



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

VÍCTOR ALFONSO MANRIQUE ANDRADE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica
Bogotá D.C, Colombia, Sur América

2013

COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

VÍCTOR ALFONSO MANRIQUE ANDRADE

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Director:

CARLOS EDUARDO CUBILLOS PEÑA, I.C., M.Sc.

Línea de Investigación:

INGENIERÍA HIDRÁULICA

Grupo de Investigación:

GIREH-GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia, Sur América

2013

A Dios que ha hecho de mi todo lo que soy, a mis padres Luis Manrique y Yaneth Andrade, quienes con su esmero y dedicación, me han llevado por el mejor camino posible: “El de la Educación”.

A un ángel muy especial en el cielo.

Para las personas creyentes, Dios está al principio. Para los científicos está al final de todas sus reflexiones.

Max Planck (Físico Alemán, 1858-1947)

AGRADECIMIENTOS

Son innumerables las personas a quienes agradezco la ayuda prestada en la ejecución del presente trabajo, entre ellos:

Al Profesor Carlos Eduardo Cubillos Peña, quien con paciencia y sabiduría asesoró este trabajo de grado.

Al grupo de investigación en recursos hídricos de la Universidad Nacional de Colombia, entre ellos a los siguientes colegas: Julio Olave, Inés Sánchez, Camilo Bernal, Sebastián Hernández, Eduardo León y muy especialmente a la Ingeniera y próxima Teniente Coronel de la Fuerza Aérea Colombiana Adriana Bermúdez, quien respeto y admiro no solo profesional e intelectualmente sino también como ser humano, y quien me ha brindado su apoyo, sincera amistad y sus siempre acertados consejos.

A la Empresa Gómez Zuluaga Villegas & Cia. Ltda, y entre ellos a sus socios Germán Villegas Jaramillo y Elkim Zuluaga, por todo el apoyo y confianza que me han brindado, y de quienes he aprendido gran parte de lo que se, sobre el arte de construir y de la gerencia proyectos.

A La Fundación Juan Pablo Gutiérrez Cáceres por el apoyo económico que me proporcionó durante la maestría, mediante su programa de becas.

A Colciencias por el apoyo económico que me aportó para el montaje de las instalaciones de laboratorio, mediante su programa de Jóvenes Investigadores e Innovadores año 2010.

A mi hermana Yiby Manrique Andrade, a mi sobrina Sarah Camila Matamoros, a mis primos Mauricio y Camilo Andrade, a mis amigos y compañeros de trabajo Mauricio Martínez y Andrés Pardo, por su apoyo incondicional.

A todos ellos mi más sincero agradecimiento.

RESUMEN

La presente investigación busca describir de manera teórica y experimental, el comportamiento del resalto hidráulico en canales con pendiente positiva y sección transversal rectangular. Con el fin de lograr lo anterior, se ha realizado una serie de ensayos en laboratorio con el propósito de tomar datos para diferentes condiciones de flujo aguas arriba (número de Froude) y aguas abajo del resalto (profundidad de flujo aguas abajo), para inclinaciones de canal de $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ$ y 11° , y para los resaltos conocidos en la literatura como tipo A, B, C y D-E. Consecuentemente, a partir de la experimentación se han obtenido expresiones para la relación longitud de remolino-profundidad inicial de resalto hidráulico (L/d_1) y para la función gamma (Γ) referida a la inclinación del canal, las cuales han sido incorporadas en las expresiones matemáticas deducidas para las relaciones adimensionales de los parámetros descriptivos tradicionales del resalto hidráulico: d_2/d_1 , d_t/d_1 , h/d_1 , E_2/E_1 , y_1/E_1 , y_2/E_1 , h/E_1 y $\Delta E/E_1$. Este trabajo ha incluido una validación experimental de las relaciones matemáticas propuestas para diferentes condiciones de flujo e inclinaciones de canal de $2^\circ, 5^\circ, 7^\circ$ y 10° , cuyos resultados sugieren suficiente bondad de las expresiones propuestas.

Palabras clave: Resalto hidráulico, número de Froude, longitud de remolino turbulento, altura del resalto, eficiencia del resalto, profundidades conjugadas, profundidades inicial y secante, canal con pendiente positiva.

ABSTRACT

This research seeks to describe theoretically and experimentally the behavior of the hydraulic jump in channels with positive slopes and rectangular cross section. In order to achieve this, in the laboratory has been performed an experiment in order to collect information for various flow conditions upstream (Froude number) and downstream of the hydraulic jump (downstream flow depth) to slopes of $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ$ y 11° , and for hydraulic jumps known as type A, B, C and D-E. Consequently, from the experimentation were obtained expressions for the ratio length swirl – initial depth of the hydraulic jump (L/d_1) and for the gamma function (Γ), relative to the slope of the channel, which have been incorporated into the mathematical expressions deduced for dimensionless ratios of the traditional descriptive parameters of the hydraulic jump: d_2/d_1 , d_t/d_1 , h/d_1 , E_2/E_1 , y_1/E_1 , y_2/E_1 , h/E_1 y $\Delta E/E_1$. This research has included an experimental validation of the proposed mathematical relationships for different flow conditions and inclinations channel of $2^\circ, 5^\circ, 7^\circ$ y 10° , the results suggest sufficient goodness of the proposed expressions.

Keywords: hydraulic jump, Froude number, turbulent eddy length, hydraulic jump height, conjugate depths, initial and sequent depths, channel with positive slope.

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN	IX
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE GRÁFICAS	XVII
LISTA DE TABLAS	XX
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XXI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 ALCANCE.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4 METODOLOGÍA.....	2
1.4.1 Revisión bibliográfica	3
1.4.2 Deducción de relaciones matemáticas	3
1.4.3 Ajuste experimental de las relaciones matemáticas propuestas.....	3
1.4.4 Verificación experimental	3
1.5 Organización del documento	3
2. ESTADO DEL ARTE ACERCA DE LOS RESALTOS HIDRÁULICOS EN CANALES CON SECCIÓN RECTANGULAR.....	5
2.1 HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS.....	5
2.1.1 Número de Froude (F).....	7
2.1.2 Energía del flujo en canales abiertos.....	8
2.1.3 Momentum del flujo en canales abiertos	13
2.2 RESALTO HIDRÁULICO	18
2.2.1 Resalto hidráulico en canales horizontales con sección rectangular ...	19
2.2.2 Resalto hidráulico en canales con pendiente y sección rectangular	28
3. DEDUCCIÓN DE RELACIONES MATEMÁTICAS PARA RESALTOS HIDRÁULICOS EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR.....	37
3.1 DEDUCCIÓN DE RELACIONES MATEMÁTICAS PARA EL RESALTO TIPO A	37
3.1.1 Relación profundidad inicial de flujo - profundidad final de flujo del resalto (d_2/d_1) (profundidades conjugadas).....	38

3.1.2	Relación longitud de remolino turbulento - profundidad inicial de flujo del resalto (L/d_1).....	42
	Donde m y c son contantes ajustadas experimentalmente.....	42
3.1.3	Relación altura - energía inicial de flujo del resalto (h/E_1)	42
3.1.4	Disipación de energía del resalto (ΔE)	44
3.1.5	Relación energía final de flujo - energía inicial de flujo del resalto (E_2/E_1) (Eficiencia del resalto)	47
3.1.6	Relación profundidad inicial de flujo - energía inicial de flujo del resalto (y_1/E_1)	49
3.1.7	Relación profundidad final de flujo - energía inicial de flujo del resalto (y_2/E_1)	50
3.1.8	Relación altura - profundidad inicial de flujo del resalto (h/y_1)	52
3.1.9	Relación pérdida de energía - energía inicial de flujo del resalto ($\Delta E/E_1$)	52
3.2	DEDUCCIÓN DE RELACIONES MATEMÁTICAS PARA LOS RESALTOS TIPO B, C Y D-E.....	53
3.2.1	Relación profundidad inicial de flujo - profundidad final de flujo del resalto (d_2/d_1) (profundidades conjugadas)	56
3.2.2	Relación longitud de remolino turbulento - profundidad inicial de flujo del resalto (L/d_1)	62
3.2.3	Relación altura - energía inicial de flujo del resalto (h/E_1)	62
3.2.4	Disipación de energía del resalto (ΔE)	64
3.2.5	Relación energía final de flujo - energía inicial de flujo del Resalto (E_2/E_1) (Eficiencia del resalto).....	67
3.2.6	Relación profundidad Inicial de flujo - energía inicial de flujo del resalto (y_1/E_1)	70
3.2.7	Relación final profundidad de Flujo - energía inicial de flujo del resalto (y_2/E_1)	72
3.2.8	Relación altura- profundidad inicial de flujo del resalto (h/y_1)	74
3.2.9	Relación pérdida de energía - energía inicial de flujo del resalto ($\Delta E/E_1$)	74
3.3	RESUMEN RELACIONES MATEMÁTICAS DEDUCIDAS PARA LOS RESALTOS TIPO A, B, C Y D-E.....	75
4.	DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DESCRIPTIVOS DE LOS RESALTOS HIDRÁULICOS EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR	77
4.1	INSTALACIÓN DE LABORATORIO	77
4.1.1	Adecuación de las instalaciones de laboratorio.....	77
4.1.2	Descripción general de las instalaciones de laboratorio	83
4.1.3	Metodología de la Experimentación	84
4.1.4	Recolección de datos.....	87
4.1.5	Calibración de instrumentos de medición.....	89
4.2	AJUSTE EXPERIMENTAL DE LAS RELACIONES MATEMÁTICAS PARA LOS RESALTOS HIDRÁULICOS CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR	91
4.2.1	Longitud de remolino turbulento - profundidad inicial de flujo del resalto (L/d_1)	91
4.2.2	Relación profundidad final de flujo - profundidad inicial de flujo del resalto (d_2/d_1) (profundidades conjugadas)	97
4.2.3	Relación profundidad de flujo aguas abajo - profundidad de flujo Inicial del Resalto (d_1/d_1).....	110
4.2.4	Relación altura - profundidad inicial de flujo del resalto (h/y_1)	112

4.2.5	Relación energía final del flujo – energía inicial del flujo del resalto (E_2/E_1)	117
4.2.6	Relación altura – energía del flujo inicial del resalto (h/E_1)	122
4.2.7	Relación profundidad inicial de flujo – energía de flujo inicial del Resalto (y_1/E_1)	126
4.2.8	Relación profundidad final de flujo – energía inicial de flujo del resalto (y_2/E_1)	131
4.2.9	Relación pérdida de energía –energía inicial del resalto ($\Delta E/E_1$)	136
4.3	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS RELACIONES MATEMÁTICAS PARA LOS RESALTOS HIDRÁULICOS CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR	141
4.3.1	Relación longitud de remolino turbulento - profundidad Inicial de Flujo del resalto (L/d_1)	141
4.3.2	Relación profundidad final de Flujo - profundidad inicial de flujo del resalto (d_2/d_1) (profundidades conjugadas)	144
4.3.3	Relación profundidad de flujo aguas abajo - profundidad inicial de flujo del resalto (d_1/d_1)	148
4.3.4	Relación altura - profundidad inicial de flujo del resalto (h/y_1)	149
4.3.5	Relación energía final del flujo – energía inicial del flujo del resalto (E_2/E_1) (Eficiencia del resalto)	151
4.3.6	Relación altura – energía inicial de flujo del resalto (h/E_1)	153
4.3.7	Relación profundidad inicial de flujo –energía Inicial de flujo del resalto (y_1/E_1)	155
4.3.8	Relación profundidad final de flujo –energía inicial de flujo del resalto (y_2/E_1)	157
4.3.9	Relación Pérdida de energía –energía inicial del resalto ($\Delta E/E_1$)	159
4.4	RELACIONES MATEMÁTICAS PROPUESTAS PARA LOS RESALTOS HIDRÁULICOS CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR	161
4.5	DIAGRAMA DEL PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN APRIORI DEL TIPO DE RESALTO HIDRÁULICO CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR	166
4.6	EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LAS RELACIONES MATEMÁTICAS PROPUESTAS	167
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	175
6.	BIBLIOGRAFÍA	179
A.	ANEXO: INSTALACIONES DE LABORATORIO	181
B.	ANEXO: COSTOS DE LA INVESTIGACIÓN	183
C.	ANEXO: DATOS EXPERIMENTALES VERTEDERO TRIANGULAR DE CRESTA DELGADA	185
D.	ANEXO:	187

CURVA DE CALIBRACIÓN CAUDAL Vs ALTURA DE LAMINA DE AGUA SOBRE CRESTA VERTEDERO TRIANGULAR.....	187
E. ANEXO:.....	189
DATOS EXPERIMENTALES RESALTOS HIDRÁULICOS EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR.....	189
F. ANEXO:.....	191
CURVAS AJUSTADAS RESALTOS HIDRÁULICOS EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR	191

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2-1: Sección vertical y sección transversal de un canal	6
Figura 2-2: Elementos geométricos de la sección de un canal.	7
Figura 2-3: Energía de un flujo gradualmente variado en un canal abierto (Adaptado de Ven Te Chow, 1959)	8
Figura 2-4: Curva de Energía específica en una sección del canal (Tomada de Ven Te Chow, 1959).....	10
Figura 2-5: Diagrama de fuerzas volumen de control sección 1 y 2 (Adaptado de Ven Te Chow, 1959).....	14
Figura 2-6: Curva de fuerza específica en la sección de un canal (Tomada de Ven Te Chow, 1959).....	18
Figura 2-7: Resalto hidráulico (Adaptado de Sotelo, 2002).....	19
Figura 2-8: Resalto ondulante (Tomada de Ven Te Chow, 1959).	19
Figura 2-9: Resalto débil (Tomada de Ven Te Chow, 1959).	20
Figura 2-10: Resalto ondulante (Tomada de Ven Te Chow, 1959).	20
Figura 2-11: Resalto estable (Tomada de Ven Te Chow, 1959).	20
Figura 2-12: Resalto fuerte (Tomada de Ven Te Chow, 1959).....	21
Figura 2-13: Curvas características en canales sin pendiente con sección rectangular (Tomada de Ven Te Chow, 1959).....	22
Figura 2-14: Longitud del resalto hidráulico (Adaptada de Sotelo Ávila, 2002).	23
Figura 2-15: Longitud de resalto en canales sin pendiente con sección rectangular (Tomada de Ven Te Chow, 1983).....	23
Figura 2-16: Longitud de remolino y de resalto hidráulico en canales sin pendiente con sección rectangular (Tomada de Sotelo Ávila, 2002).....	27
Figura 2-17: Perfiles superficiales adimensionales de resaltos hidráulicos en canales sin pendiente con sección rectangular (Tomada de Ven Te Chow, 1959).....	28
Figura 2-18: Resalto hidráulico en canal de pendiente mixta.....	29
Figura 2-19: Resalto hidráulico tipo A.....	29
Figura 2-20: Resalto hidráulico tipo B.....	30
Figura 2-21: Resalto hidráulico tipo C.....	30
Figura 2-22: Resalto Hidráulico tipo D.	31
Figura 2-23: Resalto hidráulico tipo E.....	31
Figura 2-24: Resalto hidráulico tipo F.....	32
Figura 2-25: Solución para resaltos tipo B (Peterka, 1963 y Rajaratnam, 1967) (tomada de French, 1985).....	34

Figura 2-26: Longitud del salto hidráulico en canales con pendiente tipos B, C y D y con sección rectangular (Peterka, 1963) (tomada de French, 1985).	35
Figura 3-1: Diagrama de fuerzas resalto hidráulico tipo A	38
Figura 3-2: Diagrama de fuerzas resalto hidraulico tipo B.	54
Figura 3-3: Diagrama de fuerzas resalto hidraulico tipo C.	55
Figura 3-4: Diagrama de fuerzas resalto hidráulico tipo D-E.	55
Figura 4-1: Sistema de basculamiento del canal de pendiente variable.	78
Figura 4-2: Compuerta tipo guillotina para control del flujo aguas abajo del canal.	78
Figura 4-3: Estructura de salida aguas abajo del canal.	79
Figura 4-4: Regletas de medición inclinación del canal.	79
Figura 4-5: Manguera de alimentación de agua al canal.	80
Figura 4-6: Tablero de piezómetros.	80
Figura 4-7: Compuerta de persiana para control de flujo aguas abajo del canal.	81
Figura 4-8: Fondo en acrílico para creación de pendiente horizontal.	81
Figura 4-9: Ubicación y marcación de piezómetros	82
Figura 4-10: Cuadrícula en paredes del canal.	82
Figura 4-11: Instalaciones de laboratorio.	84
Figura 4-12: Resalto hidráulico tipo A.	85
Figura 4-13. Resalto hidráulico tipo B.	85
Figura 4-14: Resalto hidráulico tipo C.	86
Figura 4-15. Resalto hidráulico tipo D-E.	86
Figura 4-16 : Medidor de Aguja	87
Figura 4-17: Cinta Métrica adosada al canal.	87
Figura 4-18: Regleta para medición de la inclinación del canal.	88
Figura 4-19: Vertedero triangular de cresta delgada.	88
Figura 4-20. Diagrama del procedimiento para la determinación del tipo de resalto hidráulico (adaptada de Frech, 1985).	166
Figura 4-21. Diagrama ejemplo de aplicación	167

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 4-1: Ajuste de coeficiente de descarga vertedero triangular	90
Gráfica 4-2: Curva de calibración del vertedero triangular.	91
Gráfica 4-3: Ajuste experimental relación L/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.	93
Gráfica 4-4: Ajuste experimental relación L/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.	94
Gráfica 4-5: Ajuste experimental relación L/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.	94
Gráfica 4-6: Ajuste experimental relación L/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.	95
Gráfica 4-7. Comparación relación L/d_1 Vs F_1 para el Resalto tipo A contra otros autores.	96
Gráfica 4-8. Comparación relación L/d_1 Vs F_1 para los resaltos tipo A,B,C y D-E.	97
Gráfica 4-9: Ajuste experimental relación Γ Vs θ para el Resalto Tipo B.	99
Gráfica 4-10: Ajuste experimental relación Γ Vs θ para el Resalto Tipo C.	99
Gráfica 4-11: Ajuste experimental relación Γ Vs θ para el Resalto Tipo D-E.	100
Gráfica 4-12: Comparación relación Γ Vs θ para los resaltos tipo A,B,C y D-E	100
Gráfica 4-13: Ajuste experimental relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.	103
Gráfica 4-14: Ajuste experimental relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.	103
Gráfica 4-15: Ajuste experimental relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.	104
Gráfica 4-16: Ajuste experimental relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.	104
Gráfica 4-17: Comparación relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo C contra la obtenida por Kindsvater (1944).	105
Gráfica 4-18: Comparación relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto Tipo D-E contra la obtenida por Kindsvater (1944).	106
Gráfica 4-19: Comparación relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E contra la obtenida por Kindsvater (1944).	107
Gráfica 4-20. Comparación relación d_2/d_1 Vs F_1 para los resaltos tipo A,B,C y D-E	107
Gráfica 4-21: Relación k Vs F_1 para el resalto tipo B.	108
Gráfica 4-22: Relación k Vs F_1 para el resalto tipo C.	109
Gráfica 4-23. Relación k Vs F_1 para el resalto tipo D-E.	109
Gráfica 4-24: Comparación relación k Vs F_1 para los resaltos tipo A,B,C y D-E.	110

Gráfica 4-25: Ajuste experimental relación Γ Vs Θ para el resalto tipo D-E.	111
Gráfica 4-26:Ajuste experimental relación $dt/d1$ Vs $F1$ para el resalto tipo D-E.....	112
Gráfica 4-27:Ajuste experimental relación h/y_1 Vs $F1$ para el resalto tipo A.	114
Gráfica 4-28: Ajuste experimental relación h/y_1 Vs $F1$ para el resalto tipo B.	115
Gráfica 4-29:Ajuste experimental Relación h/y_1 Vs $F1$ para el Resalto Tipo C.	115
Gráfica 4-30: Ajuste experimental relación h/y_1 Vs $F1$ para el resalto tipo D-E.....	116
Gráfica 4-31: Comparación relación h/y_1 Vs $F1$ para los resaltos tipo A,B,C y D-E	116
Gráfica 4-32: Ajuste Experimental relación E_2/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo A.....	119
Gráfica 4-33:Ajuste experimental relación E_2/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo B.	120
Gráfica 4-34: Ajuste experimental relación E_2/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo B.	120
Gráfica 4-35: Ajuste experimental relación E_2/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo D-E.	121
Gráfica 4-36: Comparación relación E_2/E_1 Vs $F1$ para los resaltos tipo A,B,C y D-E	121
Gráfica 4-37: Ajuste experimental relación h/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo A.....	124
Gráfica 4-38: Ajuste experimental relación h/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo B.....	124
Gráfica 4-39: Ajuste experimental relación h/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo C.....	125
Gráfica 4-40 : Ajuste experimental relación h/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo D-E.	125
Gráfica 4-41: Comparación relación h/E_1 Vs $F1$ para los resaltos tipo A,B,C y D-E.....	126
Gráfica 4-42: Ajuste experimental y_1/E_1 Vs $F1$ para el Resalto Tipo A.....	128
Gráfica 4-43: Ajuste experimental relación y_1/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo B.....	129
Gráfica 4-44: Ajuste experimental relación y_1/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo C.....	129
Gráfica 4-45:Ajuste experimental relación y_1/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo D-E.	130
Gráfica 4-46:Comparación relación y_1/E_1 Vs $F1$ para los resaltos tipo A,B,C y D-E	131
Gráfica 4-47: Ajuste experimental relación y_2/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo A.....	133
Gráfica 4-48 :Ajuste experimental relación y_2/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo B.....	134
Gráfica 4-49 :Ajuste experimental relación y_2/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo C.....	134
Gráfica 4-50: Ajuste experimental Relación y_2/E_1 Vs $F1$ para el resalto tipo D-E.....	135
Gráfica 4-51:Comparación relación y_2/E_1 Vs $F1$ para los resaltos tipo A,B,C y D-E	135
Gráfica 4-52: Ajuste experimental Relación $\Delta E/E_1$ Vs $F1$ para el resalto tipo A.	138
Gráfica 4-53: Ajuste experimental relación $\Delta E/E_1$ Vs $F1$ para el resalto tipo B	139
Gráfica 4-54.:Ajuste experimental relación $\Delta E/E_1$ Vs $F1$ para el resalto tipo C.	139
Gráfica 4-55 : Ajuste experimental relación $\Delta E/E_1$ Vs $F1$ para el resalto tipo D-E.....	140
Gráfica 4-56: Comparación relación $\Delta E/E_1$ Vs $F1$ para los resaltos tipo A,B,C y D-E	140
Gráfica 4-57: Validación experimental relación $L/d1$ Vs $F1$ para el resalto tipo A.	142
Gráfica 4-58: Validación experimental Relación $L/d1$ Vs $F1$ para el resalto tipo B.....	142
Gráfica 4-59 : Validación experimental Relación $L/d1$ Vs $F1$ para el resalto tipo C.	143
Gráfica 4-60: Validación experimental relación $L/d1$ Vs $F1$ para el resalto tipo D-E.	143
Gráfica 4-61: Validación experimental relación d_2/d_1 Vs $F1$ para el resalto tipo A.	144
Gráfica 4-62:validación experimental relación d_2/d_1 Vs $F1$ para el resalto tipo B.	145
Gráfica 4-63 : Validación experimental relación d_2/d_1 Vs $F1$ para el resalto tipo C.	145
Gráfica 4-64: Ajuste experimental relación d_2/d_1 Vs $F1$ para el resalto tipo D-E.	146
Gráfica 4-65: Validación experimental relación Γ Vs Θ para el resalto tipo B.....	146
Gráfica 4-66: Validación experimental relación Γ Vs Θ para el resalto tipo C.....	147
Gráfica 4-67: Ajuste experimental relación Γ Vs Θ para el resalto tipo D-E.	147
Gráfica 4-68 : Ajuste experimental relación $dt/d1$ Vs $F1$ para el resalto tipo D-E.....	148

Gráfica 4-69: Validación experimental relación Γ Vs θ para el resalto tipo D-E.	148
Gráfica 4-70: Validación experimental relación h/y_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.	149
Gráfica 4-71: Validación experimental relación h/y_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.	149
Gráfica 4-72: Ajuste experimental Relación h/y_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.	150
Gráfica 4-73: Validación experimental relación h/y_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.....	150
Gráfica 4-74: Validación Experimental relación E_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.....	151
Gráfica 4-75: Ajuste experimental relación E_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.....	151
Gráfica 4-76: Validación experimental relación E_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.....	152
Gráfica 4-77: validación experimental relación E_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.....	152
Gráfica 4-78: Ajuste experimental relación h/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.	153
Gráfica 4-79: Validación experimental relación h/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.....	153
Gráfica 4-80: Validación experimental relación h/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.....	154
Gráfica 4-81: Validación experimental relación h/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.	154
Gráfica 4-82: Validación experimental y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.	155
Gráfica 4-83: Validación experimental relación y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.....	155
Gráfica 4-84: Validación experimental relación y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.	156
Gráfica 4-85: Validación experimental relación y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.....	156
Gráfica 4-86: Validación experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.....	157
Gráfica 4-87: Validación experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.....	157
Gráfica 4-88: Validación experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.	158
Gráfica 4-89: Validación experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.....	158
Gráfica 4-90: Validación experimental Relación $\Delta E/E_1$ Vs F_1 para el resalto tipo A.	159
Gráfica 4-91: Validación experimental relación $\Delta E/E_1$ Vs F_1 para el resalto tipo B.	159
Gráfica 4-92: Validación experimental relación $\Delta E/E_1$ Vs F_1 para el resalto tipo C.	160
Gráfica 4-93: Validación experimental relación $\Delta E/E_1$ Vs F_1 para el resalto tipo D-E.....	160
Grafica 4-94. Solución grafica para d_2/d_1 resalto tipo A	168
Grafica 4-95. Solución grafica para d_2/d_1 resalto tipo C	169
Grafica 4-96. Solución grafica para L/d_1 resalto tipo C	170
Grafica 4-97. Solución grafica para d_2/d_1 resalto tipo D-E.....	171
Grafica 4-98. Solución grafica para h/y_1 resalto tipo D-E	172
Grafica 4-99. Solución grafica para h/E_1 resalto tipo D-E.....	173
Grafica 4-100. Solución grafica para E_2/E_1 resalto tipo D-E.....	174

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 2-1: Resumen Relaciones gráficas y matemáticas disponibles para el resalto hidráulico en canales con pendiente y sección rectangular.....	36
Tabla 3-1: Resumen relaciones matemáticas resaltos hidráulicos con pendiente y sección transversal rectangular Tipo A, B, C y D-E.....	76
Tabla 4-1: Relaciones matemáticas para el resalto hidráulico tipo A.....	162
Tabla 4-2: Relaciones matemáticas para el resalto hidráulico tipo B.....	163
Tabla 4-3. Relaciones matemáticas para el resalto hidráulico tipo C.....	164
Tabla 4-4. Relaciones matemáticas para el resalto hidráulico tipo D-E.	165

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A	Área mojada en la sección	m^2
b	Ancho del canal en la sección	m
C_d	Coefficiente de descarga vertedero	-
c	Coefficiente	-
d	Profundidad de flujo de la sección transversal perpendicular	m
\bar{d}	Profundidad de flujo promedio de la sección	m
d_{mod}	Valores calculados	-
\overline{dobs}	Valores observados	-
$\overline{dobs:}$	Promedio valores observados	-
D	Profundidad hidráulica de la sección	m
d_t	Profundidad del flujo aguas abajo del resalto (Condición de control aguas abajo)	m
E	Energía específica del flujo	m
F	Número de Froude	-
F_u	Fuerza resultante de la presión de agua en una sección	KN
F_f	Fuerza de oposición al flujo ocasionada por la fricción	KN
g	Aceleración de la fuerza de gravedad	m/s^2
G	Coefficiente empírico que relaciona a Γ y F	-
H	Energía total del flujo	m
h	Altura del resalto	m
h_f	Altura de fricción	m
h_t	Perdidas de energía	m
k	Coefficiente de ajuste por suposiciones en la deducción de las relaciones matemáticas	-
L	Longitud de remolino del resalto	m
L_c	Longitud característica	m
L_j	Longitud total de resalto	m
m	Coefficiente	-
N	Factor empírico relacionado con la longitud del resalto y el grado de inclinación del canal	-
P	Perímetro mojado del flujo en la sección	m
Q	Caudal medio del flujo	m^3/s

Símbolo	Término	Unidad SI
q	Caudal unitario	$m^3/m*s$
R_h	Radio hidráulico	m
s	Coficiente	-
T	Ancho superficial del flujo en la sección	m
t	Coficiente	-
v	Velocidad media del flujo en la sección	m/s
W	Peso del agua en el volumen de control	m
y	Profundidad de flujo en la sección vertical	m
y_c	Profundidad de flujo critica en la sección	m
z_A	Elevación del punto A de la línea de corriente por encima del plano de referencia	m
\bar{z}	Profundidad del centroide del área mojada en la sección.	m

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
α	Coficiente de Coriolis	-
β	Coficiente de Boussinesq	-
θ	Ángulo de inclinación del canal	°
r	Peso específico del fluido	KN/m ³
\forall	Volumen del cuerpo de agua en análisis (volumen de control)	m ³
ΔE	Disipación de energía del resalto	m
$\frac{\Delta M}{\Delta t}$	Cambio de momentum por unidad de tiempo	Kg*m/s ²
Γ	Factor empírico relacionado con N	-

1. INTRODUCCIÓN

Los resaltos hidráulicos son de alta aplicabilidad en la ingeniería hidráulica y ambiental; entre las aplicaciones más frecuentes se encuentran:

- Disipación de energía en estructuras hidráulicas en donde se desee evitar procesos de socavación (diques, vertederos, entre otros).
- Mantenimiento y/o incremento de niveles de lámina de agua en canales de riego y distribución.
- Reducción de presión bajo estructuras, mediante elevación de la lámina de agua.
- Aireación y decloración de agua para abastecimiento potable.
- Remoción de burbujas de aire atrapadas en conductos cerrados parcialmente llenos.
- Producción de condiciones especiales de flujo, como por ejemplo: flujo crítico en una sección de control aguas abajo en la que se pueda medir el caudal que fluye en un canal, de una manera precisa y económica (Sotelo Ávila, 2002), (French, 1988).

Pese a su gran importancia, el estudio del resalto hidráulico en canales con pendiente es reducido.

En la presente tesis se describe de manera teórica y con verificación experimental, el comportamiento del resalto hidráulico en un canal con pendiente mayor que cero y sección transversal rectangular. Dicho comportamiento se ha establecido a partir de las siguientes variables utilizadas normalmente para el efecto: profundidades de flujo inicial y secuente, longitud de remolino del resalto y disipación de energía.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Determinar teórica y experimentalmente, las relaciones entre los parámetros hidráulicos que describen las principales características de los diferentes tipos de resalto hidráulico, originados en canales con pendiente positiva y sección transversal rectangular.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis teórico del resalto hidráulico en canales con pendiente positiva y sección transversal rectangular, mediante la aplicación de los principios de la mecánica de fluidos y la hidráulica clásica.
- Adecuar una instalación de laboratorio que permita el basculamiento del canal de experimentación, la medición de los diferentes parámetros hidráulicos descriptivos del fenómeno (profundidades inicial y secunte, longitud del resalto y caudal), y la determinación precisa del ángulo de inclinación del canal.

1.2 ALCANCE

El alcance de esta tesis se ha establecido considerando la verificación experimental de formulaciones teóricas deducidas matemáticamente, a partir de los principios de la hidráulica básica aplicables al fenómeno.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El resalto hidráulico en canales con pendiente es un fenómeno frecuente en nuestro medio dadas las características topográficas del país, sin embargo, tal como se pudo constatar en la revisión bibliográfica desarrollada para la conformación del estado del arte, es un fenómeno muy poco estudiado, por lo que su conocimiento es incipiente; razón por la cual es necesario ampliar dicho conocimiento para su aplicación en el diseño de estructuras hidráulicas localizadas en zonas montañosas o en terrenos que poseen cambios abruptos de elevación.

1.4 METODOLOGÍA

El desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo mediante las siguientes actividades fundamentales:

1.4.1 Revisión bibliográfica

Se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica acerca de los resaltos hidráulicos en canales con pendiente superior o igual a cero y con sección transversal rectangular, con el fin de establecer el estado del arte correspondiente.

1.4.2 Deducción de relaciones matemáticas

Partiendo del principio de conservación de momentum y del concepto de energía total se dedujeron las relaciones matemáticas entre los parámetros que describen el resalto hidráulico generado en canales con pendiente positiva (tipos A, B, C y D-E), y sección transversal rectangular.

1.4.3 Ajuste experimental de las relaciones matemáticas propuestas

Se realizaron ensayos para una determinada gama de caudales e inclinaciones en el canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Nacional de Colombia, en donde se tomaron mediciones directas de las profundidades inicial y secunente, la longitud de remolino y el caudal empleado, para cada tipo de resalto hidráulico con pendiente positiva y sección transversal rectangular. Adicionalmente, con base en estas mediciones, se obtuvieron relaciones experimentales entre los parámetros (L/d_1) y (F_1) , y entre el parámetro γ (Γ) y el ángulo de inclinación del canal, necesarias para ajustar las ecuaciones teóricas descriptivas del comportamiento del resalto hidráulico, tal como se explica en el capítulo cuatro.

1.4.4 Verificación experimental

Una vez obtenidas la ecuaciones deducidas teóricamente para cada uno de los tipos de resalto objeto del análisis y ajustadas según lo indicado anteriormente, se procedió a realizar una serie de ensayos adicionales para inclinaciones diferentes a las que se utilizaron en el citado ajuste, con el propósito de verificar la validez de la expresiones matemáticas obtenidas.

1.5 Organización del documento

El documento se compone de seis capítulos estructurados de la siguiente forma:

- Capítulo 1: Presenta la introducción al problema, los objetivos y el alcance del trabajo.
- Capítulo 2: Contiene la recopilación de los principios básicos de la hidráulica de canales abiertos y el estado del arte de los resaltos hidráulicos en canales con y sin pendiente, y con sección transversal rectangular.
- Capítulo 3: Comprende la deducción de las relaciones teóricas entre los parámetros que describen los diferentes tipos de resalto hidráulico, en canales con pendiente y sección rectangular.
- Capítulo 4: Presenta los datos experimentales obtenidos para cada tipo de resalto hidráulico, tomados en las instalaciones de laboratorio, su ajuste a las relaciones teóricas deducidas previamente y la validación de las mismas, también con datos experimentales. Contiene, además, un ejemplo práctico de cómo emplear las relaciones propuestas para el diseño de estructuras hidráulicas
- Capítulo 5: Contiene las conclusiones y recomendaciones, derivadas en la deducción teórica de las relaciones matemáticas entre las variables que describen las características principales, del resalto hidráulico con pendiente y sección rectangular. Así como del ajuste y validación de estas con datos experimentales.
- Referencias: Comprende la bibliografía y/o literatura consultada en el desarrollo de la investigación.
- Anexos: Contiene el plano de las instalaciones de laboratorio en donde se ejecutaron los experimentos, los costos de la investigación, los datos experimentales para la calibración o ajuste del vertedero triangular de cresta delgada, los datos directos tomados en el laboratorio y los datos indirectos calculados para los resaltos hidráulicos; además, de las curvas ajustadas para los resaltos hidráulicos tipo A, B, C y D-E en canales con pendiente y sección transversal rectangular.

2. ESTADO DEL ARTE ACERCA DE LOS RESALTOS HIDRÁULICOS EN CANALES CON SECCIÓN RECTANGULAR

En el presente capítulo se definen algunos conceptos fundamentales de la hidráulica de canales abiertos y se da a conocer el estado del arte de los resaltos hidráulicos en canales con y sin pendiente, y con sección transversal rectangular.

2.1 HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS

Un canal abierto es un conducto en el cual el agua o cualquier otra sustancia fluye con una superficie expuesta a la presión atmosférica. De acuerdo con su origen el canal puede ser natural (arroyuelos, quebradas, ríos, corrientes subterráneas, entre otros) o artificial, los cuales son construidos por obra humana (canales de navegación, canales de centrales hidroeléctricas, canales y canaletas de irrigación, cunetas de drenaje, vertederos, entre otras) (Ven Te Chow 1959). Un canal artificial se construye con una sección transversal invariable, revestida en algún tipo de material (concreto, piedras, madera, entre otros) con pendiente suave y constante, es decir de sección prismática.

El término sección de canal se refiere a la sección transversal de un canal tomada en forma perpendicular a la dirección del flujo; por otro lado, una sección vertical es la sección que pasa a través del punto más bajo de la sección de canal (ver figura 2-1).

Los elementos geométricos de una sección de canal se definen propiamente por la geometría de la sección del canal y por la profundidad del flujo, de la siguiente forma:

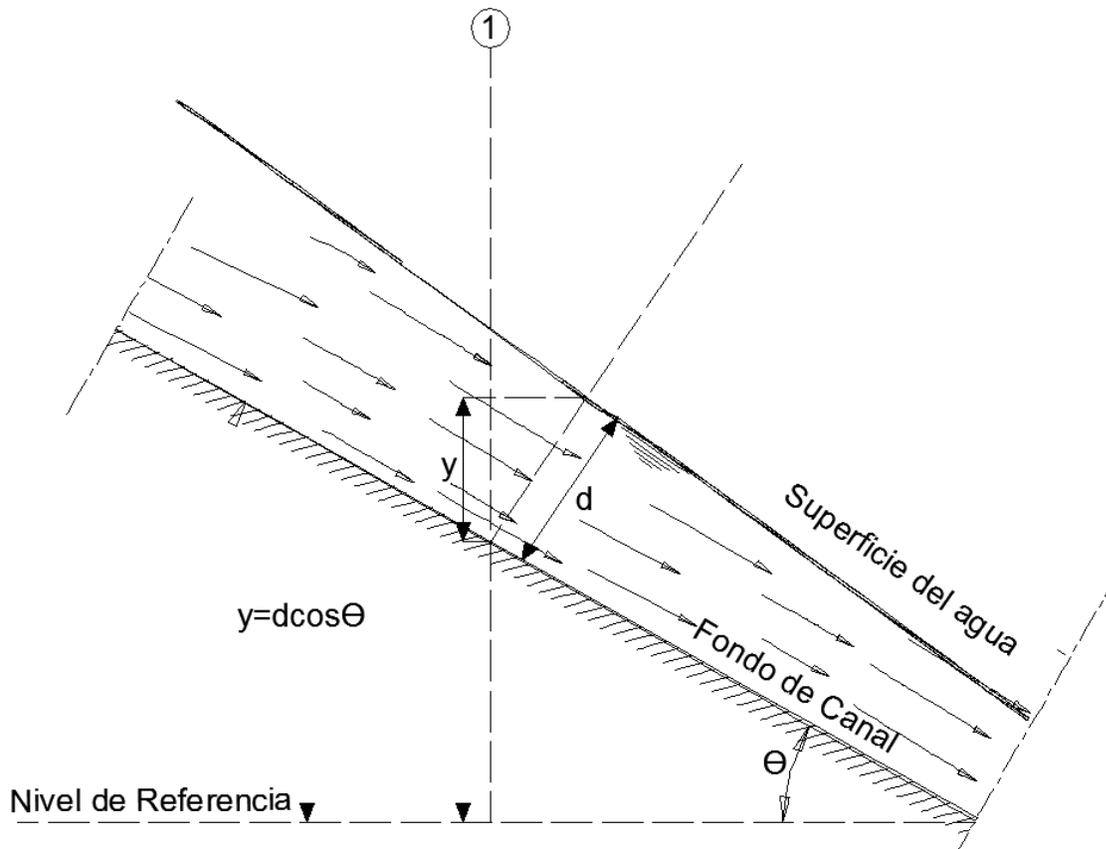


Figura 2-1: Sección vertical y sección transversal de un canal

La profundidad de flujo (y) es la distancia vertical desde el punto más bajo de la sección del canal hasta la superficie libre (ver figura 2-1); mientras la profundidad de flujo de la sección (d) es la profundidad de la lámina de agua en la sección perpendicular al flujo (ver figura 2-1).

Como parámetros descriptivos de la sección transversal, también se tiene al ancho superficial (T) que corresponde al ancho de la sección de canal en la superficie libre, el área mojada (A) que es la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de este (ver figura 2-2), el perímetro mojado (P) que concierne a la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo, el Radio hidráulico (R_h) que hace referencia a la relación del área mojada con respecto al perímetro mojado (ver ecuación (2-1)), y la profundidad hidráulica (D) que es la relación entre el área mojada y el ancho superficial (ver ecuación (2-2)).

$$R_h = \frac{A}{P}$$

(2-1)

$$D = \frac{A}{T}$$

(2-2)

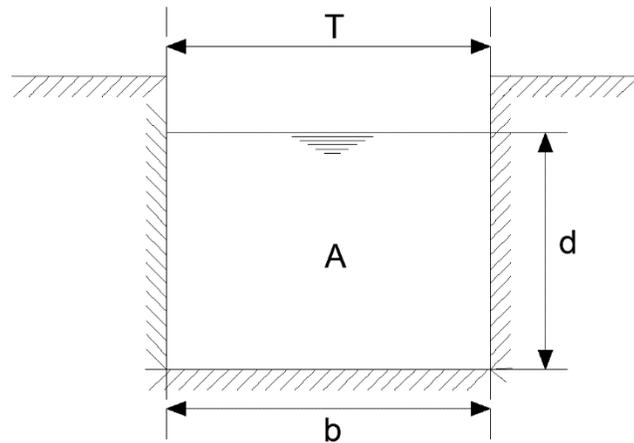


Figura 2-2: Elementos geométricos de la sección de un canal.

2.1.1 Número de Froude (F)

Es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, definidas de la siguiente forma:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gL_c}}$$

(2-3)

Donde:

F : Número de Froude (adimensional).

v : Velocidad media del flujo en la sección (m/s).

L_c : Longitud característica (m).

g : Aceleración de la fuerza de gravedad (m/s^2).

Cuando el número de Froude es igual a la unidad se dice que el estado del flujo es crítico y la Ecuación (2-3), se puede expresar de la siguiente forma:

$$v = \sqrt{gL_c}$$

(2-4)

Si $v < \sqrt{gL_c}$, el flujo es subcrítico, si $v > \sqrt{gL_c}$ el flujo se denomina supercrítico. En canales abiertos la longitud característica es la profundidad hidráulica D .

2.1.2 Energía del flujo en canales abiertos

La energía total de un flujo uniforme o gradualmente variado en unidades de longitud por peso de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección del canal puede expresarse como una altura total, que es igual a la suma de la elevación por encima de un nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad, de la siguiente forma (ver figura 2-3):

$$H = z_A + d_A \cos \theta + \frac{v_A^2}{2g} \quad (2-5)$$

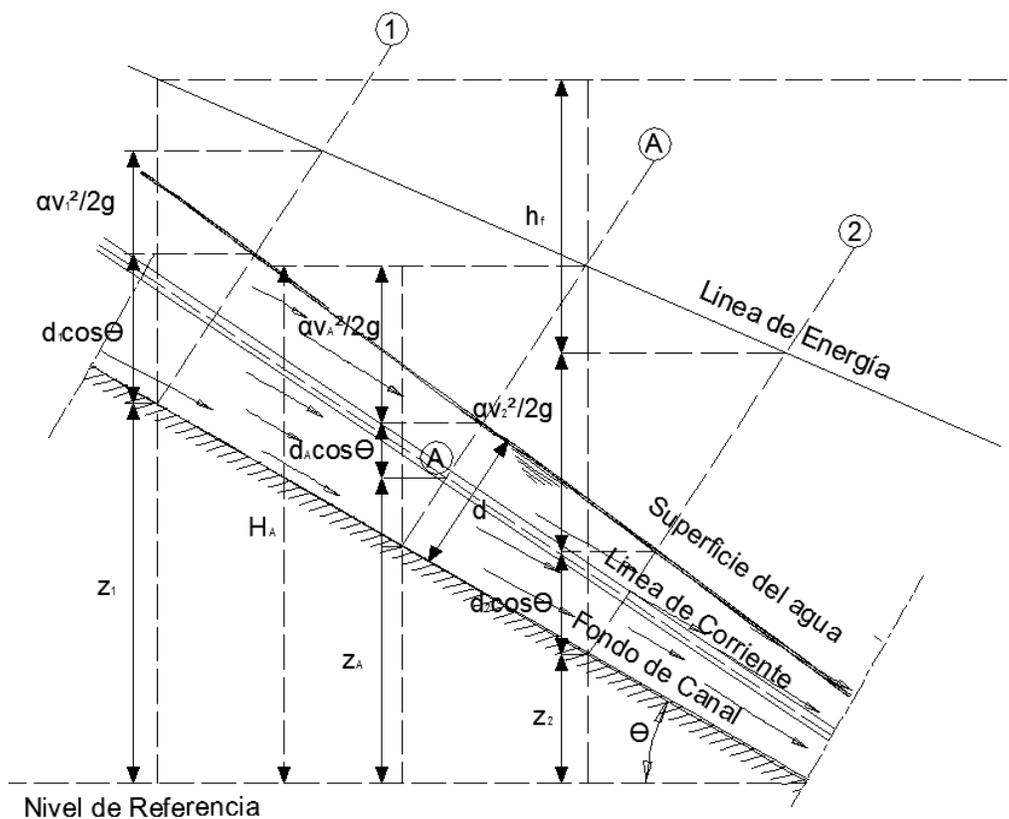


Figura 2-3: Energía de un flujo gradualmente variado en un canal abierto (Adaptado de Ven Te Chow, 1959)

Donde:

z : Elevación del punto A por encima del plano de referencia (m).

θ : Ángulo de inclinación del canal ($^{\circ}$).

$y = d \cos \theta$: Altura de presión, lo cual para flujo en canales abiertos es equivalente a la profundidad de la lámina de agua en el punto A (m).

v_A : Velocidad media del fluido en el punto A (m/s).

g : Aceleración fuerza de gravedad (m/s^2).

En general cada línea de corriente que pasa a través de la sección del canal tendrá una altura de velocidad diferente, debido a la distribución no uniforme de la velocidad; en términos prácticos esto se remedia afectando la cabeza de velocidad con el coeficiente de coriolis (α)¹ con lo que la energía total en una sección del canal es:

$$H = z + d \cos \theta + \alpha \frac{v^2}{2g}$$

(2-6)

De acuerdo con el principio de conservación de energía, la altura de energía total en la sección 1 (ver Figura 2-3) localizada aguas arriba, debe ser igual a la altura de energía total en la sección 2 localizada aguas abajo más la pérdida de energía (h_f) entre las dos secciones:

$$H = z_1 + d_1 \cos \theta + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \theta + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

(2-7)

¹ Debido a la distribución no uniforme de la velocidad en la sección transversal de un canal tanto la altura de velocidad como el momentum de un fluido que pasa a través de dicha sección por unidad de tiempo, deben afectarse por un coeficiente de mayoración (α) llamado coeficiente de Coriolis y (β) llamado coeficiente de Boussinesq respectivamente, de la siguiente forma:

- Altura de velocidad: $\alpha \frac{v^2}{2g}$

Donde:

α : Coeficiente de Coriolis (valores típicos: 1.03-1.36)

v : Velocidad media del flujo en la sección (m/s)

g : Aceleración fuerza de gravedad (m/s^2)

- Momentum: $\beta \frac{\gamma Qv}{g}$

Donde:

β : Coeficiente de Boussinesq (valores típicos: 1.01-1.12)

γ : Peso específico del agua (KN/m^3)

Q : Caudal medio del flujo en la sección (m^3/s)

v : Velocidad media del flujo en la sección (m/s)

La anterior expresión es aplicable al flujo paralelo y se hace extensible por simplicidad al flujo gradualmente variado.

