipo I, II, III y IV según la clasificación de la U.S Bureau of Reclamation; cuencos que disipan la energía principalmente por la formación del resalto hidráulico y en segunda medida por la presencia de dados deflectores, bloques de impacto y umbrales de salida. Cada cuenco ha sido diseñado y dimensionado de acuerdo a las características del canal de pendiente variable, realizando un grupo adicional de ensayos bajo las mismas seis condiciones de flujo para la estructura de embalse (rebosadero de sobreflujo de doble curvatura), sin cuenco amortiguador; este grupo de ensayos es utilizado para evaluar la energía específica inicial. El análisis experimental permitirá evaluar la disipación de energía y relacionar su comportamiento con otras características físicas, como son el número de Froude " F_r ", el caudal " Q " y la longitud del resalto.

Como parte del proceso experimental, se realizó siete medidas de control de flujo con el propósito de ajustar experimentalmente la ecuación del caudal de descarga para rebosaderos de doble curvatura, $q = 3,1587(H)^{1,6539}$, ecuación de ajuste para el cálculo de caudales unitarios " q " en función de la carga hidráulica " H ". Cada característica física medida directamente en laboratorio (en el caso de tirantes conjugados), o indirectamente mediante fórmulas (en el caso de velocidades, caudales y número de Froude), fue utilizada para determinar la disipación de energía y está establecida para cada tipo de cuenco en estudio y para cada una de las seis condiciones de flujo. Estos datos son presentados en las tablas N° 5, 6, 7, 8 y 9; del presente informe. Del mismo modo, se presentan en las tablas N° 10, 11, 12, 13 y 14 la disipación de energía hidráulica en %, para cada tipo de cuenco y para cada condición de flujo; llegando a un porcentaje máximo de disipación de 61,70% (correspondiente al cuenco amortiguador tipo IV y a un caudal " Q " de 0,00562 m³/s), y un porcentaje mínimo de 31,18% (correspondiente al cuenco amortiguador tipo II y a un caudal " Q " de 0,00978 m³/s). Otras características físicas importantes en la investigación, pero que no forman parte del cálculo de la disipación de energía, son la longitud y el tipo de resalto hidráulico, datos medidos por observación directa en el laboratorio y que son presentados en las tablas N° 15, 16, 17, 18 y 19; llegando a una longitud máxima de resalto de 62 cm con un resalto claro (correspondiente al rebosadero sin cuenco de amortiguamiento) y una longitud mínima de 15 cm con un resalto ahogado (correspondiente al cuenco tipo III).

ABSTRACT

This investigation is focused on determining experimentally hydraulic power dissipation for different types of dampers basins. For this purpose, was developed in the laboratory of hydraulics Private University of North a series of tests under six conditions of flow, so that, six experimental data were obtained for each basin. The structures under study are basins type I, II, III and IV as classified by the U.S Bureau of Reclamation; basins dissipate energy mainly by the formation of the hydraulic jump and second measured by the presence of dice baffles, blocks impact and output thresholds. Each basin has been designed and sized according to the channel characteristics of variable slope, making an additional set of tests under the same six flow conditions for the structure of dam (overflow weir double curvature), without damper basin; this group of trials it's used to evaluate initial specific energy. The experimental analysis will evaluate the energy dissipation and relate their behavior with other physical characteristics, such as the Froude number " F_r ", the flow " Q " and the length of the hydraulic jump.

As part of the experimental process, seven flow control measures were performed with the purpose of experimentally adjusting the flow equation discharge for double curvature weirs, $q = 3,1587 (H)^{1,6539}$, adjustment equation for the calculation of unit flows " q " as a function of the hydraulic load " H ". Each physical property directly measured in the laboratory (in the case of straps conjugates), or indirectly by formulas (in the case of speeds, flows and Froude number), was used to determine the energy dissipation and is set for each type of basin under study and for each of the six flow conditions. These data are presented in tables N° 5, 6, 7, 8 and 9 of this report. Similarly, are presented in tables N° 10, 11, 12, 13 and 14 dissipation of hydraulic energy in %, for each type of basin and each flow condition; reaching a maximum percentage of dissipation 61,70% (corresponding to the stilling type IV and flow " Q " of 0,00562 m³/s), and a minimum percentage of 31,18% (corresponding to the stilling type II and flow " Q " of 0,00978 m³/s). Other important physical characteristics in research, but not part of the calculation of energy dissipation, are the length and type of hydraulic jump, data measured by direct observation in the laboratory and are presented in Tables N° 15, 16, 17, 18 and 19; reaching a maximum length of projection of 62 cm with a hydraulic jump clear (corresponding to the weir without basin buffer) and a minimum length of 15 cm with a drowned hydraulic jump (corresponding to type III basin).