Por otra parte, la energía específica en la sección de un canal se define como la energía por peso medida respecto al fondo de éste. Entonces si $z=0$, la Ecuación (2-6) se expresa de la siguiente forma:

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (2-8)$$

Teniendo en cuenta que el caudal en una sección de canal es el producto de la velocidad media por el área, se puede escribir la Ecuación 2-8, así:

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{Q^2}{2gA} \quad (2-9)$$

Donde:

Q : Caudal medio del flujo en la sección (m^3/s).

A : Área de la sección del canal (m^2).

La Ecuación (2-9) muestra que para una sección y un caudal determinado la energía específica sólo es función de la profundidad del flujo.

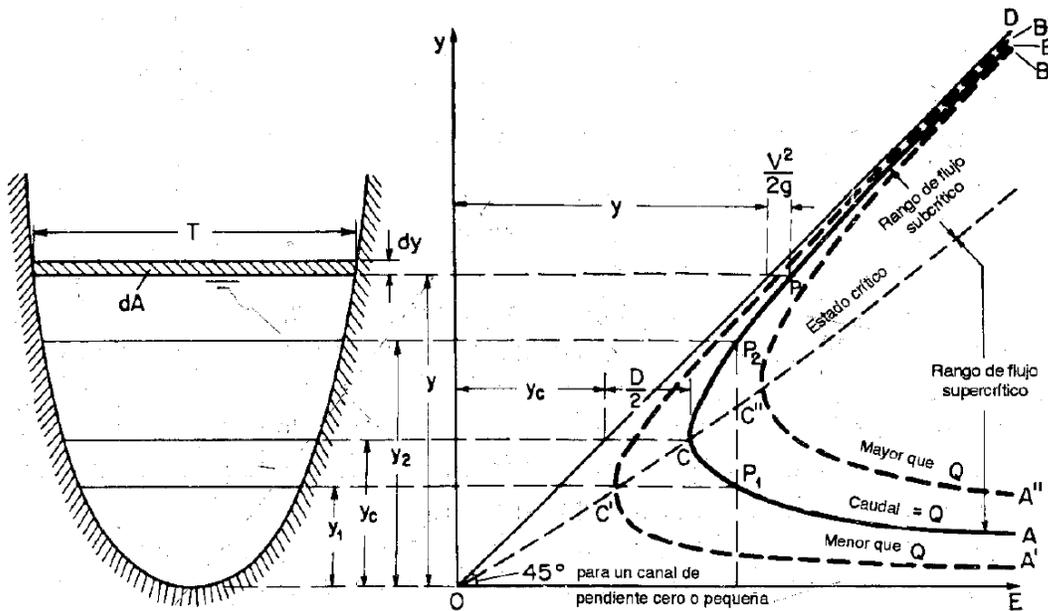


Figura 2-4: Curva de Energía específica en una sección del canal (Tomada de Ven Te Chow, 1959).

Gráficando la profundidad de flujo contra la energía específica se obtiene la curva mostrada en la figura 2-4. Ésta indica que para una energía específica determinada existen dos profundidades de flujo posibles, la profundidad baja (y_1) y la profundidad alta (y_2) (profundidades alternas). En el punto C la energía específica es mínima y las profundidades alternas se vuelven una sola; la profundidad en este punto es llamada profundidad crítica (y_c).

Cuando la profundidad del flujo es menor que la profundidad crítica, la velocidad de flujo es mayor que la velocidad crítica, lo cual se denomina flujo supercrítico; Cuando sucede lo contrario y la profundidad de flujo es mayor que la profundidad crítica, la velocidad de flujo es menor que la velocidad crítica, a lo cual se le llama flujo subcrítico.

Cuando el caudal cambia la curva de energía específica cambia de posición según el caudal sea menor o mayor al empleado para construir la curva primaria u original, tal como se muestra en la figura 2-4.

Retomando lo expresado anterior mente en esta sección y en la sección 2.1.1, el estado crítico de flujo es la condición para el cual el número de Froude (F) es igual a la unidad, de otra forma es también el estado del flujo para el cual la energía específica es mínima para un caudal determinado.

Partiendo de la ecuación de energía específica en una sección determinada, de un canal con pendiente (Ecuación (2-8)) y suponiendo un flujo uniforme (paralelo) o gradualmente variado, se tiene:

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{v^2}{2g}$$

(2-10)

Teniendo en cuenta que la velocidad media se puede expresar en términos de caudal y área mojada de la sección:

$$v = \frac{Q}{A}$$

(2-11)

Reemplazando la Ecuación (2-11) en la Ecuación (2-10), se tiene:

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2}$$

(2-12)

Derivando la Energía con respecto a la profundidad de flujo en la sección (d), se llega:

$$\frac{dE}{dd} = \cos \theta + \alpha \frac{Q^2}{2gA^3} (-2) \frac{dA}{dd}$$

$$\frac{dE}{dd} = \cos \theta - \alpha \frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dd}$$

(2-13)

El diferencial de área se puede expresar de la siguiente manera (ver figura 2-4):

$$T dd = dA$$

$$T = \frac{dA}{dd}$$

(2-14)

Reemplazando la Ecuación (2-14) en la Ecuación (2.13), se obtiene:

$$\frac{dE}{dd} = \cos \theta - \alpha \frac{Q^2}{gA^3} T$$

(2-15)

Igualando el diferencial $\frac{dE}{dd}$ a cero, para hallar la mínima energía:

$$\frac{dE}{dd} = 0$$

$$0 = \cos \theta - \alpha \frac{Q^2}{gA^3} T$$

$$\alpha \frac{Q^2}{gA^3} T = \cos \theta$$

(2-16)

Reemplazando la Ecuación (2-2) y la Ecuación (2-11) en la Ecuación (2-16), se llega:

$$\frac{\alpha V^2}{2g} = \frac{D \cos \theta}{2}$$

(2-17)

La Ecuación (2-17) expresa que cuando el flujo es crítico, la cabeza de velocidad es igual a la mitad de la profundidad hidráulica. Reorganizando los términos de la Ecuación (2-17) y teniendo en cuenta que el número de Froude es igual a la unidad cuando el flujo es crítico, se tiene:

$$F^2 = \frac{\alpha v^2}{gD \cos \theta}$$

$$F = \frac{v}{\sqrt{\frac{gD \cos \theta}{\alpha}}}$$

(2-18)

2.1.3 Momentum del flujo en canales abiertos

El momentum del flujo que pasa a través de la sección de un canal por unidad de tiempo, se expresa de la siguiente forma:

$$\beta \frac{\gamma Q v}{g}$$

(2-19)

Donde:

β : Coeficiente de Boussinesq.

γ : Peso específico del fluido (KN/m³).

Q : Caudal medio del flujo en la sección (m³/s).

v : Velocidad media del flujo en la sección (m/s).

g : Aceleración fuerza de gravedad (m/s²).

De acuerdo a la segunda ley de movimiento de Newton, el cambio de momentum por unidad de tiempo en el cuerpo de agua de un canal (Volumen de Control²) es igual a la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo.

$$\sum F_u = \frac{\Delta M}{\Delta t}$$

(2-20)

² Volumen de Control: Región del espacio que se establece como artificio para analizar las características y propiedades del flujo (Duarte & Niño, 2002).

Donde:

$\sum Fu$: Sumatoria de fuerzas externas.

$\frac{\Delta M}{\Delta t}$: Cambio de momentum por unidad de tiempo.

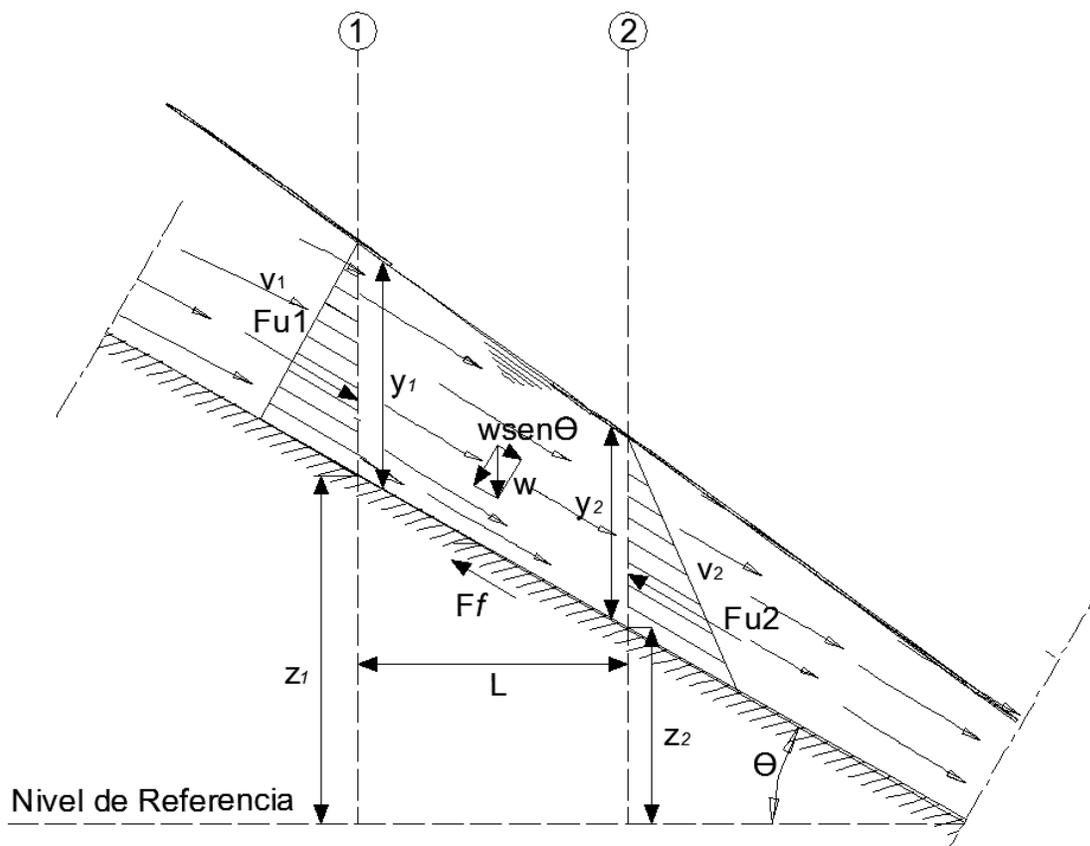


Figura 2-5: Diagrama de fuerzas volumen de control sección 1 y 2 (Adaptado de Ven Te Chow, 1959).

Al aplicar este principio al flujo en un canal con pendiente entre las secciones 1 y 2 (Ver figura 2-5), se llega a la siguiente expresión:

$$Fu_1 - Fu_2 + w \sin \theta - F_f = \beta_2 \left(\frac{r}{g} \right) Q v_2 - \beta_1 \left(\frac{r}{g} \right) Q v_1$$

(2-21)

Donde:

Fu_1 : Fuerza resultante de la presión de agua en la sección 1 (KN).

Fu_2 : Fuerza resultante de la presión de agua en la sección 2 (KN).

W : Peso del agua en el volumen de control (KN).

F_f : Fuerza de fricción y de resistencia externa que actúan a lo largo de la superficie de contacto entre el agua y el canal (KN).

Considerando un flujo uniforme (paralelo) o gradualmente variado, las fuerzas resultantes en las secciones se puede calcular suponiendo una distribución hidrostática de presiones, de la siguiente forma:

$$Fu_1 = \frac{1}{2} \gamma d_1 d_1 \cos \theta b = \frac{1}{2} r b d_1^2 \cos \theta$$

(2-22)

$$Fu_2 = \frac{1}{2} \gamma d_2 d_2 \cos \theta b = \frac{1}{2} r b d_2^2 \cos \theta$$

(2-23)

Suponiendo:

$$F_f = \gamma h_f b \bar{d}$$

(2-24)

Donde:

h_f : Altura de fricción (m).

$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2}{2}$: Profundidad promedio (m).

El caudal circundante en el tramo se puede tomar como el producto de la velocidad promedio y el área promedio:

$$Q = 1/2 (v_1 + v_2) b \bar{d}$$

(2-25)

Donde:

v_1 : Velocidad promedio en la sección 1 (m/s).

v_2 : Velocidad promedio en la sección 2 (m/s).

b : Ancho del canal (m).

El peso del cuerpo de agua es igual a:

$$w = \gamma b \bar{d} L$$

(2-26)

La pendiente del tramo en evaluación es:

$$\sin \theta = \frac{z_1 - z_2}{L}$$

(2-27)

Al sustituir las Ecuaciones (2-22), (2-23), (2-24), (2-25), (2.26) y (2-27) en la Ecuación (2-21), se tiene:

$$\frac{1}{2} r b d_1^2 \cos \theta - \frac{1}{2} r b d_2^2 \cos \theta + \gamma b \bar{d} L \left(\frac{z_1 - z_2}{L} \right) - \gamma h_f b \bar{d} = 1/2 \left(\frac{r}{g} \right) (v_1 + v_2) b \bar{y} (\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1)$$

(2-28)

Simplificando:

$$z_1 + d_1 \cos \theta + \beta_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \theta + \beta_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

(2-29)

La Ecuación (2-29), resulta similar a la ecuación de energía (Ecuación (2-7)), sin embargo los coeficientes de ajuste por la distribución no uniforme de la velocidad (α) y (β), son diferentes; y los términos que evalúan las pérdidas por energía (h_f) y (h_f) en cada ecuación tienen significados esencialmente disimiles.

En la ecuación de energía (h_f) estima la energía disipada dentro del cuerpo de agua (Volumen de control), en tanto en la ecuación de momentum (h_f) tiene en cuenta las pérdidas debidas a las fuerzas externas ejercidas por el volumen de agua sobre las paredes del canal.

No considerando diferencia apreciable entre los coeficientes (α) y (β), en flujo uniforme o gradualmente variado la evidencia experimental ha mostrado que las pérdidas de energía interna son muy similares a las pérdidas debidas a fuerzas externas.

Retomando lo obtenido anteriormente y aplicando el principio de momentum a un tramo corto, con pendiente de un canal prismático (ver figura 2-5 y Ecuación (2-21)):

$$F_1 - F_2 + w \sin \theta - F_f = \beta \left(\frac{r}{g} \right) Q v_2 - \beta \left(\frac{r}{g} \right) Q v_1$$

Teniendo que:

$$Q = v_1 A_1$$

(2-30)

$$Q = v_2 A_2$$

$$(2-31)$$

$$F_1 = \gamma \bar{z}_1 A_1$$

$$(2-32)$$

$$F_1 = \gamma \bar{z}_2 A_2$$

$$(2-33)$$

$$w = \gamma \nabla$$

$$(2-34)$$

Donde:

\bar{z}_1, \bar{z}_2 : Distancia de los centroides de las áreas mojadas en las secciones transversales 1 y 2 (m).

A_1, A_2 : Área mojada en las secciones transversales 1 y 2 (m²).

∇ : Volumen del cuerpo de agua en análisis (volumen de control) (m³).

Reemplazando las Ecuaciones (2-30), (2-31), (2.32) y (2.33) en Ecuación (2-21), simplificando y reorganizado términos se llega a la siguiente expresión:

$$\left(\bar{z}_1 A_1 + \beta \frac{Q}{g A_1} \right) - \left(\bar{z}_2 A_2 + \beta \frac{Q}{g A_2} \right) = \frac{F_f}{\gamma} - \nabla \sin \theta$$

$$(2-35)$$

El término $\left(F = \bar{z}_1 A_1 + \beta \frac{Q}{g A_1} \right)$, es conocido como fuerza específica. $\left(\beta \frac{Q}{g A_1} \right)$, representa el momentum del flujo que pasa a través de la sección del canal por unidad de tiempo y por unidad de peso de agua, y $(\bar{z}_1 A_1)$ es la fuerza por unidad de peso de agua.

Al graficar la profundidad de flujo contra la fuerza específica para una sección de canal y caudal determinado, se obtiene la curva mostrada en la figura 2-6. Esta muestra que para una fuerza específica determinada existe dos profundidades de flujo posibles, la profundidad baja (y_1) y la profundidad alta (y_2), En el punto C la fuerza específica es mínima y las dos posibles profundidades se vuelven una sola.

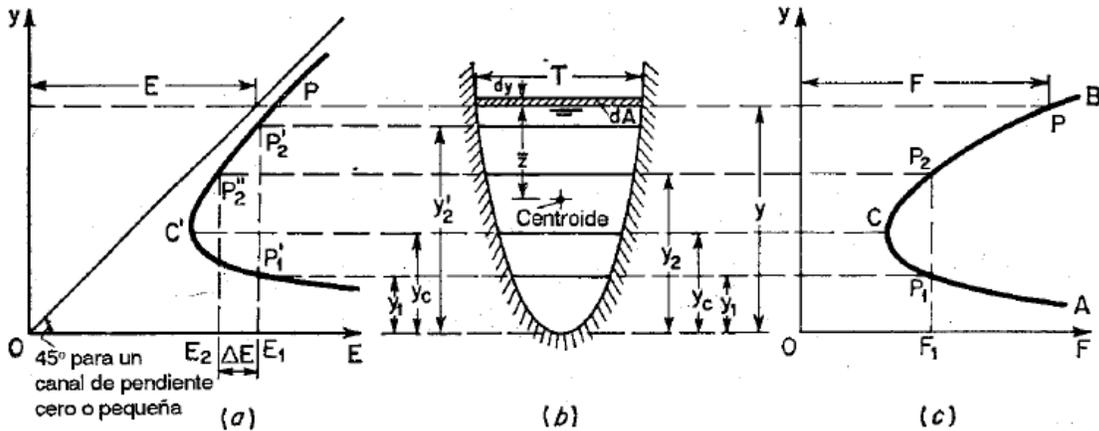


Figura 2-6: Curva de fuerza específica en la sección de un canal (Tomada de Ven Te Chow, 1959).

2.2 RESALTO HIDRÁULICO

El resalto hidráulico es un fenómeno local que se produce en condiciones de cambio de régimen de flujo supercrítico (condición de control aguas arriba) a flujo subcrítico (condición de control aguas abajo), acompañado de remolinos o vórtices turbulentos y gran disipación de energía (ver figura 2-7). Entre sus aplicaciones más frecuentes se encuentran:

- Disipación de energía en estructuras hidráulicas en donde se desee evitar procesos de socavación (diques, vertederos, entre otros).
- Mantenimiento y/o incremento de niveles de lámina de agua en canales de riego y distribución.
- Reducción de presión bajo estructuras, mediante elevación de la lámina de agua.
- Aireación y decloración de agua para abastecimiento potable.
- Remoción de burbujas de aire atrapadas en conductos cerrados parcialmente llenos.
- Producción de condiciones especiales de flujo, como por ejemplo, flujo crítico en una sección de control aguas abajo en la que se pueda medir el caudal circundante en un canal, de una manera efectiva y económica (Sotelo, 2002), (French, 1988).

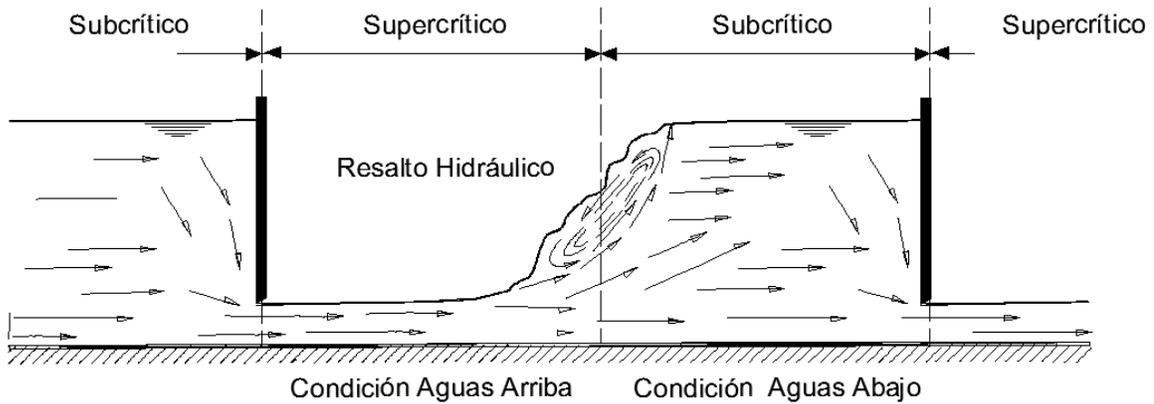


Figura 2-7: Resalto hidráulico (Adaptado de Sotelo, 2002).

2.2.1 Resalto hidráulico en canales horizontales con sección rectangular

Los resaltos hidráulicos en fondo horizontal se clasifican de acuerdo con los estudios del U.S Bureau of Reclamation –USBR- (1963), según el número de Froude, de la siguiente manera:

$F_1=1.0$ a 1.7 , Resalto Ondulante, la superficie del agua muestra ondulaciones.



Figura 2-8: Resalto ondulante (Tomada de Ven Te Chow, 1959).

$F_1=1.7$ a 2.5 , Resalto Débil, se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, sin embargo, la superficie del agua hacia aguas abajo y la velocidad a través de la sección permanecen razonablemente uniformes, con una baja pérdida de energía.

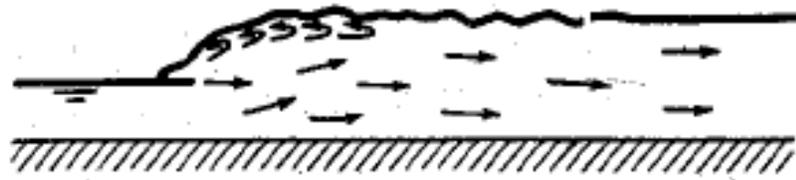


Figura 2-9: Resalto débil (Tomada de Ven Te Chow, 1959).

$F_1=2.5$ a 4.5 , Resalto Oscilante, existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación origina una onda de gran longitud y período irregular, que generalmente se traslada a grandes distancias aguas abajo, causando daños a las diversas estructuras hidráulicas de encauzamiento.



Figura 2-10: Resalto ondulante (Tomada de Ven Te Chow, 1959).

$F_1=4.5$ a 4.9 , Resalto Estable, la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. El tirante aguas abajo tiene menos influencia sobre la acción y posición del resalto; La disipación de energía lograda por este tipo de resalto varía entre el 45% y el 70%.

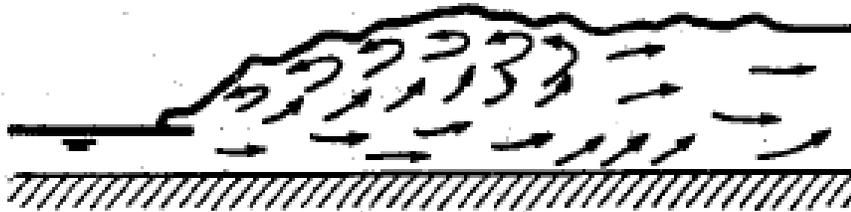


Figura 2-11: Resalto estable (Tomada de Ven Te Chow, 1959).

$F_1>9.0$, Resalto Fuerte, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren a lo largo de la cara frontal del resalto, generando fuertes ondas que se propagan hacia aguas abajo. La disipación de energía lograda por este tipo de resalto alcanza un 85%.



Figura 2-12: Resalto fuerte (Tomada de Ven Te Chow, 1959).

- **Profundidades conjugadas**

Según Bélanger (1828), bajo comprobación experimental de Peterka (1964), un resalto hidráulico se forma si el número de Froude aguas arriba del flujo (F_1), la profundidad del flujo aguas arriba (d_1) y la profundidad del flujo aguas abajo (d_2) (Profundidad secuente), satisface la siguiente ecuación (ver deducción en la sección 3.3.1):

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

(2-36)

- **Pérdida de energía**

La pérdida o disipación de energía del resalto hidráulico es igual a la diferencia de las energías específicas aguas arriba y aguas abajo de este, de la siguiente forma (ver deducción en la sección 3.1.4):

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(d_2 - d_1)^3}{4d_1d_2}$$

(2-37)

- **Eficiencia del resalto**

La eficiencia del resalto hidráulico es definida como la relación entre la energía aguas arriba y aguas abajo de éste (ver deducción sección 3.1.5):

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^3 + 4F_1^2}{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^2 (2 + F_1^2)}$$

(2-38)

- **Altura del resalto**

La altura del resalto es definida como la diferencia de profundidades aguas arriba y aguas abajo de éste; y se puede estimar de la siguiente forma (Ver deducción sección 3.1.3):

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3}{2 + F_1^2}$$

(2-39)

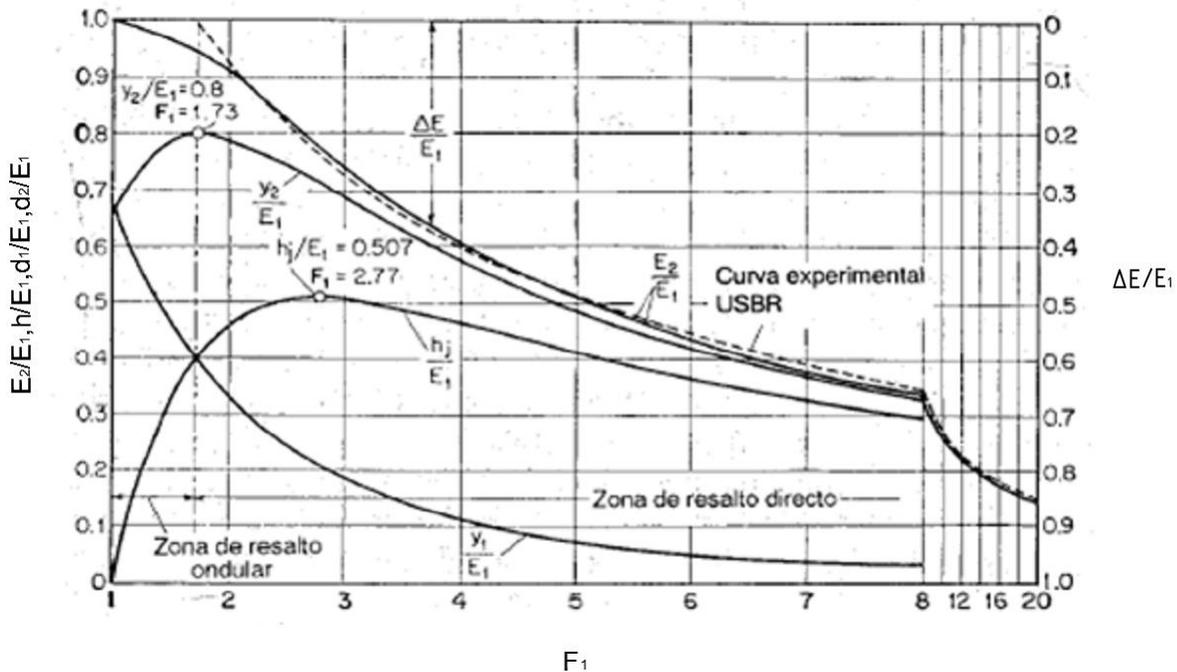


Figura 2-13: Curvas características en canales sin pendiente con sección rectangular (Tomada de Ven Te Chow, 1959).

- **Longitud de resalto**

La longitud de remolino turbulento L del resalto es definida como la distancia entre la sección donde inicia su cara frontal y otra que corresponde a su punto de estancamiento (separación del flujo en las direcciones de avance y retroceso). Por otra parte, la longitud del resalto L_j , es la distancia desde la misma cara frontal del inicio de éste, hasta aquella en que se alcanza la máxima altura de la superficie de agua y se estabiliza la distribución de la velocidad.

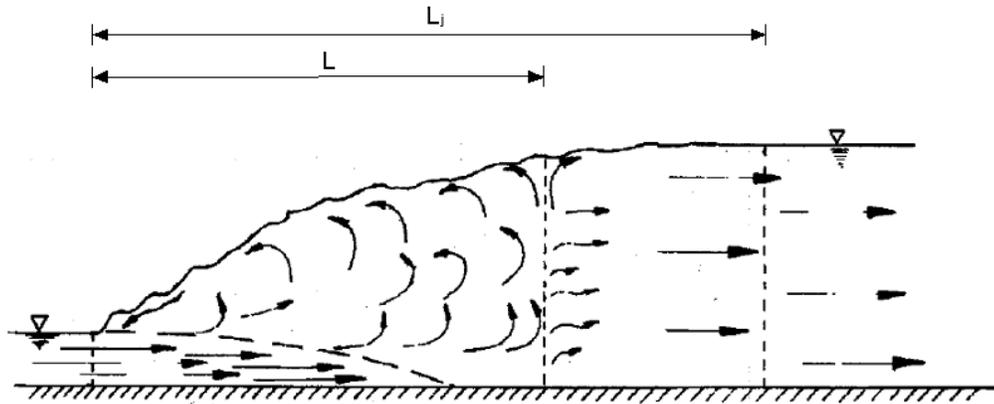


Figura 2-14: Longitud del resalto hidráulico (Adaptada de Sotelo Ávila, 2002).

En teoría la longitud del resalto no es fácil de determinar, para lo cual a través de datos experimentales la USBR llegó a la figura 2-15, que relaciona el número de Froude con el parámetro (L/d_2) .

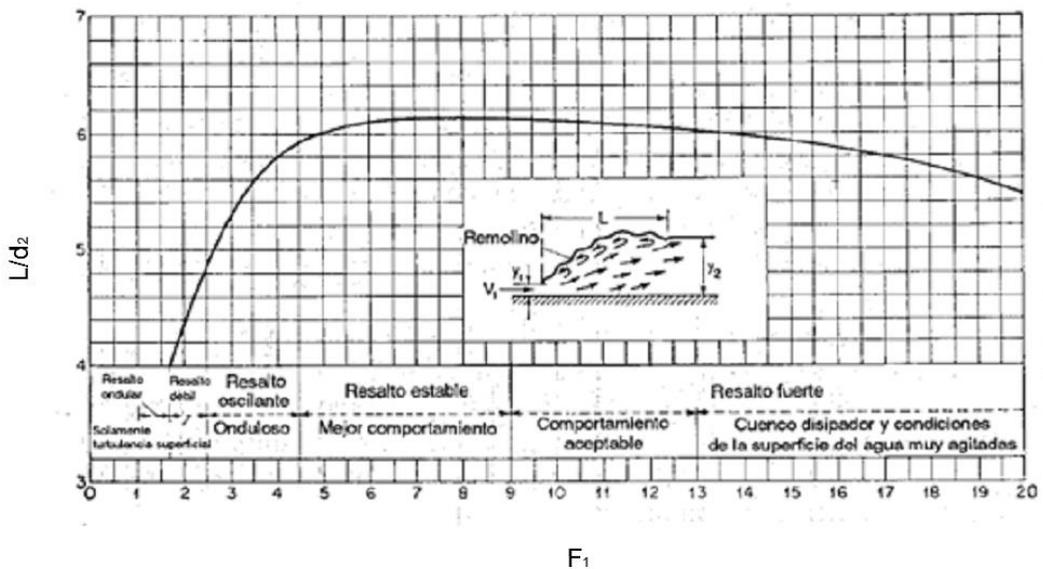


Figura 2-15: Longitud de resalto en canales sin pendiente con sección rectangular (Tomada de Ven Te Chow, 1983).

Diversos autores han hallado relaciones matemáticas de la longitud del resalto en relación con la profundidad inicial (d_1) y en función del número de Froude inicial (F_1), la cual es la que mejor define los datos experimentales en general. De acuerdo con Sotelo (2002), se tiene:

Silvester:

$$L_j/d_1 = 9.75(F_1 - 1)^{1.01}$$

(2-40)

Woyciki:

$$L_j/d_1 = 4.05\sqrt{1 + 8F_1^2} - 0.1F_1^2 - 12.05$$

(2-41)

Smetana y Tizon:

$$L_j/d_1 = 3 \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3 \right]$$

(2-42)

Pavlovsky:

$$L/d_1 = 2.375\sqrt{1 + 8F_1^2} - 4.875$$

(2-43)

Ludin:

$$L/d_1 = \left[\frac{13.5F_1}{(6F_1 - 4.5)} \right] \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3 \right]$$

(2-44)

Safranez:

$$L/d_1 = 6F_1$$

(2-45)

Válida para $1.72 < F_1 < 19.1$

Pietrkowsky:

$$L/d_1 = 5.9F_1$$

(2-46)

Válida para para $5.5 < F_1 < 19.8$.

Chertousov:

$$L/d_1 = 10.3(\sqrt{F_1} - 1)^{0.81}$$

(2-47)

Se desconoce el significado de L para esta ecuación.

Einwachter:

$$L/d_1 = 8.3(\sqrt{F_1} - 1)$$

(2-48)

Válida para para $2.5 < F_1 < 6.95$. Se desconoce el significado de L para esta ecuación.

Pikalov:

$$L/d_1 = 4\sqrt{1 + 2F_1}$$

(2-49)

Se desconoce el significado de L para esta ecuación.

Rajaratnam:

$$L_j/d_1 = 3\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1\right)$$

(2-50)

Ecuación deducida, para $4 < F_1 < 16$

Sarma y Newnham:

$$L/d_1 = 6.73(F_1 - 1)$$

(2-51)

Ecuación original, para $1.21 < F_1 < 3.79$.

Malik:

$$L/d_1 = 6.2F_1 - 10.4 + [5F_1 - 7.5 + 0.17(F_1 - 3)^4] \frac{d_1}{b}$$

(2-52)

Ecuación deducida para $3 \leq F_1 \leq 6$.

Bretz:

$$L/y_1 = 6.29F_1 - 3.59$$

(2-53)

Ecuación deducida para $3.3 < F_1 < 15.3$

Hager, Bremen y Kawagoshi:

$$L/y_1 = 8(F_1 - 1.5)$$

(2-54)

Ecuación deducida para $2.5 < F_1 < 12$

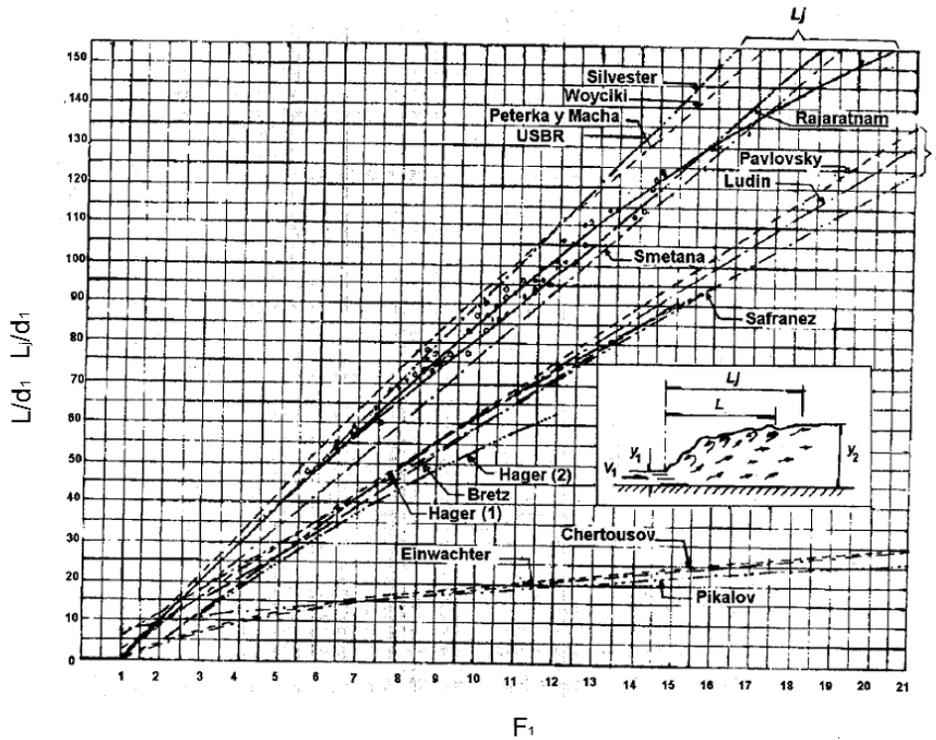


Figura 2-16: Longitud de remolino y de resalto hidráulico en canales sin pendiente con sección rectangular (Tomada de Sotelo Ávila, 2002).

- **Perfil del resalto**

Bakhmeteff y Matzke encontraron experimentalmente que el perfil de la superficie libre del resalto hidráulico puede representarse mediante curvas adimensionales para distintos valores de (F_1), como se muestra en la figura 2-17.

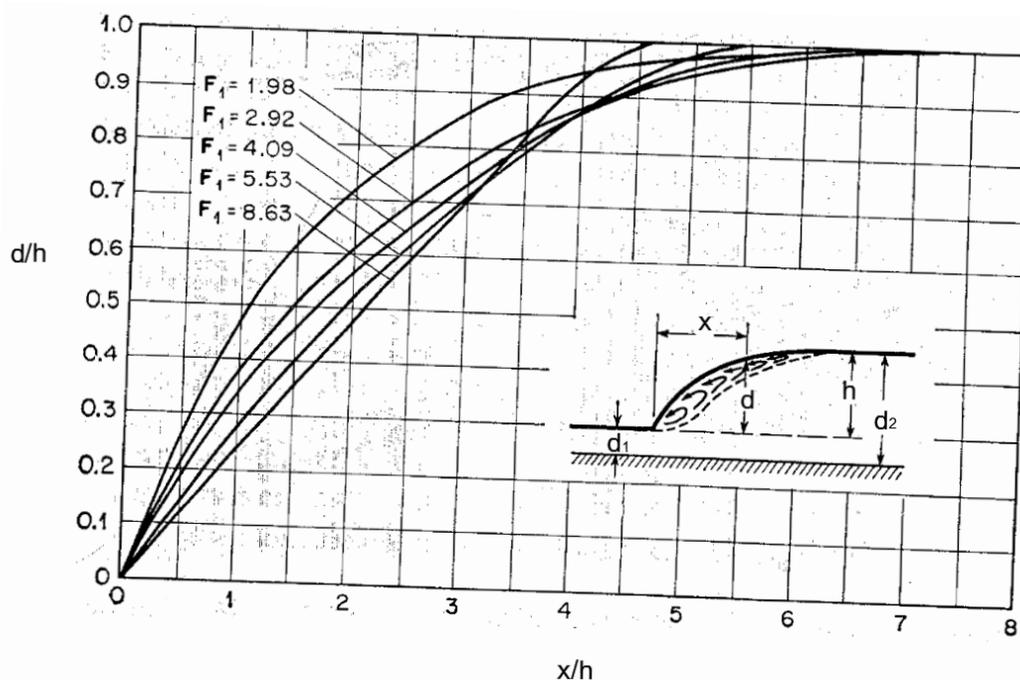


Figura 2-17: Perfiles superficiales adimensionales de resaltos hidráulicos en canales sin pendiente con sección rectangular (Tomada de Ven Te Chow, 1959).

2.2.2 Resalto hidráulico en canales con pendiente y sección rectangular

Generalmente el resalto hidráulico en canales con pendiente se forma en realidad en canales con pendiente mixta, el cual es un canal de dos tramos con diferente inclinación: El primero, ubicado aguas arriba con una pendiente suficientemente grande que garantice un flujo supercrítico y el segundo, ubicado aguas abajo con pendiente suave, horizontal o adversa (Delgado & Sotelo, 2002).

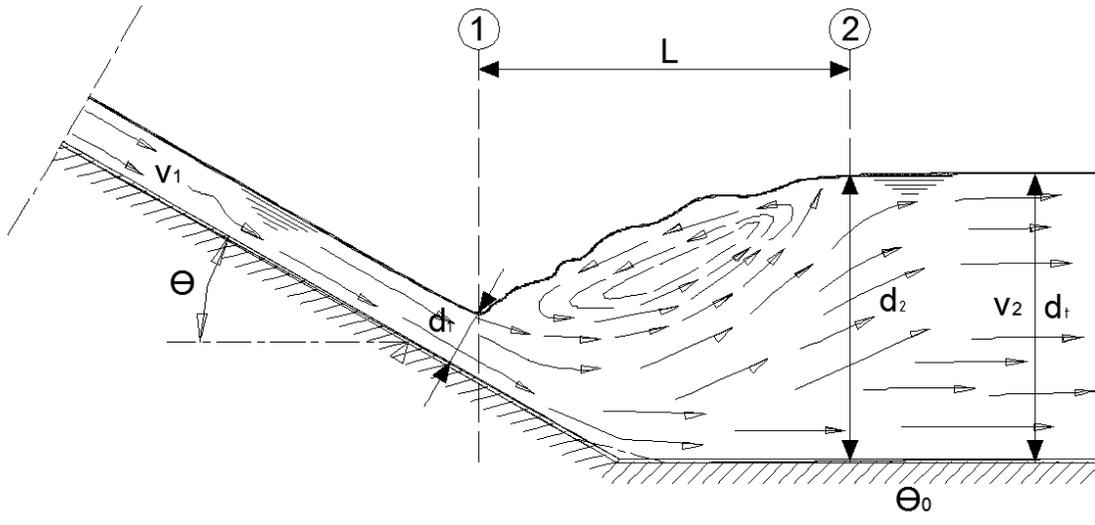


Figura 2-18: Resalto hidráulico en canal de pendiente mixta.

- Tipos de resalto

De acuerdo a la profundidad de flujo aguas abajo (d_t) (control aguas abajo) se forman diferentes tipos de resalto en canales de pendiente mixta, de la siguiente manera:

Tipo A. El resalto hidráulico inicia al final de la pendiente y se forma sobre el canal de pendiente suave. Las condiciones de flujo en la sección 1 originan una profundidad secunete (d_2) igual a la profundidad de flujo aguas abajo (d_t) (control aguas abajo).

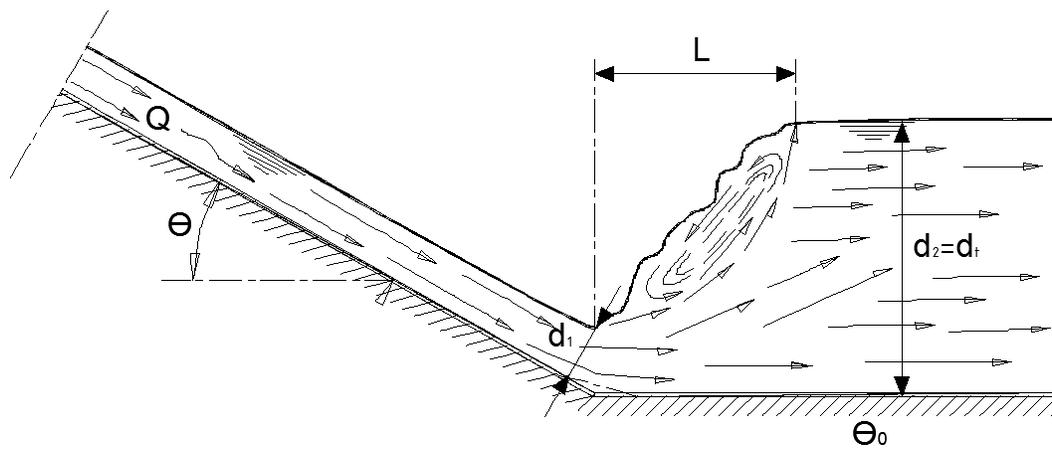


Figura 2-19: Resalto hidráulico tipo A.

Tipo B. El resalto hidráulico se forma parcialmente en los dos tramos de canal, existe un incremento en la profundidad de flujo aguas abajo (d_t) (control aguas abajo) $d_t > d_2$, con respecto a la condición del resalto tipo A, lo que provoca que el resalto retroceda hacia el primer tramo del canal.

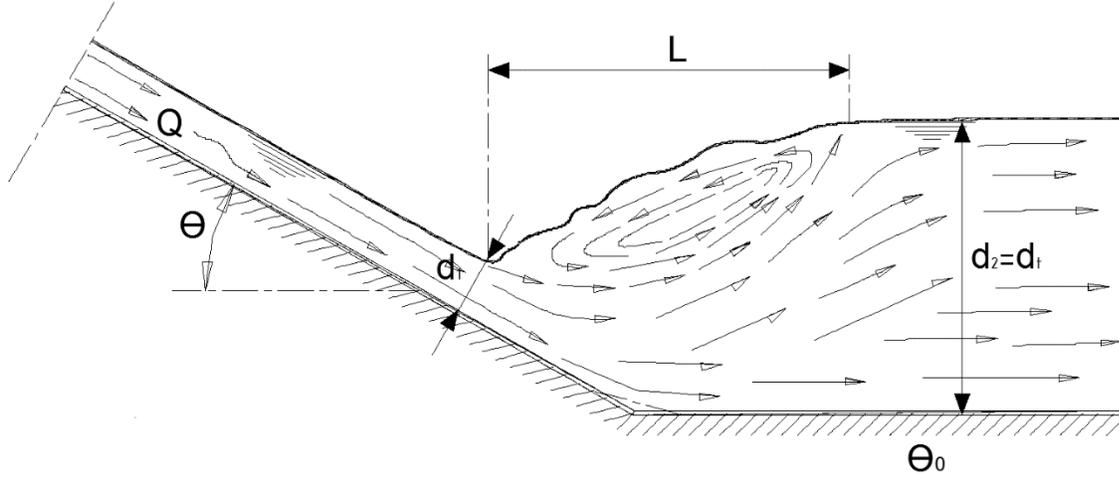


Figura 2-20: Resalto hidráulico tipo B

Tipo C. El resalto hidráulico se desarrolla sobre el tramo de gran pendiente; coincidiendo el final de este, con el punto de cambio de inclinación. La profundidad de flujo aguas abajo (d_t) (control aguas abajo) es mayor que la necesaria para que se forme el resalto tipo B y menor que la necesaria para que se forme el resalto tipo D.

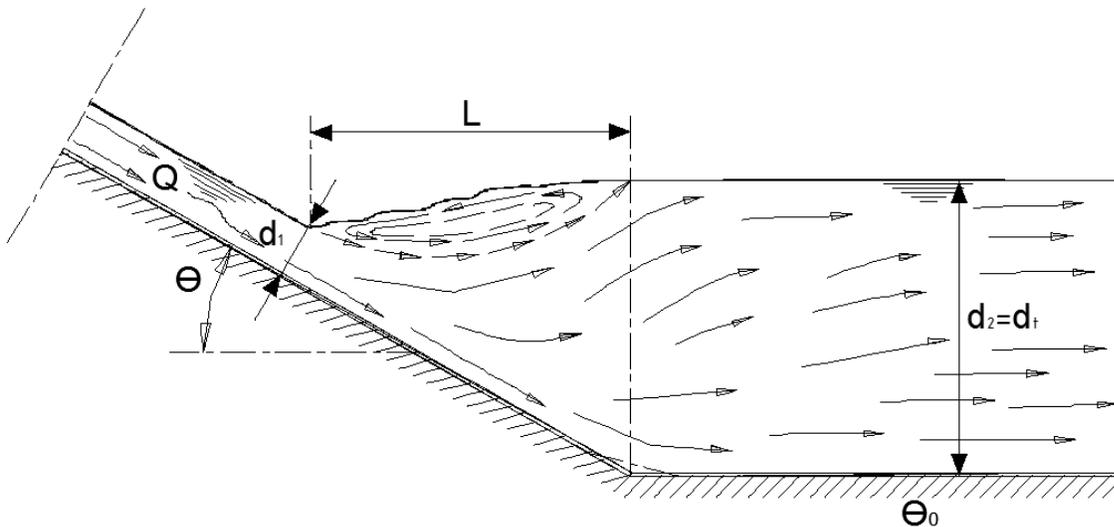


Figura 2-21: Resalto hidráulico tipo C.

Tipo D. El salto hidráulico se desarrolla en el tramo de gran pendiente, la profundidad de flujo aguas abajo (d_t) (control aguas abajo) es mayor que la necesaria para la formación

de un resalto Tipo C y es lo suficientemente grande para que éste penetre e influya en las condiciones de flujo en el tramo de pendiente.

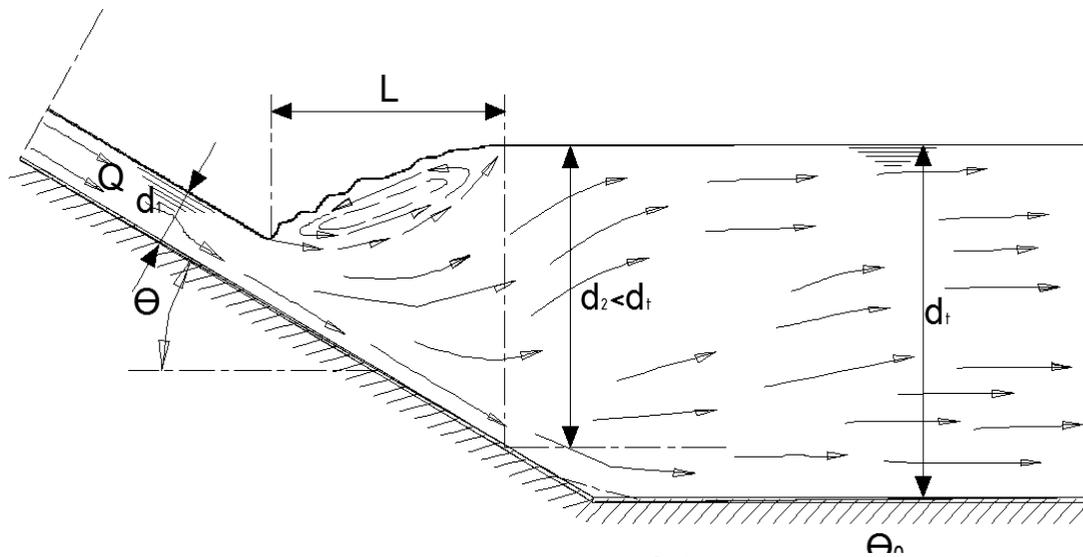


Figura 2-22: Resalto Hidráulico tipo D.

Tipo E. El salto hidráulico ocurre totalmente sobre el tramo de gran pendiente y en un canal con longitud indefinida.

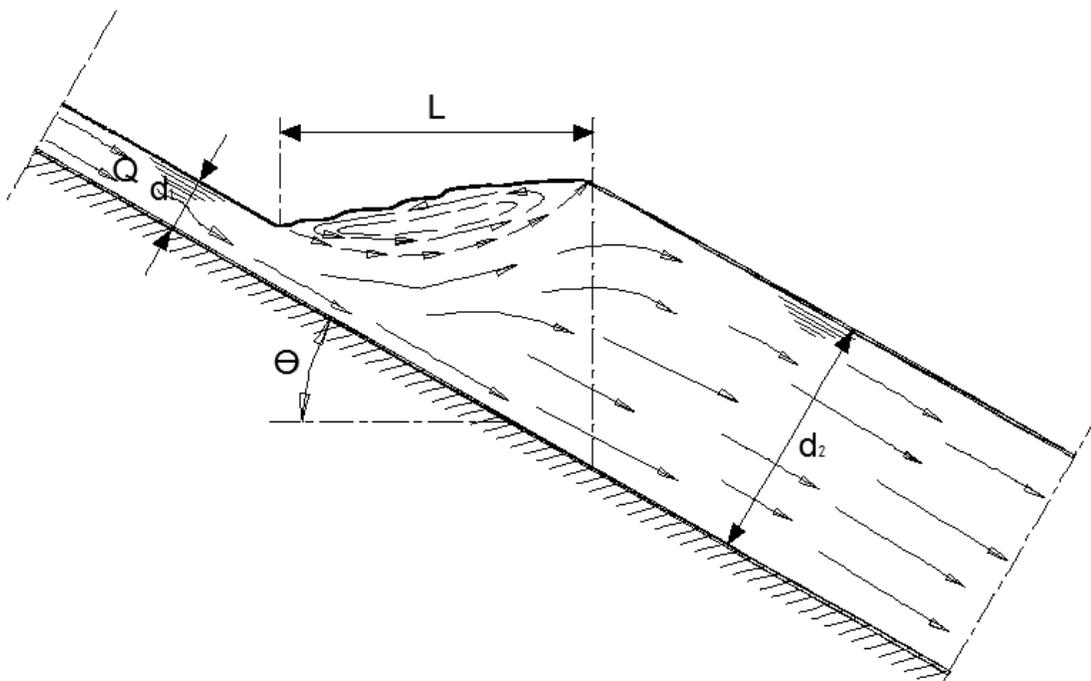


Figura 2-23: Resalto hidráulico tipo E.

Tipo F. El salto hidráulico ocurre en el tramo de pendiente adversa.

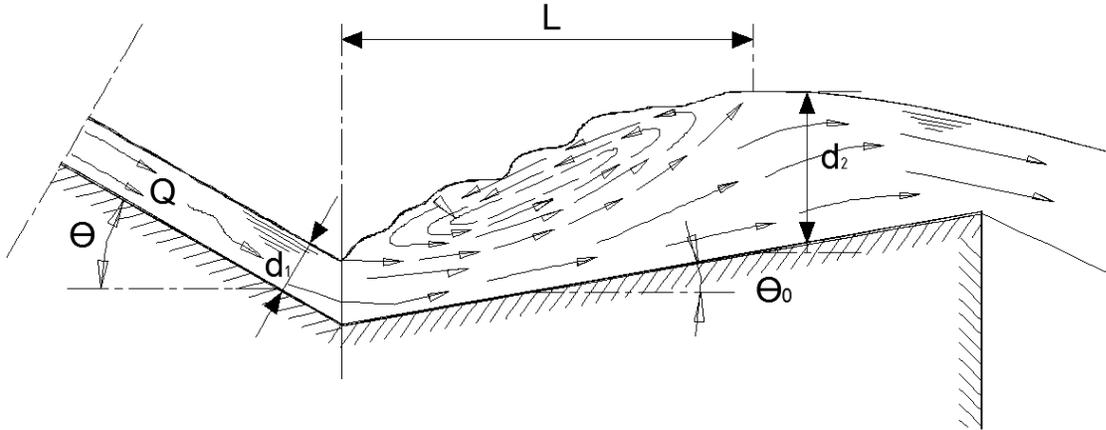


Figura 2-24: Resalto hidráulico tipo F.

Los resaltos tipo A, B, C y D son los más comunes; los saltos tipo A y B se forman sobre canales cuyo primer tramo tiene una pendiente de gran inclinación y el segundo es de pendiente suave, el tipo A es el más frecuente; los saltos C y D ocurren sobre canales cuyo tramo inicial es de pendiente ligeramente inclinada y cambia a uno de pendiente suave. Los saltos E y F son pocos comunes, siendo estos generalmente casos teóricos (Delgado & Sotelo, 2002).

Kindsvaster (1944), desarrolló la siguiente expresión para el resalto hidráulico tipo C, la cual afirman Bradley & Peterka (1957) puede también aplicarse al resalto hidráulico tipo D:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2 \cos \theta} \sqrt{1 + 8F_1^2 \left(\frac{\cos^3 \theta}{1 - 2N \tan \theta} \right)} \quad (2-55)$$

Donde N es un factor empírico relacionado con la longitud del salto y θ es el ángulo de la pendiente longitudinal del canal (en grados).

Definiendo los siguientes parámetros:

$$\Gamma_1^2 = \frac{\cos^3 \theta}{1 - 2N \tan \theta} \quad (2-56)$$

$$G_1^2 = \Gamma_1^2 F_1^2$$

(2-57)

La Ecuación (2-55) puede, entonces, expresarse de la siguiente forma:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8G_1^2} - 1$$

(2-58)

Rajaratman (1967) estableció la siguiente interrelación:

$$\Gamma_1 = 10^{0.027\theta}$$

(2-59)

Aunque no se ha establecido una solución analítica para el resalto tipo B, Bradley y Peterka (1957) desarrollaron la siguiente solución gráfica basada en experimentos de laboratorio.

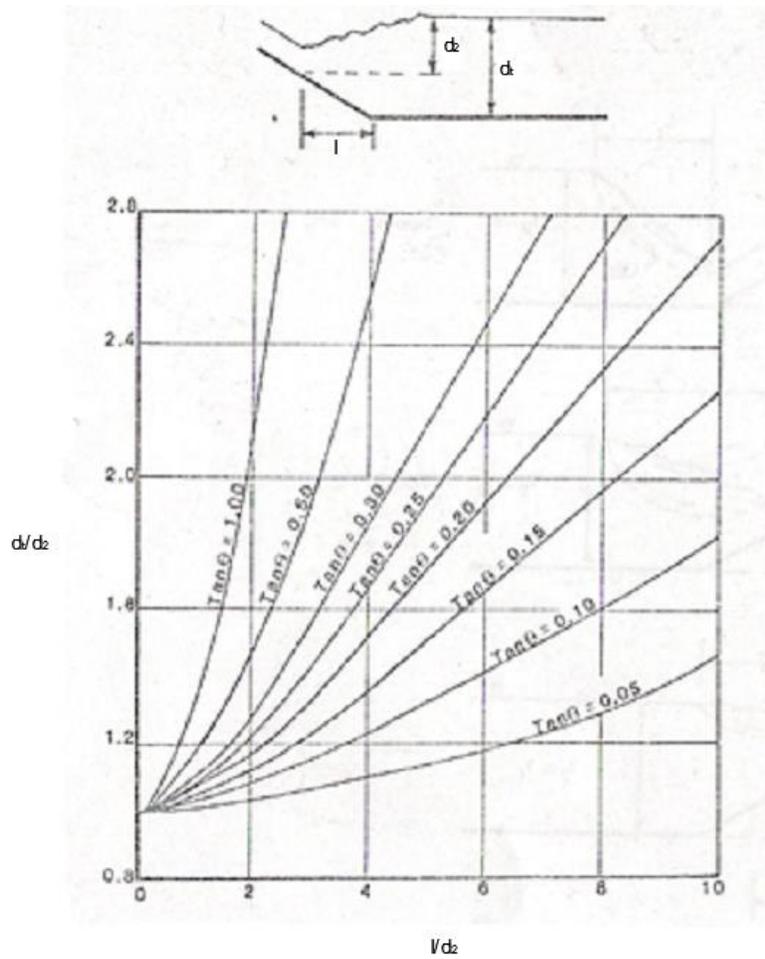


Figura 2-25: Solución para resaltos tipo B (Peterka, 1963 y Rajaratnam, 1967) (tomada de French, 1985).

Bradley y Peterka (1957) presentaron también una serie de resultados acerca de la longitud de Salto para los tipos B, C y D.

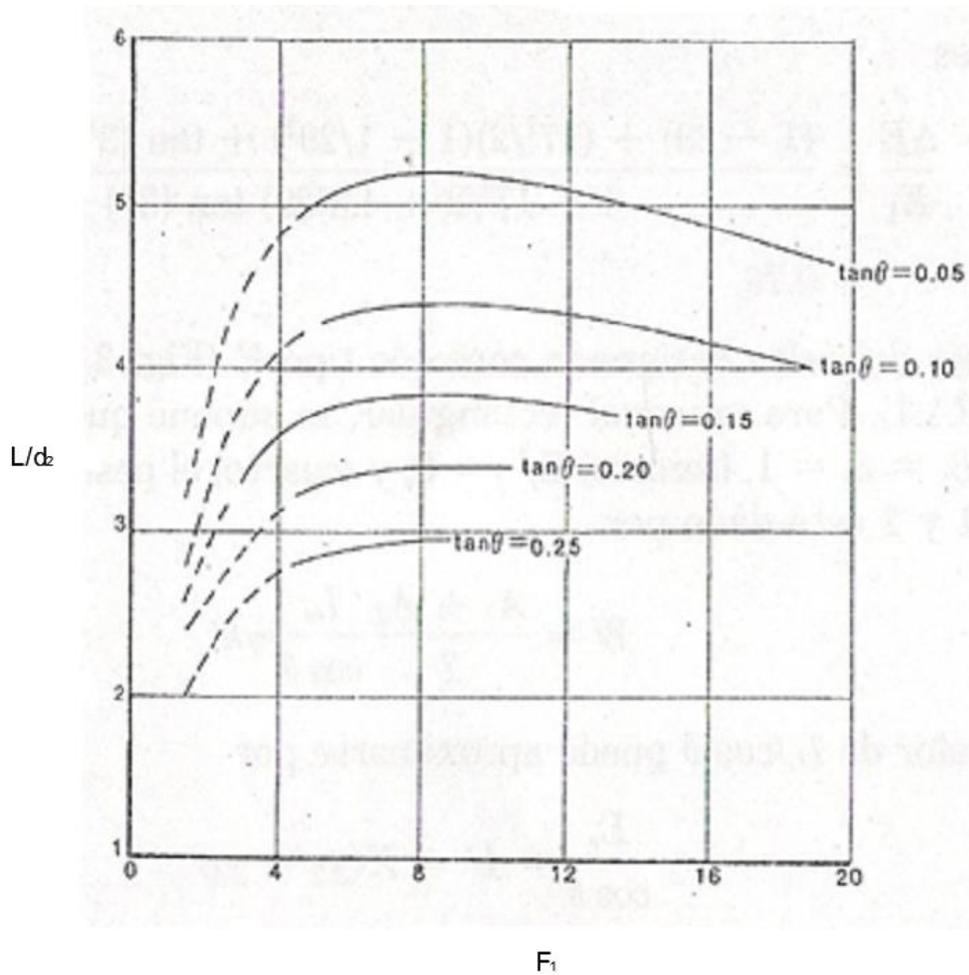


Figura 2-26: Longitud del salto hidráulico en canales con pendiente tipos B, C y D y con sección rectangular (Peterka, 1963) (tomada de French, 1985).

La pérdida de energía para el salto tipo A puede estimarse a partir de las ecuaciones planteadas para un canal horizontal (Ecuación 2-36). Para los tipos de saltos C y D, Bradley y Peterka (1957) proponen la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{\left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)\right] + \frac{F_1^2}{2} \left\{1 - \frac{1}{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2}\right\} + \left(\frac{Ld_t}{d_t d_1}\right) \tan \theta}{1 + \left(\frac{F_1^2}{2}\right) + \left(\frac{Ld_t}{d_t d_1}\right) \tan \theta}$$

(2-60)

En general la anterior expresión no puede utilizarse para valores de $F_1 < 4$, ya que en estos valores la información acerca de la relación (L/y_2) es escasa y la relación $(\Delta E/E_1)$ es muy variable.

Recientemente investigadores como Gunal & Naryanan (1996) y Ohtsu & Yasuda (1991), han realizado algunos experimentos con el fin de desarrollar expresiones gráficas para la relación entre profundidades conjugadas y la longitud de remolino turbulento del resalto hidráulico tipo D; estos datos se presentan en el capítulo 4 de este documento, junto con el análisis de los resultados obtenidos en la investigación.

En resumen se conocen para el resalto hidráulico con pendiente positiva y sección transversal rectangular, las siguientes relaciones gráficas u expresiones matemáticas entre parámetros descriptivos:

Tipo de Resalto	Profundidades Conjugada	Longitud del resalto	Disipación de Energía
A	Expresión matemática (Ecuación 2-36)-Bélanger	-	Expresión matemática (Ecuación 2-37 y 2-38).
B	Solución Gráfica (Fig 2-25)-Bradley & Peterka	Solución Gráfica (Fig 2-26)-Bradley & Peterka	-
C	Expresión matemática (Ecuación 2-55)-Kindsvaster	Solución Gráfica (Fig 2-26)-Bradley & Peterka	Expresión matemática (Ecuación 2-60)-Bradley & Peterka
D	Expresión matemática (Ecuación 2-55) - Kindsvaster	Solución Gráfica (Fig 2-26)-Bradley & Peterka	Expresión matemática (Ecuación 2-60)-Bradley & Peterka
E	-	-	-
F	-	-	-

Tabla 2-1: Resumen Relaciones gráficas y matemáticas disponibles para el resalto hidráulico en canales con pendiente y sección rectangular.

3. DEDUCCIÓN DE RELACIONES MATEMÁTICAS PARA RESALTOS HIDRÁULICOS EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

En el presente capítulo se muestra el procedimiento matemático desarrollado por el autor de presente trabajo, para deducir las relaciones matemáticas que describen el comportamiento de los resaltos hidráulicos tipo A, B, C y D-E, que se originan en canales con pendiente mayor a cero y con sección transversal rectangular. Se advierte que para que se produzcan estos resaltos, es requisito indispensable que el canal presente un cambio de inclinación, de tal manera que aguas abajo se tenga un tramo de muy baja pendiente (aproximadamente horizontal).

3.1 DEDUCCIÓN DE RELACIONES MATEMÁTICAS PARA EL RESALTO TIPO A

El resalto hidráulico Tipo A es el que inicia al final del canal con pendiente y se desarrolla sobre el canal de pendiente suave, con lo cual éste puede ser asimilado como un resalto en un canal sin inclinación (pendiente horizontal).

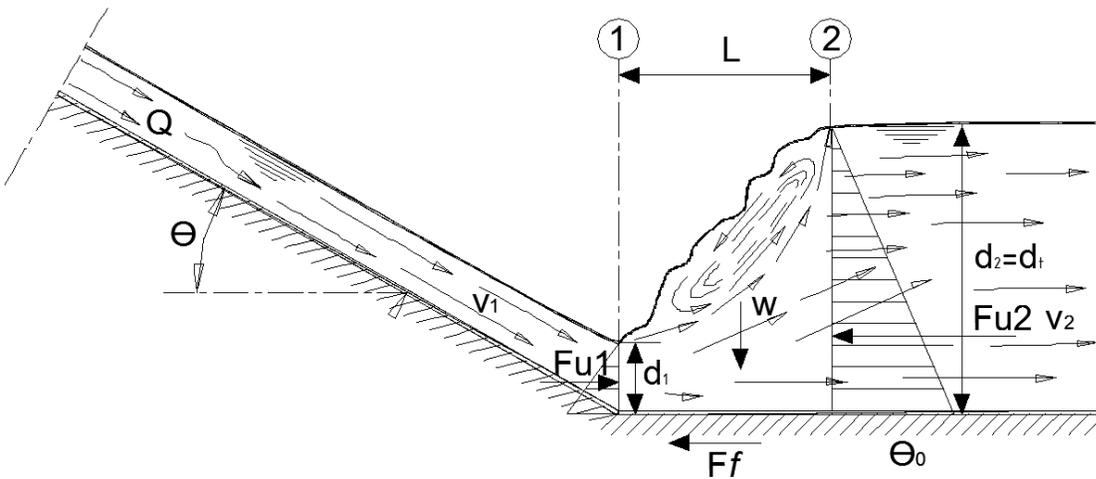


Figura 3-1: Diagrama de fuerzas resalto hidráulico tipo A

3.1.1 Relación profundidad inicial de flujo - profundidad final de flujo del resalto (d_2/d_1) (profundidades conjugadas)

En general, el fenómeno del resalto hidráulico es tratado teóricamente por medio del principio de conservación de momentum, ya que el principio de conservación de energía no proporciona un medio adecuado, debido a que se desconoce la pérdida de energía asociada al resalto (Sotelo, 2002).

Al aplicar el principio de cantidad de movimiento o momentum entre las secciones 1 y 2 del resalto hidráulico tipo A (ver figura 3-1), se tiene:

$$Fu_1 - Fu_2 + w \sin \theta - F_f = \beta_2 \left(\frac{r}{g} \right) Q v_2 - \beta_1 \left(\frac{r}{g} \right) Q v_1$$

(3-1)

Definiendo cada término para el resalto hidráulico tipo A:

$$Fu_1 = \frac{1}{2} r d_1 d_1 b = \frac{1}{2} r d_1^2 b$$

(3-2)

$$Fu_2 = \frac{1}{2} r d_2 d_2 b = \frac{1}{2} r d_2^2 b$$

(3-3)

Las pérdidas por fricción se asumen nulas, ya que el fenómeno ocurre en un tramo corto, siendo éstas insignificantes con respecto a las pérdidas por turbulencia que genera el resalto, por lo tanto:

$$F_f \cong 0$$

(3-4)

Suponiendo el coeficiente de Boussinesq igual a la unidad, por ser un tramo corto en el que se desarrolla el fenómeno y al considerar uniforme la distribución de velocidad en las secciones 1 y 2, se tiene:

$$\beta = 1$$

(3-5)

Reemplazando las ecuaciones (3-2), (3-3), (3-4) y (3-5) en (3-1), se obtiene:

$$\frac{1}{2}rd_1^2b - \frac{1}{2}rd_2^2b - 0 = \frac{r}{g}Qv_2 - \frac{r}{g}Qv_1$$

(3-6)

Dividiendo la ecuación (3-6) por el ancho del canal (b):

$$\frac{1}{2}rd_1^2 - \frac{1}{2}rd_2^2 = \frac{rQ}{gb}v_2 - \frac{rQ}{gb}v_1$$

(3-7)

El caudal unitario se define de la siguiente manera:

$$\frac{Q}{b} = q$$

(3-8)

Reemplazando la ecuación (3-8) en la ecuación (3-7):

$$\frac{1}{2}rd_1^2 - \frac{1}{2}rd_2^2 = \frac{r}{g}q(v_2 - v_1)$$

(3-9)

Multiplicando la ecuación (3-9) por el factor $2/\gamma$, se obtiene:

$$d_1^2 - d_2^2 = \frac{2}{g}q(v_2 - v_1)$$

(3-10)

Por el principio de continuidad:

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow v_1 b d_1 = v_2 b d_2$$

$$v_2 = \frac{v_1 b d_1}{b d_2} = \frac{v_1 d_1}{d_2}$$

(3-11)

El caudal unitario se puede expresar para la sección 1, como:

$$q = v_1 d_1$$

(3-12)

Reemplazando las ecuaciones (3-11) y (3-12) en la ecuación (3-10):

$$d_1^2 - d_2^2 = \frac{2}{g}v_1^2 d_1 \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right)$$

(3-13)

El número de Froude se define de la siguiente manera:

$$F_1^2 = \frac{v_1^2}{gD_1}$$

(3-14)

La profundidad hidráulica para un canal rectangular es:

$$D = \frac{A}{T} = \frac{b d_1}{b} = d_1$$

(3-15)

Reemplazando la ecuación (3-15) en la ecuación (3-14), se obtiene:

$$F_1^2 = \frac{v_1^2}{gd_1} \rightarrow v_1^2 = F_1^2 gd_1$$

$$(3-16)$$

Reemplazando la ecuación (3-16) en la ecuación (3-13) y realizando algunas manipulaciones algebraicas:

$$d_1^2 - d_2^2 = \frac{2}{g} F_1^2 g d_1^2 \left(\frac{d_1 - d_2}{d_2} \right)$$

$$\frac{(d_1 - d_2)(d_1 + d_2)}{(d_1 - d_2)} = 2F_1^2 \frac{d_1^2}{d_2}$$

$$d_2(d_1 + d_2) = 2F_1^2 d_1^2$$

$$\frac{d_2 d_1 + d_2^2}{d_1^2} = 2F_1^2$$

$$\frac{d_2}{d_1} + \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 = 2F_1^2$$

$$\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{d_1} \right) - 2F_1^2 = 0$$

$$(3-17)$$

Aplicando la solución para una ecuación cuadrática a la Ecuación (3-17):

$$\frac{d_2}{d_{1(1,2)}} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$a = 1; b = 1; c = -2F_1^2$$

$$\frac{d_2}{d_{1(1,2)}} = \frac{-1 \pm \sqrt{(1^2) - 4(1)(-2F_1^2)}}{2(1)}$$

$$\frac{d_2}{d_{1(1,2)}} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 8F_1^2}}{2}$$

La solución No.1 es:

$$\frac{d_2}{d_{1(1)}} = \frac{-1 - \sqrt{1 + 8F_1^2}}{2}$$

Con lo que daría una relación de profundidades conjugadas (profundidad inicial y secunente) negativa, lo que es físicamente imposible, por lo tanto esta solución se descarta.

La solución válida es la No.2, la cual es la llamada solución de Belanger (1928) para canales sin pendiente y con sección rectangular (ver sección 2.2.1):

$$\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

(3-18)

3.1.2 Relación longitud de remolino turbulento - profundidad inicial de flujo del resalto (L/d_1)

De acuerdo con Silvester, Woyciki, Smetana & Tizon, Sarma & Newman, entre otros, se llega a que la relación entre la longitud de remolino turbulento del resalto (L) y la profundidad de flujo en la sección 1 (d_1), respecto al número de Froude en la sección 1, es una función lineal, de la siguiente forma:

$$\frac{L}{d_1} = mF_1 + c$$

(3-19)

Donde m y c son contantes ajustadas experimentalmente.

3.1.3 Relación altura - energía inicial de flujo del resalto (h/E_1)

La relación altura de resalto con respecto a la energía en la sección 1, se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{h}{E_1} = \frac{d_2 - d_1}{E_1}$$

(3-20)

En la sección 3.1.1 se demostró que la relación entre las profundidades conjugadas se rige por la siguiente expresión:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

$$d_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) d_1$$

(3-21)

Ahora, la energía en la sección 1 es:

$$E_1 = d_1 + \frac{v_1^2}{2g}$$

(3-22)

El número de Froude en la sección 1 se expresa, según la ecuación (3-16):

$$F_1^2 = \frac{v_1^2}{gd_1} \rightarrow v_1^2 = F_1^2 gd_1$$

(3-23)

Reemplazando la ecuación (3-23) en la ecuación (3-22):

$$E_1 = d_1 + \frac{F_1^2 gd_1}{2g} \rightarrow E_1 = d_1 + \frac{F_1^2 d_1}{2} \rightarrow E_1 = d_1 \left(1 + \frac{F_1^2}{2} \right)$$

(3-24)

Reemplazando la ecuación (3-24) y la ecuación (3-21) en la ecuación (3-20), y realizando algunas manipulaciones algebraicas:

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) d_1 - d_1}{d_1 \left(1 + \frac{F_1^2}{2} \right)}$$

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - \frac{1}{2} - 1 \right)}{\frac{2 + F_1^2}{2}}$$

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3}{2 + F_1^2}$$

(3-25)

3.1.4 Disipación de energía del resalto (ΔE)

La pérdida o disipación de energía se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

(3-26)

Teniendo en cuenta que la energía en la sección 1 y sección 2 respectivamente, es:

$$E_1 = d_1 + \frac{v_1^2}{2g}$$

(3-27)

$$E_2 = d_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

(3-28)

Reemplazando la ecuación (3-27) y la ecuación (3-28) en la ecuación (3-26):

$$\Delta E = d_1 + \frac{v_1^2}{2g} - d_2 - \frac{v_2^2}{2g}$$

(3-29)

El caudal que circula en el resalto es:

$$Q = v_1 A_1$$

$$Q = V_1 b d_1 \rightarrow \frac{Q}{b} = V_1 d_1 \rightarrow q = v_1 y_1 \rightarrow v_1 = \frac{q}{d_1}$$

(3-30)

De manera equivalente al caudal en la sección 1, se puede deducir para la sección 2:

$$q = v_2 d_2 \rightarrow v_2 = \frac{q}{d_2}$$

(3-31)

El número de Froude para la sección 1, según la ecuación (3-16) es:

$$F^2 = \frac{v_1^2}{gd_1}$$

(3-32)

Reemplazando la ecuación (3-30) en la ecuación (3-32):

$$F^2 = \frac{q^2}{gd_1^3} \rightarrow q^2 = F^2 g d_1^3$$

(3-33)

Ahora se tiene que la relación entre profundidades conjugadas, según la ecuación (3-18), es:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

(3-34)

Realizando algunas manipulaciones algebraicas de la ecuación (3-34), se tiene:

$$\begin{aligned} \left(2 \frac{d_2}{d_1} + 1 \right)^2 &= \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} \right)^2 \\ 4 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + 4 \left(\frac{d_2}{d_1} \right) + 1 &= 1 + 8F_1^2 \\ 4 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + 4 \left(\frac{d_2}{d_1} \right) &= 8F_1^2 \end{aligned}$$

(3-35)

Reemplazando la ecuación (3-33) en la ecuación (3-35), se obtiene:

$$\begin{aligned} 4 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + 4 \left(\frac{d_2}{d_1} \right) &= 8 \frac{q^2}{gd_1^3} \\ \frac{g}{2} \left(\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + \frac{d_2}{d_1} \right) &= \frac{q^2}{d_1^3} \\ q^2 &= \frac{g}{2} (d_2^2 d_1 + d_2 d_1^2) \end{aligned}$$

$$q^2 = \frac{g}{2}(d_2 + d_1)d_2d_1$$

$$(3-36)$$

Reemplazando las ecuaciones (3-30) y (3-31) en la ecuación (3-29):

$$\Delta E = d_1 + \frac{1}{2g} \frac{q^2}{d_1^2} - d_2 - \frac{1}{2g} \frac{q^2}{d_2^2}$$

$$(3-37)$$

Ahora reemplazando la ecuación (3-36) en la ecuación (3-37) y realizando algunas operaciones algebraicas:

$$\Delta E = d_1 + \frac{1}{2g} \left(\frac{g(d_2 + d_1)(d_2d_1)}{d_1^2} \right) - d_2 - \frac{1}{2g} \left(\frac{g(d_2 + d_1)(d_2d_1)}{d_2^2} \right)$$

$$\Delta E = d_1 + \frac{1}{4} \frac{(d_2 + d_1)d_2}{d_1} - d_2 - \frac{1}{4} \frac{(d_2 + d_1)d_1}{d_2}$$

$$\Delta E = (d_1 - d_2) + \frac{1}{4}(d_2 + d_1) \left(\frac{d_2}{d_1} - \frac{d_1}{d_2} \right)$$

$$\Delta E = (d_1 - d_2) + \frac{1}{4}(d_2 + d_1) - \frac{(d_2^2 - d_1^2)}{d_1d_2}$$

$$\Delta E = (d_1 - d_2) + \frac{1}{4}(d_2 + d_1)^2 \frac{(d_2 - d_1)}{d_1d_2}$$

$$\Delta E = (d_2 - d_1) \left(\frac{(d_2 + d_1)^2}{4d_1d_2} - 1 \right)$$

$$\Delta E = (d_2 - d_1) \left(\frac{d_2^2 + 2d_1d_2 + d_1^2 - 4d_1d_2}{4d_1d_2} \right)$$

$$\Delta E = \frac{(d_2 - d_1)(d_2 - d_1)^2}{4d_1d_2}$$

$$\Delta E = \frac{(d_2 - d_1)^3}{4d_1d_2}$$

$$(3-38)$$

3.1.5 Relación energía final de flujo - energía inicial de flujo del resalto (E_2/E_1) (Eficiencia del resalto)

La eficiencia del resalto se expresa como el cociente entre la energía en la sección 2 y la energía en la sección 1:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{d_2 + \frac{V_2^2}{2g}}{d_1 + \frac{v_1^2}{2g}}$$

(3-39)

El caudal unitario se puede expresar de la siguiente manera, según las ecuaciones (3-30) y (3-31):

$$q = v_1 y_1$$

(3-40)

$$q = v_2 d_2$$

(3-41)

Reemplazando las ecuaciones (3-40) y (3-41) en la ecuación (3-39):

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{d_2 + \frac{q^2}{d_2^2(2g)}}{d_1 + \frac{q^2}{d_1^2(2g)}}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{d_2^3(2g) + q^2}{d_2^2(2g)}}{\frac{d_1^3(2g) + q^2}{d_1^2(2g)}}$$

(3-42)

De acuerdo a la ecuación (3-33), el caudal unitario se puede expresar de la siguiente manera:

$$q^2 = F_1^2 d_1^3 g$$

(3-43)

Reemplazando la ecuación (3-43) en la ecuación (3-42), se obtiene:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(d_2^3(2g) + q^2)(d_1^3(2g))}{(d_1^3(2g) + q^2)(d_2^3(2g))}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{d_2^3 d_1^2 (2g) + F_1^2 d_1^5 g}{d_1^3 d_2^2 (2g) + F_1^2 d_1^3 d_2^2 g}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{2d_2^3 d_1^2 + F_1^2 d_1^5}{2d_1^3 d_2^2 + F_1^2 d_1^3 d_2^2}$$

$$(3-44)$$

Teniendo en cuenta que la relación entre profundidades conjugadas, según la ecuación (3-18), es:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

$$(3-45)$$

Ahora desarrollando cada término de la ecuación (3-44) y teniendo en cuenta la Ecuación (3-45), se tiene:

$$2d_2^3 d_1^2 = 2 \left(\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) d_1 \right)^3 d_1^2$$

$$2d_2^3 d_1^2 = 2 \left(\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \right)^3 d_1^5$$

$$2d_2^3 d_1^2 = \frac{1}{4} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^3 d_1^5$$

$$(3-46)$$

$$2d_1^3 d_2^2 = 2d_1^3 \left(\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) d_1 \right)^2$$

$$2d_1^3 d_2^2 = \frac{1}{2} d_1^5 \left(\sqrt{1 + F_1^2} - 1 \right)^2$$

$$(3-47)$$

$$F_1^2 d_1^3 d_2^2 = F_1^2 d_1^3 \left(\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) d_1 \right)^2$$

$$F_1^2 d_1^3 d_2^2 = \frac{F_1^2 d_1^5}{4} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^2$$

(3-48)

Reemplazando las Ecuaciones (3-46), (3-47) y (3-48) en la ecuación (3-44), se obtiene:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{1}{4} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^3 d_1^5 + F_1^2 d_1^5}{\frac{1}{2} d_1^5 \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^2 + \frac{F_1^2 d_1^5}{4} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^2}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{1}{4} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^3 + F_1^2}{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^2 + \frac{F_1^2}{4} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^2}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^3 + 4F_1^2}{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^2 (2 + F_1^2)}$$

(3-49)

3.1.6 Relación profundidad inicial de flujo - energía inicial de flujo del resalto (y_1/E_1)

La relación entre la profundidad del flujo inicial y la energía inicial se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{d_1}{d_1 + \frac{v^2}{2g}}$$

(3-50)

El caudal unitario se puede expresar de la siguiente manera, según la ecuación (3-12):

$$q = v_1 d_1$$

(3-51)

Reemplazando la ecuación (3-51) en la ecuación (3-50):

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{d_1}{d_1 + \frac{q^2}{d_1^2(2g)}} \quad (3-52)$$

El caudal unitario se puede expresar de la siguiente forma, según la Ecuación (3-33):

$$q^2 = F_1^2 g d_1^3 \quad (3-53)$$

Reemplazando la ecuación (3-53) en la Ecuación (3-52):

$$\begin{aligned} \frac{y_1}{E_1} &= \frac{d_1^3(2g)}{d_1^3(2g) + F_1^2 g d_1^3} \\ \frac{y_1}{E_1} &= \frac{2}{2 + F_1^2} \end{aligned} \quad (3-54)$$

3.1.7 Relación profundidad final de flujo - energía inicial de flujo del resalto (y_2/E_1)

La relación entre la profundidad del flujo final y la energía inicial, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{d_2}{d_1 + \frac{v_1^2}{2g}} \quad (3-55)$$

El caudal unitario se puede expresar de la siguiente manera, según la ecuación (3-12):

$$q = v_1 d_1 \quad (3-56)$$

Reemplazando la ecuación (3-56) en la ecuación (3-55):

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{d_2}{d_1 + \frac{q^2}{d_1^2 2g}}$$

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{d_2}{\frac{d_1^3(2g) + q^2}{d_1^2(2g)}}$$

(3-57)

El caudal unitario también se puede expresar de la siguiente forma, según la ecuación (3-33):

$$q^2 = F_1^2 g d_1^3$$

(3-58)

Reemplazando la ecuación (3-58) en la ecuación (3-57):

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{d_2 d_1^2 (2g)}{d_1^3 (2g) + F_1^2 g d_1^3}$$

(3-59)

Ahora se tiene que la relación entre profundidades conjugadas, según la ecuación (3-18), es:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

(3-60)

Reemplazando la ecuación (3-60) en la ecuación (3-59):

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{1/2 \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) d_1^3 (2g)}{d_1^3 (2g) + F_1^2 g d_1^3}$$

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)}{2 + F_1^2}$$

(3-61)

3.1.8 Relación altura - profundidad inicial de flujo del resalto (h/y_1)

La relación altura de resalto-profundidad inicial de flujo, está dada de la siguiente manera:

$$\frac{h}{y_1} = \frac{d_2 - d_1}{d_1}$$

(3-62)

Se tiene que la relación entre profundidades conjugadas, según la ecuación (3.18), es:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

(3-63)

Reemplazando la ecuación (3-63) en la ecuación (3-62), se llega:

$$\frac{h}{y_1} = \frac{1/2 \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) d_1 - d_1}{d_1}$$

$$\frac{h}{y_1} = 1/2 \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) - 1$$

$$\frac{h}{y_1} = 1/2 \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1/2 - 1$$

$$\frac{h}{y_1} = 1/2 \sqrt{1 + 8F_1^2} - 3/2$$

(3-64)

3.1.9 Relación pérdida de energía - energía inicial de flujo del resalto ($\Delta E/E_1$)

La relación pérdida de energía-energía inicial del flujo, se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1}$$

(3-65)

Para la eficiencia del resalto se demostró la siguiente relación (ecuación (3-49)):

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 (2 + F_1^2)}$$

(3-66)

Reemplazando la ecuación (3-66) en la ecuación (3-65):

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 (2 + F_1^2)}$$

(3-67)

3.2 DEDUCCIÓN DE RELACIONES MATEMÁTICAS PARA LOS RESALTOS TIPO B, C Y D-E

Los resaltos hidráulicos B, C y D-E, se forman de la siguiente manera:

- Resalto hidráulico Tipo B: Se forma parcialmente en el tramo de canal con gran pendiente y en el tramo de canal con pendiente suave, es decir, sobre el punto de cambio de inclinación.
- Resalto hidráulico Tipo C: Se desarrolla en el canal de mayor pendiente, finalizando justo en el punto de cambio de inclinación.
- Resalto hidráulico Tipo D-E: Los resaltos tipo D y E se forman en el canal de gran pendiente antes del punto de cambio de inclinación; no obstante, el resalto tipo E es un caso teórico y difícil de encontrar en la práctica, por lo que éste sólo se puede formar en un canal de alta pendiente cuya longitud sea extremadamente larga, de tal manera que se den dos condiciones hidráulicas simultáneas: La

existencia de un obstáculo en el fondo que genere el resalto hidráulico y la inexistencia de un control aguas abajo del mismo, para que el flujo se mantenga subcrítico y uniforme. En el presente trabajo se unen estos dos tipos de resalto denominándolos como salto D-E, ya que en principio son muy similares, aunque difieran aguas abajo, y por lo tanto, para su descripción allí se consideren diferentes variables; así, para el resalto tipo E, la variable que se considera en la relación de profundidades conjugadas, es la profundidad aguas abajo del resalto (d_2 igual a d_t), mientras que para el resalto tipo D, la variable que se considera es la profundidad aguas abajo resultante de la existencia de un control hidráulico (d_t). Obsérvese que d_2 es diferente de d_t , como se muestra en la figura 3-4.

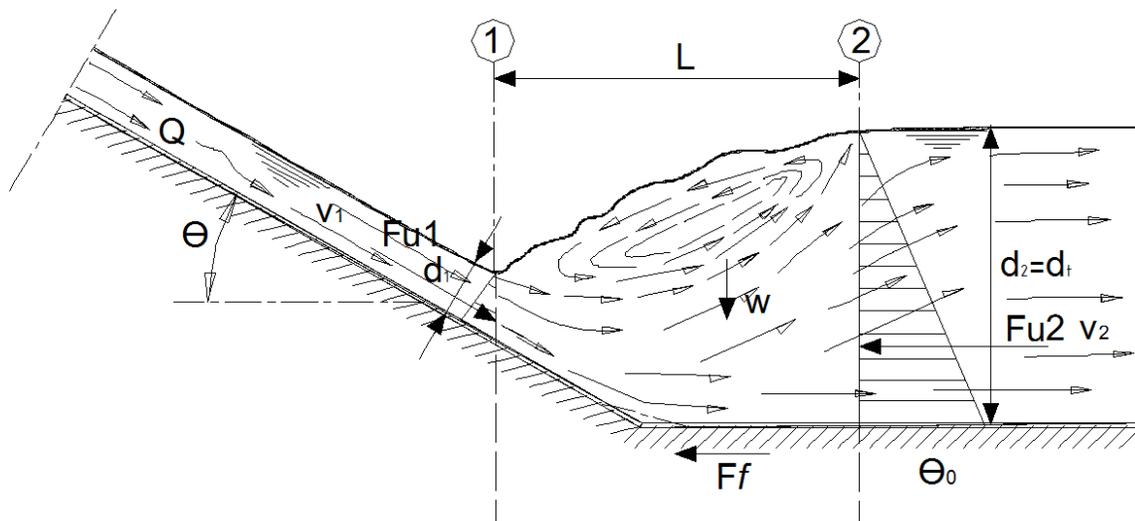


Figura 3-2: Diagrama de fuerzas resalto hidráulico tipo B.

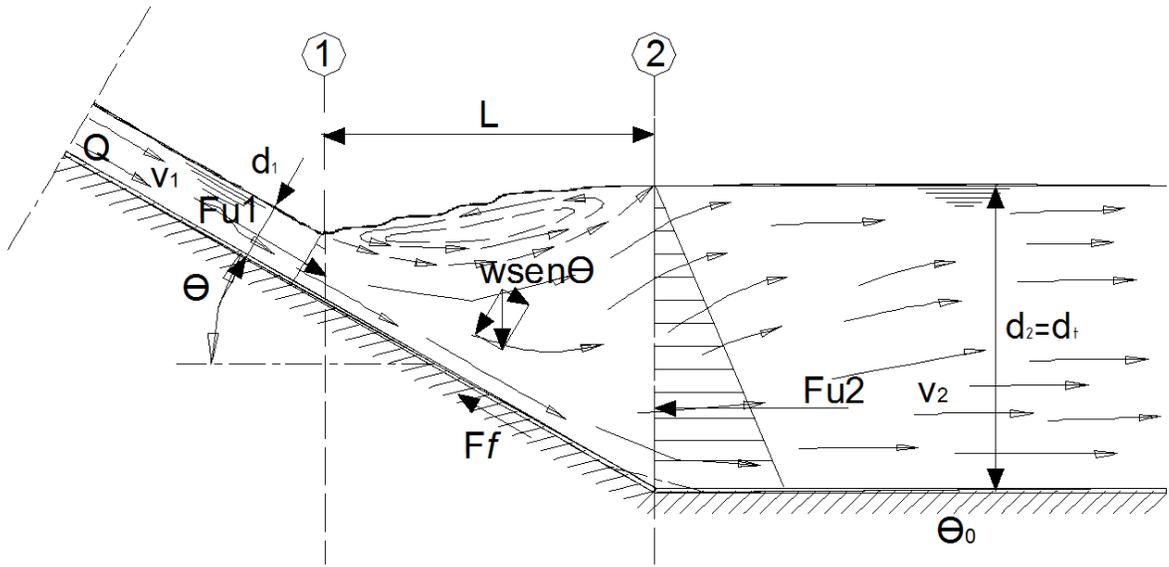


Figura 3-3: Diagrama de fuerzas resalto hidráulico tipo C.

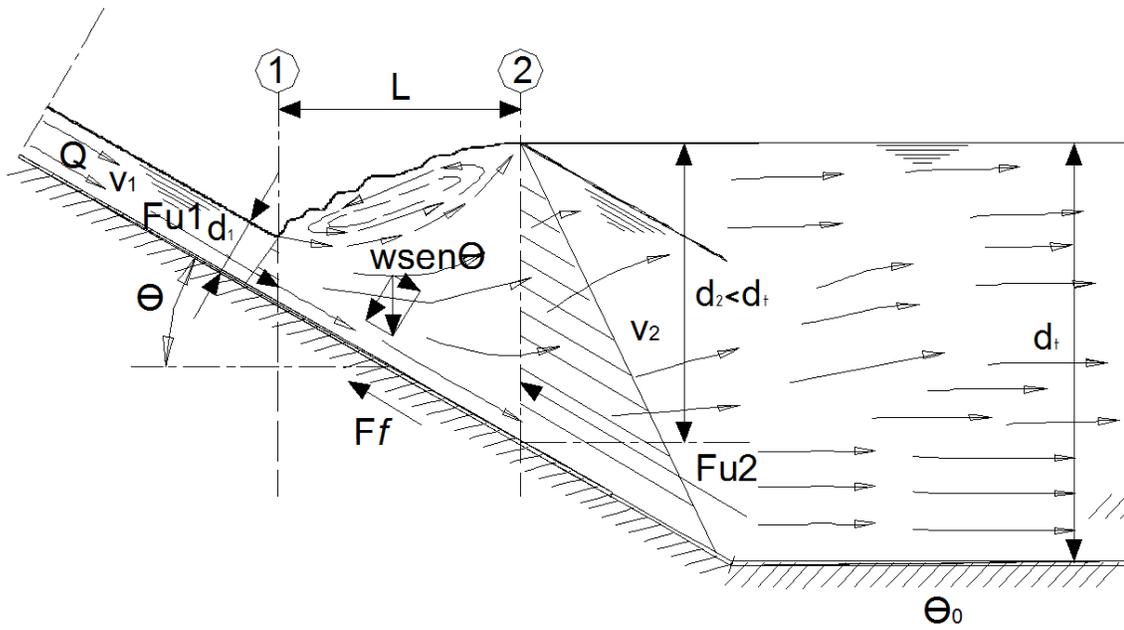


Figura 3-4: Diagrama de fuerzas resalto hidráulico tipo D-E.

3.2.1 Relación profundidad inicial de flujo - profundidad final de flujo del resalto (d_2/d_1) (profundidades conjugadas)

Tal como se indicó en la sección 3.1.1, el fenómeno del resalto hidráulico es tratado teóricamente por medio del principio de conservación de Momentum.

Al aplicar el principio de cantidad de movimiento o momentum entre las secciones 1 y 2 del resalto hidráulico tipo D-E (ver figura 3-4), se tiene:

$$Fu_1 - Fu_2 - F_f - W \sin \theta = \frac{r}{g} Q(v_2 - v_1)$$

(3-68)

Definiendo cada término para el resalto hidráulico tipo D-E:

$$Fu_1 = \frac{1}{2} r(d_1)(d_1 \cos \theta)b = \frac{1}{2} rbd_1^2 \cos \theta$$

(3-69)

$$Fu_2 = \frac{1}{2} r(d_2)(d_2 \cos \theta)b = \frac{1}{2} rbd_2^2 \cos \theta$$

(3-70)

Las pérdidas por fricción se asumen nulas, ya que el fenómeno ocurre en un tramo corto, siendo estas insignificantes con respecto a las pérdidas por turbulencia que genera el resalto, por lo tanto:

$$F_f \cong 0$$

(3-71)

Suponiendo el coeficiente de Boussinesq igual a la unidad, por ser un tramo corto en el que se desarrolla el fenómeno y al considerar uniforme la distribución de velocidad en las secciones 1 y 2, se tiene:

$$\beta = 1$$

(3-72)

El peso del volumen de agua en el resalto se cuantifica aproximadamente, suponiendo un perfil trapezoidal, así:

$$W = rL \frac{(d_1 + d_2)}{2} bk \quad (3-73)$$

Donde k , es un coeficiente que ajusta la discrepancia entre el perfil real del resalto y la forma trapezoidal supuesta, además de la variación del peso específico del cuerpo de agua (volumen de control) dentro del resalto por incorporación de aire.