NOTA DE ACCESO

No se puede acceder al texto completo pues contiene datos confidenciales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abarca Huamán, L. E. (diciembre de 2013). *DISEÑO HIDRÁULICO DEL CANAL DE DISIPACIÓN QUE CONECTA UN CONDUCTO CON FLUJO SUPERCRÍTICO CON UN AFORADOR PARSHALL, EMPLEANDO UN MODELO A ESCALA*. Tesis de Licenciatura. PUCP. Recuperado el 26 de Agosto de 2015, de www.tesis.pucp.edu.pe:
Disponible:<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/5294>
2. Cadavid R., J. H. (2006). *HIDRÁULICA DE CANALES FUNDAMENTOS*. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
3. Castro Zeballos, O. F. (s.f). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS*. Recuperado el 24 de Agosto de 2015, de es.scribd.com: Disponible: <https://es.scribd.com/doc/81688365/DISENO-DE-ESTRUCTURAS-HIDRAULICAS>
4. Chanson, H. (2004). *HIDRÁULICA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS*. BOGOTA: MCGRAW HILL.
5. Chow, V. T. (1994). *HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS*. Bogotá: McGraw Hill.
6. Coutinho de Lencastre, A., & Robles García, C. (1998). *Manual de Ingeniería Hidráulica* (Versión española ed.). España: Universidad Publica de Navarra.
7. Díez-Cascón Sagrado, J., & Bueno Hernández, F. (2001). *Ingeniería de Presas: presas de fábricas*. Cantabria: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.
8. Herrera Paz, A. A. (2004). *INVESTIGACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA DEL SEGUNDO ALIVIADERO DE EXCEDENCIA-PRESA SABANA YEGUA*. Recuperado el 18 de Octubre de 2016, de <https://pirhua.udep.edu.pe>: Disponible: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1196/ICI_127.pdf?sequence=1
9. Manrique Andrade, V. A. (2013). *COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 25 de Marzo de 2015, de www.bdigital.unal.edu.co: Disponible: <http://www.bdigital.unal.edu.co/46283/1/300067.2013.pdf>
10. Mansen Valderrama, A. (s.f.). *DISEÑO DE BOCATOMAS: apuntes de clase*. Recuperado el 24 de Agosto de 2015, de <http://civilgeeks.com/>: Disponible: <http://civilgeeks.com/2011/11/30/diseo-de-bocatomas-apuntes-de-clase/>

11. Martínez Marín, E., Batanero Akerman, P., Martínez Gonzales, I., Martínez Olmos, E., & Gonzales Ordóñez, E. (2007). *DISEÑO DE PEQUEÑAS PRESAS. Traducción de la 3° edición Americana* (3er ed.). Madrid: Bellisco Ediciones.
12. Mery M., H. (2013). *HIDRÁULICA APLICADA AL DISEÑO DE OBRAS*. Santiago de Chile: RIL. editores.
13. Novak, R., Moffat, A., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2001). *ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS* (Traducción de la segunda edición en ingles de HYDRAULIC STRUCTURES ed.). Bogotá: McGRAW HILL.
14. *OBRAS HIDRÁULICAS I*. (2008). Recuperado el 24 de Agosto de 2015, de www.civilgeeks.com: Disponible: <http://civilgeeks.com/2012/08/23/descargar-libro-de-obras-hidraulicas-i/>
15. Ortega Novillo, B. F. (Mayo de 2012). *ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA A LA SALIDA DEL TÚNEL DE DESVÍO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOPLADORA. Tesis de maestría. Escuela Politécnica Nacional*. Recuperado el 25 de Marzo de 2015, de bibdigital.epn.edu.ec:
Disponible:<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7707/1/CD-4353.pdf>
16. Rodríguez Ruiz, P. (Agosto de 2008). *HIDRÁULICA II*. Recuperado el 24 de Agosto de 2015, de carlosquispeanccasi.files.wordpress.com: Disponible: https://carlosquispeanccasi.files.wordpress.com/2011/12/hidraulica_ruiz.pdf
17. Sotelo Ávila, G. (2002). *HIDRÁULICA DE CANALES*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
18. Villamarin Paredes, S. C. (2013). *MANUAL BÁSICO DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA. Tesis de licenciatura. Escuela Politécnica del Ejercito*. Recuperado el 24 de Agosto de 2015, de repositorio.espe.edu.ec: Disponible: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6181/1/T-ESPE-040211.pdf>
19. Villón Béjar, M. (2000). *Hidráulica de canales* (4ta ed.). Costa Rica: EDITORIAL TECNOLOGÍA DE COSTA RICA.