Reemplazando las ecuaciones (3-69), (3-70), (3-71), (3-72) y (3-73) en la ecuación (3-68):

$$\frac{1}{2} r b d_1^2 \cos \theta - \frac{1}{2} r b d_2^2 \cos \theta - 0 + \frac{krL}{2} (d_1 + d_2) b \sin \theta = \frac{r}{g} Q v_2 - \frac{r}{g} Q v_1 \quad (3-74)$$

Dividiendo por ancho del canal (b) la ecuación (3-74):

$$\frac{1}{2} r d_1^2 \cos \theta - \frac{1}{2} r d_2^2 \cos \theta - 0 + \frac{krL}{2} (d_1 + d_2) \sin \theta = \frac{r}{g} Q v_2 - \frac{r}{g} Q v_1 \quad (3-75)$$

El caudal por unidad de ancho se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{Q}{b} = q \quad (3-76)$$

Reemplazando la ecuación (3-76) en la ecuación (3-75):

$$\frac{1}{2} r d_1^2 \cos \theta - \frac{1}{2} r d_2^2 \cos \theta - 0 + \frac{krL}{2} (d_1 + d_2) \sin \theta = \frac{r}{g} q v_2 - \frac{r}{g} q v_1 \quad (3-77)$$

Por el principio de continuidad:

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow v_1 b d_1 = v_2 b d_2$$

$$v_2 = \frac{v_1 b d_1}{b d_2} = \frac{v_1 d_1}{d_2} \quad (3-78)$$

Multiplicando la ecuación (3-77) por el factor $\frac{2}{\gamma}$ y reemplazando la ecuación (3-78) en la ecuación (3-77):

$$d_1^2 \cos \theta - d_2^2 \cos \theta + kL(d_1 + d_2) \sin \theta = \frac{2}{g} q v_1 \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right)$$

(3-79)

El caudal unitario se puede expresar para la sección 1:

$$q = v_1 d_1$$

(3-80)

Reemplazando la ecuación (3-80) en la ecuación (3-79):

$$d_1^2 \cos \theta - d_2^2 \cos \theta + kL(d_1 + d_2) \sin \theta = \frac{2}{g} v_1^2 d_1 \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right)$$

(3-81)

De la ecuación (2-18), se tiene para el número de Froude en canales con inclinación:

$$F_1^2 = \frac{v^2}{\frac{gD \cos \theta}{\alpha}}$$

(3-82)

La profundidad hidráulica para un canal rectangular es:

$$D = \frac{A}{T} = \frac{b d_1}{b} = d_1$$

(3-83)

Suponiendo un coeficiente de coriolis (α) igual a la unidad y reemplazando la ecuación (3-83) en la ecuación (3-82):

$$F_1^2 = \frac{V^2}{g d_1 \cos \theta} \Rightarrow v^2 = F_1^2 g d_1 \cos \theta$$

(3-84)

Reemplazando la ecuación (3-84) en la ecuación (3-81), y realizando algunas manipulaciones algebraicas:

$$\begin{aligned}
 d_1^2 \cos \theta - d_2^2 \cos \theta + kL(d_1 + d_2) \sin \theta &= \frac{2}{g} F_1^2 g d_1 \cos \theta d_1 \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right) \\
 d_1^2 \cos \theta - d_2^2 \cos \theta + kL(d_1 + d_2) \sin \theta &= 2F_1^2 \frac{d_1^2}{d_2} \cos \theta (d_1 - d_2) \\
 \frac{(d_1^2 - d_2^2) \cos \theta + kL(d_1 + d_2) \sin \theta}{(d_1 - d_2)} &= 2F_1^2 \frac{d_1^2}{d_2} \cos \theta \\
 \frac{(d_1 - d_2)(d_1 + d_2) \cos \theta}{(d_1 - d_2)} + \frac{kL(d_1 + d_2) \sin \theta}{(d_1 - d_2)} &= 2F_1^2 \frac{d_1^2}{d_2} \cos \theta \\
 (d_1 + d_2) \cos \theta + \frac{kL(d_1 + d_2) \sin \theta}{(d_1 - d_2)} &= 2F_1^2 \frac{d_1^2}{d_2} \cos \theta \\
 (d_1 + d_2) \left(\cos \theta - \frac{kL \sin \theta}{(d_2 - d_1)} \right) &= 2F_1^2 \frac{d_1^2}{d_2} \cos \theta \\
 \frac{d_2(d_1 + d_2)}{2d_1^2} &= \frac{F_1^2 \cos \theta}{\cos \theta - \frac{kL \sin \theta}{(d_2 - d_1)}}
 \end{aligned}$$

(3-85)

De la ecuación (3-85), se define el siguiente término:

$$G^2 = \Gamma F_1^2$$

(3-86)

Así:

$$\Gamma = \frac{\cos \theta}{\cos \theta - \frac{kL \sin \theta}{(d_2 - d_1)}}$$

(3-87)

Donde la función (Γ), es calibrada o ajustada experimentalmente.

Reemplazando la ecuación (3-86) en la ecuación (3-85):

$$\frac{d_2(d_1 + d_2)}{2d_1^2} = G^2$$

$$\frac{d_2 d_1 + d_2^2}{d_1^2} = 2G^2 \rightarrow \left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = 2G^2$$

$$\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right) - 2G^2 = 0$$

(3-88)

Aplicando la solución para una ecuación cuadrática a la ecuación (3-88):

$$\frac{d_2}{d_{1(1,2)}} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$a = 1; b = 1; c = -2G^2$$

$$\frac{d_2}{d_{1(1,2)}} = \frac{-1 \pm \sqrt{1^2 - 4(1)(-2G^2)}}{2(1)}$$

$$\frac{d_2}{d_{1(1,2)}} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 8G^2}}{2}$$

La solución No.1 es:

$$\frac{d_2}{d_{1(1)}} = \frac{-1 - \sqrt{1 + 8G^2}}{2}$$

Con lo que daría una relación de profundidad inicial y seciente negativa, lo que es físicamente imposible, por lo tanto esta solución se descarta.

La solución válida es la No.2

$$\frac{d_2}{d_1} = 1/2 \left(-1 + \sqrt{1 + 8G^2} \right)$$

(3-89)

La anterior ecuación es válida para el resalto tipo D-E.

Teniendo en cuenta que la profundidad de flujo de la sección (d), se relaciona con la profundidad de flujo (y) de la siguiente manera:

$$y_1 = d_1 \cos \theta$$

$$y_2 = d_2 \cos \theta$$

$$(3-90)$$

Entonces la ecuación (3-89), se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1/2 \left(-1 + \sqrt{1 + 8G^2} \right)$$

$$(3-91)$$

Ante la dificultad de generar una ecuación explícita para las profundidades conjugadas del resalto tipo B y C, se realiza la siguiente consideración sobre la ecuación (3-90), con el fin de que ésta sea aplicable a dichos resaltos (ver figura 3-2 y 3-3):

$$y_1 = d_1 \cos \theta$$

$$(3-92)$$

$$y_2 = d_2$$

$$(3-93)$$

Con lo cual la relación de profundidades conjugadas para el resalto tipo B y C, se expresarían de la siguiente manera:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{\cos \theta}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8G^2} \right)$$

$$(3-94)$$

Y el coeficiente k presentado anteriormente, ajustaría cualquier discrepancia de esta suposición teórica con la realidad.

3.2.2 Relación longitud de remolino turbulento - profundidad inicial de flujo del resalto (L/d_1)

La relación entre la longitud de remolino turbulento del resalto L y la profundidad de flujo en la sección 1 (d_1), con respecto al número de Froude en la sección 1, es una función lineal de la siguiente forma:

$$\frac{L}{d_1} = (m + s\theta)F_1 + t\theta + c$$

(3-95)

Donde θ es el ángulo de inclinación del canal y las constantes m , s , t y c son ajustadas experimentalmente.

3.2.3 Relación altura - energía inicial de flujo del resalto (h/E_1)

La relación altura de resalto con respecto a la energía en la sección 1, se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{h}{E_1} = \frac{d_2 \cos \theta - d_1 \cos \theta}{E_1}$$

(3-96)

En la sección 3.2.1 se demostró que la relación entre las profundidades conjugadas se rige por la siguiente expresión:

$$d_2 = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8G^2} - 1) d_1$$

(3-97)

Ahora, la energía en la sección 1 es:

$$E_1 = z_1 + d_1 \cos \theta + \frac{V_1^2}{2g}$$

(3-98)

La altura con respecto al nivel de referencia se puede expresar como:

$$z_1 = L \tan \theta$$

$$(3-99)$$

Reemplazando la Ecuación (3-99) en la Ecuación (3-98):

$$E_1 = L \tan \theta + d_1 \cos \theta + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$(3-100)$$

El número de Froude en la sección 1 se expresa, según la ecuación (3-82):

$$F_1^2 = \frac{v^2}{\frac{gD \cos \theta}{\alpha}}$$

$$(3-101)$$

Reemplazando la ecuación (3-101) en la ecuación (3-100):

$$E_1 = L \tan \theta + d_1 \cos \theta + \frac{F_1^2 g d_1 \cos \theta}{2g}$$

$$(3-102)$$

Ahora reemplazando ecuación (3-97) y la ecuación (3-102) en la ecuación (3-96), y realizando algunas operaciones algebraicas, se tiene:

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\frac{1}{2}(\sqrt{1+8G^2}-1)d_1 \cos \theta - d_1 \cos \theta}{L \tan \theta + d_1 \cos \theta + \frac{F_1^2 \cos \theta}{2}}$$

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\frac{1}{2}(\sqrt{1+8G^2}-1) - 1}{\frac{L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 1 + \frac{F_1^2}{2}}$$

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8G^2} - 1 - 2}{\frac{2L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2}$$

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8G^2} - 3}{\frac{2L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2}$$

(3-103)

3.2.4 Disipación de energía del resalto (ΔE)

La pérdida o disipación de energía se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

(3-104)

Teniendo en cuenta que la energía en la sección 1 y sección 2 respectivamente, es:

$$E_1 = z_1 + d_1 \cos \theta + \frac{v_1^2}{2g}$$

(3-105)

$$E_2 = z_2 + d_2 \cos \theta + \frac{v_2^2}{2g}$$

(3-106)

Reemplazando ecuación (3-105) y (3-106) en la ecuación (3-104):

$$\Delta E = z_1 + d_1 \cos \theta + \frac{v_1^2}{2g} - z_2 - d_2 \cos \theta - \frac{v_2^2}{2g}$$

(3-107)

Suponiendo:

$$Z_2 = 0$$

(3-108)

y

$$\tan \theta = \frac{z_1}{L} \rightarrow z_1 = L \tan \theta$$

(3-109)

Reemplazando las ecuaciones (3-108) y (3-109) en la Ecuación (3-107):

$$\Delta E = L \tan \theta + d_1 \cos \theta + \frac{v_1^2}{2g} - d_2 \cos \theta - \frac{v_2^2}{2g}$$

(3-110)

En la sección 3.2.1 se demostró que la relación entre las profundidades conjugadas se rige por la siguiente expresión:

$$\frac{d_2}{d_1} = 1/2 (\sqrt{1 + 8G^2} - 1)$$

(3-111)

Realizando algunas operaciones algebraicas:

$$\left(2 \frac{d_2}{d_1} + 1\right)^2 = \left(\sqrt{1 + 8G^2}\right)^2$$

$$4 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 + 4 \frac{d_2}{d_1} = 8G^2$$

(3-112)

De la Ecuación (3-86):

$$G^2 = \Gamma F_1^2$$

(3-113)

De las Ecuaciones (3-80) y (3-84):

$$F_1^2 = \frac{q^2}{gd_1^3 \cos \theta}$$

(3-114)

Remplazando la ecuación (3-113) y (3-114) en la ecuación (3-112) y realizando algunas operaciones algebraicas:

$$4 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + 4 \frac{d_2}{d_1} = 8 \Gamma \frac{q^2}{g d_1^3 \cos \theta}$$

$$\frac{g}{2} \left(\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \right) = \frac{\Gamma q^2}{d_1^3 \cos \theta}$$

$$q^2 = \frac{g}{2\Gamma} \left(\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \right) d_1^3 \cos \theta$$

$$q^2 = \frac{g}{2\Gamma} (d_2^2 d_1 \cos \theta + d_2 d_1^2 \cos \theta)$$

$$q^2 = \frac{g}{2\Gamma} (d_2 + d_1) d_2 d_1 \cos \theta$$

(3-115)

De la ecuación (3-80), se tiene:

$$q = v_1 d_1$$

(3-116)

De manera análoga por el principio de continuidad o conservación de masa, se puede inferir lo siguiente:

$$q = v_2 d_2$$

(3-117)

Reemplazando las ecuaciones (3-116) y (3-117) en la ecuación (3-110), y realizando algunas operaciones algebraicas:

$$\Delta E = L \tan \theta + d_1 \cos \theta + \frac{q^2}{2g d_1^2} - d_2 \cos \theta - \frac{q^2}{2g d_2^2}$$

$$\Delta E = L \tan \theta + d_1 \cos \theta - d_2 \cos \theta + \frac{q^2}{2g d_1^2} - \frac{q^2}{2g d_2^2}$$

$$\Delta E = L \tan \theta + (d_1 - d_2) \cos \theta + \left(\frac{1}{d_1^2} - \frac{1}{d_2^2} \right) \frac{q^2}{2g}$$

$$\Delta E = L \tan \theta + (d_1 - d_2) \cos \theta + \left(\frac{d_2^2 - d_1^2}{d_1^2 d_2^2} \right) \frac{q^2}{2g}$$

(3-118)

Remplazando la ecuación (3-115) en la ecuación (3-118):

$$\Delta E = L \tan \theta - (d_2 - d_1) \cos \theta + \left(\frac{d_2^2 - d_1^2}{d_1^2 d_2^2} \right) \frac{1}{4\Gamma} (d_2 + d_1) d_2 d_1 \cos \theta$$

$$\Delta E = L \tan \theta - (d_2 - d_1) \cos \theta + \frac{(d_2 - d_1)(d_2 + d_1)^2 \cos \theta}{4\Gamma d_1 d_2}$$

$$\Delta E = L \tan \theta + (d_2 - d_1) \cos \theta \left(\frac{(d_2 + d_1)^2}{4\Gamma d_1 d_2} - 1 \right)$$

(3-119)

3.2.5 Relación energía final de flujo - energía inicial de flujo del Resalto (E_2/E_1) (Eficiencia del resalto).

La eficiencia del resalto se expresa como el cociente entre la energía en la sección 2 y la energía en la sección 1:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{z_2 + d_2 \cos \theta + \frac{V_2^2}{2g}}{z_1 + d_1 \cos \theta + \frac{V_1^2}{2g}}$$

(3-120)

De la ecuación (3-108) y (3-109):

$$Z_2 = 0$$

(3-121)

y

$$\tan \theta = \frac{z_1}{L} \rightarrow z_1 = L \tan \theta$$

(3-122)

Reemplazando las ecuaciones (3-122) y (3-121) en la ecuación (3-120):

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{d_2 \cos \theta + \frac{V_2^2}{2g}}{L \tan \theta + d_1 \cos \theta + \frac{V_1^2}{2g}}$$

(3-123)

De las ecuaciones (3-116) y (3-117), se tiene:

$$q = v_1 y_1$$

(3-124)

$$q = v_2 d_2$$

(3-125)

Reemplazando las ecuaciones (3-124) y (3-125) en la ecuación (3-123) y realizando algunas manipulaciones algebraicas

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{d_2 \cos \theta + \frac{q^2}{d_2^2(2g)}}{L \tan \theta + d_1 \cos \theta + \frac{q^2}{d_2^2(2g)}}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{d_2^3 \cos \theta (2g) + q^2}{d_2^2(2g)}}{L \tan \theta + \frac{d_1^3 \cos \theta (2g) + q^2}{d_2^2(2g)}}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{d_2^3 \cos \theta (2g) + q^2}{d_2^2(2g)}}{\frac{d_1^2(2g)L \tan \theta + d_1^3 \cos \theta (2g) + q^2}{d_1^2(2g)}}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(d_2^3 \cos \theta (2g) + q^2)(d_1^2(2g))}{(d_1^2(2g)L \tan \theta + d_1^3 \cos \theta (2g) + q^2)(d_1^2(2g))}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(d_2^3 d_1^2 \cos \theta (2g) + q^2 d_1^2)}{d_1^2 d_2^2 (2g) L \tan \theta + d_1^3 d_2^2 \cos \theta (2g) + q^2 d_2^2}$$

(3-126)

En la sección 3.2.1 se demostró que la relación entre las profundidades conjugadas se rige por la siguiente expresión:

$$\frac{d_2}{d_1} = 1/2 \left(\sqrt{1 + 8G^2} - 1 \right) \quad (3-127)$$

El número de Froude para un canal con pendiente y sección rectangular, según la ecuación (3-114) es:

$$F_1^2 = \frac{q^2}{gd_1^3 \cos \theta} \quad (3-128)$$

Ahora desarrollando cada término de la ecuación (3-126), teniendo en cuenta las ecuaciones (3-127) y (3-128), se tiene

$$\begin{aligned} d_2^3 d_1^2 \cos \theta (2g) &= \left(1/2 \left(\sqrt{1 + 8G^2} - 1 \right) d_1 \right)^3 (d_1)^2 \cos \theta (2g) \\ d_2^3 d_1^2 \cos \theta (2g) &= \frac{1}{4} g \left(\sqrt{1 + 8G^2} - 1 \right)^3 d_1^5 \cos \theta \end{aligned} \quad (3-129)$$

$$\begin{aligned} q^2 d_1^2 &= F_1^2 g d_1^2 \cos \theta (d_1^2) \\ q^2 d_1^2 &= F_1^2 g d_1^5 \cos \theta \end{aligned} \quad (3-130)$$

$$\begin{aligned} d_1^2 d_2^2 (2g) L \tan \theta &= d_1^2 \left(1/2 \left(\sqrt{1 + 8G^2} - 1 \right) d_1 \right)^2 (2g) L \tan \theta \\ d_1^2 d_2^2 (2g) L \tan \theta &= \frac{1}{2} g L \tan \theta \left(\sqrt{1 + 8G^2} - 1 \right)^2 d_1^4 \end{aligned} \quad (3-131)$$

$$d_1^2 d_2^2 \cos \theta (2g) = d_1^3 \left(1/2 \left(\sqrt{1 + 8G^2} - 1 \right) d_1 \right)^2 d_1^2 \cos \theta (2g)$$

$$d_1^2 d_2^2 \cos \theta (2g) = \frac{1}{2} g \left(\sqrt{1 + 8G^2} - 1 \right)^2 d_1^5 \cos \theta$$

(3-132)

$$q^2 d_2^2 = F_1^2 g d_1^3 \cos \theta d_2^2 = \frac{1}{4} F_1^2 g d_1^3 \cos \theta \left(\sqrt{1 + 8G^2} - 1 \right)^2 d_1^2$$

$$q^2 d_2^2 = \frac{1}{4} F_1^2 g \left(\sqrt{1 + 8G^2} - 1 \right)^2 d_1^5 \cos \theta$$

(3-133)

Reemplazando las ecuaciones (3-130), (3-131), (3-132) y (3-133) en la ecuación (3-126), se obtiene:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{1}{4} g (\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^5 d_1^3 \cos \theta + F_1^2 g d_1^5 \cos \theta}{\frac{1}{2} g L \tan \theta (\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^2 d_1^4 + \frac{1}{2} g (\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^2 d_1^5 \cos \theta + \frac{1}{4} F_1^2 g (\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^2 d_1^5 \cos \theta}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{1}{4} (\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^3 + F_1^2}{\frac{1}{2} L \frac{\tan \theta}{\cos \theta} \frac{(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^2}{d_1} + \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^2 + \frac{1}{4} F_1^2 (\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^2}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^2 \left(\frac{2L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2 \right)}$$

(3-134)

3.2.6 Relación profundidad Inicial de flujo - energía inicial de flujo del resalto (y_1/E_1)

La relación entre la profundidad del flujo inicial y la energía inicial, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{d_1 \cos \theta}{z_1 + d_1 \cos \theta + \frac{V_1^2}{2g}}$$

(3-135)

De las ecuaciones (3-108) y (3-109):

$$Z_2 = 0$$

$$(3-136)$$

y

$$\tan \theta = \frac{z_1}{L} \rightarrow z_1 = L \tan \theta$$

$$(3-137)$$

Reemplazando la ecuación (3-136) y la ecuación (3-137), en la ecuación (3-135):

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{d_1 \cos \theta}{L \tan \theta + d_1 \cos \theta + \frac{q^2}{d_1^2(2g)}}$$

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{d_1 \cos \theta}{L \tan \theta + \frac{d_1^3(2g) \cos \theta + q^2}{d_1^2(2g)}}$$

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{d_1 \cos \theta}{\frac{(L \tan \theta)d_1^2(2g) + d_1^3(2g) \cos \theta + q^2}{d_1^2(2g)}}$$

$$(3-138)$$

El número de Froude para un canal con pendiente y sección rectangular, según la ecuación (3.-114) es:

$$F_1^2 = \frac{q^2}{gd_1^3 \cos \theta}$$

$$(3-139)$$

Reemplazando la ecuación (3-139) en la ecuación (3-138):

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{d_1^3 \cos \theta(2g)}{L \tan \theta d_1^2(2g) + d_1^3(2g) \cos \theta + gF_1^2 d_1^3 \cos \theta}$$

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{2}{\left(2 \frac{L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2\right)}$$

$$(3-140)$$

3.2.7 Relación final profundidad de Flujo - energía inicial de flujo del resalto (y_2/E_1)

La relación entre la profundidad del flujo final y la energía inicial, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{d_2 \cos \theta}{z_1 + d_1 \cos \theta + \frac{v_1^2}{2g}}$$

(3-141)

De las Ecuaciones (3-116) y (3-109):

$$q = v_1 y_1$$

(3-142)

y

$$\tan \theta = \frac{z_1}{L} \rightarrow z_1 = L \tan \theta$$

(3-143)

Reemplazando la ecuación (3-142) y la ecuación (3-143), en la ecuación (3-141):

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{d_2 \cos \theta}{L \tan \theta + d_1 \cos \theta + \frac{q^2}{2gd_1^2}}$$

(3-144)

De la ecuación (3-114), el número de Froude en la sección 1, se relaciona de la siguiente manera:

$$F_1^2 = \frac{q^2}{gd_1^3 \cos \theta}$$

(3-145)

Reemplazando la ecuación (3-145) en la ecuación (3-144):

$$\begin{aligned}\frac{y_2}{E_1} &= \frac{d_2 \cos \theta}{L \tan \theta + \frac{2gd_1^2 \cos \theta + F_1^2 gd_1^3 \cos \theta}{2gd_1^2}} \\ \frac{y_2}{E_1} &= \frac{d_2 \cos \theta}{\frac{L \tan \theta (2g)d_1^2 + 2gd_1^3 \cos \theta + F_1^2 gd_1^3 \cos \theta}{2gd_1^2}} \\ \frac{y_2}{E_1} &= \frac{2gd_1^2 d_2 \cos \theta}{L \tan \theta (2g)d_1^2 + 2gd_1^3 \cos \theta + F_1^2 gd_1^3 \cos \theta}\end{aligned}$$

(3-146)

Teniendo en cuenta que la relación entre profundidades conjugadas, según la ecuación (3-89), es:

$$\frac{d_2}{d_1} = 1/2 \left(-1 + \sqrt{1 + 8G^2} \right)$$

(3-147)

Reemplazando la ecuación (3-147) en la ecuación (3-146), se tiene:

$$\begin{aligned}\frac{y_2}{E_1} &= \frac{2gd_1^2 \cdot 1/2 (\sqrt{1 + 8G^2} - 1) d_1 \cos \theta}{L \tan \theta (2g)d_1^2 + 2gd_1^3 \cos \theta + F_1^2 gd_1^3 \cos \theta} \\ \frac{y_2}{E_1} &= \frac{gd_1^3 (\sqrt{1 + 8G^2} - 1) \cos \theta}{L \tan \theta (2g)d_1^2 + 2gd_1^3 \cos \theta + F_1^2 gd_1^3 \cos \theta} \\ \frac{y_2}{E_1} &= \frac{\sqrt{1 + 8G^2} - 1}{2L \frac{\tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2}\end{aligned}$$

(3-148)

3.2.8 Relación altura- profundidad inicial de flujo del resalto (h/y_1)

La relación altura de resalto-profundidad inicial de flujo, está dada de la siguiente manera:

$$\frac{h}{y_1} = \frac{d_2 \cos \theta - d_1 \cos \theta}{d_1 \cos \theta}$$

(3-149)

Teniendo en cuenta que la relación entre profundidades conjugadas, según la ecuación (3-89), es:

$$\frac{d_2}{d_1} = 1/2 \left(-1 + \sqrt{1 + 8G^2} \right)$$

(3-150)

Reemplazando la ecuación (3-150) en la ecuación (3-149), y realizando algunas operaciones algebraicas se obtiene:

$$\frac{h}{y_1} = \frac{1/2 \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) d_1 - d_1}{d_1}$$

$$\frac{h}{y_1} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8F_1^2} - 3/2$$

(3-151)

3.2.9 Relación pérdida de energía - energía inicial de flujo del resalto ($\Delta E/E_1$)

La relación pérdida de energía - energía inicial del flujo, se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1}$$

(3-152)

Para la eficiencia del resalto se demostró la siguiente relación (ver ecuación 3-134):

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^2 \left(\frac{2L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2 \right)}$$

(3-153)

Reemplazando Ecuación (3-153) en (3-152):

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 \left(\frac{2L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2 \right)}$$

(3-154)

3.3 RESUMEN RELACIONES MATEMÁTICAS DEDUCIDAS PARA LOS RESALTOS TIPO A, B, C Y D-E

La tabla 3-1 resume las relaciones matemáticas halladas en las secciones 3.1 y 3.2, para los resaltos hidráulicos en canales con pendiente positiva y sección transversal rectangular tipo A, B, C y D-E.

Relación de Parámetros	Resalto hidráulico Tipo A	Resalto Hidráulico Tipo B, C y D-E
$\frac{L}{d_1}$	$mF_1 + c$	$(m + s\theta)F_1 + t\theta + c$
Γ	1	$\frac{\cos \theta}{\cos \theta - \frac{kL \sin \theta}{(d_2 - d_1)}}$
G^2	F_1^2	ΓF_1^2
$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)$	$\frac{\cos \theta}{2}(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)$
$\frac{h}{y_1}$	$\frac{1}{2}\sqrt{1 + 8F_1^2} - \frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{1 + 8G^2} - \frac{3}{2}$
ΔE	$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$	$k_2 L \tan \theta + (d_2 - d_1) \cos \theta \left(\frac{(d_2 + d_1)^2}{4\Gamma d_1 d_2} - 1 \right)$
$\frac{E_2}{E_1}$	$\frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 (2 + F_1^2)}$	$\frac{(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^2 \left(\frac{2k_2 L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2 \right)}$
$\frac{h}{E_1}$	$\frac{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3}{2 + F_1^2}$	$\frac{\sqrt{1 + 8G^2} - 3}{\frac{2k_2 L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2}$
$\frac{y_1}{E_1}$	$\frac{2}{2 + F_1^2}$	$\frac{2}{\frac{2k_2 L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2}$
$\frac{y_2}{E_1}$	$\frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)}{2 + F_1^2}$	$\frac{(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)}{\frac{2k_2 L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2}$
$\frac{\Delta E}{E_1}$	$1 - \frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 (2 + F_1^2)}$	$1 - \frac{(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8G^2} - 1)^2 \left(\frac{2k_2 L \tan \theta}{d_1 \cos \theta} + 2 + F_1^2 \right)}$

Tabla 3-1: Resumen relaciones matemáticas resaltos hidráulicos con pendiente y sección transversal rectangular Tipo A, B, C y D-E.

4. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DESCRIPTIVOS DE LOS RESALTOS HIDRÁULICOS EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

En el presente capítulo se presentan los resultados de las mediciones de los ensayos de laboratorio y se realiza la evaluación experimental de las relaciones matemáticas deducidas en el capítulo 3, que intentan describir el comportamiento de los resaltos hidráulicos tipo A, B, C y D-E, en canales con pendiente y con sección transversal rectangular.

4.1 INSTALACIÓN DE LABORATORIO

4.1.1 Adecuación de las instalaciones de laboratorio

Los experimentos se realizaron en el canal de pendiente variable de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá D.C, después las algunas adecuaciones realizadas por el autor del presente trabajo, con un costo aproximado de \$ 7.000.000, que fueron ejecutados con el apoyo económico otorgado por Colciencias, a través de su programa de Jóvenes Investigadores e Innovadores 2010 (ver anexo B-costos de la investigación). Las adecuaciones más significativas al canal de pendiente variable se citan a continuación:

- Mantenimiento y limpieza de la sección del canal: Pulimento del fondo del canal, limpieza del acrílico, sellado con silicona entre la estructura metálica y el acrílico.
- Ajuste al sistema de basculamiento del canal: Reconstrucción de las bases que soportan el canal, creación de doble pivoteo, mediante la instalación de dos tornillos sinfin con sus respectivos volantes en los dos apoyos, para alcanzar el rango de pendientes entre -11° y 11° (ver figura 4-1).
Como obra anexa a la anterior y por seguridad industrial se instaló malacates (garruchas) a lado y lado del canal, anclados a las vigas de la estructura en

concreto del edificio y cuatro ángulos metálicos con el fin de confinar el canal y restringir el movimiento horizontal.

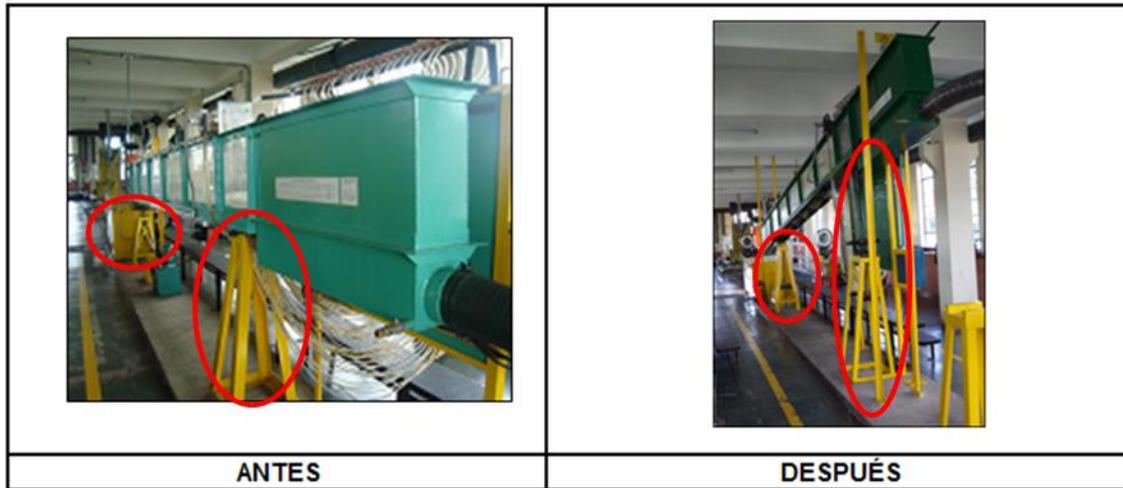


Figura 4-1: Sistema de basculamiento del canal de pendiente variable.

- Construcción de compuerta tipo guillotina para control de flujo aguas abajo del canal (ver figura No.31).



Figura 4-2: Compuerta tipo guillotina para control del flujo aguas abajo del canal.

- Reconstrucción de estructura de salida del canal: Ampliación de la estructura de salida aguas abajo del canal e instalación de acrílico (ver figura 4-3).



Figura 4-3: Estructura de salida aguas abajo del canal.

- Construcción de nuevas regletas para la medición del ángulo de inclinación del canal (ver figura 4-4).

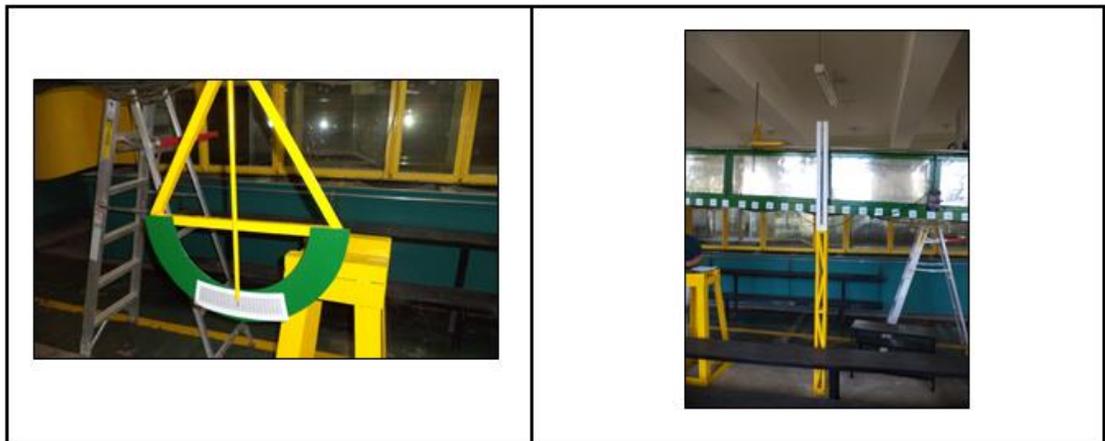


Figura 4-4: Regletas de medición inclinación del canal.

- Cambio de manguera de alimentación de agua, para permitir el basculamiento del canal (ver figura 4-5).



Figura 4-5: Manguera de alimentación de agua al canal.

- Ampliación del tablero de piezómetros (ver figura 4-6)

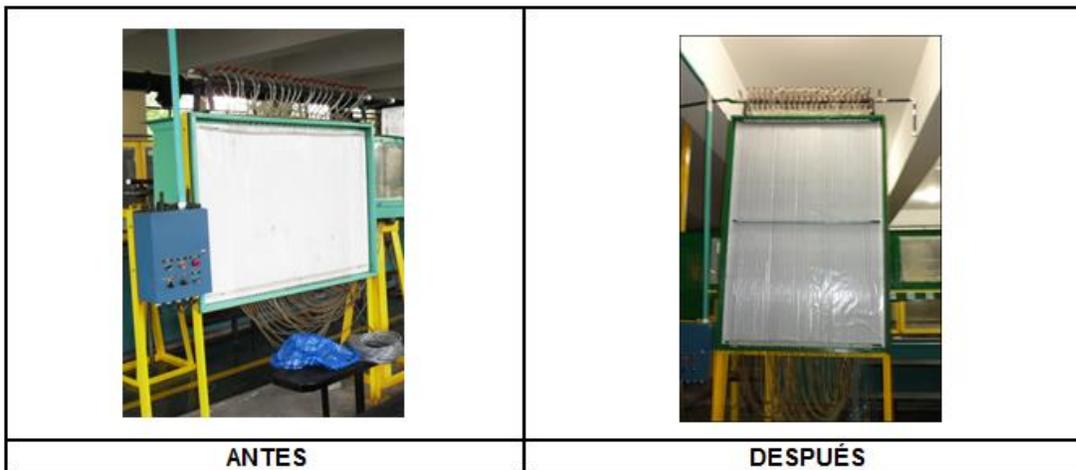


Figura 4-6: Tablero de piezómetros.

- Ajuste de la compuerta de persiana para control del flujo aguas abajo del canal (ver figura 4-7)

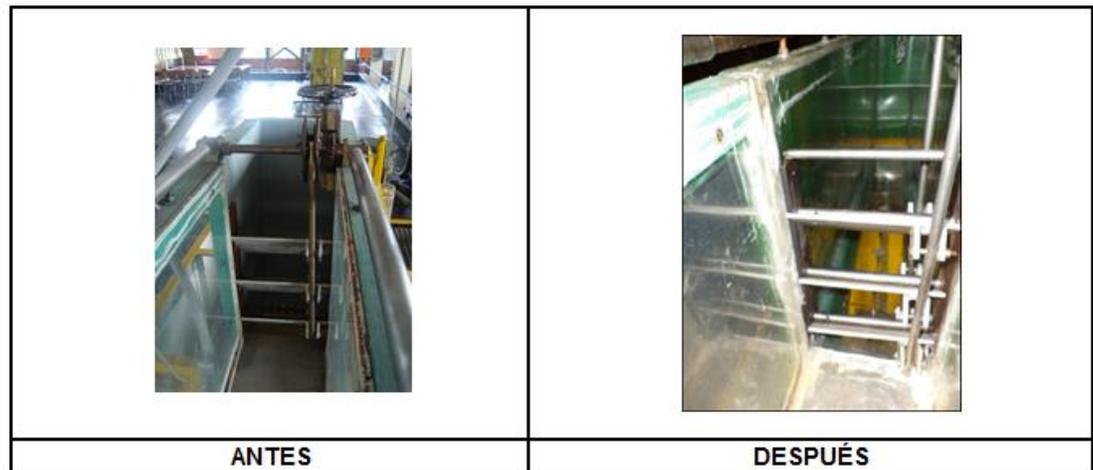


Figura 4-7: Compuerta de persiana para control de flujo aguas abajo del canal.

- Construcción de fondo del canal en acrílico para producir una pendiente horizontal en la superficie del agua, en el extremo final del canal (ver figura 4-8).



Figura 4-8: Fondo en acrílico para creación de pendiente horizontal.

- Ubicación y marcación de piezómetros a lo largo del canal (ver figura 4-9).



Figura 4-9: Ubicación y marcación de piezómetros

- Instalación de cinta métrica a lo largo del canal y de cuadrícula en las paredes del canal (ver figura 4-10).



Figura 4-10: Cuadrícula en paredes del canal.

4.1.2 Descripción general de las instalaciones de laboratorio

Como se mencionó anteriormente los experimentos se realizaron en el canal de pendiente variable de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá D.C, el cual tiene las siguientes características generales (Ver Anexo A-Instalaciones de Laboratorio):

- Longitud del canal: 5.0 m.
- Ancho Canal: 0.22 m.
- Alto Canal: 0.50 m.
- Material de fondo: Aluminio.
- Material Paredes: Acrílico.
- Caudal máximo de experimentación: 30 l/s.
- Rango Inclinación: -11° a 11° .
- Compuerta fija tipo guillotina para el control del flujo aguas arriba.
- Compuerta móvil tipo guillotina para el control del flujo aguas abajo.

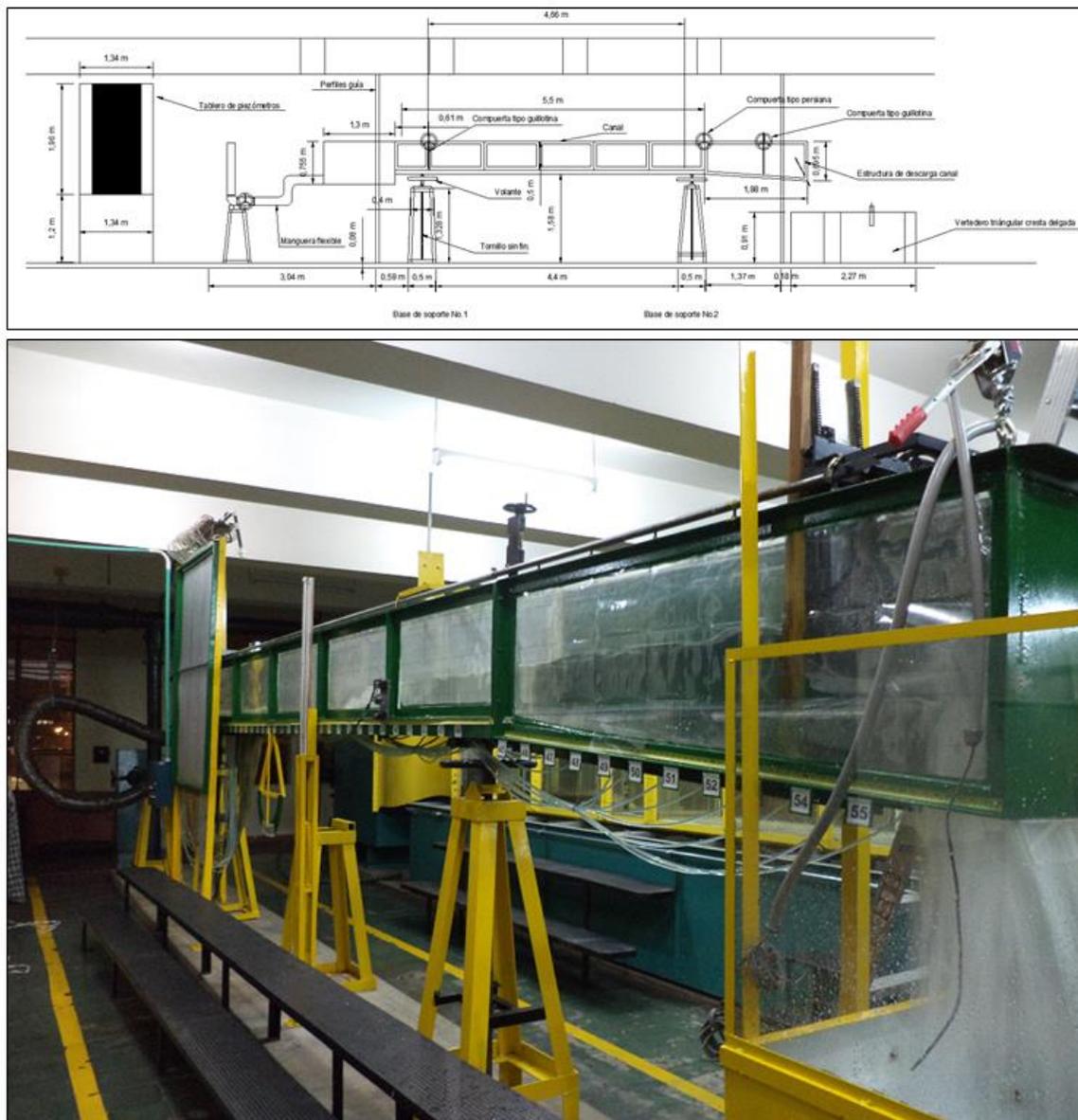


Figura 4-11: Instalaciones de laboratorio.

4.1.3 Metodología de la Experimentación

Los ensayos se realizaron de la siguiente forma:

Para las pendientes: 0° , 1° , 3° , 6° , 9° y 11° se experimentó con diferentes caudales entre 0 l/s y 30 l/s, y niveles de superficie aguas abajo entre 0.042 m y 0.69 m, para crear diversos resaltos hidráulicos tipos A, B, C y D-E, con lo que se completó un total de veinte experimentos por cada una de dichas pendientes (480 experimentos en total). Adicionalmente se formaron cinco resaltos para las pendientes: 2° , 4° , 5° , 7° , 8° y 10° (120 experimentos en total), con el fin de realizar la validación de las relaciones propuestas

(Ver Anexo E-Datos experimentales resaltos hidráulicos en canales con pendiente y sección rectangular).

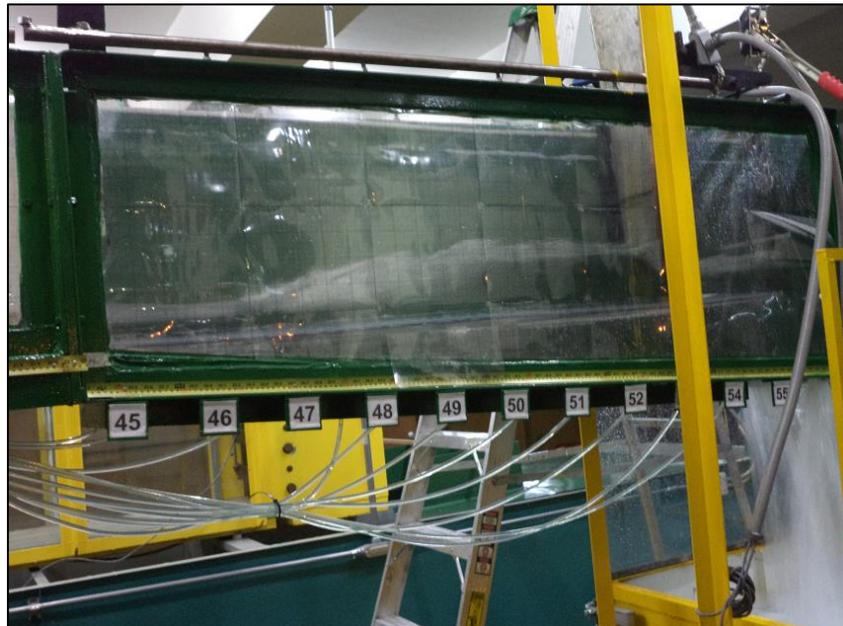


Figura 4-12: Resalto hidráulico tipo A.



Figura 4-13. Resalto hidráulico tipo B.



Figura 4-14: Resalto hidráulico tipo C.



Figura 4-15. Resalto hidráulico tipo D-E.

4.1.4 Recolección de datos

Para cada experimento se tomaron los siguientes datos:

- *Profundidad Inicial y secuente*: Medida directa e inmediatamente antes y después del resalto con ayuda de un medidor de aguja (ver figura 4-16).



Figura 4-16 : Medidor de Aguja

- *Longitud del Resalto*: medida directamente sobre el canal mediante la cinta métrica adosada al mismo (ver figura 4-17).



Figura 4-17: Cinta Métrica adosada al canal.

- *Inclinación de fondo de canal*: medida directamente sobre una regleta calibrada, que indica el grado de inclinación del canal. (ver figura 4-18).



Figura 4-18: Regleta para medición de la inclinación del canal.

- *Caudal*: Medido directamente mediante un vertedero triangular de cresta delgada debidamente calibrado, ubicado al final del canal (ver figura 4-19).



Figura 4-19: Vertedero triangular de cresta delgada.

- *Velocidad*: Calculada de manera indirecta en las secciones aguas abajo y aguas arriba del resalto, a partir de los datos obtenidos del caudal y la profundidad de flujo (Ver anexo E-Datos experimentales resaltos hidráulicos en canales con pendiente y sección rectangular).
- *Energía Específica*: Determinada indirectamente en la secciones aguas abajo y aguas arriba del resalto, a partir de los datos obtenidos del caudal y la profundidad de flujo (Ver anexo E-Datos experimentales resaltos hidráulicos en canales con pendiente y sección rectangular).

4.1.5 Calibración de instrumentos de medición

- *Calibración de medidores de aguja:* No se realizó calibración, ya que el laboratorio realiza esta labor semestralmente.
- *Calibración regleta para medición de pendiente:* La calibración se realizó de forma manual con cinta métrica, plomada y nivel de mano, de la siguiente manera: Se puso el canal en posición horizontal comprobándose esto con el nivel de mano, luego se procedió a tomar la distancia entre los apoyos y la altura del canal en cada soporte con respecto al piso; por medio de relaciones trigonométricas se determinó la altura que debe tener cada apoyo respecto al piso para lograr el ángulo deseado y se marcó este nivel en la regleta, con lo cual quedó calibrada con los ángulos indicados (0°-11°).
Con el fin de tener una segunda medida del ángulo de inclinación del canal, también se calibró una semicircunferencia reglada angularmente, la cual para ángulos mayores a 5° tiene una mejor precisión de medida.
- *Calibración de cinta métrica:* No se realizó calibración ya que esta viene patronada desde fábrica.
- *Calibración de vertedero:* El caudal descargado por un vertedero triangular de cresta delgada está gobernado por la siguiente expresión:

$$Q = C_d \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h_v^{5/2}$$

Donde:

Q : Caudal descargado por el vertedero (L/s).

C_d : Coeficiente de descarga

θ : Ángulo de abertura para un vertedero triangular simétrico (°).

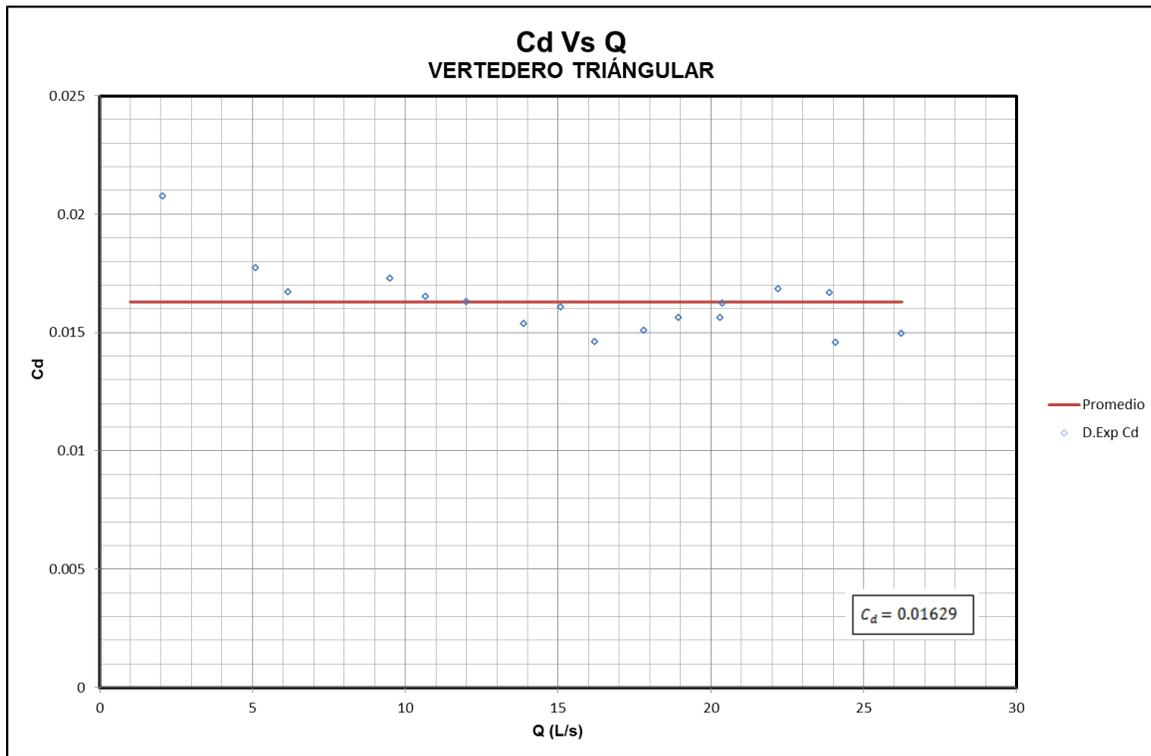
h_v : Carga sobre el vertedero (cm).

Al medir 17 caudales diferentes, por el método volumétrico y al tomar las cargas sobre la cresta del vertedero (altura de lámina de agua sobre la cresta) para cada uno de estos, se ajustó por medio de mínimos cuadrados el coeficiente de descarga, obteniendo un $C_d = 0.01629$ (ver Gráfica 4-1), con lo que la ecuación ajustada de descarga de caudal del vertedero, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.97$ es (ver Gráfica 4-2):

$$Q = 0.0251 h_v^{5/2}$$

(4-1)

Donde el caudal (Q) está en litros por segundo y la carga sobre el vertedero (h_v) en centímetros.



Gráfica 4-1: Ajuste de coeficiente de descarga vertedero triangular

El coeficiente de correlación R^2 es calculado de la siguiente forma:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(dobs - dmod)^2}{\sum(dobs - \overline{dobs})^2}$$

(4-2)

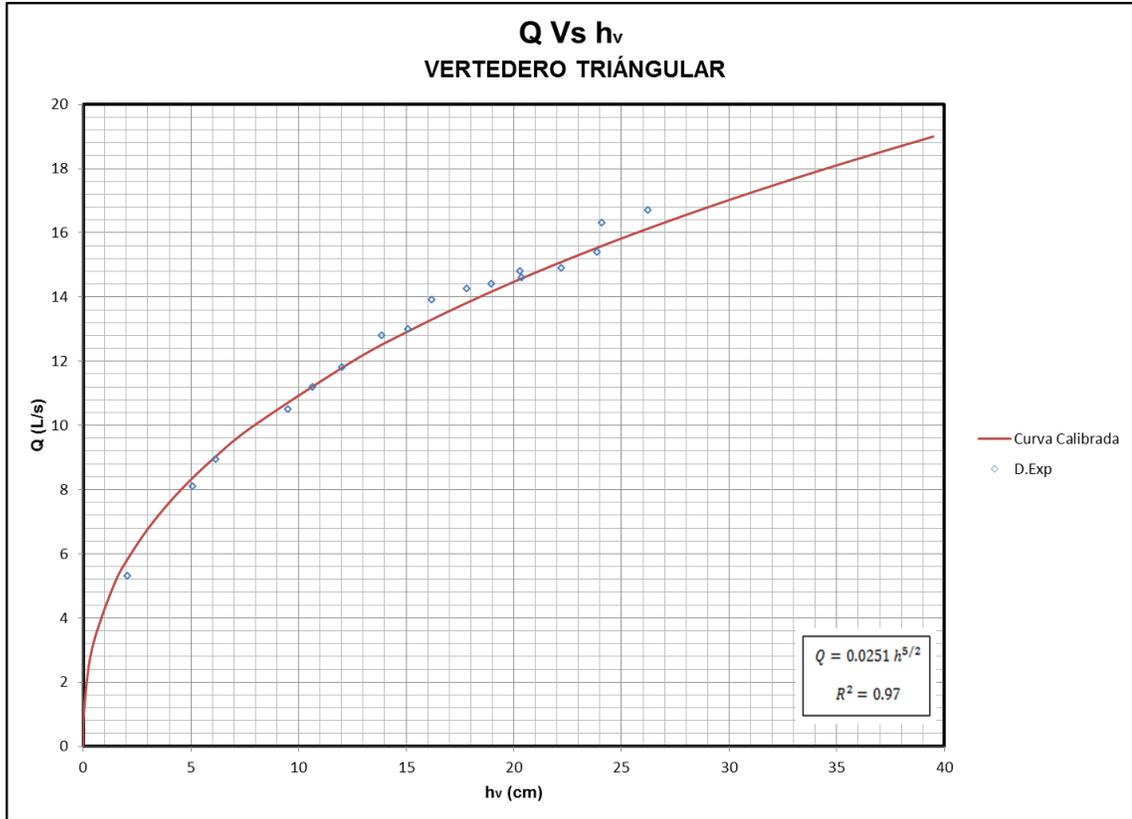
Donde:

R^2 : Coeficiente de correlación (adimensional); entre más cercano a uno es mejor la correlación de los datos.

$dobs$: Valores observados.

$dmod$: Valores calculados.

\overline{dobs} : Promedio valores observados.



Gráfica 4-2: Curva de calibración del vertedero triangular.

4.2 AJUSTE EXPERIMENTAL DE LAS RELACIONES MATEMÁTICAS PARA LOS RESALTOS HIDRÁULICOS CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

Teniendo en cuenta las relaciones matemáticas deducidas en el capítulo 3, para los resaltos hidráulicos en canales con pendiente y sección rectangular, se procedió a realizar el respectivo ajuste de la función (Γ) y la relación (L/d_1) Vs (F_1), con lo cual quedan definidas todas las relaciones propuestas: d_2/d_1 , h/y_1 , E_2/E_1 , h/E_1 , y_1/E_1 , y_2/E_1 y $\Delta E/E_1$, para cada tipo de resalto en las diferentes inclinaciones evaluadas. Luego se grafica cada relación adimensional con los resultados experimentales tomados, con el fin de verificar su aplicabilidad.

4.2.1 Longitud de remolino turbulento - profundidad inicial de flujo del resalto (L/d_1)

Con los datos tomados para los tipos de resalto hidráulico A, B, C y D-E, en diferentes inclinaciones y números de Froude aguas arriba, y empleando las formas matemáticas planteadas en la sección 3.1.2 y 3.2.2; se obtuvieron las siguientes relaciones ajustadas por mínimos cuadrados con sus respectivos coeficientes de correlación:

Resalto Tipo A:

$$\frac{L}{d_1} = 7.1425F_1 - 6.73$$

$$R^2 = 0.60$$

(4-3)

Resalto Tipo B:

$$\frac{L}{d_1} = (-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369$$

$$R^2 = 0.60$$

(4-4)

Resalto Tipo C:

$$\frac{L}{d_1} = (-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053$$

$$R^2 = 0.80$$

(4-5)

Resalto Tipo D-E:

$$\frac{L}{d_1} = (-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964$$

$$R^2 = 0.83$$

(4-6)

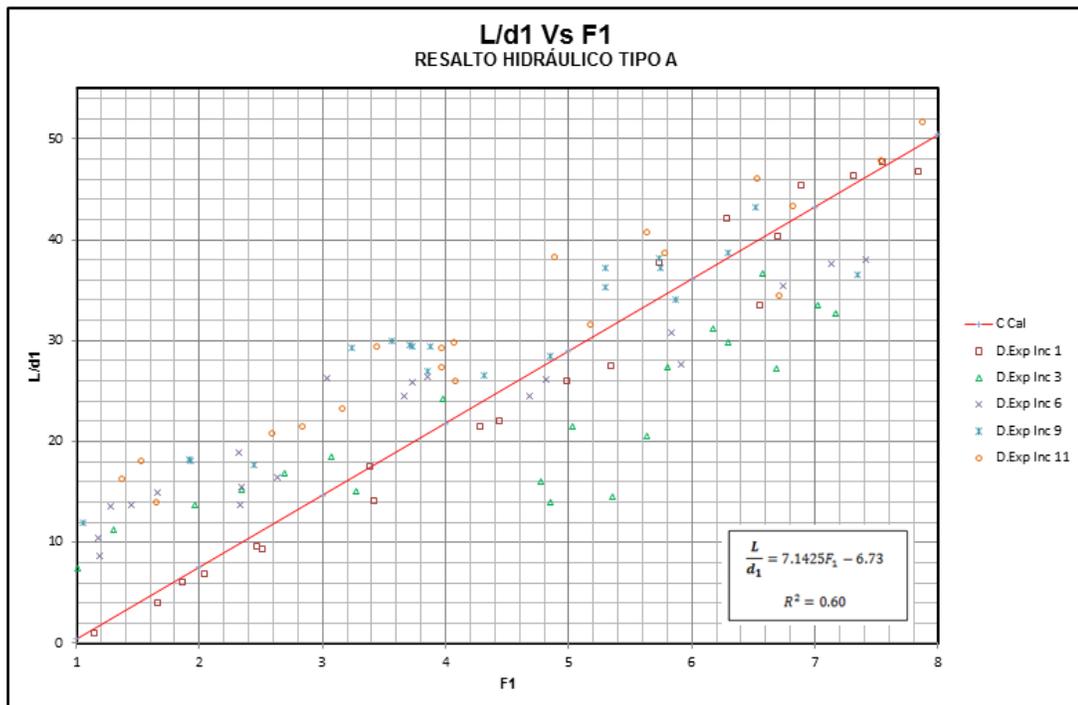
En las gráficas 4-3,4-4,4-5 y 4-6 se puede observar una gran dispersión de los datos traducido esto en coeficientes de correlación bajos, ocasionados por la variabilidad de la longitud del remolino turbulento en el tiempo, aun para resaltos estables (resaltos que se

ubican en una posición fija en el canal, no realizando desplazamiento longitudinal a lo largo del este), lo cual dificulta una medida exacta de este parámetro.

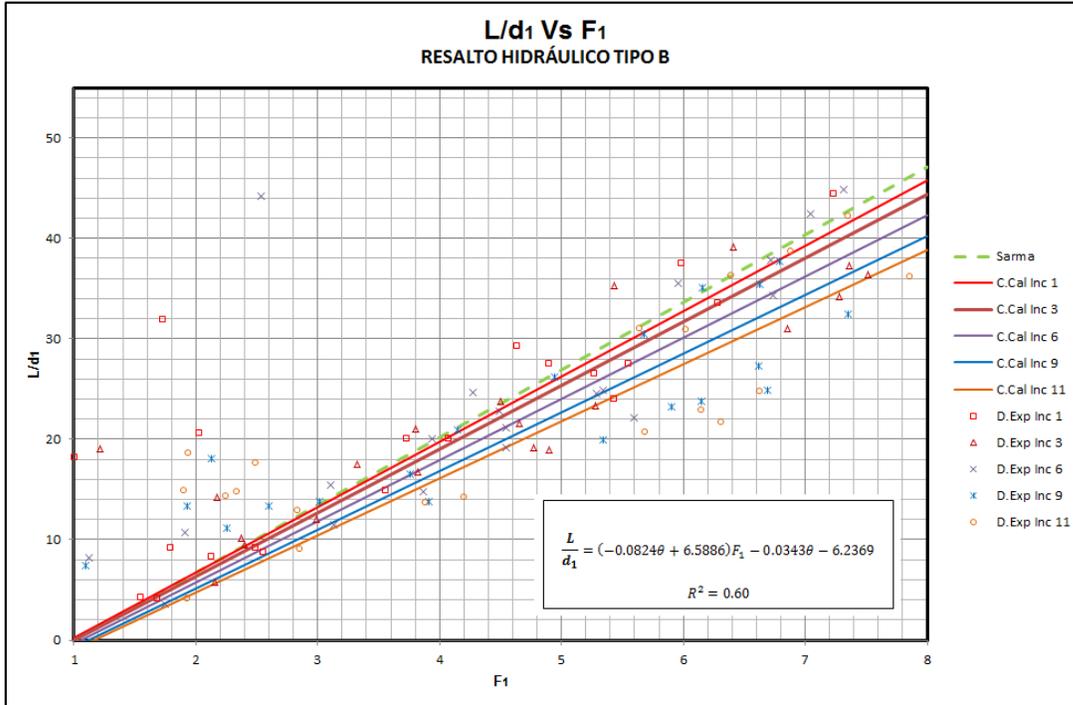
La gráfica 4-3 muestra que los datos no tienen ninguna agrupación por grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, sin embargo siguen una misma tendencia lineal-monótona creciente, lo cual confirma la suposición realizada en las deducciones matemáticas para este tipo de resalto (resalto hidráulico horizontal).

Lo anterior quiere decir que sin importar el grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, a mayor número de Froude en la sección inicial de resalto, se obtiene un mayor valor de la relación (L/d_1), lo que en consecuencia produce inequívocamente una longitud mayor de remolino turbulento del resalto.

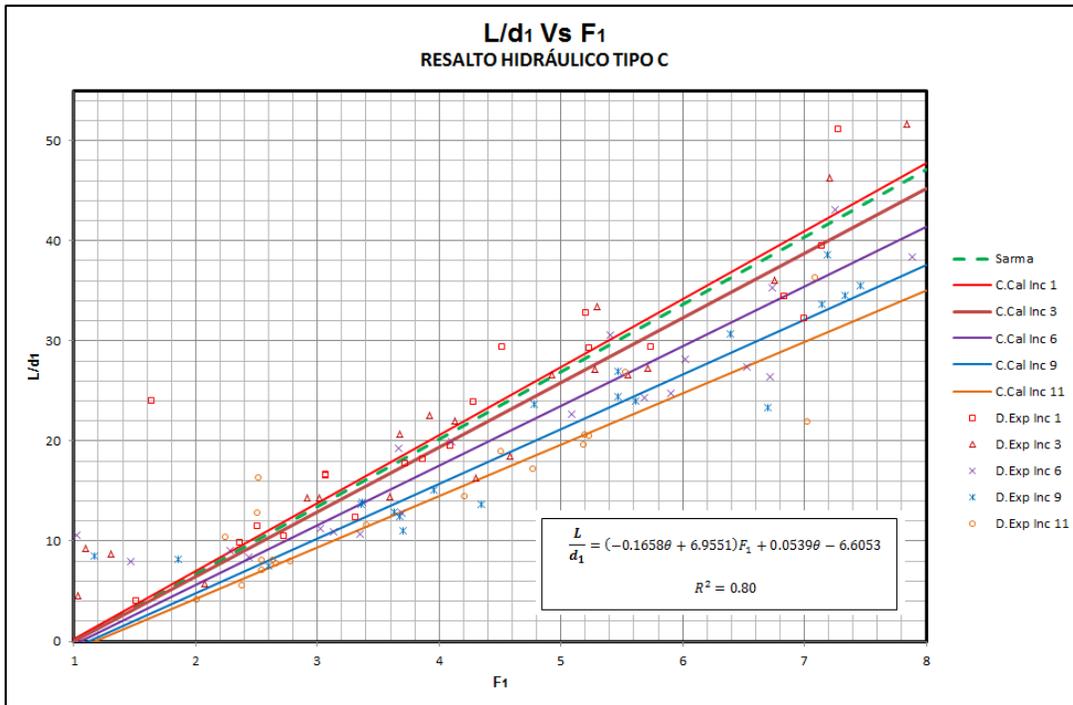
En las gráficas 4-3,4-4,4-5 y 4-6, para los resaltos tipo B, C y D-E, se observa una tendencia de los datos de la misma forma que en el resalto tipo A: Lineal-monótona creciente, pero con una agrupación decreciente de estos de acuerdo con el grado de inclinación del canal. En otras palabras la relación (L/d_1) varía en forma directamente proporcional con el número de Froude y en forma inversamente proporcional al grado de inclinación del canal ($L/d_1 \propto F_1 \alpha^{-1} \Theta$).



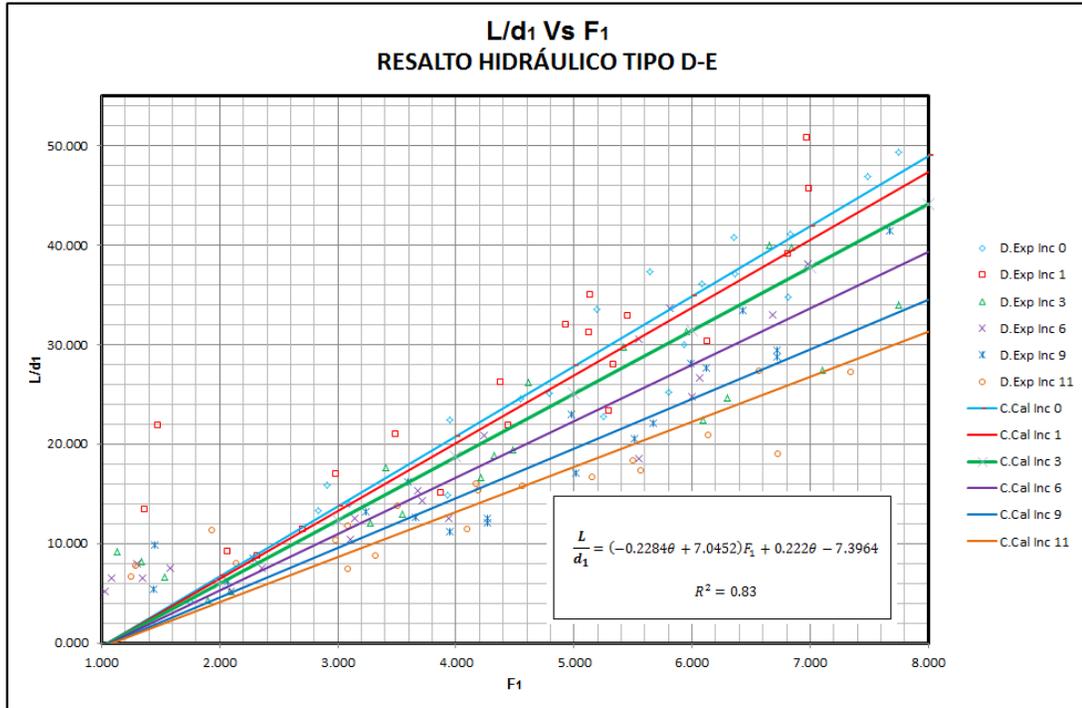
Gráfica 4-3:Ajuste experimental relación L/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.



Gráfica 4-4: Ajuste experimental relación L/d1 Vs F1 para el resalto tipo B



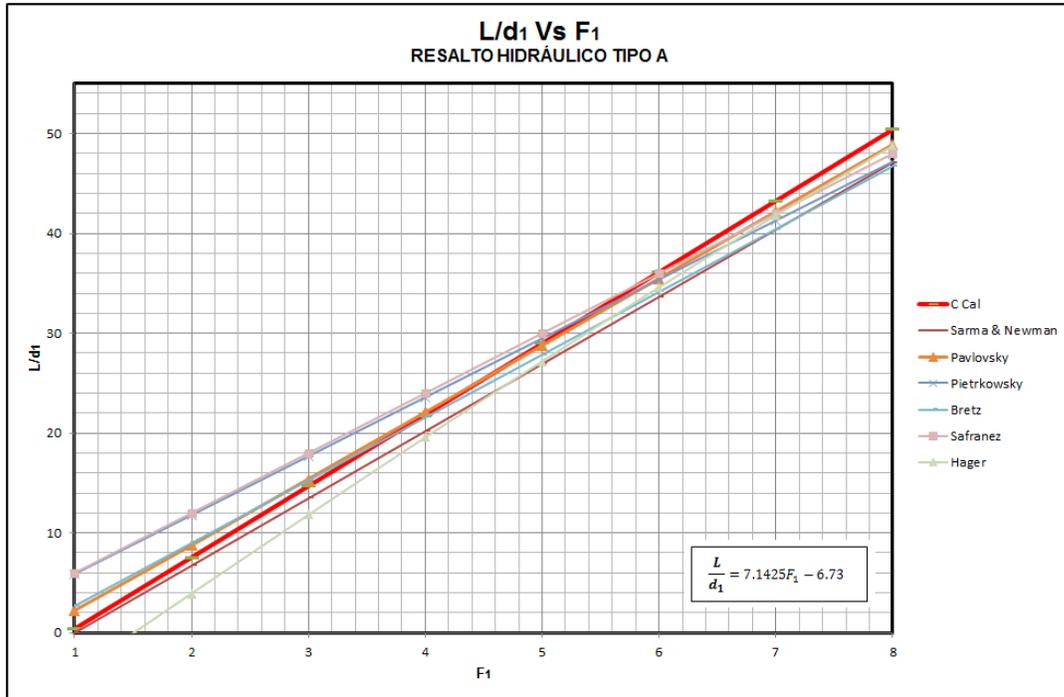
Gráfica 4-5: Ajuste experimental relación L/d1 Vs F1 para el resalto tipo C.



Gráfica 4-6: Ajuste experimental relación L/d₁ Vs F₁ para el resalto tipo D-E.

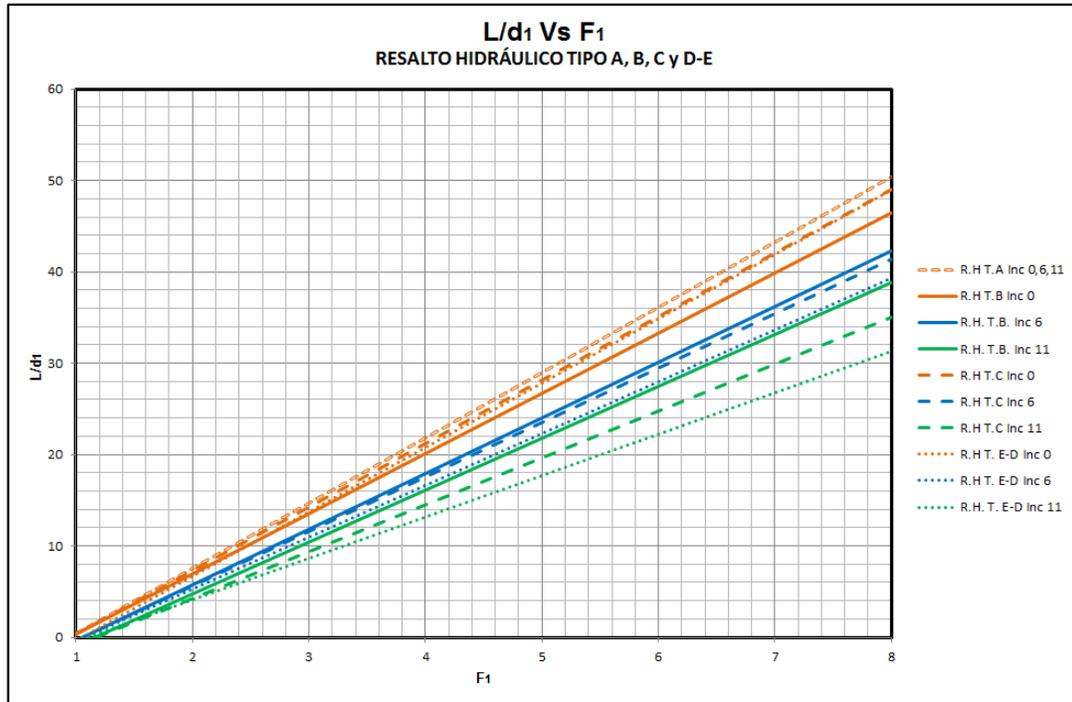
Los datos obtenidos en experimentos con números de Froude entre 1 y 2, distan totalmente de las curvas ajustadas, debido a que en este rango se crean resaltos ondulantes, en los cuales, los límites de la longitud de remolino turbulento no son muy claros, lo que produce errores en la medición.

Realizando una comparación entre la relación matemática obtenida en el presente trabajo para (L/d_1) en el resalto tipo A, y las relaciones matemáticas obtenidas para el mismo tipo de resalto en un canal de sección rectangular por Sarma & Newman, Pietrkowsky, Bretz, Safranez y Hager (ver gráfica 4-7), se observa una tendencia de la curva desarrollada en esta investigación muy similar a las propuestas por estos autores.



Gráfica 4-7. Comparación relación L/d_1 Vs F_1 para el Resalto tipo A contra otros autores.

Comparando el orden de magnitud de la relación (L/d_1) para los resaltos tipo A, B, C y D-E, para un mismo número de Froude y un mismo grado de inclinación del canal, se observó que la relación se comporta de la siguiente forma para los tipos de resalto: $L/d_1-A > L/d_1-B > L/d_1-C > L/d_1-D-E$ (ver gráfica 4-8). Es de resaltar que los valores de la relación (L/d_1) obtenidos en todos los tipos de resaltos para un canal sin inclinación, tienen una magnitud y tendencia muy similares, con una discrepancia de tan solo el 5% entre las curvas ajustadas.



Gráfica 4-8. Comparación relación L/d_1 Vs F_1 para los resaltos tipo A,B,C y D-E.

4.2.2 Relación profundidad final de flujo - profundidad inicial de flujo del resalto (d_2/d_1) (profundidades conjugadas)

Con el cálculo la función (Γ), para cada experimento tomado para los resaltos hidráulicos tipo A, B, C y D-E, con diferentes inclinaciones y números de Froude aguas arriba, y ajustando la relación por mínimos cuadrados, se llega a las siguientes expresiones, con sus respectivos coeficientes de correlación:

Resalto Tipo A:

Si bien, la función (Γ) no aparece en las relaciones matemáticas deducidas para el resalto tipo A; teniendo en cuenta las formas matemáticas deducidas para los resaltos tipos B, C y D-E, es claro que en este tipo de resalto la función debe aproximarse a la unidad.

$$\Gamma = 1$$

$$(4-7)$$

Resalto Tipo B:

$$\Gamma = e^{0.0877\theta}$$

$$R^2 = 0.95$$

(4-8)

Resalto Tipo C:

$$\Gamma = e^{0.1233\theta}$$

$$R^2 = 0.96$$

(4-9)

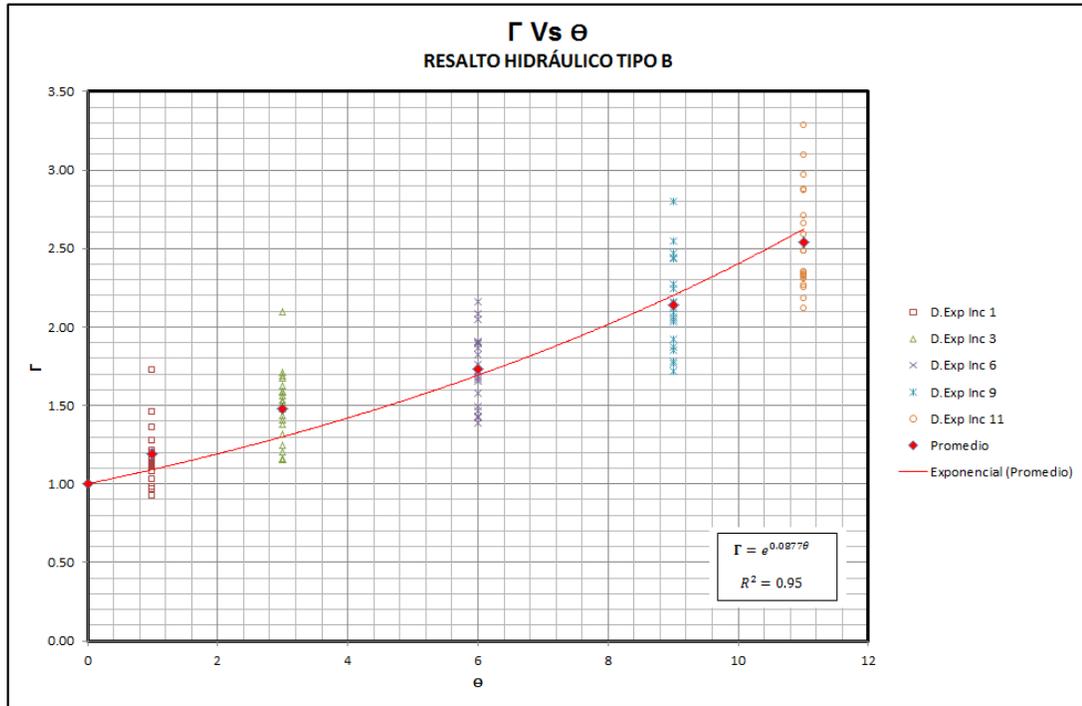
Resalto Tipo D-E:

$$\Gamma = e^{0.1024\theta}$$

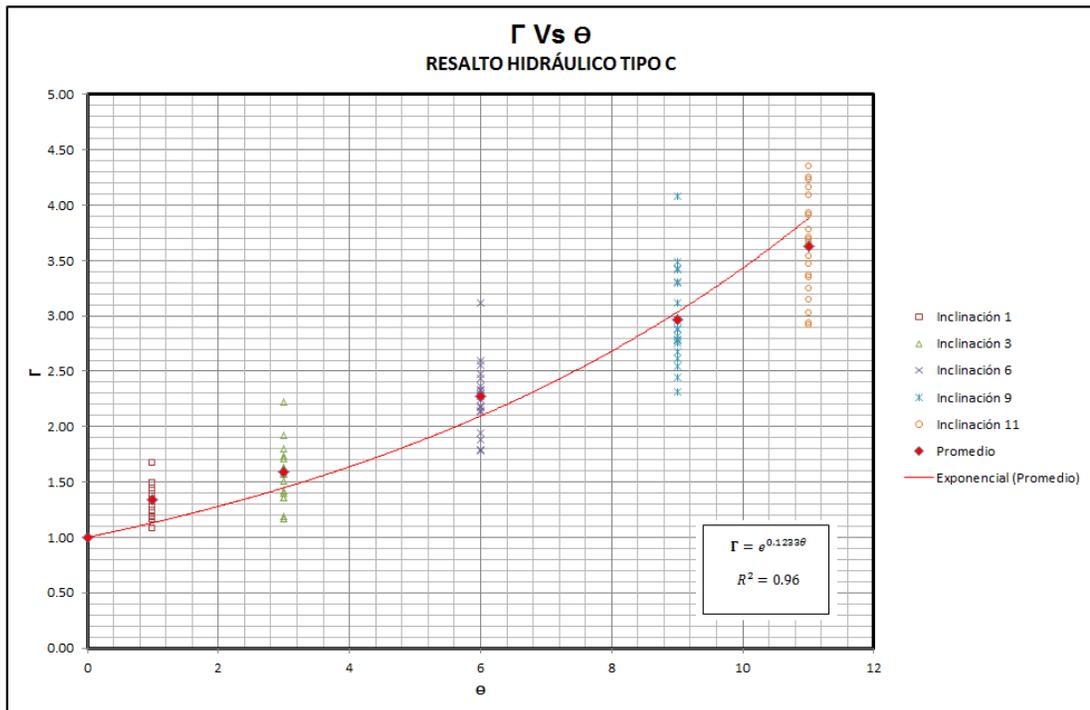
$$R^2 = 0.99$$

(4-10)

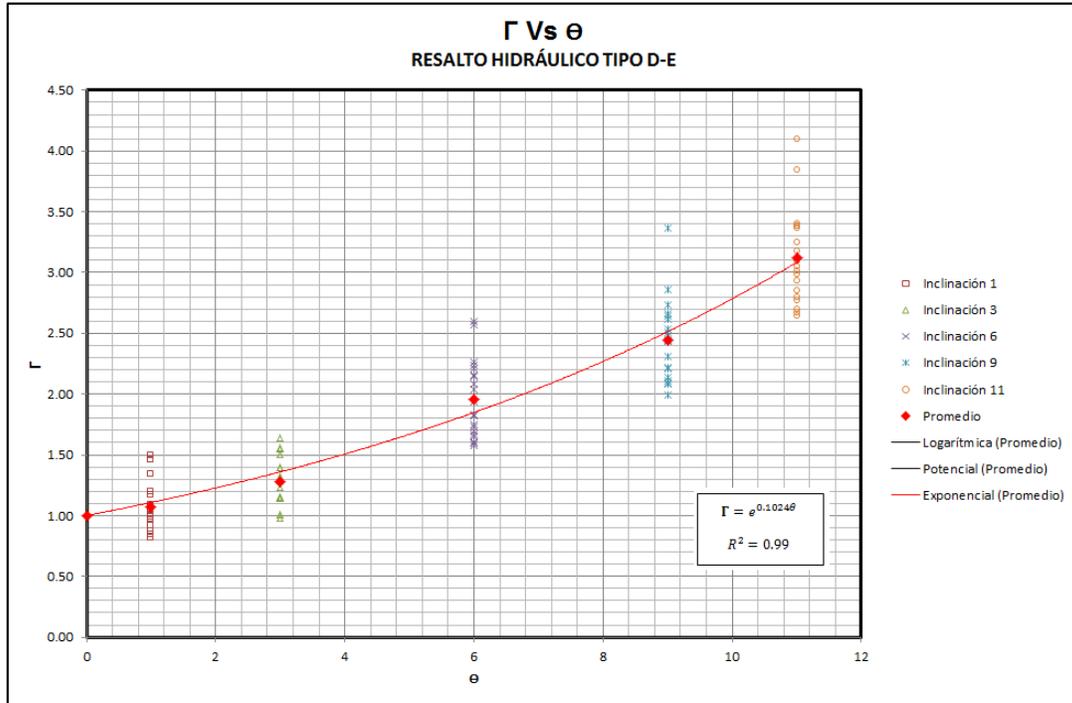
Las gráficas 4-8,4-9 y 4-10 de los resaltos hidráulicos tipo B, C y D-E, muestran cómo la curva se ajusta a la media o al centroide de la nube de datos, para una misma inclinación del canal, siguiendo una forma exponencial con el incremento de esta.



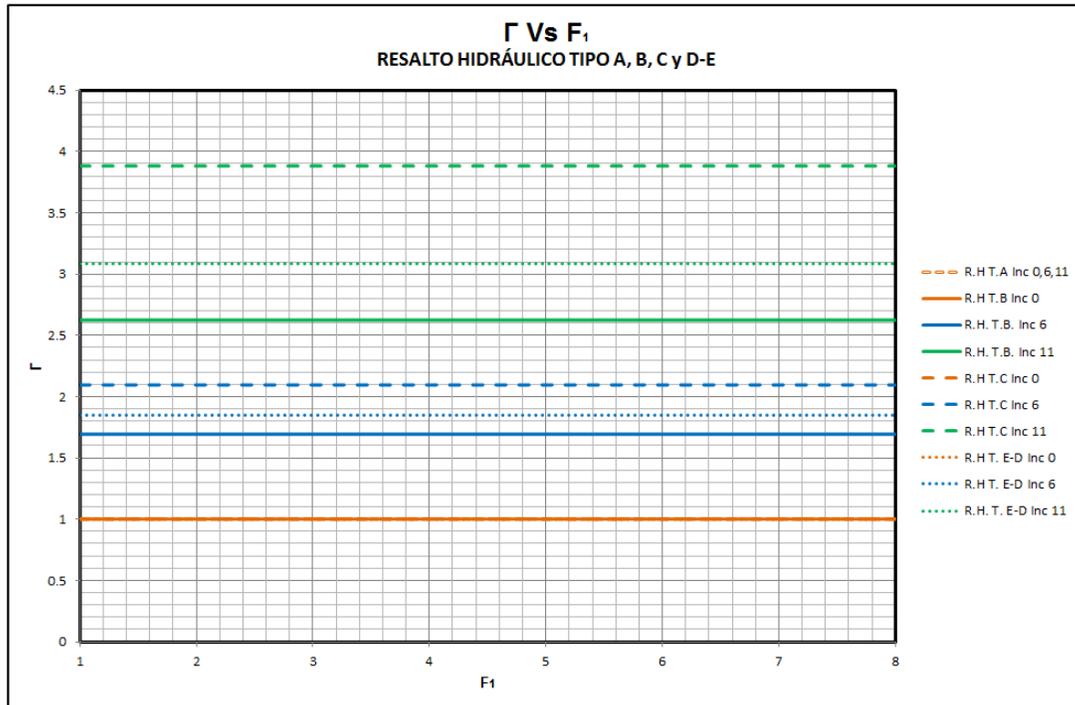
Gráfica 4-9: Ajuste experimental relación Γ Vs θ para el Resalto Tipo B.



Gráfica 4-10: Ajuste experimental relación Γ Vs θ para el Resalto Tipo C.



Gráfica 4-11: Ajuste experimental relación Γ Vs θ para el Resalto Tipo D-E.



Gráfica 4-12: Comparación relación Γ Vs θ para los resaltos tipo A,B,C y D-E

En la gráfica 4-12 se compara el orden de magnitud de la función (Γ) para los resaltos tipo A, B C y D-E, con respecto al número de Froude y a la inclinación del canal. En ésta

se observa que para un número de Froude e inclinación del canal determinados, el valor de la función se comporta de la siguiente forma: $\Gamma\text{-C} > \Gamma\text{-D-E} > \Gamma\text{-B} > \Gamma\text{-A}$.

Según la ecuación (3-86):

$$G^2 = \Gamma F_1^2$$

$$(4-11)$$

Ahora, reemplazando la ecuación (4-11) en la ecuación (3-94) para los resaltos tipo B y C, y en la ecuación (3-89) para el resalto tipo D-E y además, recordando la ecuación (3-18) para el resalto tipo A, se tiene para cada resalto las siguientes relaciones para las profundidades conjugadas, con su respectivo coeficiente de correlación:

Resalto Tipo A:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

$$R^2 = 0.95$$

$$(4-12)$$

Resalto Tipo B:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{\cos \theta}{2} \left(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1 \right)$$

$$R^2 = 0.97$$

$$(4-13)$$

Resalto Tipo C:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{\cos \theta}{2} \left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 1 \right)$$

$$R^2 = 0.97$$

$$(4-14)$$

Resalto Tipo D-E:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1 \right)$$

$$R^2 = 0.98$$

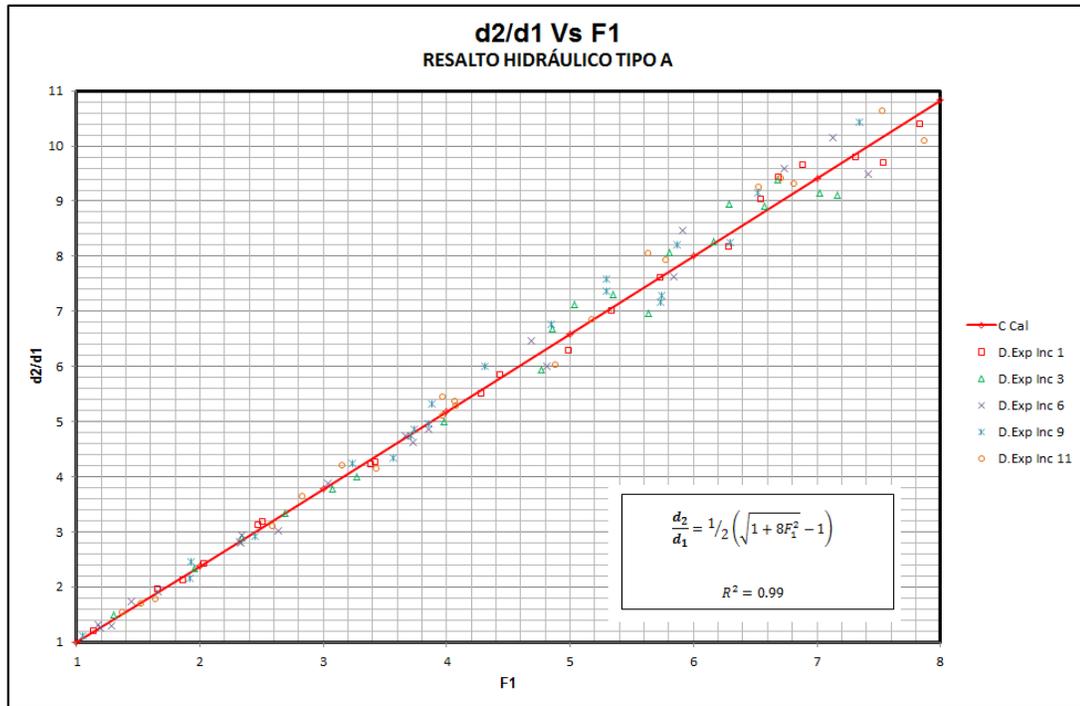
(4-15)

En las gráficas 4-11,4-12,4-13 y 4-14, se puede observar una muy buena correlación de los datos con las formas matemáticas deducidas, inclusive para flujos con número de Froude menor a 2, según muestran los coeficientes de correlación respectivos, para cada expresión por tipo de resalto.

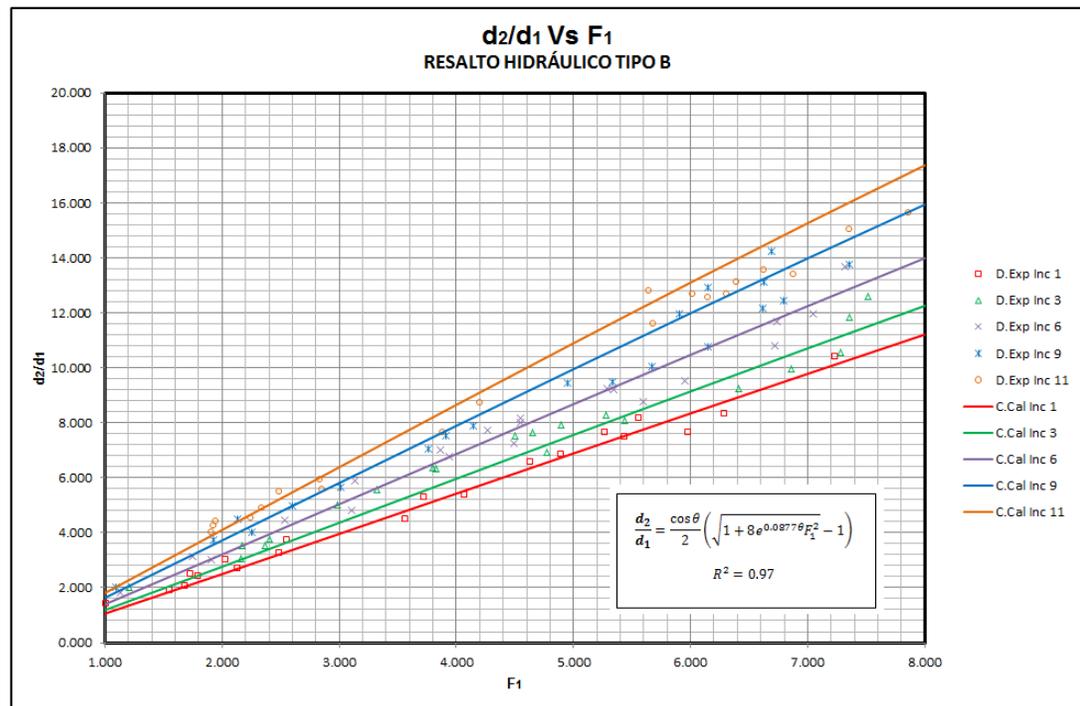
La gráfica 4-11 muestra que los datos no tienen ninguna agrupación por grado de inclinación del canal para el resalto tipo A; sin embargo, siguen una misma tendencia lineal-monótona creciente, lo cual confirma la suposición realizada en las deducciones matemáticas para este tipo de resalto (resalto hidráulico sin pendiente).

Lo anterior expresa que sin importar el grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, a mayor número de Froude en la sección inicial de resalto, se obtiene un mayor valor de la relación (d_2/d_1) , lo que en consecuencia produce una mayor profundidad secuente.

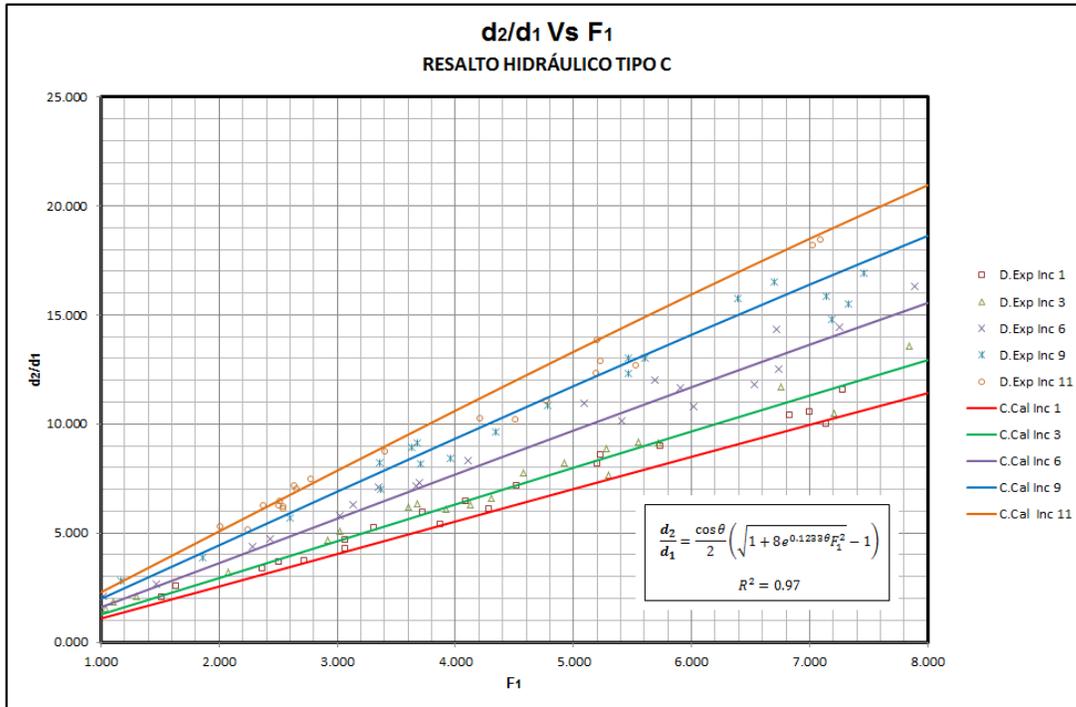
En la gráficas 4-12,4-13 y 4-14, de los resaltos tipo B, C y D-E, se observa una tendencia de los datos de la misma forma que en el resalto tipo A: Lineal-monótona creciente, pero con una agrupación creciente de estos de acuerdo al grado de inclinación del canal. Formulando de otra forma, la relación (d_2/d_1) varía en forma directamente proporcional con el número de Froude y con la inclinación del canal $(d_2/d_1 \propto F_1 \propto \Theta)$.



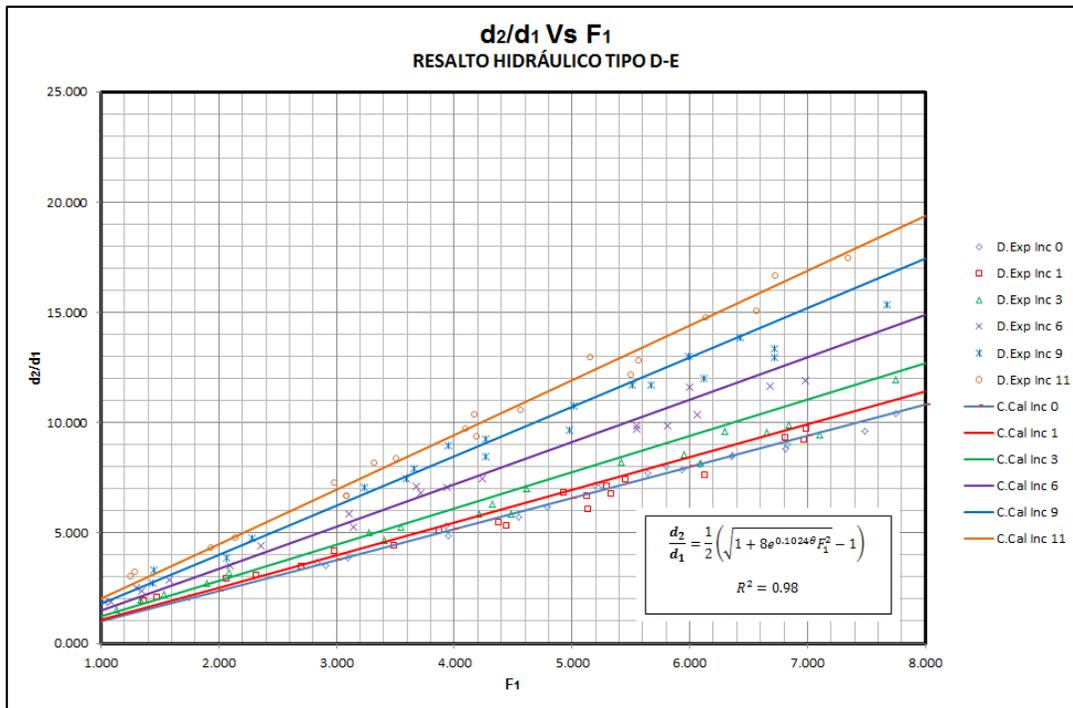
Gráfica 4-13: Ajuste experimental relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo A



Gráfica 4-14: Ajuste experimental relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.

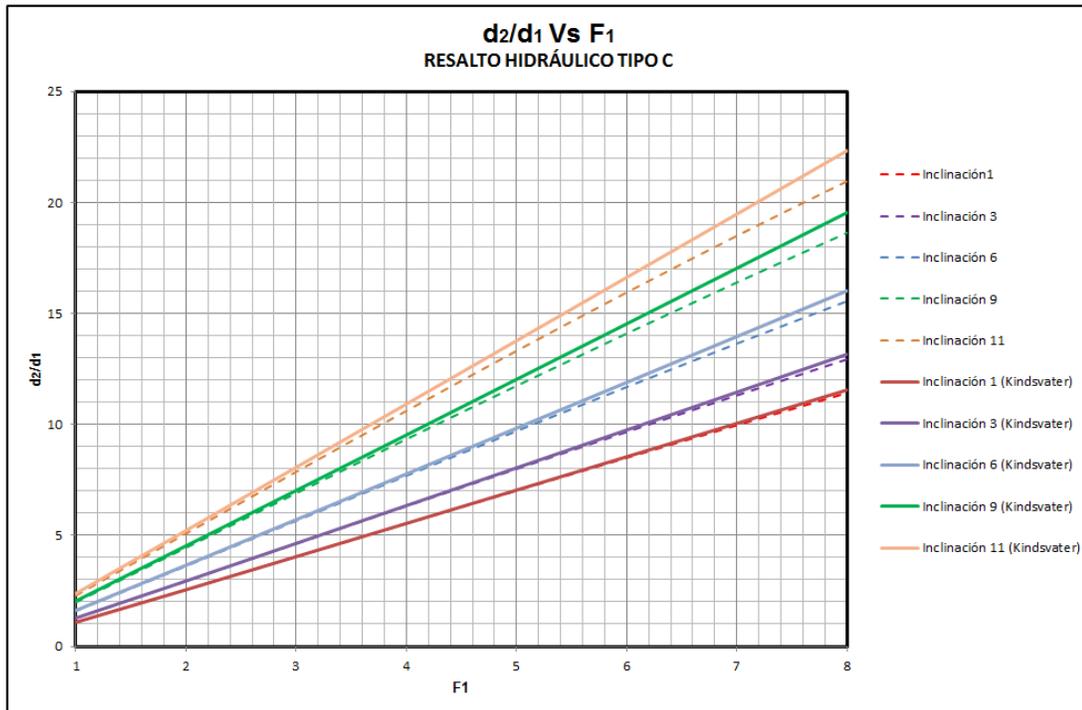


Gráfica 4-15: Ajuste experimental relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.



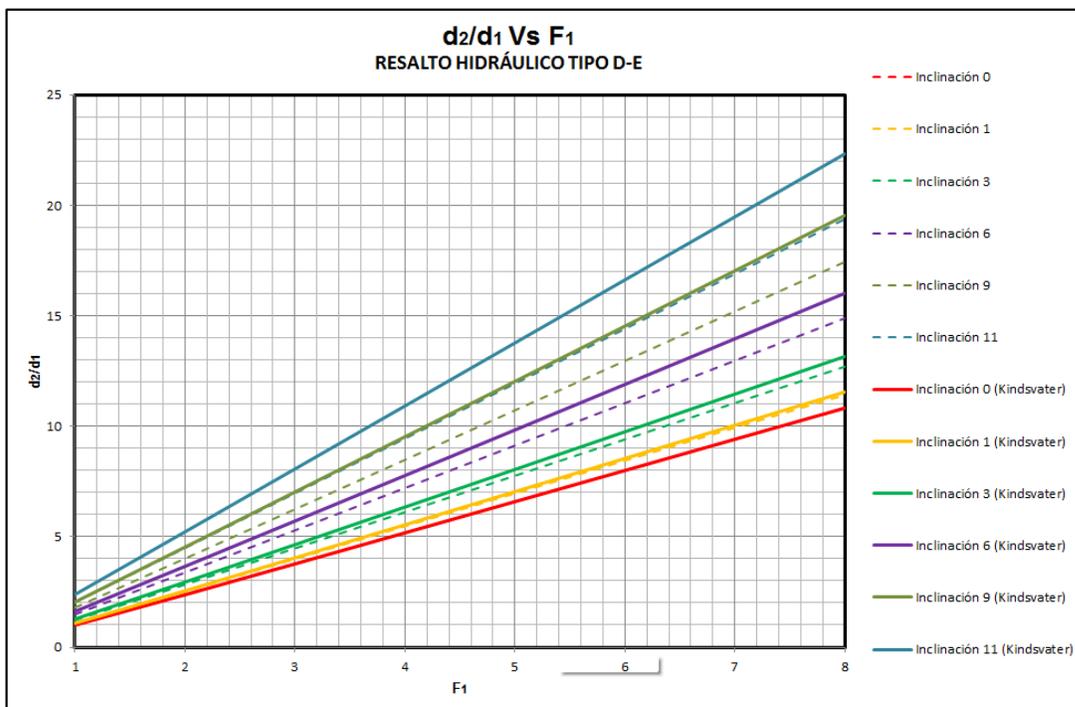
Gráfica 4-16: Ajuste experimental relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.

La relación matemática obtenida en la presente investigación para las profundidades conjugadas del resalto tipo C (ecuación 4-14), se compara en la gráfica 4-17 con la relación obtenida por Kindvater en 1944 (Ecuación 2-55); en ésta se observa una muy buena coincidencia, con una desviación general entre las curvas de aproximadamente un 6%, aunque esta discrepancia aumenta con el incremento de inclinación del canal y con el número de Froude del flujo en la sección inicial del resalto.



Gráfica 4-17: Comparación relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo C contra la obtenida por Kindsvater (1944).

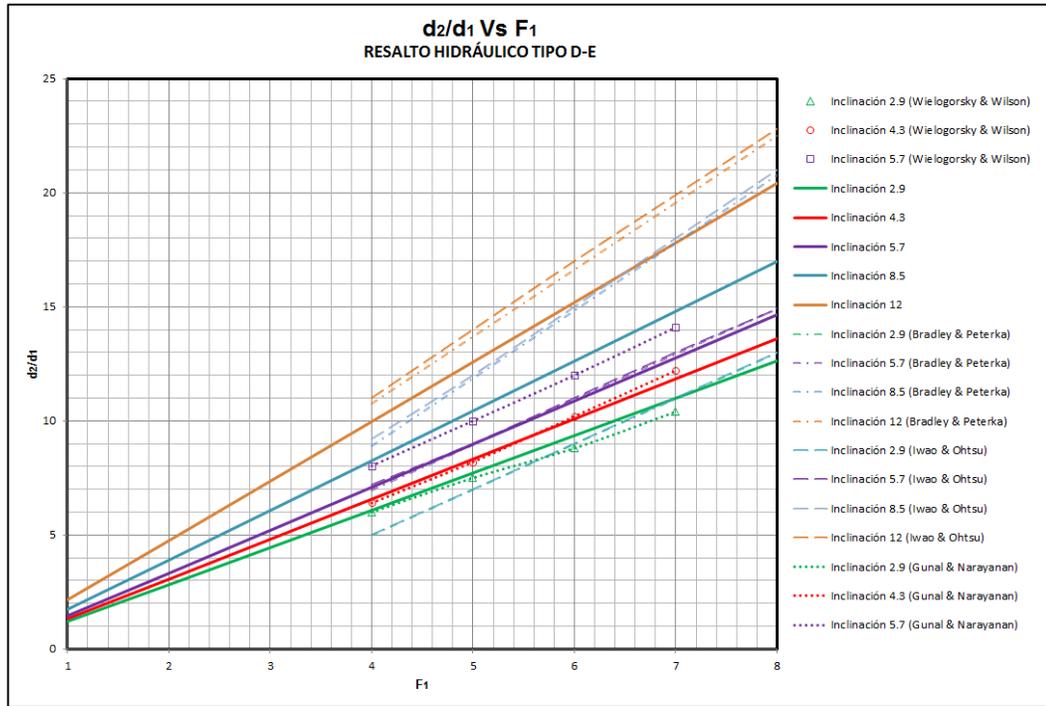
En la gráfica 4-18 se compara la relación de profundidades conjugadas obtenida por el autor del presente trabajo para el resalto D-E, con las obtenida por Kindsvater en 1944 (Ecuación 4-14) para el resalto tipo C, la cual, afirma Bradley & Peterka (1957), es aplicable también para el resalto tipo D. Lo observado experimentalmente es que esta expresión no es aplicable para el resalto tipo D-E, sobre todo para ángulos de inclinación mayores a 6°.



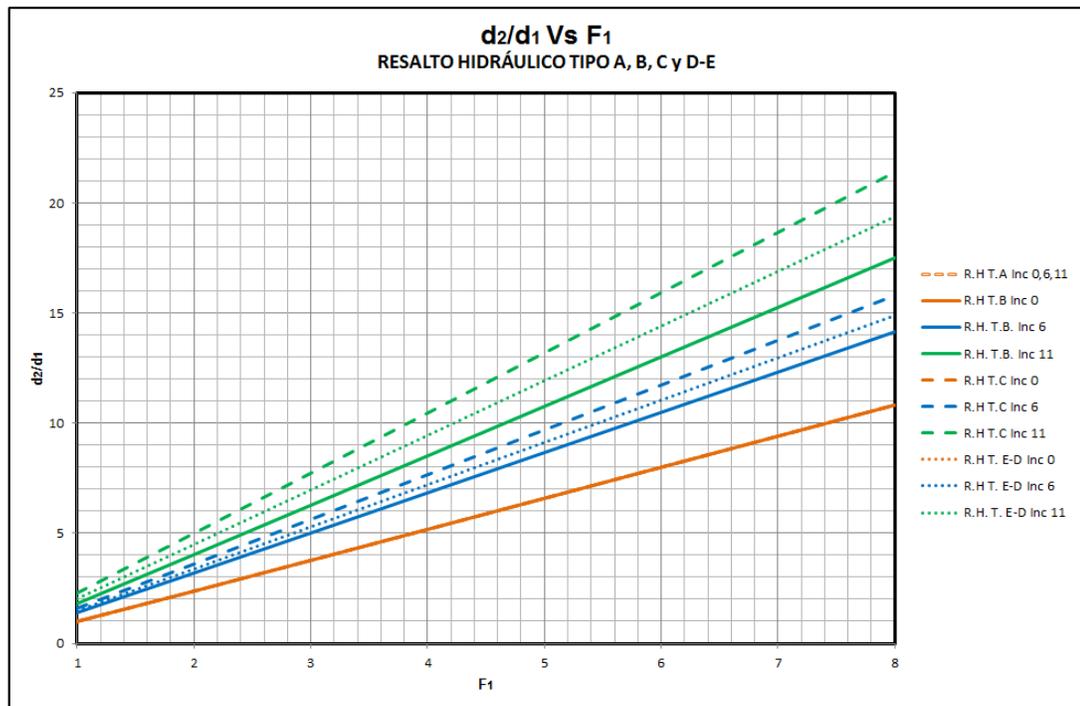
Gráfica 4-18: Comparación relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto Tipo D-E contra la obtenida por Kindsvater (1944).

En la figura 4-19 se compara las relaciones obtenidas para la relación (d_2/d_1) para el resalto tipo D-E, con las curvas obtenidas por Bradley & Peterka, Wielogorsky & Wilson, IWao & Ontsu, y Gunal & Nayaratnan, arrojando los siguientes resultados:

- Al comparar las curvas obtenidas por Wielogorsky & Wilson, para las inclinaciones de canal 2.9°, 4.3° y 5.7°, con las curvas obtenidas en el presente trabajo, se tiene una desviación aproximada del 5%, de los cuales la mayor discrepancia se observó para una inclinación del canal de 5.7°
- Al comparar las curvas obtenidas por Bradley y Peterka, para las inclinaciones de canal 2.9°, 5.7°, 8.5° y 12°, con las curvas obtenidas en el presente trabajo; se tiene una desviación aproximada del 10%, de los cuales la mayor discrepancia se observó para una inclinación de canal de 8.5°.
- Comparando las curvas obtenidas por Iwao & Ohtsu para las inclinaciones de canal 2.9°, 5.7°, 8.5° y 12°, con las curvas obtenidas en el presente trabajo, se tiene una desviación del 11%, encontrando que la mayor discrepancia se da para una inclinación del canal de 8.5°
- Comparando las curvas obtenidas por Gunal & Narayanan para las inclinaciones de canal 2.9°, 4.3° y 5.7°, con las curvas obtenidas en el presente trabajo, se encontró una desviación del 8%, con la mayor discrepancia para una inclinación del canal de 5.7°.



Gráfica 4-19: Comparación relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E contra la obtenida por Kindsvater (1944).

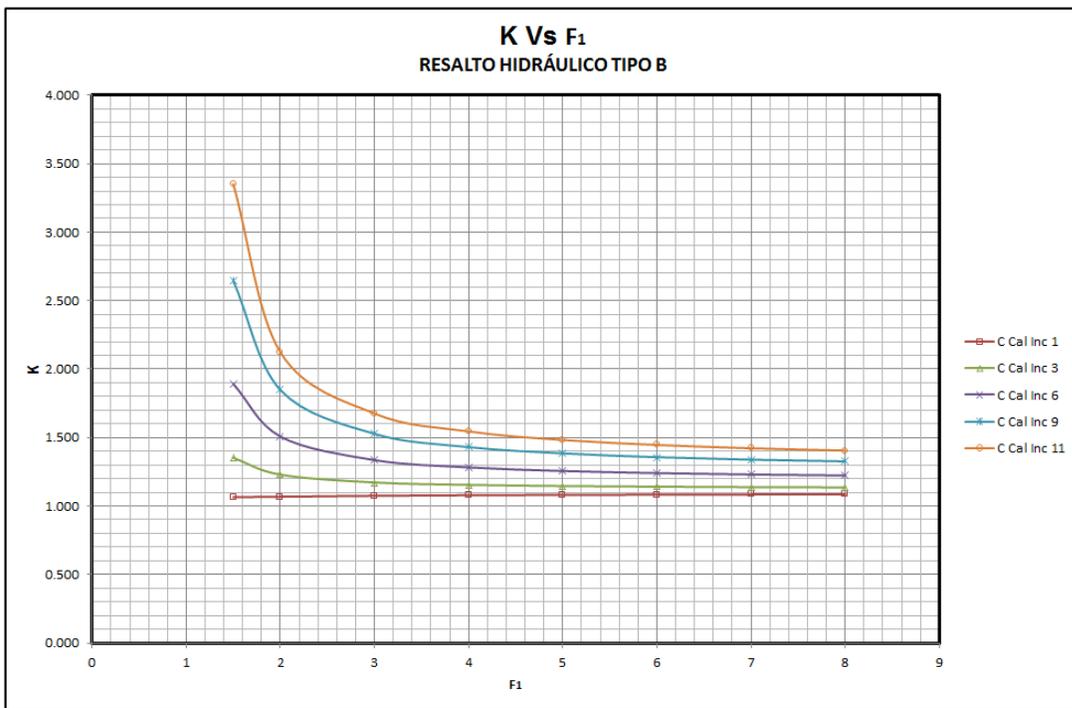


Gráfica 4-20. Comparación relación d_2/d_1 Vs F_1 para los resaltos tipo A,B,C y D-E

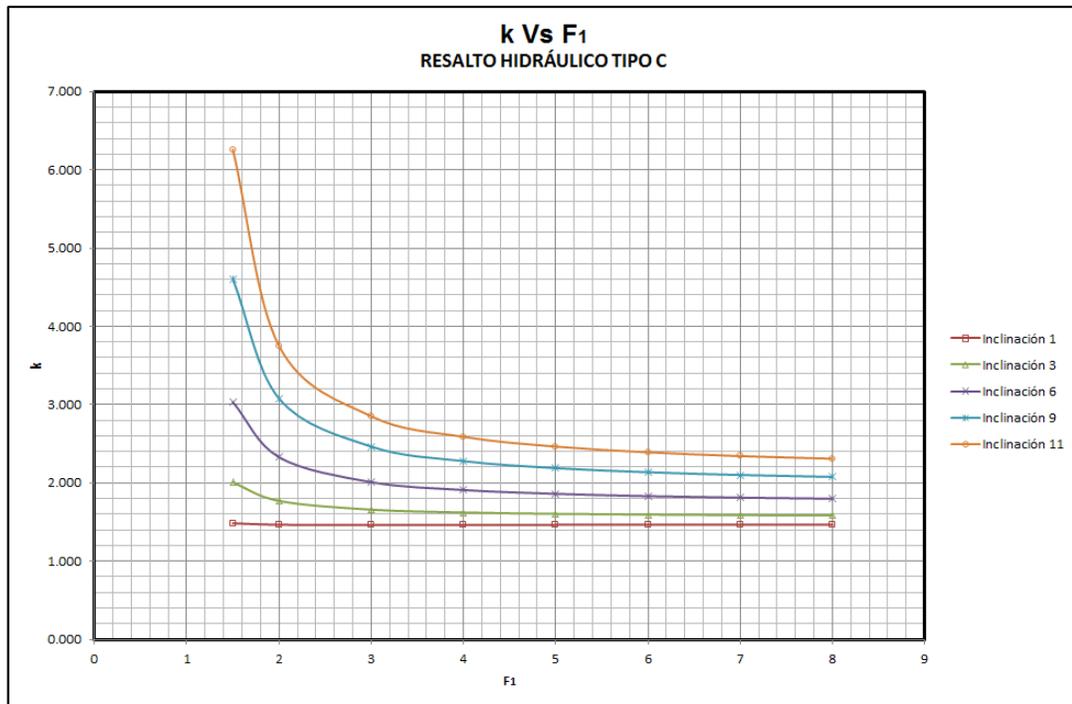
La gráfica 4-20 compara los valores de la relación (d_2/d_1) para los resaltos tipo A, B, C y D-E, con respecto al número de Froude y a la inclinación del canal; en ésta se observa que para un número de Froude e inclinación de canal determinada, la relación tiene el siguiente comportamiento: $d_2/d_1-C > d_2/d_1-D-E > d_2/d_1-B > d_2/d_1-A$.

De acuerdo con la función (Γ) ajustada para cada tipo de resalto, se calcula para cada pendiente y número de Froude el valor del coeficiente (k) , el cual según la sección 3.2.1, representa: el ajuste por la discrepancia entre el perfil real del resalto y la forma trapezoidal supuesta, la variación del peso específico del cuerpo de agua (volumen de control) dentro del resalto por incorporación de aire y los posibles errores por la suposición de la relación de profundidades conjugadas propuesta para el resalto tipo B y C.

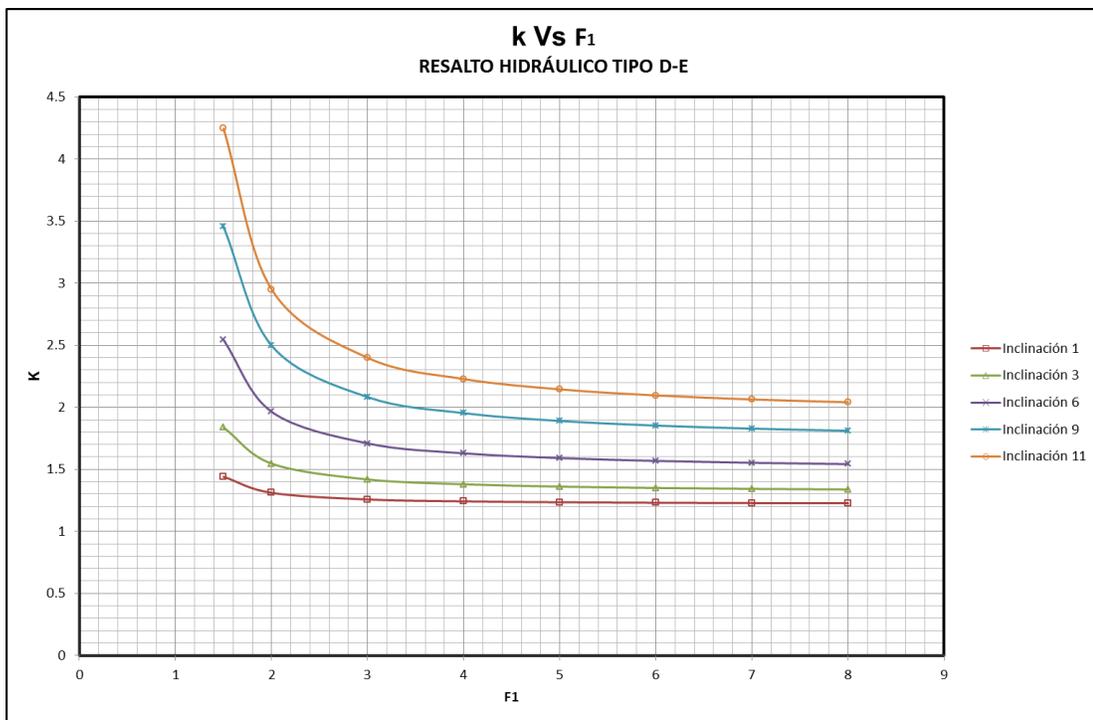
Las gráficas 4-21, 4-22 y 4-23, muestran para (k) , una forma exponencial decreciente con el número de Froude teniendo en cuenta una misma inclinación del canal; de esta gráfica también se puede deducir que para una pendiente del canal igual o cercana a cero, el valor de k se aproxima a la unidad. En resumen, el valor de (k) varía en proporción directa con la inclinación del canal y en proporción inversa con el número de Froude ($k \propto \theta \alpha^{-1} F_1$).



Gráfica 4-21: Relación k Vs F_1 para el resalto tipo B.

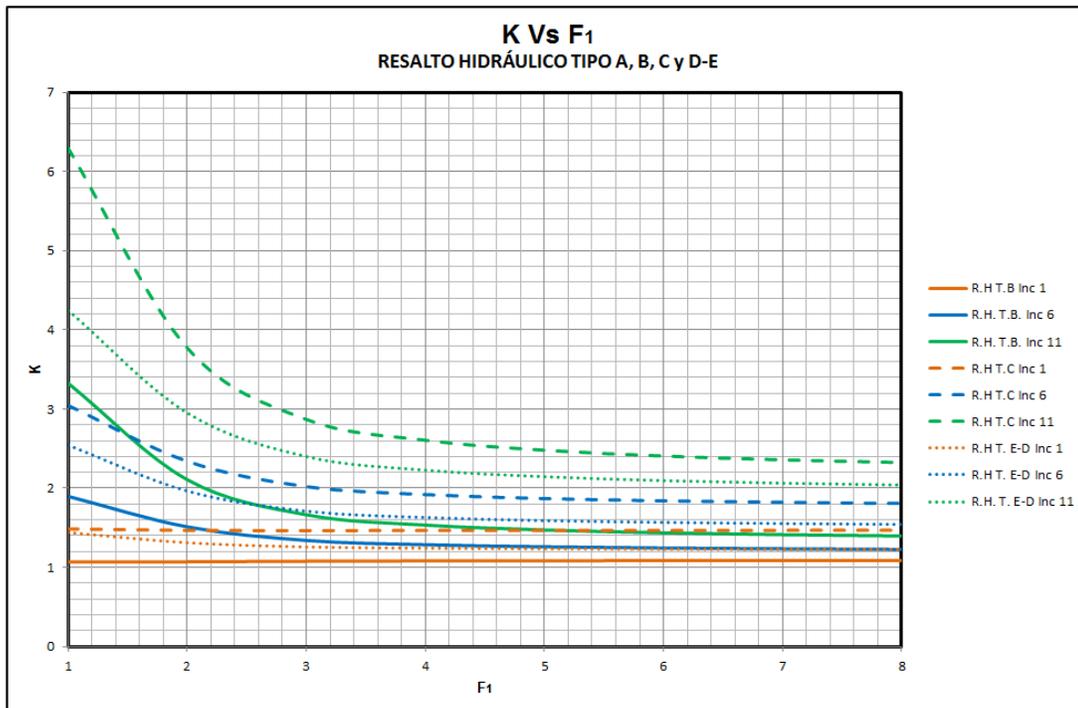


Gráfica 4-22: Relación k Vs F_1 para el resalto tipo C.



Gráfica 4-23. Relación k Vs F_1 para el resalto tipo D-E.

En la gráfica 4-24, se compara el valor del parámetro (k), para los resaltos tipos A, B, C y D-E, con respecto al número de Froude y a la inclinación del canal, en ésta se observa que para un número de Froude e inclinación determinada, la relación tiene el siguiente comportamiento: $k-C > k-D-E > k-B > k-A$.



Gráfica 4-24: Comparación relación k Vs F_1 para los resaltos tipo A, B, C y D-E

4.2.3 Relación profundidad de flujo aguas abajo - profundidad de flujo Inicial del Resalto (d_2/d_1)

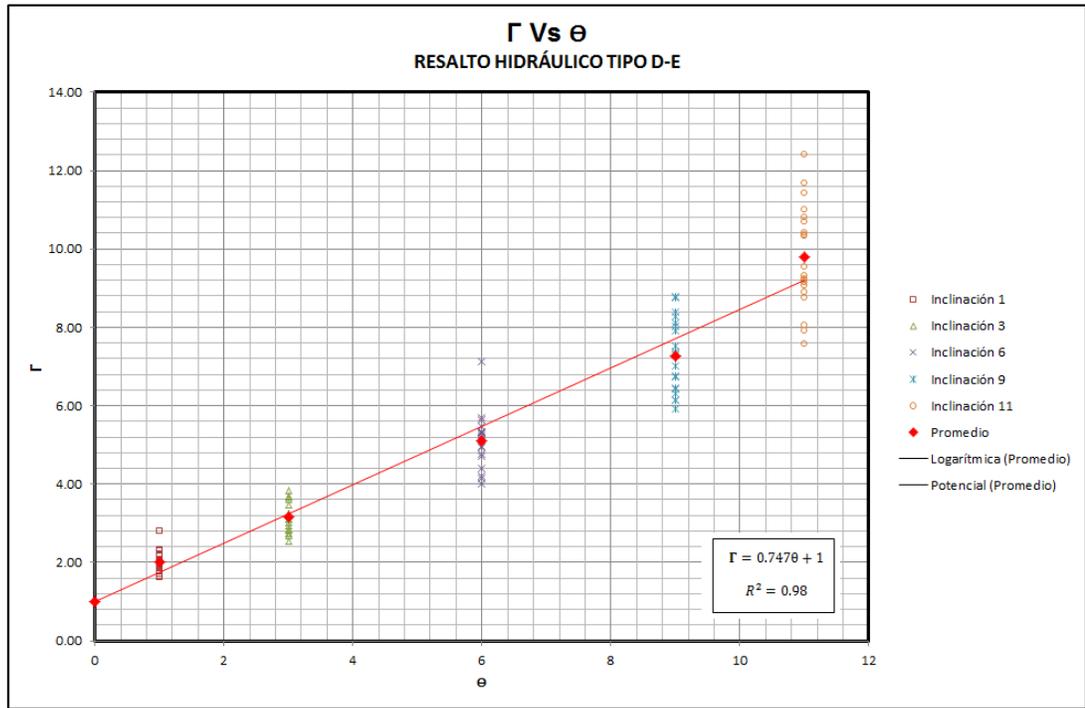
Para el tipo de resalto D-E, se intenta hallar una relación matemática entre la relación (d_2/d_1), con respecto al número de Froude y la inclinación del canal. Para esto se emplea la forma matemática deducida para la relación (d_2/d_1) (ver ecuación 3-89).

Ajustado la función (Γ), se tiene la siguiente expresión con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.98$:

:

$$\Gamma = 0.747\theta + 1$$

(4-16)



Gráfica 4-25: Ajuste experimental relación Γ Vs θ para el resalto tipo D-E.

La gráfica 4-25, muestra cómo la curva se ajusta a la media o centroide de la nube de datos para una misma inclinación del canal, siguiendo una forma lineal-monótona creciente.

Recordando una vez más, que según la ecuación 3-89:

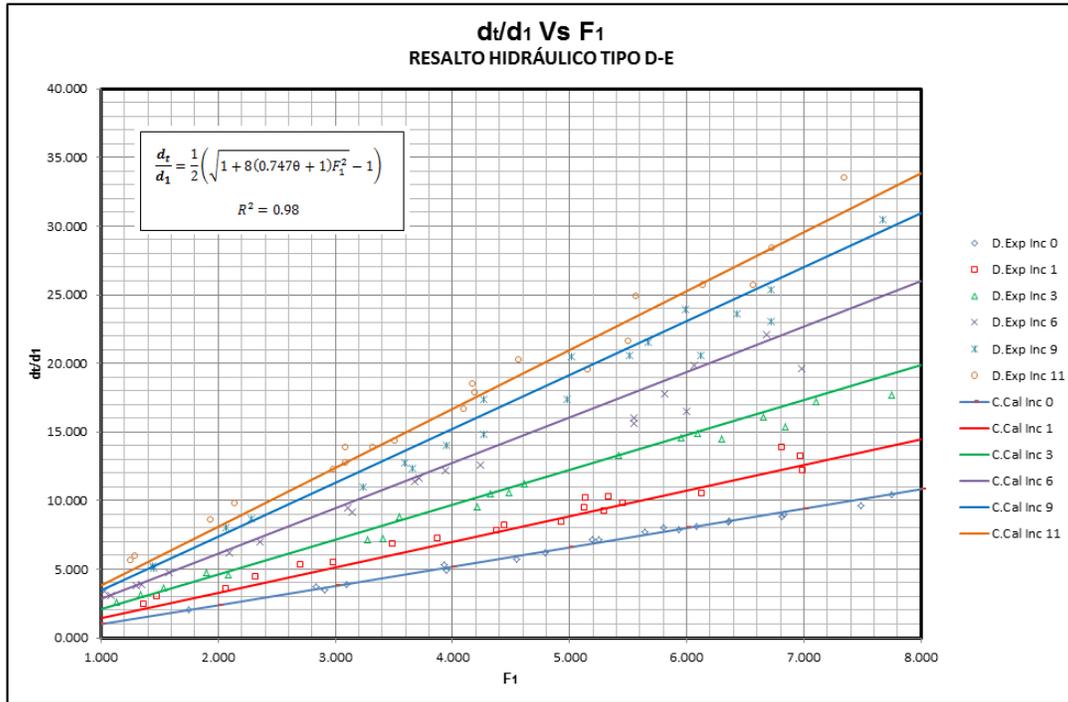
$$G^2 = \Gamma F_1^2 \tag{4-17}$$

Ahora reemplazando la ecuación (4-17) en la ecuación (3-89) se obtiene la siguiente relación de profundidades (d_t/d_1), respecto al número de Froude y al ángulo de inclinación del canal, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.98$.

$$\frac{d_t}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8(0.747\theta + 1)F_1^2} - 1 \right) \tag{4-18}$$

La gráfica 4-26, muestra una muy buena correlación de los datos con la forma matemática supuesta, según muestra el coeficiente de correlación. Esta gráfica también muestra una tendencia de los datos de forma lineal-monótona creciente, con agrupación de datos de acuerdo al grado de inclinación del canal. En otras palabras, la relación

(d_t/d_1) varía en forma directamente proporcional con el número de Froude y con la inclinación del canal ($d_t/d_1 \propto F_1 \propto \Theta$).



Gráfica 4-26: Ajuste experimental relación dt/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.

4.2.4 Relación altura - profundidad inicial de flujo del resalto (h/y_1)

Con los datos experimentales obtenidos para esta relación y para los resaltos tipo A, B, C y D-E, en diferentes inclinaciones y números de Froude; se compara la forma matemática deducida en la sección 3.1.8 y 3.2.8, teniendo en cuenta las funciones (Γ) anteriormente ajustadas para cada tipología de resalto; con lo cual se obtuvieron las siguientes relaciones con sus respectivos coeficientes de correlación:

Resalto Tipo A:

$$\frac{h}{y_1} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8F_1^2} - \frac{3}{2}$$

$$R^2 = 0.97$$

$$(4-19)$$

Resalto Tipo B:

$$\frac{h}{y_1} = 1/2 \sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 3/2$$

$$R^2 = 0.97$$

(4-20)

Resalto Tipo C:

$$\frac{h}{y_1} = 1/2 \sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 3/2$$

$$R^2 = 0.97$$

(4-21)

Resalto Tipo D-E:

$$\frac{h}{y_1} = 1/2 \sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 3/2$$

$$R^2 = 0.98$$

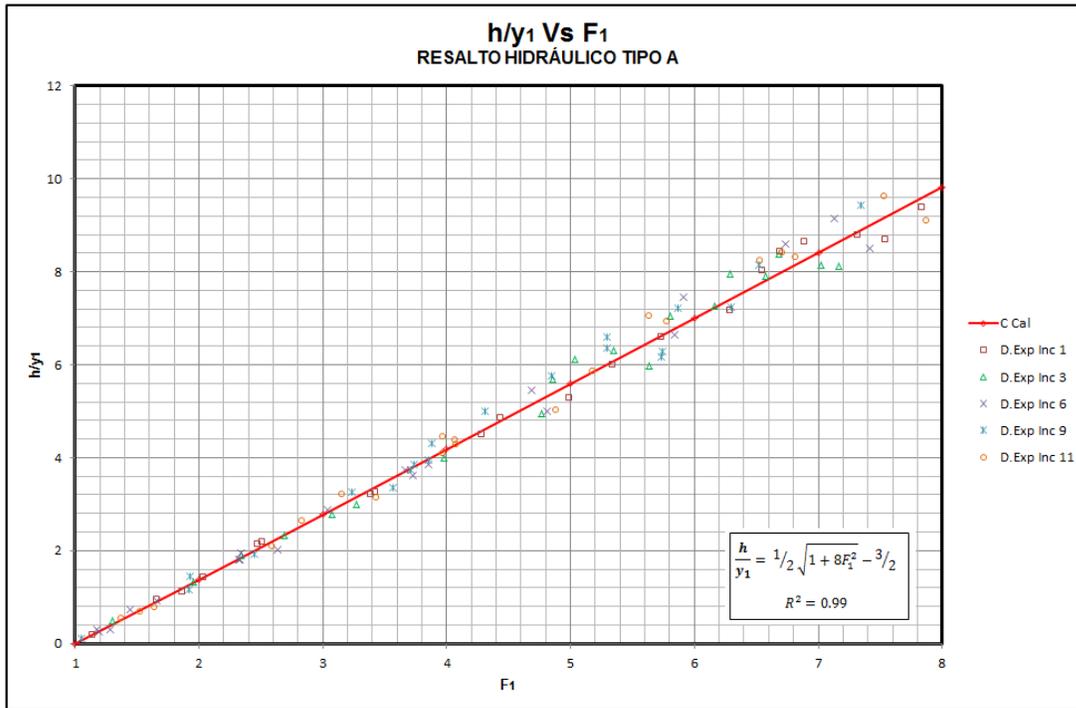
(4-22)

En la gráfica 4-27,4-28,4-29 y 4-30, se puede observar una excelente correlación de los datos con la forma matemática deducida ya que esta relación implícitamente depende de la relación de profundidades conjugadas (d_2/d_1), que como se mostró en numerales anteriores, obtuvo muy buenos coeficientes de correlación.

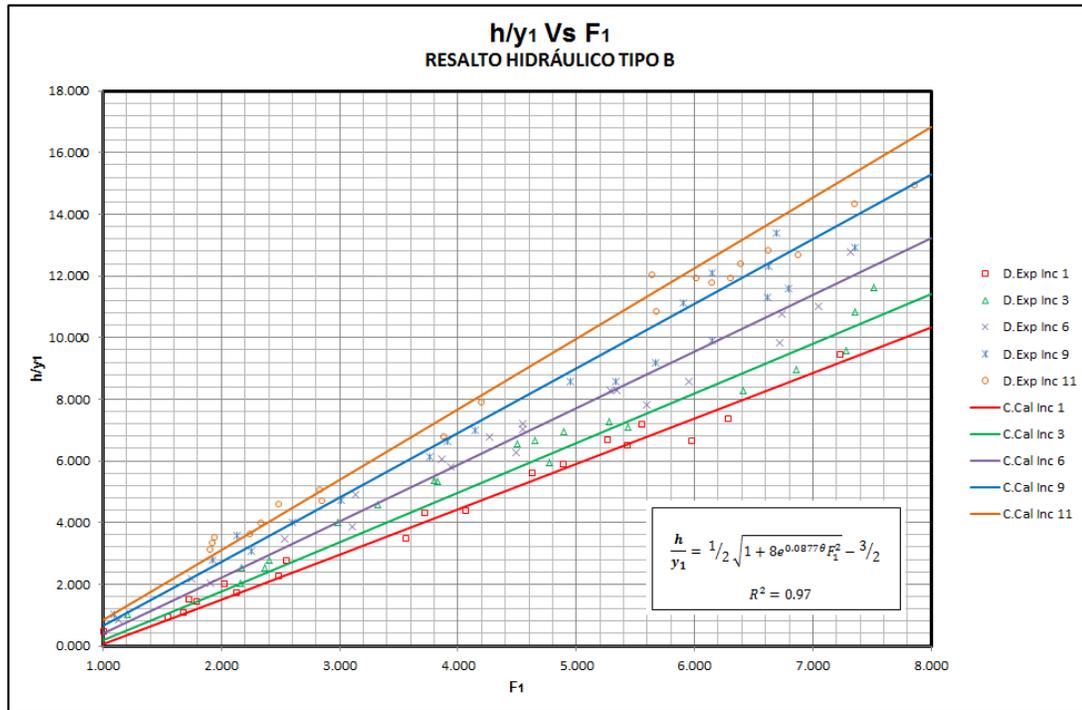
La gráfica 4-27 muestra que los datos no tienen ninguna agrupación por grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, sin embargo siguen una misma tendencia lineal-monótona creciente, lo que significa que sin importar el grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, a mayor número de Froude en la sección inicial de resalto, se obtiene una mayor relación (h/d_1), lo que trae consigo una mayor profundidad del resalto.

En la gráficas 4-28,4-29 y 4-30, para los resaltos tipo B, C y D-E, se observa una tendencia de los datos de la misma forma que en el resalto tipo A: Lineal-monótona-creciente, pero con una agrupación creciente de estos de acuerdo con el grado de inclinación del canal. Formulando de otra forma, la relación (h/y_1) varía en forma

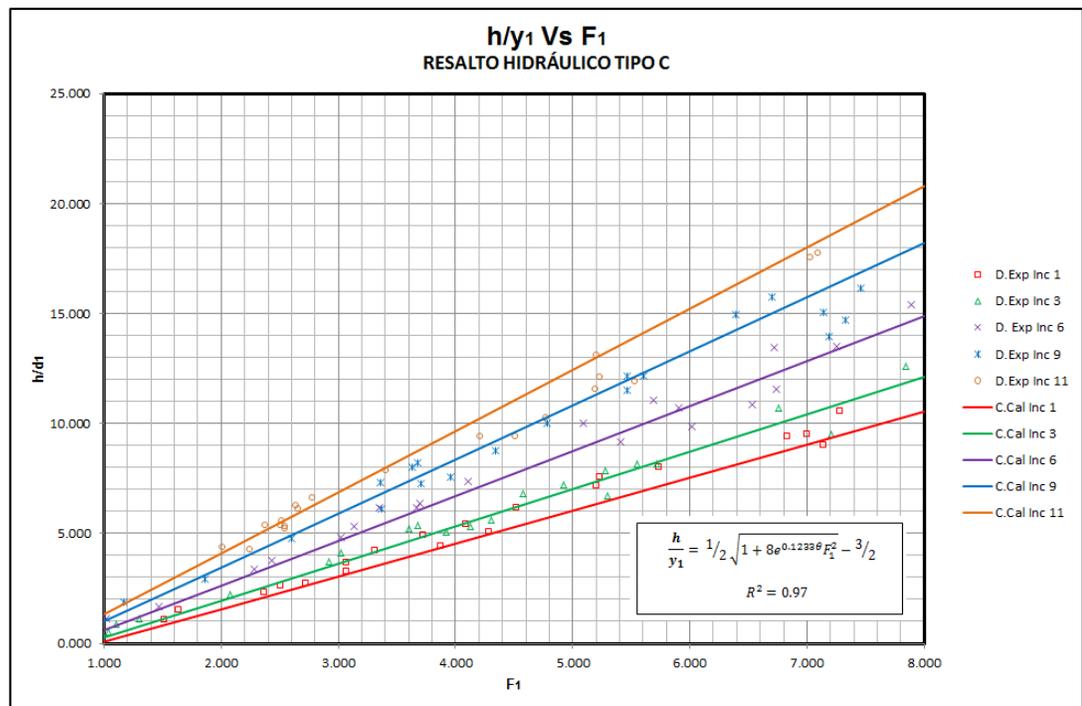
directamente proporcional con el número de Froude y la inclinación del canal ($h/y_1 \propto F_1 \propto \Theta$).



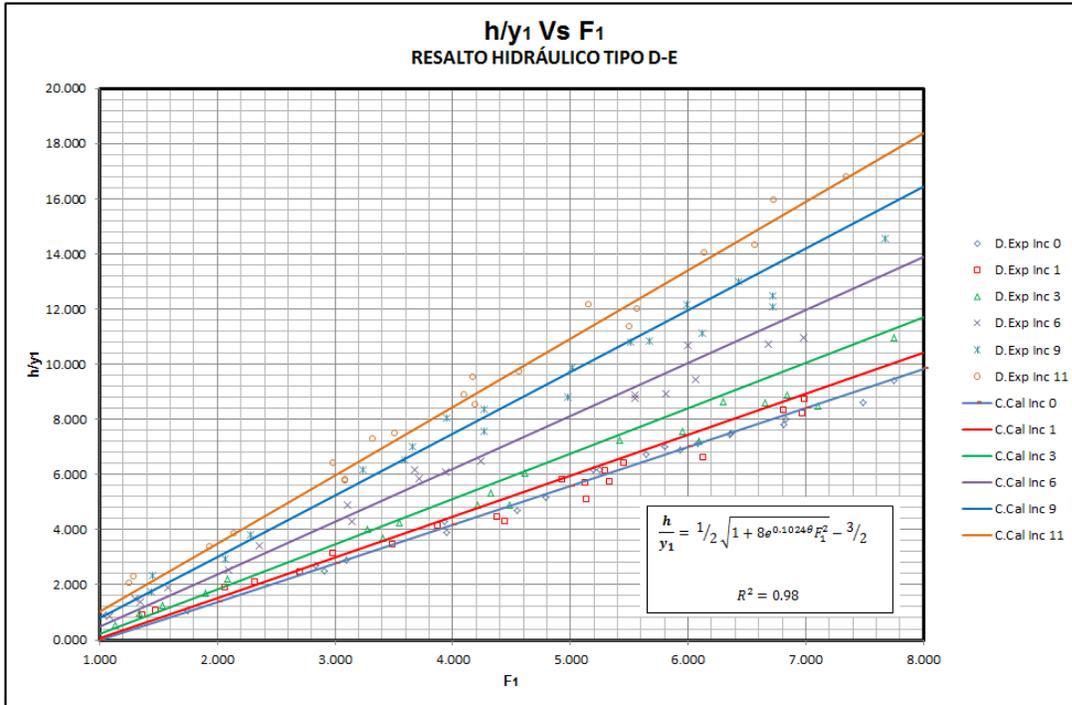
Gráfica 4-27: Ajuste experimental relación h/y_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.



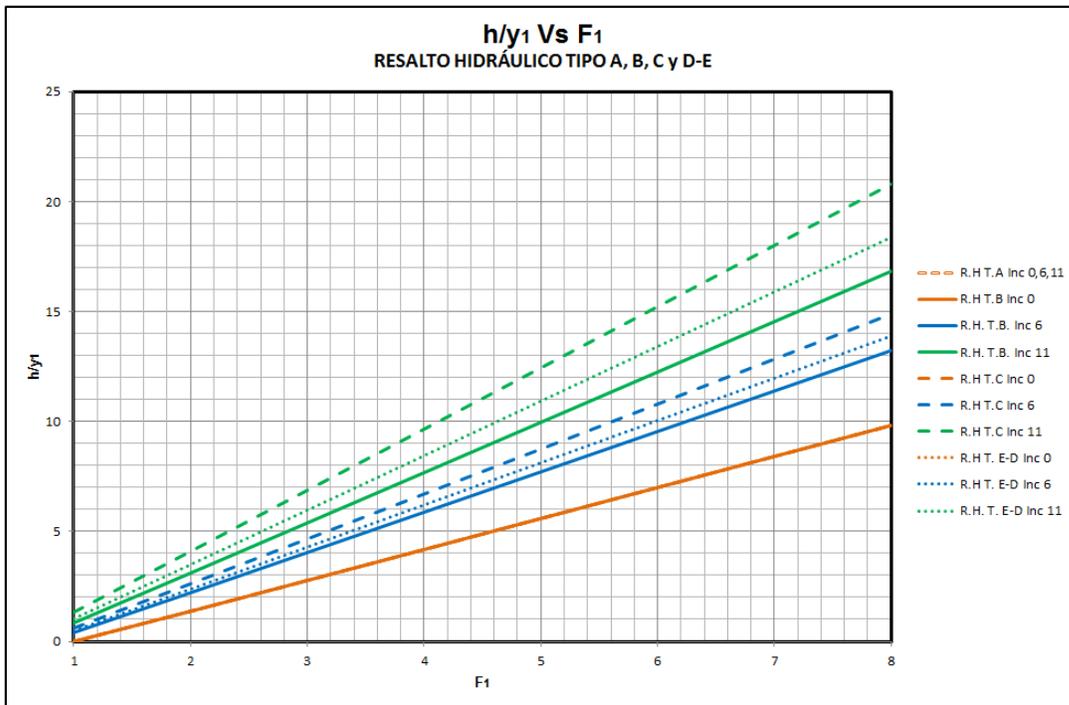
Gráfica 4-28: Ajuste experimental relación h/y₁ Vs F₁ para el resalto tipo B.



Gráfica 4-29: Ajuste experimental Relación h/y₁ Vs F₁ para el Resalto Tipo C.



Gráfica 4-30: Ajuste experimental relación h/y₁ Vs F₁ para el resalto tipo D-E.



Gráfica 4-31: Comparación relación h/y₁ Vs F₁ para los resaltos tipo A,B,C y D-E

La gráfica 4-31 compara el orden de magnitud de la relación (h/y_1) para los resaltos tipo A, B, C y D-E, con respecto al número de Froude y a la inclinación del canal, en esta se observa que para un numero de Froude e inclinación de canal determinada, la relación tiene el siguiente comportamiento: $h/y_1-C > h/y_1-D-E > h/y_1-B > h/y_1-A$.

4.2.5 Relación energía final del flujo – energía inicial del flujo del resalto (E_2/E_1)

Con los datos experimentales obtenidos para esta relación y para los resaltos tipo A, B, C y D-E, en diferentes inclinaciones y números de Froude; se compara la forma matemática deducida en la sección 3.1.5 y 3.2.5, teniendo en cuenta las funciones (Γ) y (L/d_1) anteriormente ajustadas para cada tipología de resalto; con lo cual se obtuvieron las siguientes relaciones con sus respectivos coeficientes de correlación:

Resalto Tipo A:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 (2 + F_1^2)}$$

$$R^2 = 0.99$$

(4-23)

Resalto Tipo B:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1)^2 (2((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2)}$$

$$R^2 = 0.87$$

(4-24)

Resalto Tipo C:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 1\right)^3 + 4F_1^2}{\left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 1\right)^2 \left(2\left((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053\right) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2\right)}$$

$$R^2 = 0.81$$

(4-25)

Resalto Tipo D-E:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\left(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1\right)^3 + 4F_1^2}{\left(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1\right)^2 \left(2\left((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964\right) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2\right)}$$

$$R^2 = 0.80$$

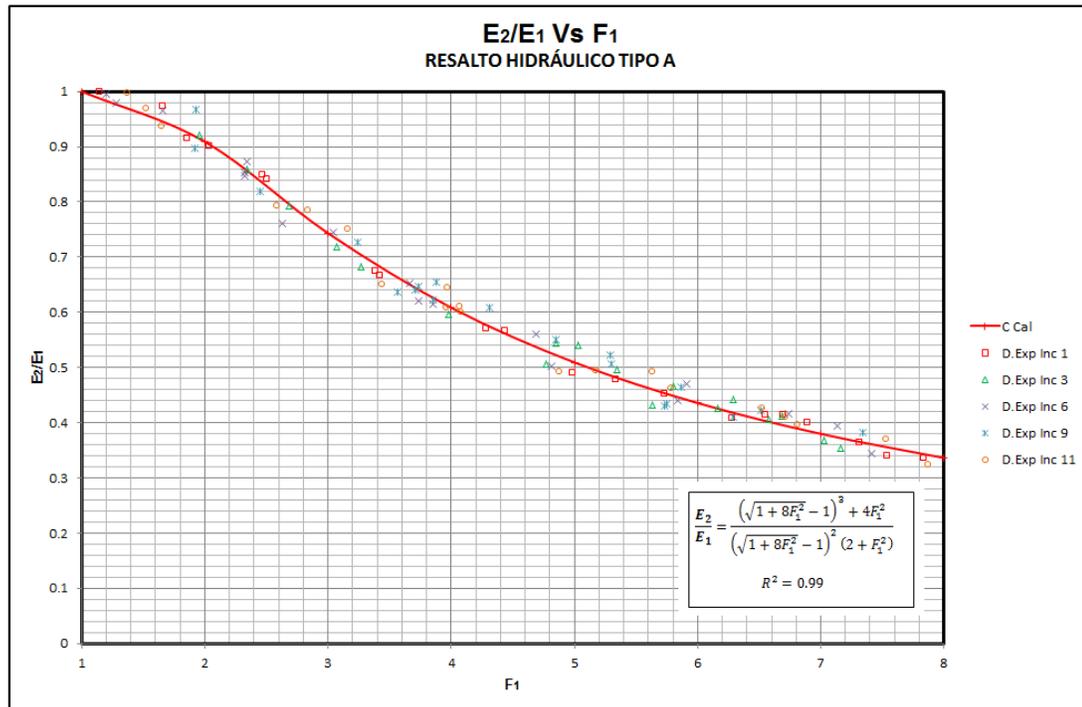
(4-26)

En las gráficas 4-32,4-33,4-34 y 4-35 se puede observar una aceptable correlación de los datos con las formas matemáticas deducidas, ajustando de una mejor forma los datos de menor inclinación.

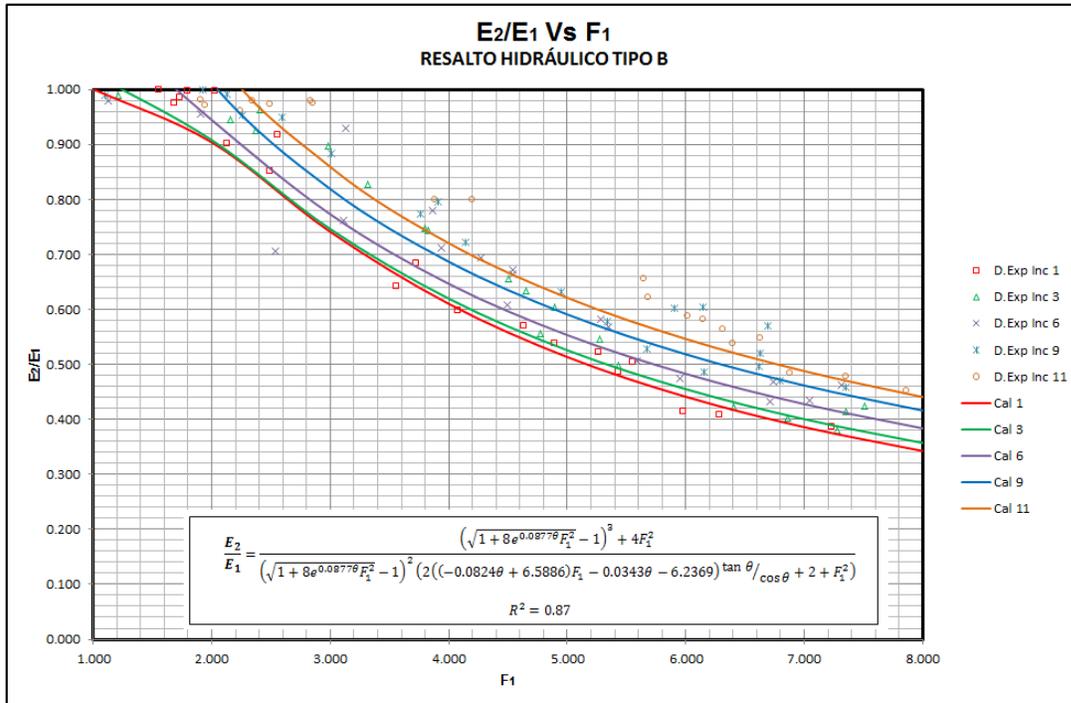
La gráfica 4-32 muestra que los datos no presentan ninguna agrupación por grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, sin embargo siguen una misma tendencia no lineal-decreciente, lo que significa que sin importar el grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, a mayor número de Froude en la sección inicial del resalto, se obtiene una menor relación E_2/E_1 , lo que trae consigo una mayor disipación de energía. De esta gráfica se puede también deducir que se puede alcanzar el 50% de disipación de energía con resaltos hidráulicos con número de Froude aguas arriba cercanos a cinco, rango denominado como resalto estable (chow,1959).

En la gráficas 4-33,4-34 y 4-35, para los resaltos tipo B, C y D-E, se observa una tendencia de los datos de la misma forma que en el resalto tipo A: no lineal-decreciente, pero con una agrupación creciente de estos de acuerdo al grado de inclinación del canal. Formulando de otra forma, la relación E_2/E_1 varía en forma directamente proporcional con la inclinación del canal y en forma inversamente proporcional con el número de Froude

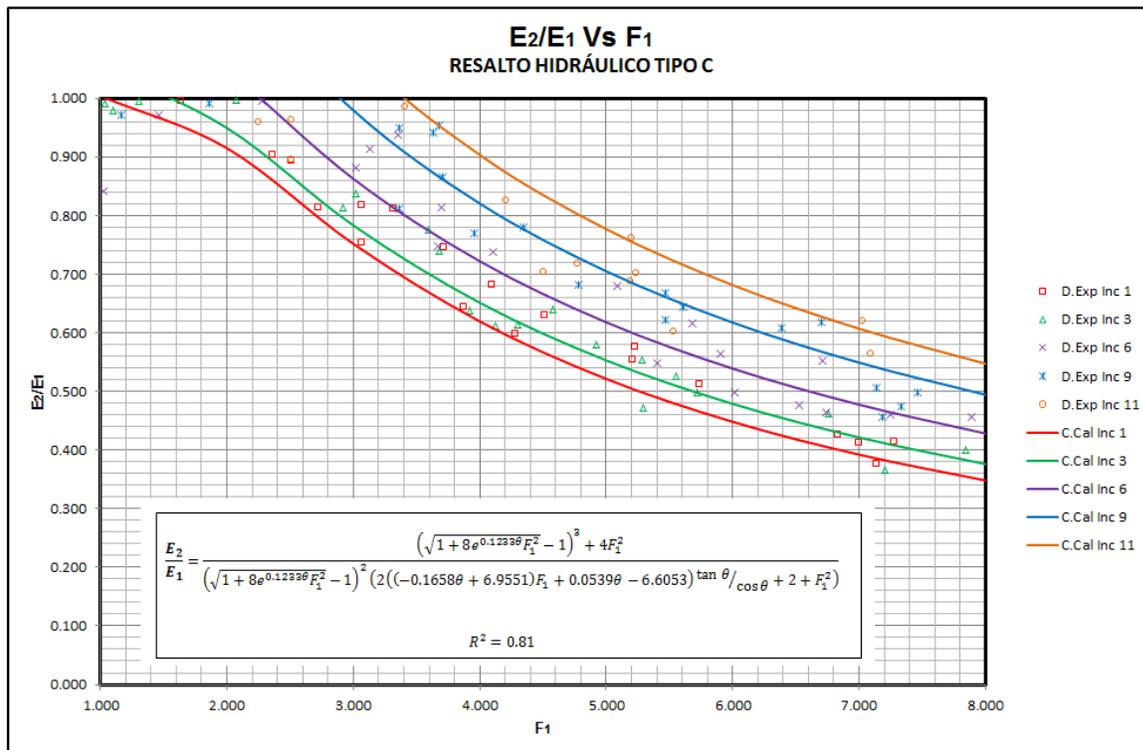
$(E_2/E_1 \propto \Theta \alpha^{-1} F_1)$. Así, para obtener un porcentaje de disipación de energía determinado se necesita un mayor número de Froude entre mayor inclinación tenga el canal.



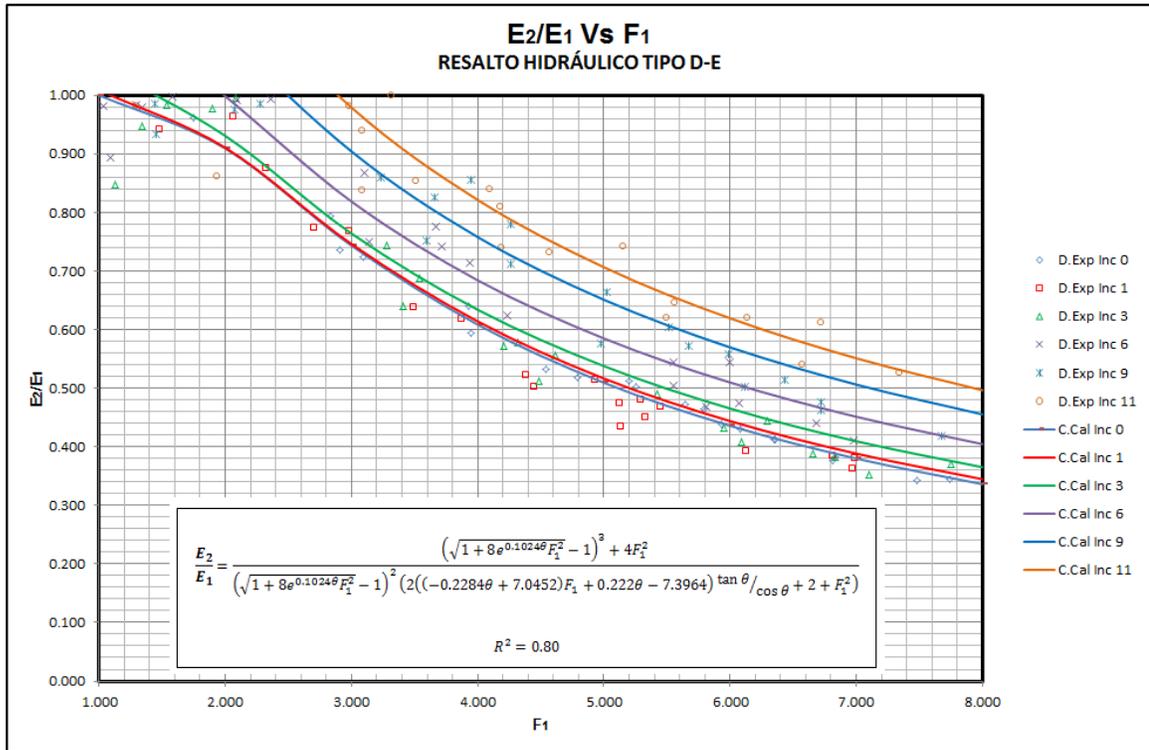
Gráfica 4-32: Ajuste Experimental relación E_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.



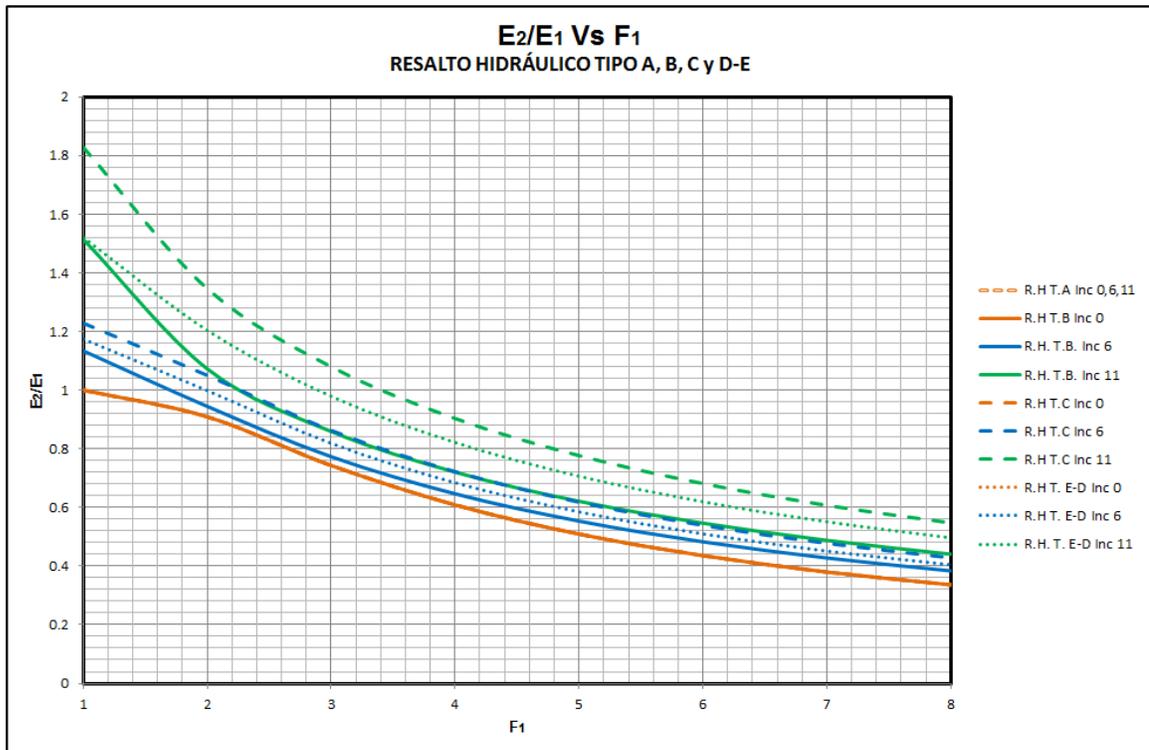
Gráfica 4-33: Ajuste experimental relación E_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.



Gráfica 4-34: Ajuste experimental relación E_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.



Gráfica 4-35: Ajuste experimental relación E₂/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo D-E.



Gráfica 4-36: Comparación relación E₂/E₁ Vs F₁ para los resaltos tipo A,B,C y D-E

La gráfica 4-36 compara el valor de la relación (E_2/E_1) para los resaltos tipos A, B, C y D-E, con respecto al número de Froude y a la inclinación del canal; en esta se observa que para un número de Froude e inclinación de canal determinado, la relación tiene el siguiente comportamiento: $E_2/E_1-C > E_2/E_1-D-E > E_2/E_1-B > E_2/E_1-A$. Lo anterior quiere decir que para un mismo número de Froude y una misma inclinación del canal, el resalto tipo A es el que mayor disipación de energía proporciona, mientras el resalto tipo C, es el que menos disipa energía.

4.2.6 Relación altura – energía del flujo inicial del resalto (h/E_1)

Con los datos experimentales obtenidos para esta relación y para los resaltos tipo A, B, C y D-E, en diferentes inclinaciones y números de Froude; se compara la forma matemática deducida en las secciones 3.1.3 y 3.2.3, teniendo en cuenta las funciones (Γ) y (L/d_1) anteriormente ajustadas para cada tipología de resalto; con lo cual se obtuvieron las siguientes relaciones con sus respectivos coeficientes de correlación:

Resalto Tipo A:

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3}{2 + F_1^2}$$

$$R^2 = 0.94$$

$$(4-27)$$

Resalto Tipo B:

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 3}{2((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$$

$$R^2 = 0.85$$

$$(4-28)$$

Resalto Tipo C:

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 3}{2((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$$

$$R^2 = 0.80$$

(4-29)

Resalto Tipo D-E:

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 3}{2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$$

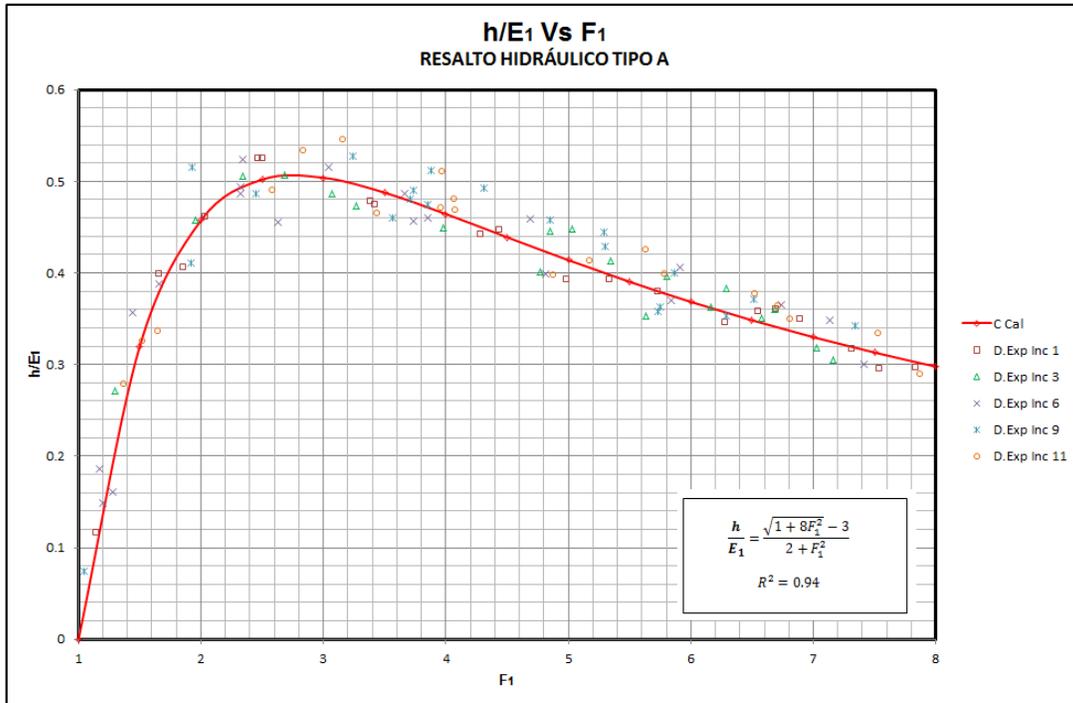
$$R^2 = 0.83$$

(4-30)

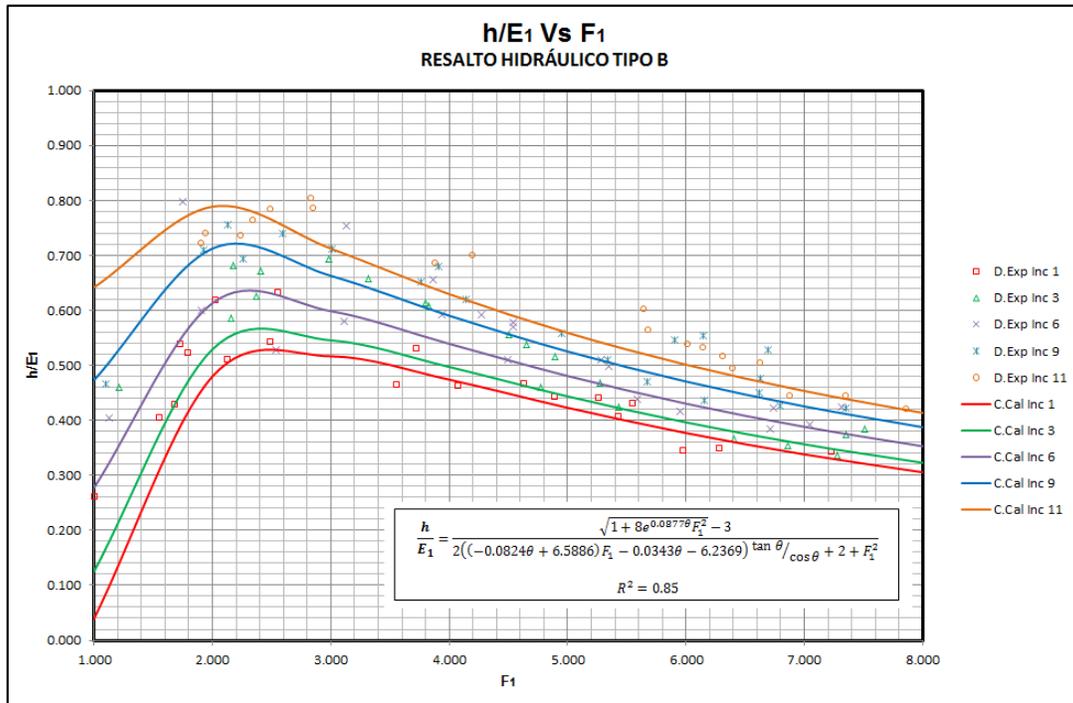
En la gráfica 4-37,4-38,4-39 y 4-40 se puede observar una aceptable correlación de los datos con las formas matemáticas deducidas, ajustando de una mejor forma los datos de menor inclinación.

La gráfica 4-37 muestra que los datos no tienen ninguna agrupación por grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, sin embargo siguen una misma tendencia no lineal-no monótona, En esta gráfica se puede deducir que la máxima altura que puede alcanzar el resalto es aproximadamente el 50% de la energía inicial total y se da en números de Froude cercanos a 2.77, en donde comúnmente se forman los denominados resaltos oscilantes (chow,1959).

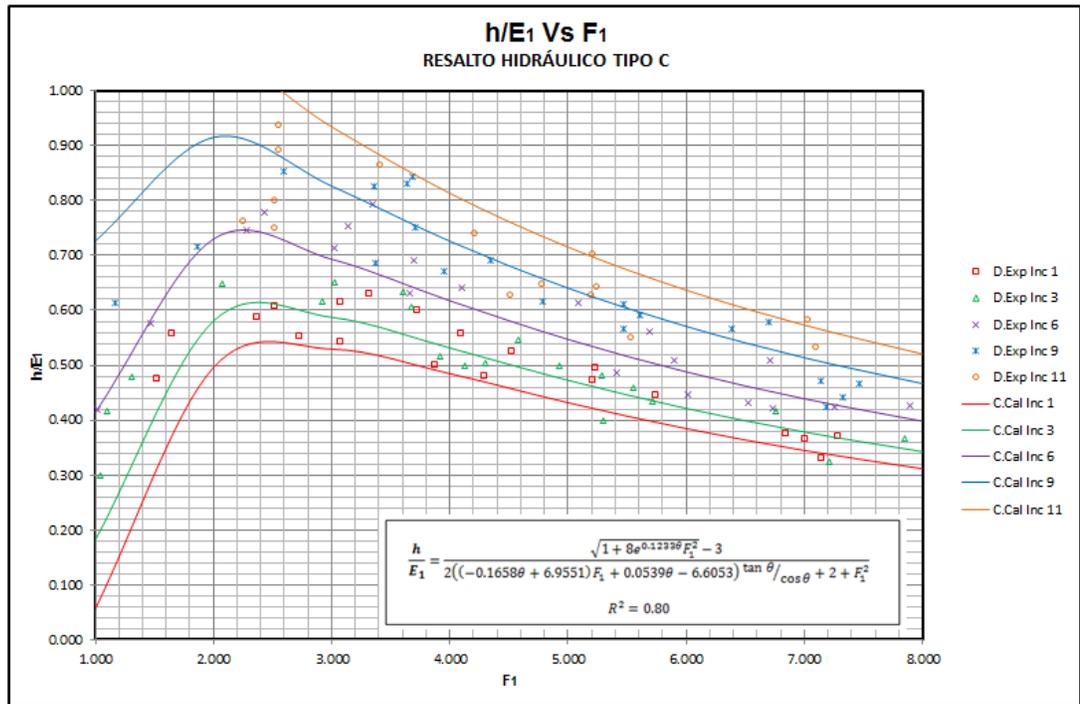
En la Gráficas 4-38,4-39 y 4-40, para los resaltos tipo B, C y D-E, se observa una tendencia de los datos de la misma forma que en el resalto tipo A: no lineal-no monótona, pero con una agrupación creciente de estos de acuerdo con el grado de inclinación del canal. En esta gráfica se puede deducir que la máxima altura que puede alcanzar el resalto con relación a la energía inicial total, aumenta con la inclinación del canal y se da en el rango denominado como resalto oscilante (Chow, 1959), además a mayor inclinación se alcanza el valor máximo de la relación con números de Froude más pequeños. En resumen, la relación (h/E_1) varía en proporción directa con la inclinación del canal y en forma directa con el número de Froude para $F_1 < 2.77$ o en forma inversa con el número de Froude para $F_1 > 2.77$ ($h/E_1 \propto \theta \propto F_1$, para $F_1 < 2.77$, $h/E_1 \propto \theta \propto^{-1} F_1$, para $F_1 > 2.77$).



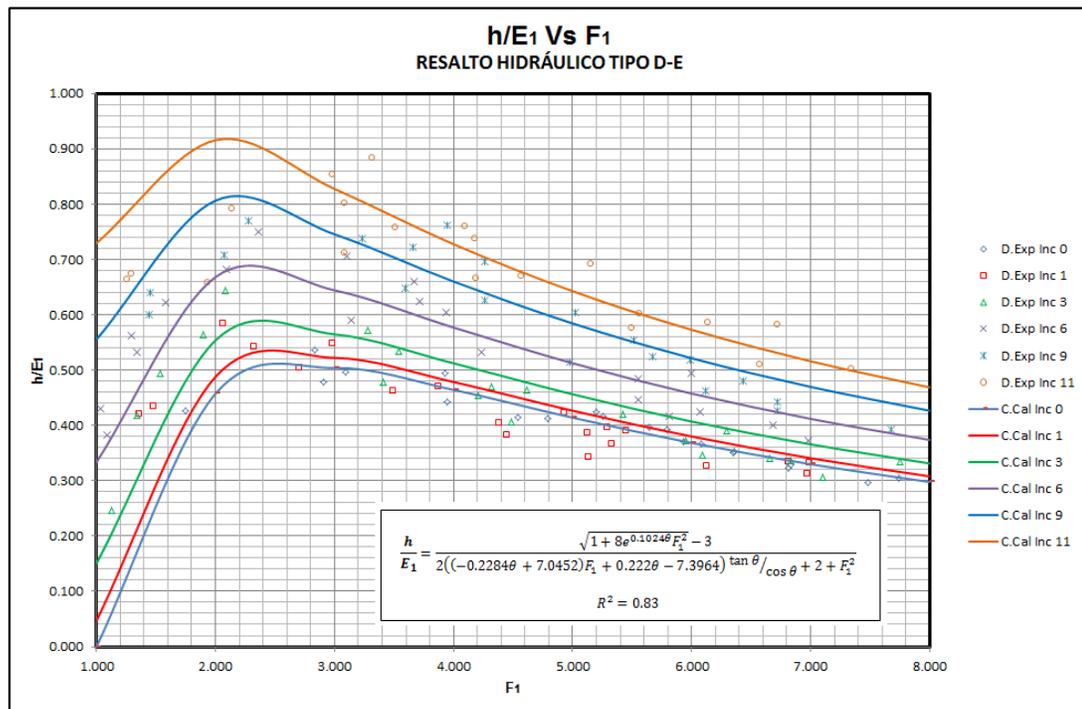
Gráfica 4-37: Ajuste experimental relación h/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo A.



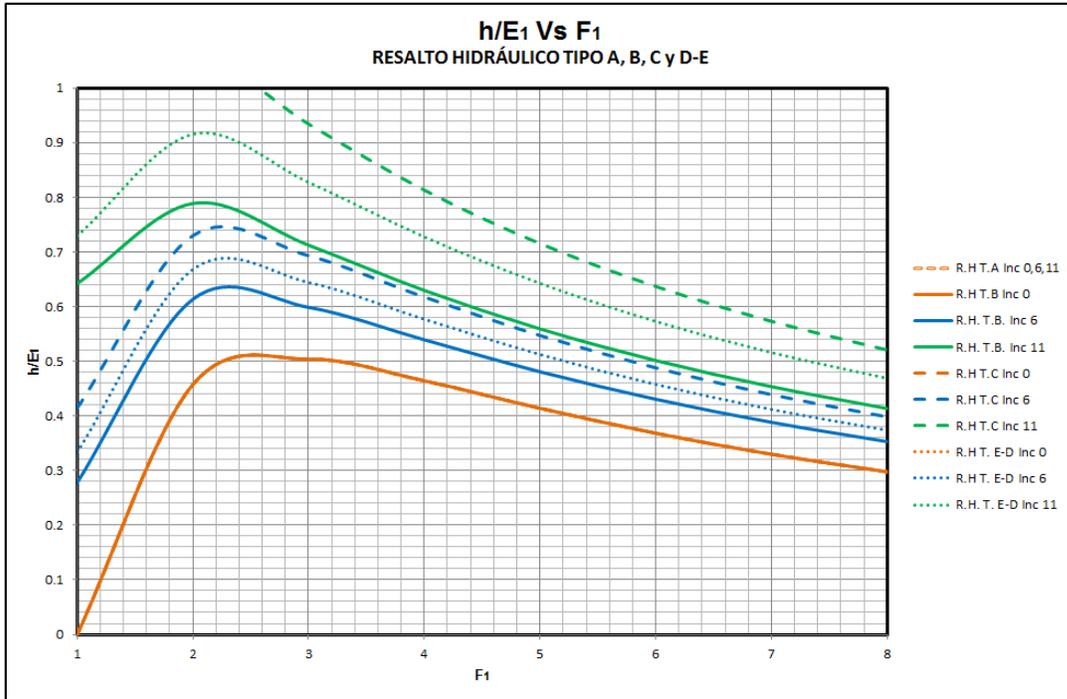
Gráfica 4-38: Ajuste experimental relación h/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo B.



Gráfica 4-39: Ajuste experimental relación h/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo C.



Gráfica 4-40 : Ajuste experimental relación h/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo D-E.



Gráfica 4-41: Comparación relación h/E_1 Vs F_1 para los resaltos tipo A, B, C y D-E

La gráfica 4-41 compara el valor de la relación (h/E_1) para los resaltos tipos A, B, C y D-E, con respecto al número de Froude y a la inclinación del canal, en ésta se observa que para un número de Froude e inclinación de canal determinada, la relación tiene el siguiente comportamiento: $h/E_1-C > h/E_1-D-E > h/E_1-B > h/E_1-A$, lo anterior quiere decir que para un mismo número de Froude y una misma inclinación del canal, el resalto tipo C es el que mayor altura de resalto alcanza para una energía inicial dada.

4.2.7 Relación profundidad inicial de flujo – energía de flujo inicial del Resalto (y_1/E_1)

Con los datos experimentales obtenidos para esta relación y para los resaltos tipo A, B, C y D-E, en diferentes inclinaciones y números de Froude; se compara la forma matemática deducida en las secciones 3.1.6 y 3.2.6, teniendo en cuenta las funciones (Γ) y (L/d_1) anteriormente ajustadas para cada tipología de resalto; con lo cual se obtuvieron las siguientes relaciones con sus respectivos coeficientes de correlación:

Resalto Tipo A:

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{2}{2 + F_1^2}$$

$$R^2 = 0.99$$

$$(4-31)$$

Resalto Tipo B:

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{2}{2((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$$

$$R^2 = 0.95$$

(4-32)

Resalto Tipo C:

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{2}{2((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$$

$$R^2 = 0.84$$

(4-33)

Resalto Tipo D-E:

$$\frac{y_1}{E_1} = \frac{2}{2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$$

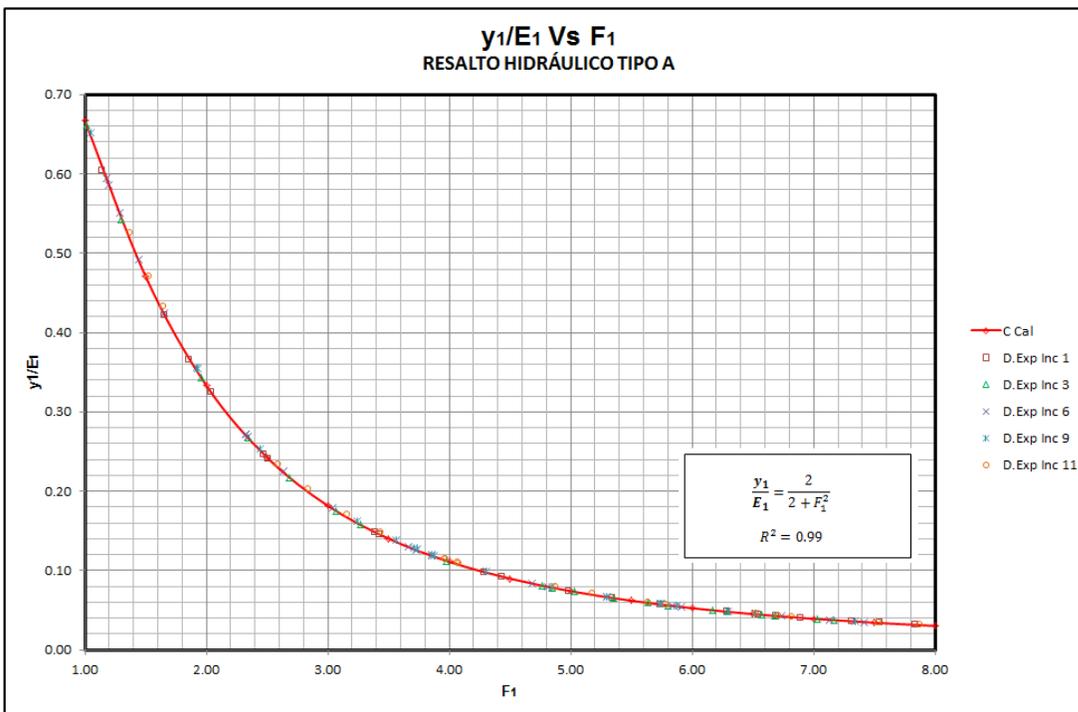
$$R^2 = 0.86$$

(4-34)

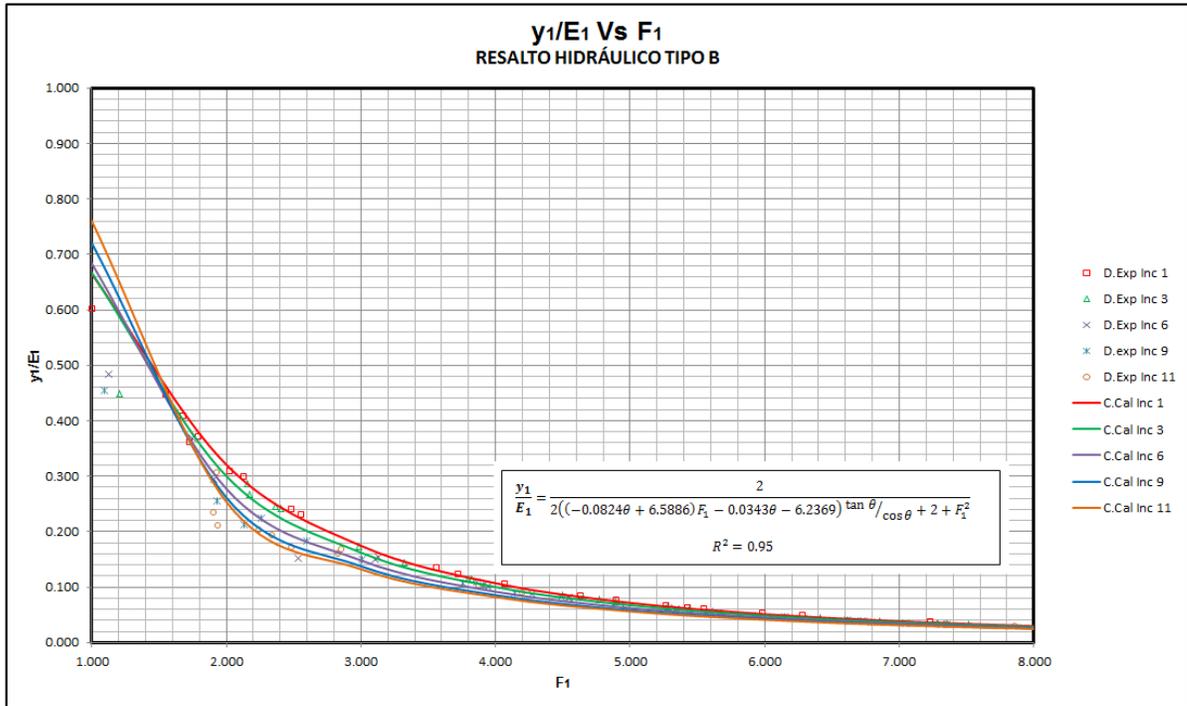
En la gráfica 4-42,4-43,4-44 y 4-45 se puede observar una aceptable correlación de los datos con las formas matemáticas deducidas, ajustando de una mejor forma los datos de menor inclinación

La gráfica 4-42 muestra que los datos no tienen ninguna agrupación por grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, sin embargo siguen una misma tendencia no lineal-decreciente, lo que significa que sin importar el grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, a mayor número de Froude en la sección inicial de resalto, se obtiene una menor relación (y_1/E_1) , lo que trae consigo una profundidad inicial menor y un incremento de la velocidad inicial. De esta gráfica se puede deducir que la máxima profundidad inicial de flujo es aproximadamente el 67% de la energía inicial y se da en números de Froude cercanos a la unidad, condición de flujo en la cual el resalto es ondulante y muy débil.

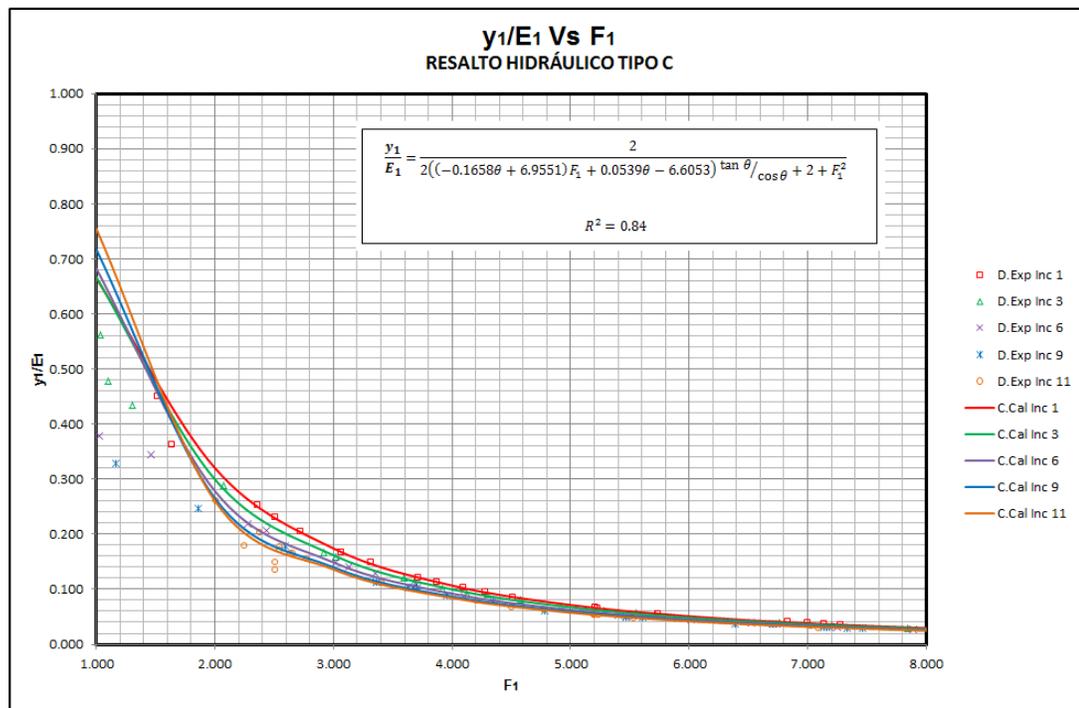
En la Gráficas 4-43,4-44 y 4-45, para los resaltos tipo B, C y D-E, se observa una tendencia de los datos de la misma forma que en el resalto tipo A: no lineal-decreciente, pero con una agrupación de estos de acuerdo al grado de inclinación del canal. De esta Gráfica se puede deducir que la máxima profundidad inicial de flujo con respecto a la energía inicial aumenta con el incremento de inclinación del canal, no obstante se muestra que para condiciones de flujo con número de Froude mayor a 1.5, la situación se invierte y la relación profundidad inicial-energía total inicial disminuye cuando la inclinación aumenta y el número de Froude aumenta. Lo anterior quiere decir que a una mayor inclinación y para número de Froude mayores a 1.5 la componente de profundidad de flujo es mucho menor que la componente altura de velocidad con respecto a la energía total. La intercepción de la curvas sucede para el rango en donde se forman los resaltos llamados ondulantes. En resumen, la relación (y_1/E_1) varía en forma inversamente proporcional con el número de Froude y la inclinación del canal ($y_1/E_1 \propto \theta^{-1} F_1^{-1}$, para $F_1 > 1.5$).



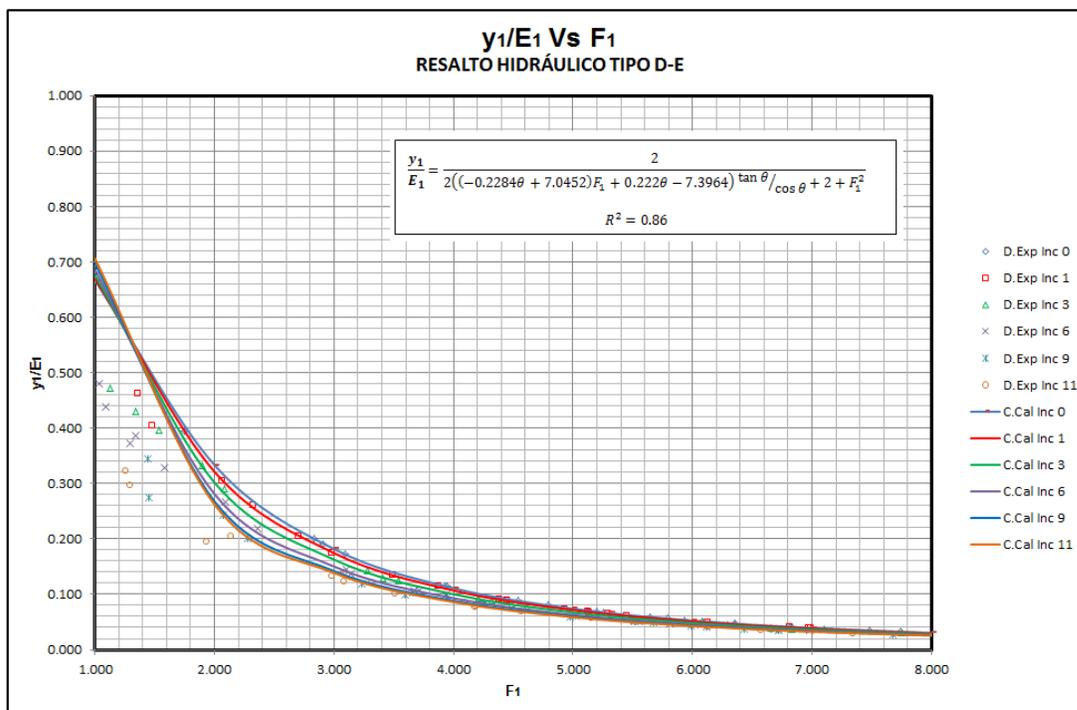
Gráfica 4-42: Ajuste experimental y_1/E_1 Vs F_1 para el Resalto Tipo A.



Gráfica 4-43: Ajuste experimental relación y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.

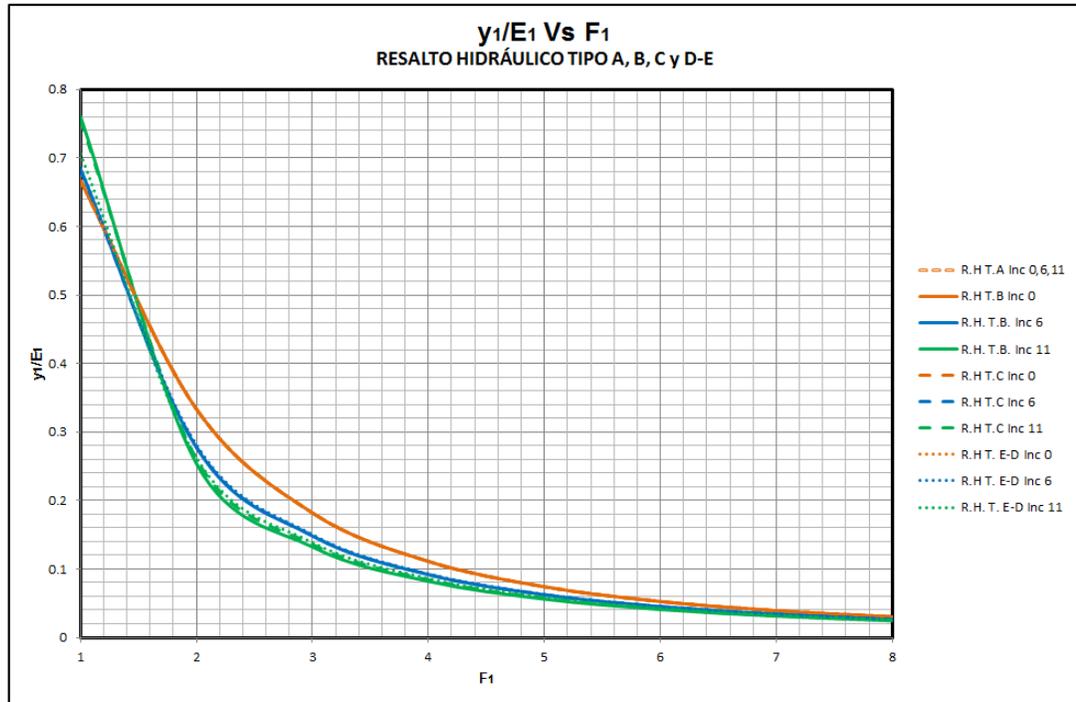


Gráfica 4-44: Ajuste experimental relación y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.



Gráfica 4-45: Ajuste experimental relación y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.

La gráfica 4-45 compara el valor de la relación (y_1/E_1) para los resaltos tipos A, B, C y D-E, con respecto al número de Froude y a la inclinación del canal, en esta se observa que para un número de Froude e inclinación de canal determinada, la relación tiene el siguiente comportamiento: $y_1/E_1-B > y_1/E_1-C > y_1/E_1-D-E > y_1/E_1-A$ para números de Froude menores a 1.5, y $y_1/E_1-A > y_1/E_1-D-E > y_1/E_1-C > y_1/E_1-B$ para números de Froude mayores a 1.5. Lo anterior quiere decir que para números de Froude menores que 1.5 el resalto tipo B tiene una mayor altura inicial de flujo (menor velocidad inicial) que los demás resaltos, para números de Froude mayor a 1.5, sucede lo contrario y el resalto B tiene la menor altura inicial de flujo (mayor velocidad inicial) que los demás resaltos.



Gráfica 4-46: Comparación relación y_1/E_1 Vs F_1 para los resallos tipo A, B, C y D-E

4.2.8 Relación profundidad final de flujo – energía inicial de flujo del resalto (y_2/E_1)

Con los datos experimentales obtenidos para esta relación y para los resallos tipo A, B, C y D-E, en diferentes inclinaciones y números de Froude; se compara la forma matemática deducida en la sección 3.1.7 y 3.2.7, teniendo en cuenta las funciones (Γ) y (L/d_1) anteriormente ajustadas para cada tipología de resalto; con lo cual se obtuvieron las siguientes relaciones con sus respectivos coeficientes de correlación:

Resalto Tipo A:

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)}{2 + F_1^2}$$

$$R^2 = 0.97$$

$$(4-35)$$

Resalto Tipo B:

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1)}{2((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$$

$$R^2 = 0.84$$

(4-36)

Resalto Tipo C:

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 1)}{2((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$$

$$R^2 = 0.80$$

(4-37)

Resalto Tipo D-E:

$$\frac{y_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1)}{2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$$

$$R^2 = 0.83$$

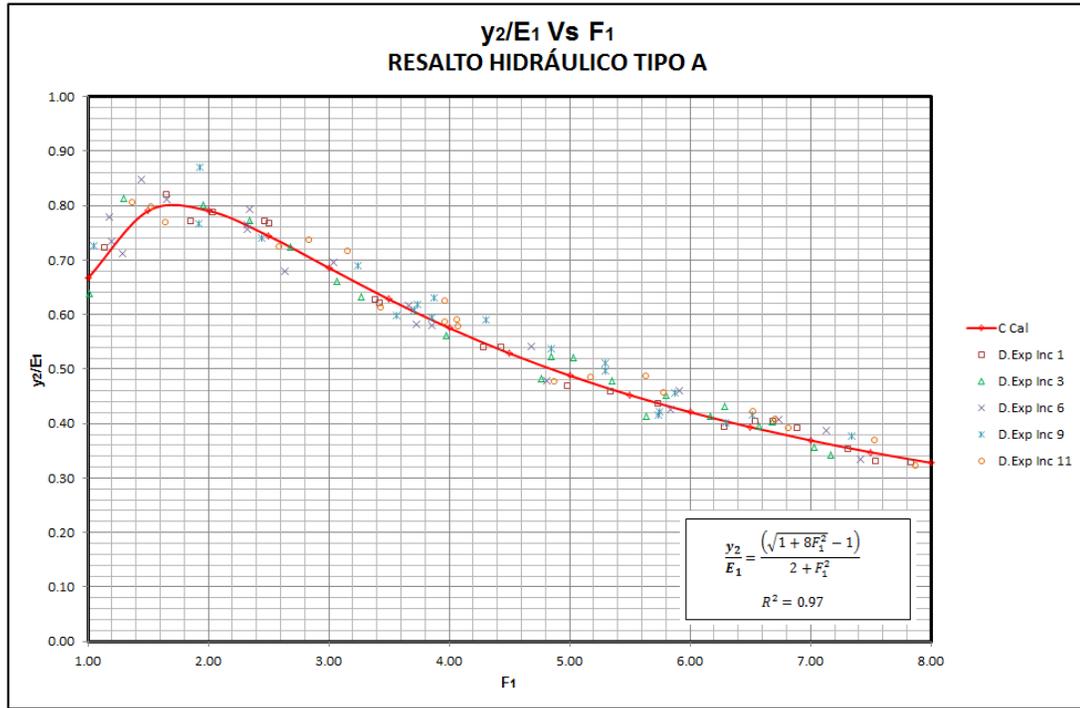
(4-38)

En la gráficas 4-47,4-48,4-49 y 4-50 se puede observar una aceptable correlación de los datos con las formas matemáticas deducidas, ajustando de una mejor forma los datos de menor inclinación.

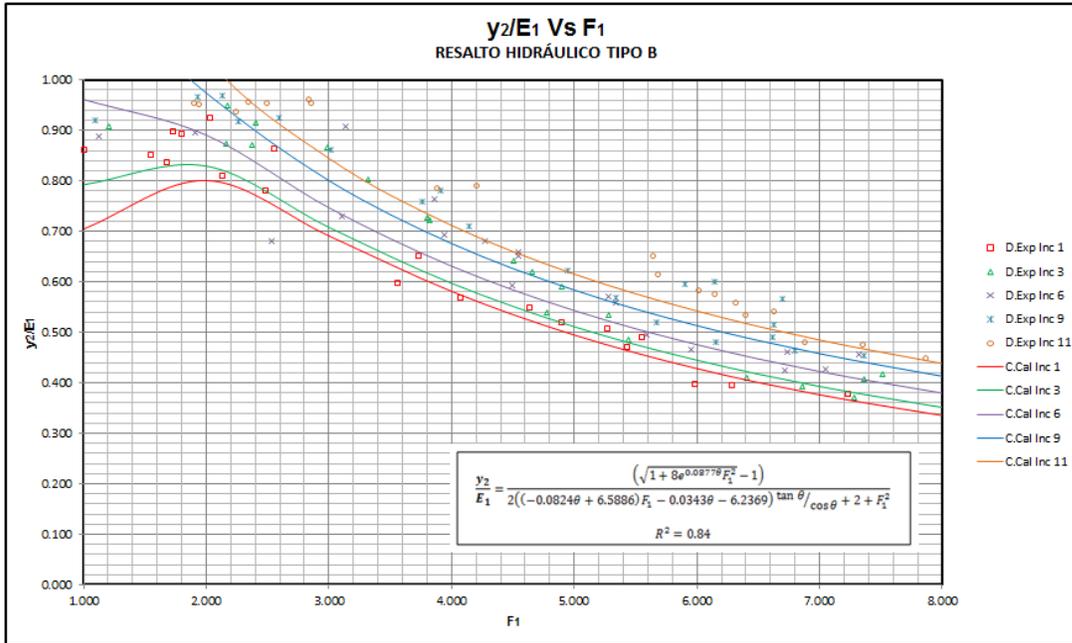
La gráfica 4-47 muestra que los datos no tienen ninguna agrupación por grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, sin embargo siguen una misma tendencia no lineal-no monótona; de esta gráfica se puede deducir que la máxima profundidad final que puede alcanzar el resalto es aproximadamente el 80% de la energía inicial total y se da en números de Froude cercanos a 1.73, en el rango en donde se forman los resaltos denominados como débiles.

En la gráficas 4-48,4-49 y 4-50, para los resaltos tipo B, C y D-E, se observa una tendencia de los datos de la misma forma que en el resalto tipo A: no lineal-no monótona, pero con una agrupación creciente de estos de acuerdo al grado de inclinación del canal. En esta gráfica se puede deducir que la máxima profundidad final que puede alcanzar el resalto con relación a la energía inicial total, aumenta con la inclinación del canal y se da

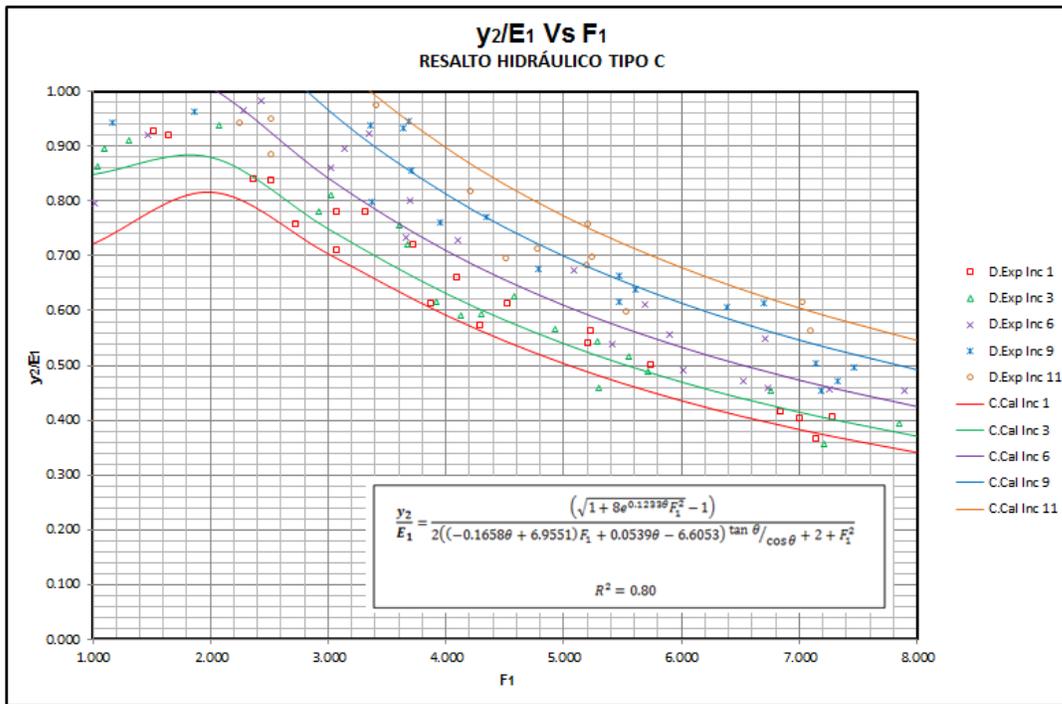
en el rango en donde se forman los resaltos denominados como débiles (Chow, 1959), además ese máximo valor desaparece para ángulos mayores a 6°. En resumen, la relación (y_2/E_1) varía directamente proporcional con la inclinación del canal y en forma inversamente proporcional con el número de Froude, para $F_1 > 1.75$ ($y_2/E_1 \propto \theta \alpha^{-1} F_1$, para $F_1 > 1.75$).



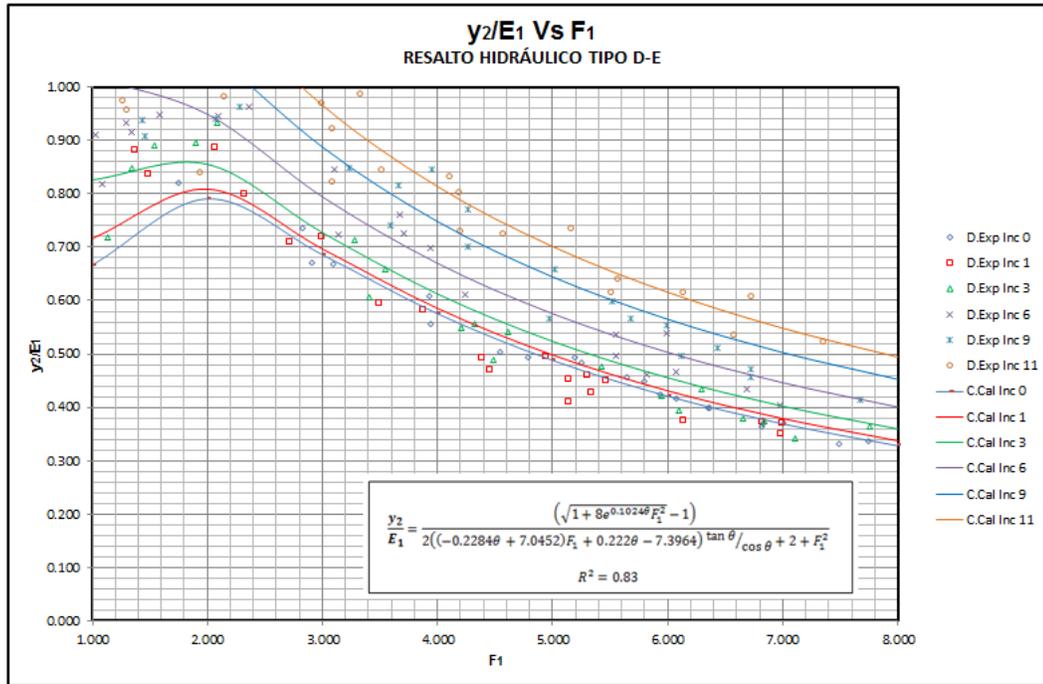
Gráfica 4-47: Ajuste experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.



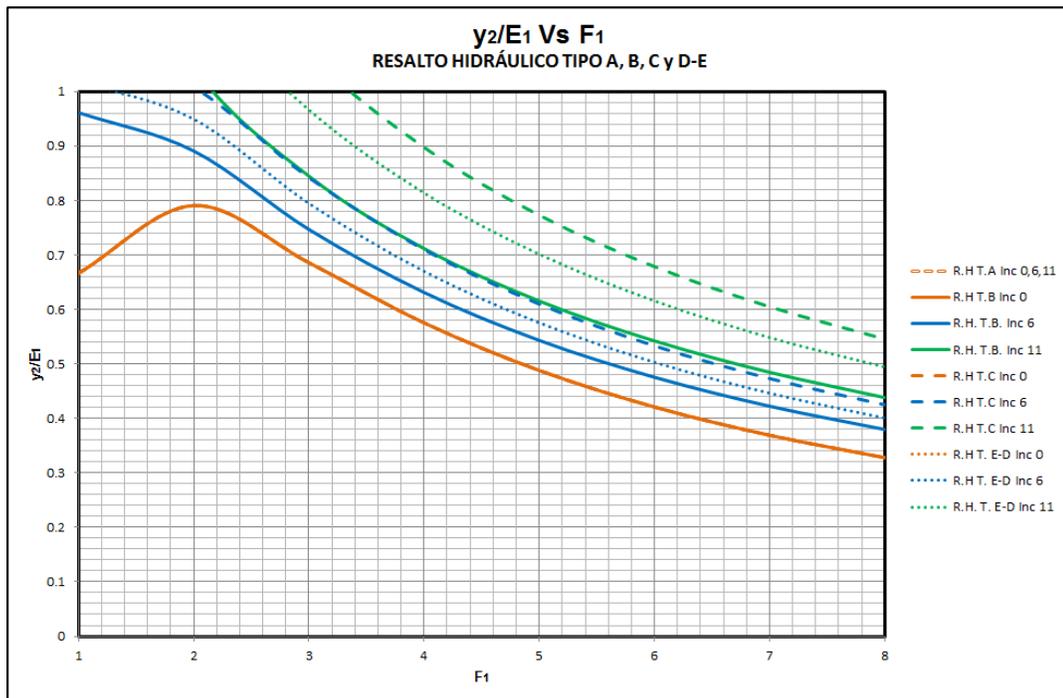
Gráfica 4-48 :Ajuste experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.



Gráfica 4-49 :Ajuste experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.



Gráfica 4-50: Ajuste experimental Relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.



Gráfica 4-51: Comparación relación y_2/E_1 Vs F_1 para los resaltos tipo A, B, C y D-E

La gráfica 4-51 compara el valor de la relación (y_2/E_1) para los resaltos tipos A, B, C y D-E, con respecto al número de Froude y a la inclinación del canal; en ésta se observa que para un número de Froude e inclinación de canal determinada, la relación tiene el siguiente comportamiento: $y_2/E_1-C > y_2/E_1-D-E > y_2/E_1-B > y_2/E_1-A$; lo anterior quiere decir que para unas condiciones preestablecidas el resalto tipo C es el que mayor profundidad final de resalto alcanza para una energía inicial dada.

4.2.9 Relación pérdida de energía –energía inicial del resalto $(\Delta E/E_1)$

Con los datos experimentales obtenidos para esta relación y para los resaltos tipo A, B, C y D-E, en diferentes inclinaciones y números de Froude; se compara la forma matemática deducida en la sección 3.1.9 y 3.2.9, teniendo en cuenta las funciones (Γ) y (L/d_1) anteriormente ajustadas para cada tipología de resalto; con lo cual se obtuvieron las siguientes relaciones con sus respectivos coeficientes de correlación:

Resalto Tipo A:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 (2 + F_1^2)}$$

$$R^2 = 0.99$$

$$(4-39)$$

Resalto Tipo B:

$$\frac{\Delta E}{E_1} =$$

1

$$\frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1)^2 (2((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2)}$$

$$R^2 = 0.87$$

$$(4-40)$$

Resalto Tipo C:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{1}{\frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 1)^2 (2((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2)}}}$$

$$R^2 = 0.80$$

(4-41)

Resalto Tipo D-E:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{1}{\frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1)^2 (2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2)}}}$$

$$R^2 = 0.80$$

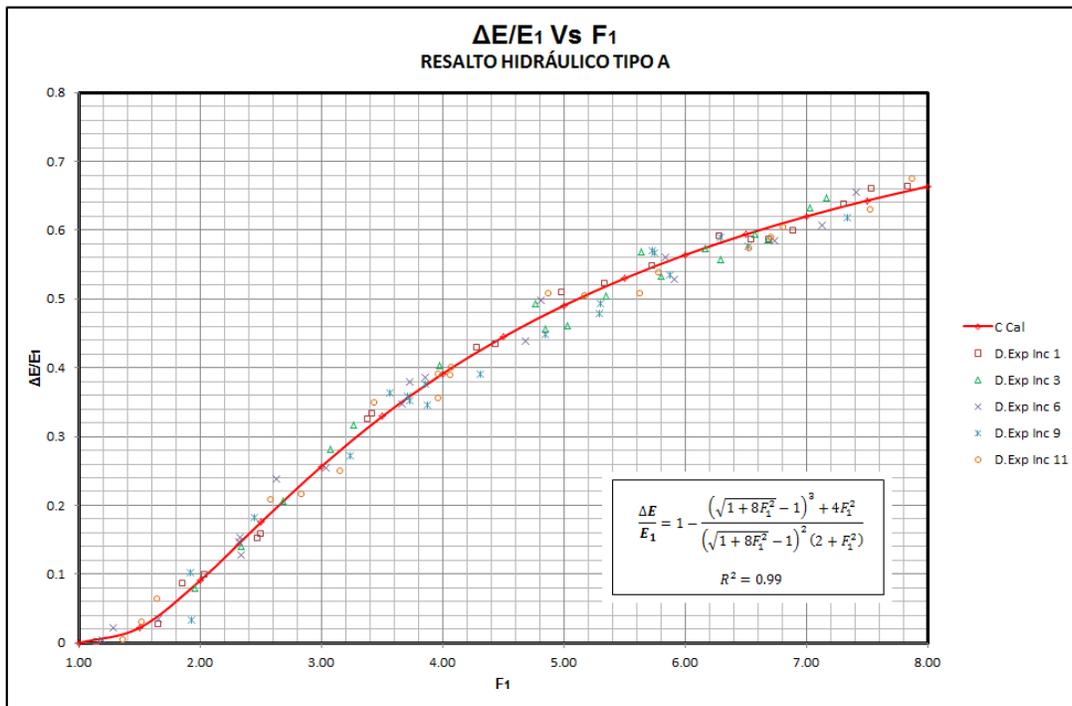
(4-42)

En las gráficas 4-52,4-53,4-54 y 4-55 se puede observar una aceptable correlación de los datos con las formas matemáticas deducidas, ajustando de una mejor forma los datos de menor inclinación.

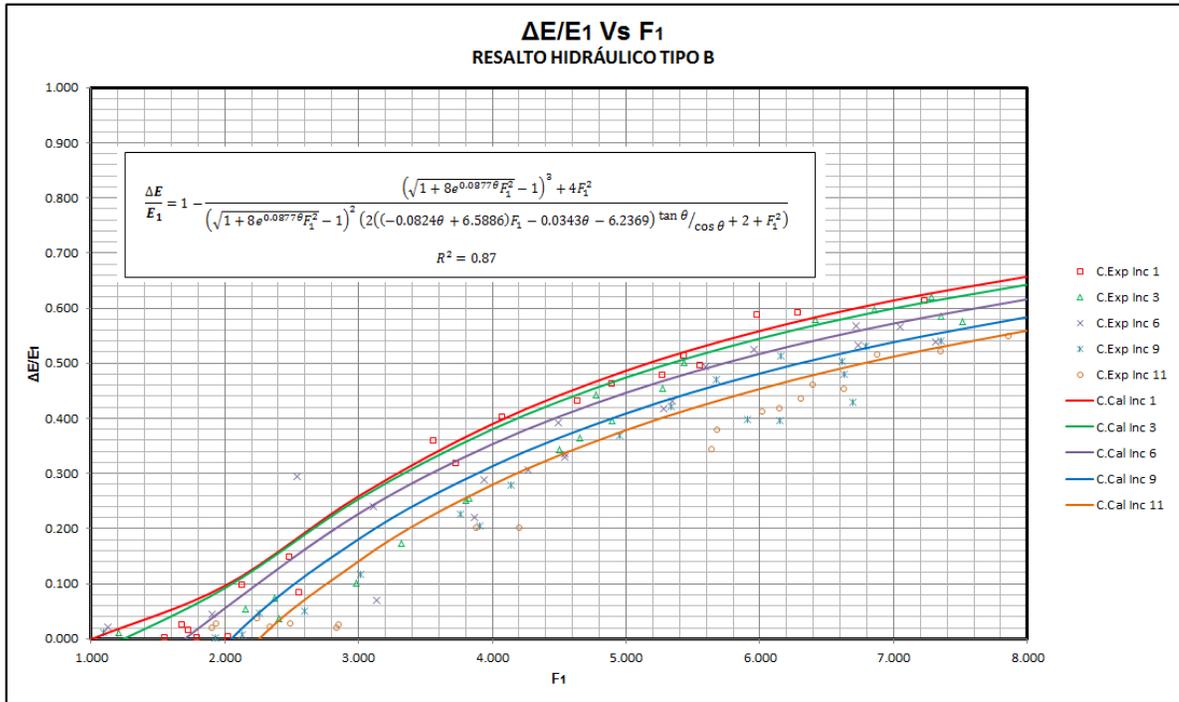
La gráfica 4-52 muestra que los datos no tienen ninguna agrupación por grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, sin embargo siguen una misma tendencia no lineal-creciente, lo que significa que sin importar el grado de inclinación del canal para el resalto tipo A, a mayor número de Froude en la sección inicial de resalto, se obtiene una mayor relación $\Delta E/E_1$, lo que trae consigo una mayor disipación de energía. De esta gráfica se puede también deducir que se puede alcanzar el 50% de disipación de energía con resaltos hidráulicos con número de Froude aguas arriba cercanos a cinco, rango en donde se forman los resaltos denominados como estables (Chow, 1959).

Esta relación es el complemento de la relación de eficiencia del resalto (E_2/E_1).

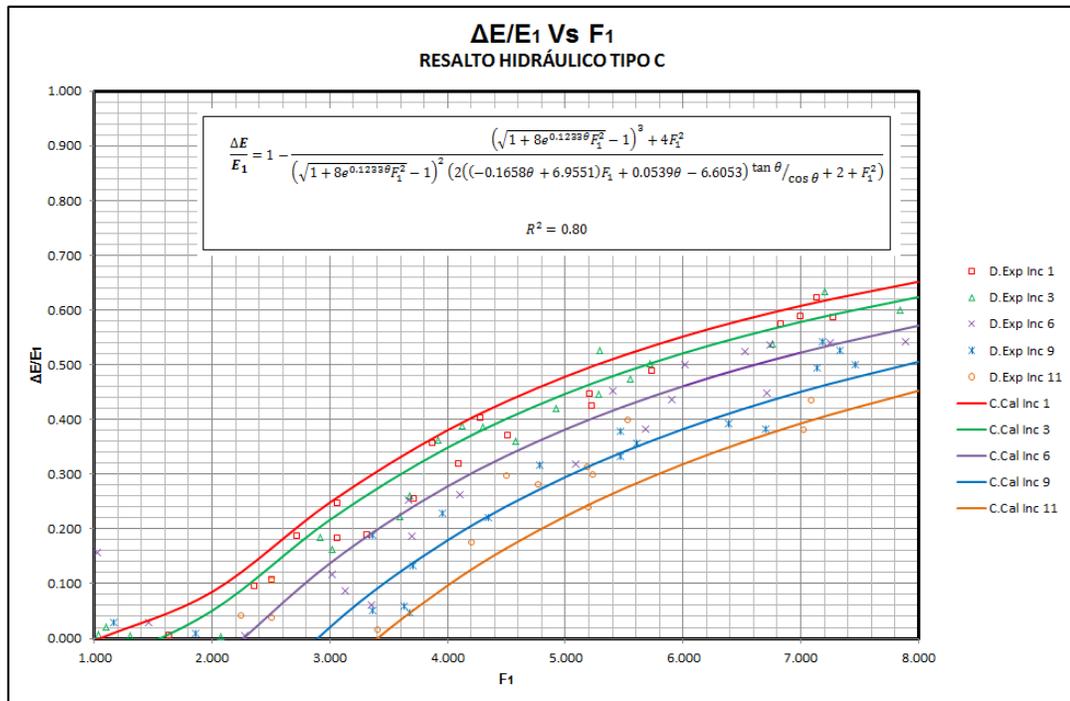
En la gráficas 4-53,4-54 y 4-55, para los resaltos tipo B, C y D-E, se observa una tendencia de los datos de la misma forma que en el resalto tipo A: no lineal-creciente, pero con una agrupación decreciente de éstos de acuerdo con el grado de inclinación del canal. Formulando de otra forma, a mayor número de Froude en la sección inicial del resalto y a un menor grado de inclinación del canal, mayor es el valor de la relación ($\Delta E/E_1$), trayendo como consecuencia una mayor disipación de energía. Por otro lado, la gráfica también muestra que para obtener un porcentaje de disipación de energía determinada se necesita un mayor número de Froude entre mayor inclinación tenga el canal. En resumen la relación ($\Delta E/E_1$) varía en proporción directa con el número de Froude y en proporción inversa con la inclinación del canal ($\Delta E/E_1 \propto F_1 \alpha^{-1} \Theta$).



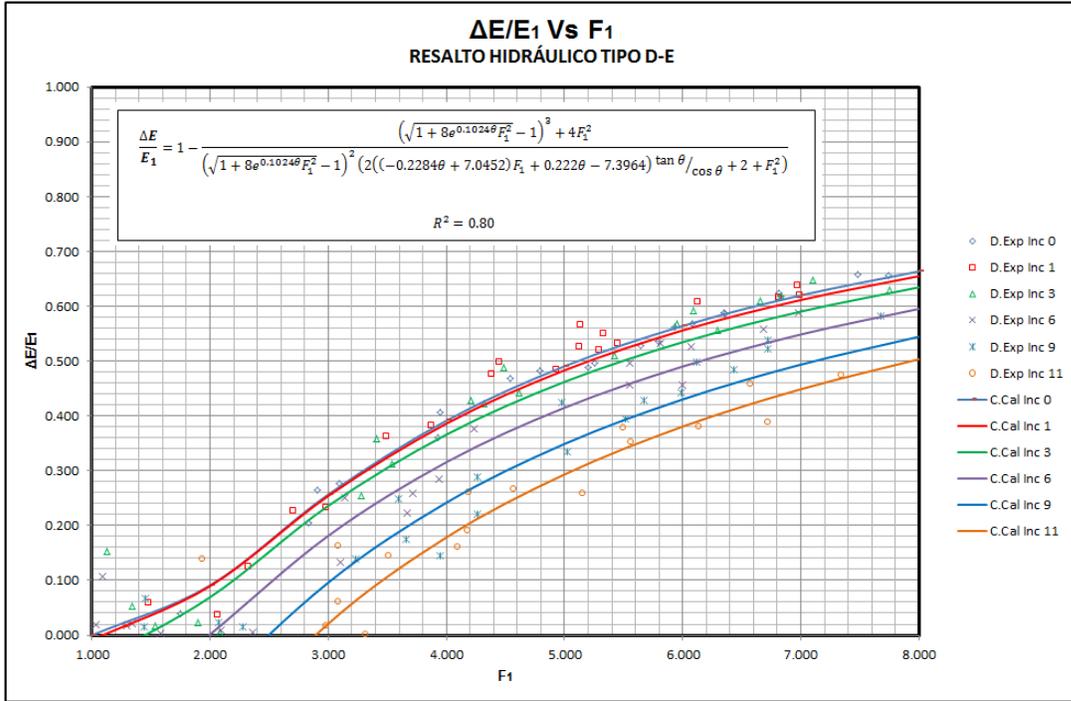
Gráfica 4-52: Ajuste experimental Relación $\Delta E/E_1$ Vs F_1 para el resalto tipo A.



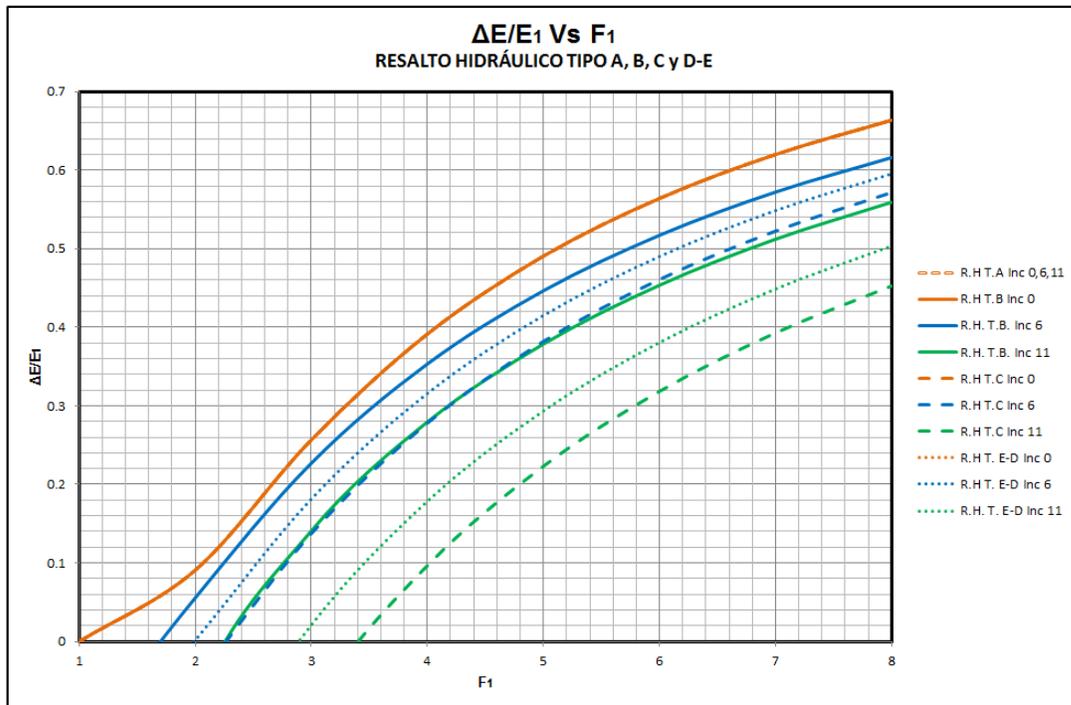
Gráfica 4-53: Ajuste experimental relación ΔE/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo B



Gráfica 4-54.:Ajuste experimental relación ΔE/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo C.



Gráfica 4-55 : Ajuste experimental relación $\Delta E/E_1$ Vs F_1 para el resalto tipo D-E.



Gráfica 4-56: Comparación relación $\Delta E/E_1$ Vs F_1 para los resaltos tipo A,B,C y D-E

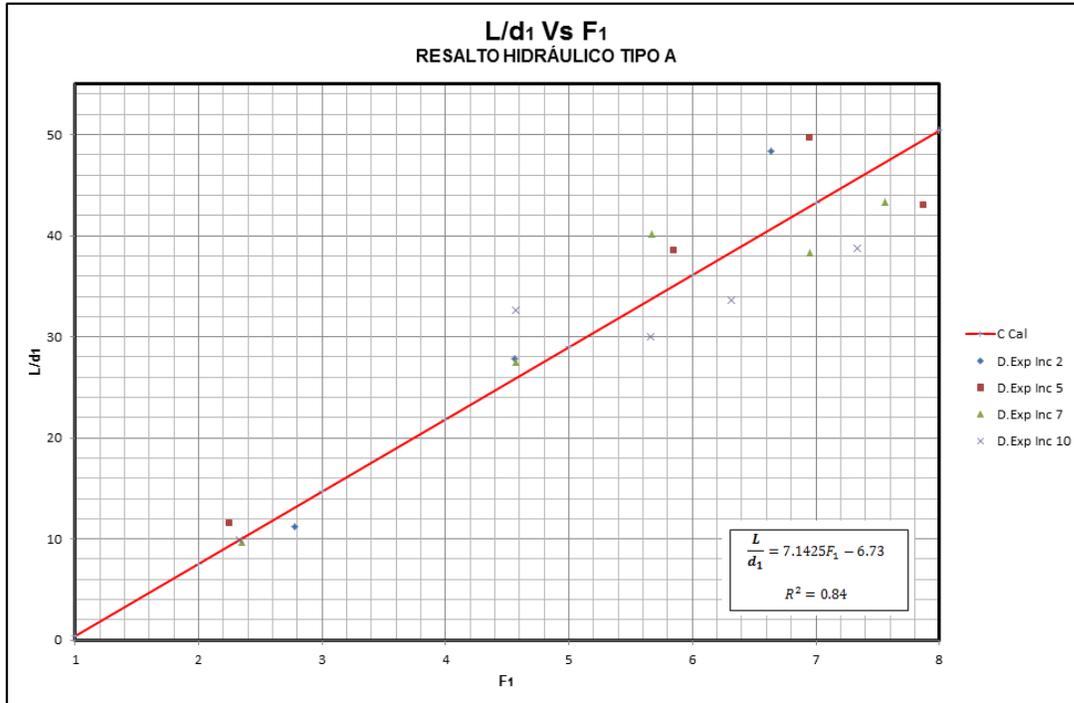
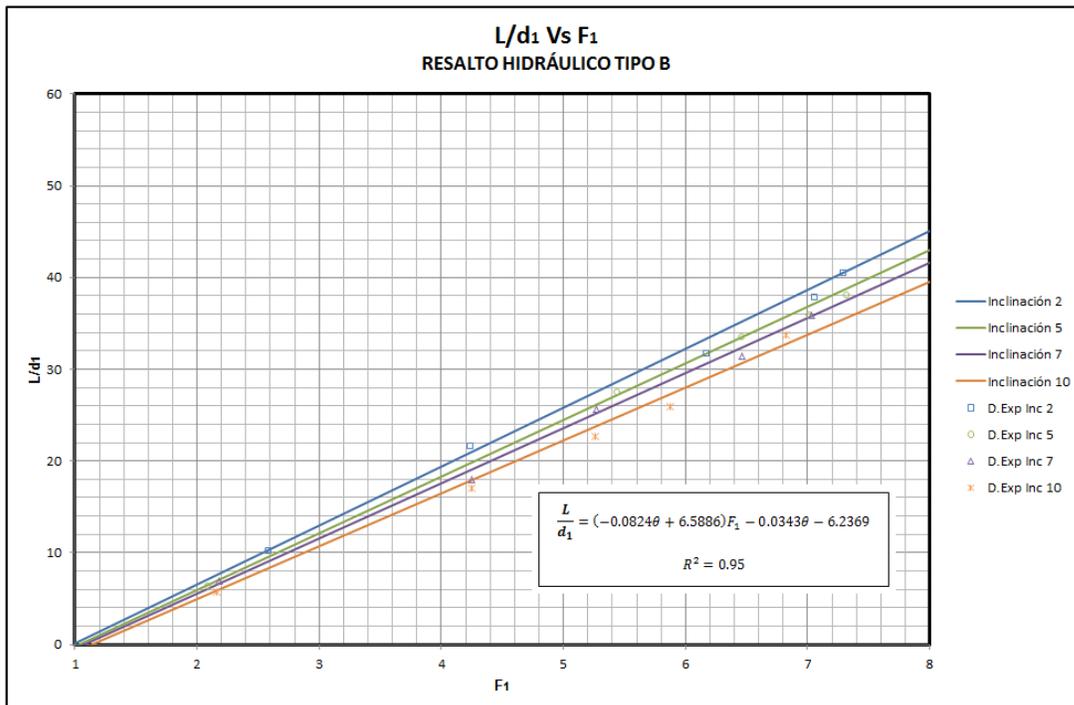
La gráfica 4-55 compara el valor de la relación $(\Delta E/E_1)$ para los resaltos tipos A, B, C y D-E, con respecto al número de Froude y a la inclinación del canal; en esta se observa que para un número de Froude e inclinación de canal determinada, la relación tiene el siguiente comportamiento: $\Delta E/E_1-A > \Delta E/E_1-B > \Delta E/E_1-D-E > \Delta E/E_1-C$, lo anterior quiere decir que para un mismo número de Froude y una misma inclinación del canal, el resalto tipo A es el que más disipación de energía proporciona y el resalto tipo C es el que menos disipación de energía ofrece.

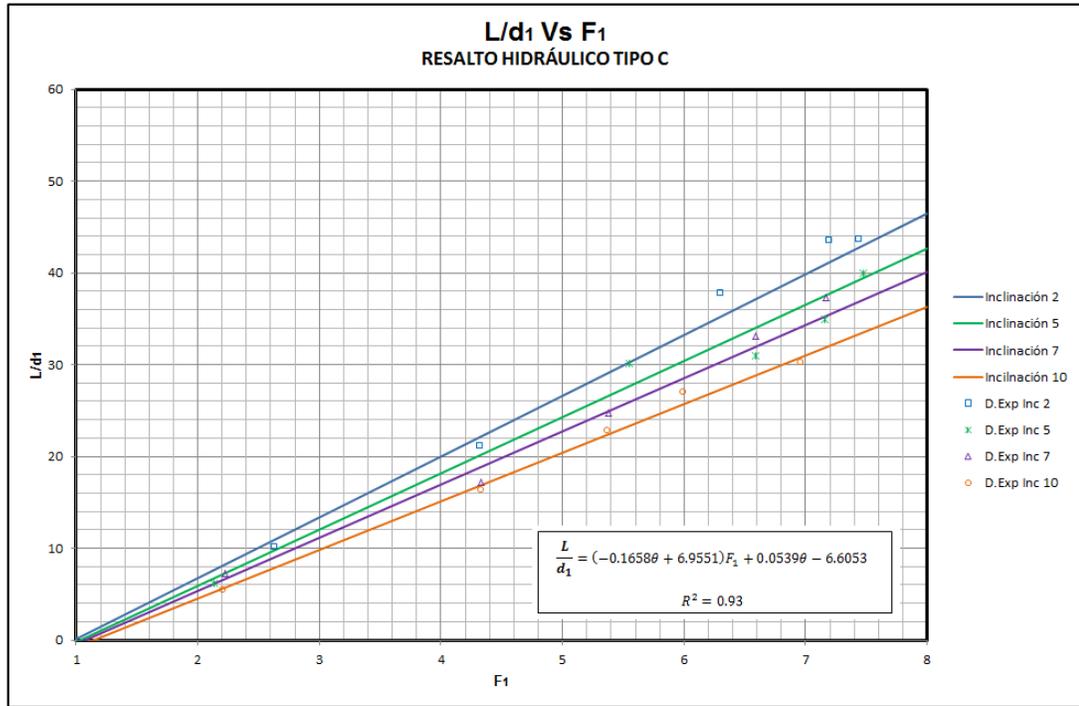
4.3 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS RELACIONES MATEMÁTICAS PARA LOS RESALTOS HIDRÁULICOS CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

Teniendo en cuenta las relaciones matemáticas ajustadas en la sección 4.1.6, para los resaltos hidráulicos en canales con pendiente y sección rectangular, se procede a realizar la validación de estas relaciones, con el fin de verificar su capacidad de predicción.

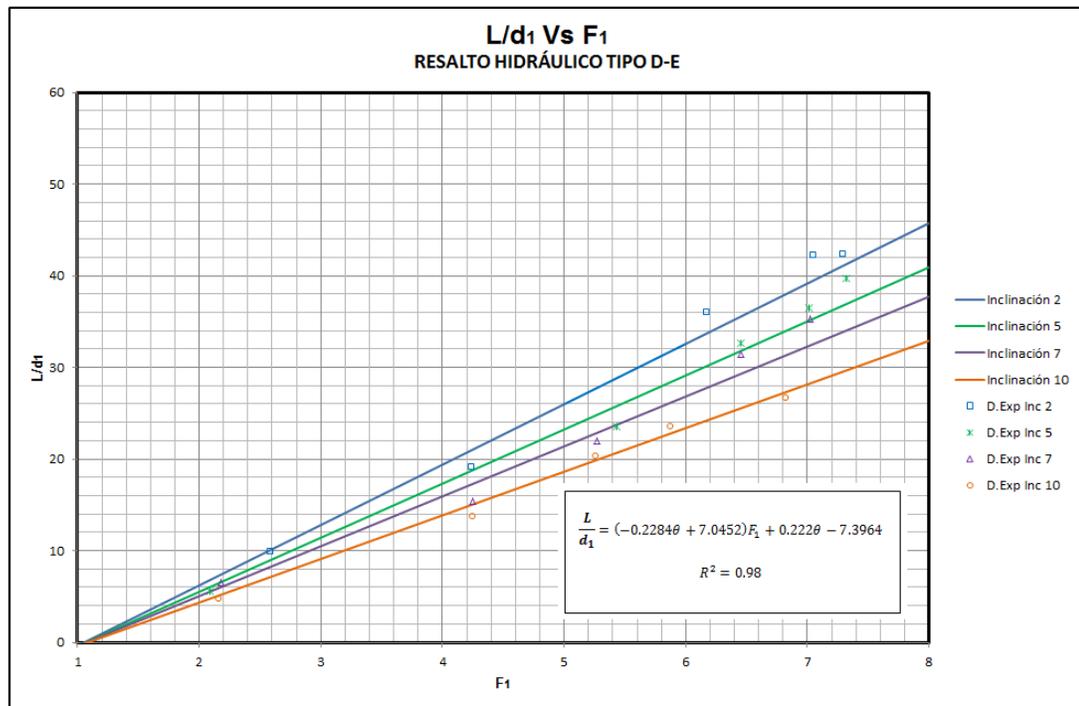
En general en la validación de las relaciones (L/d_1) , (d_2/d_1) , (d/d_1) , (h/y_1) , (E_2/E_1) , (h/E_1) , (y_1/E_1) , (y_2/E_1) , $(\Delta E/E_1)$ y de la función (Γ) , se obtuvieron muy buenos resultados para los resaltos tipo A, B, C y D-E (ver gráficas 4-57 a 4-93) con coeficientes de correlación R^2 entre 0.84 y 0.99; de esta forma, se puede decir que las expresiones matemáticas representan adecuadamente las relaciones para cada tipo de resalto.

4.3.1 Relación longitud de remolino turbulento - profundidad Inicial de Flujo del resalto (L/d_1)

Gráfica 4-57: Validación experimental relación L/d₁ Vs F₁ para el resalto tipo A.Gráfica 4-58: Validación experimental Relación L/d₁ Vs F₁ para el resalto tipo B.

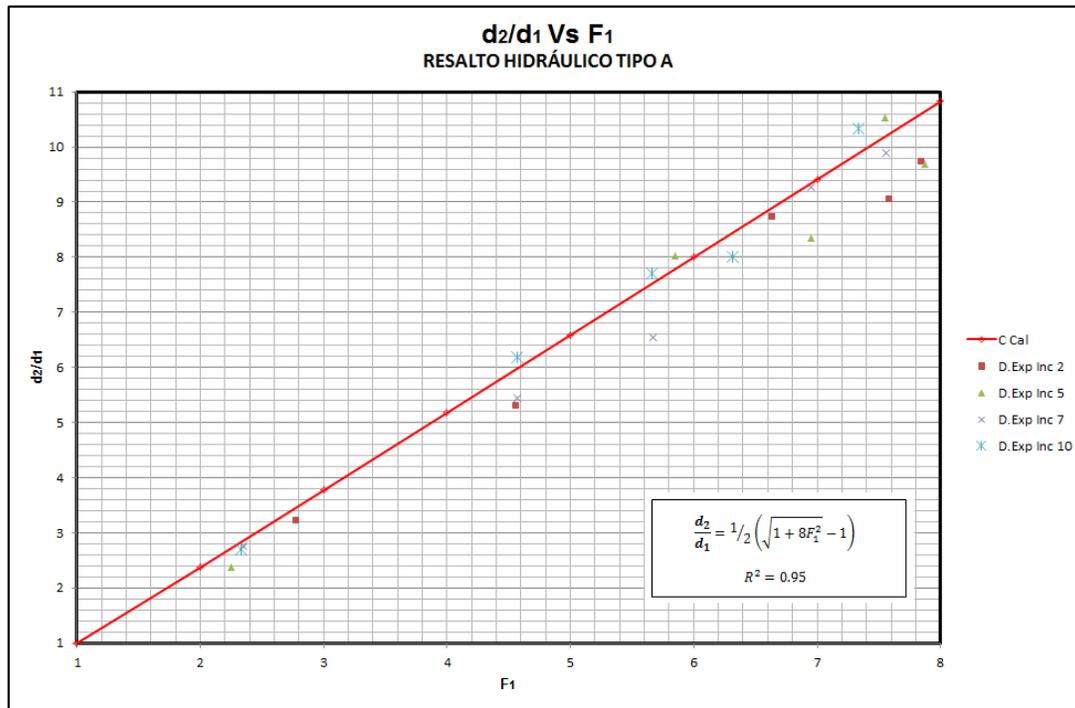


Gráfica 4-59 : Validación experimental Relación L/d1 Vs F1 para el resalto tipo C.

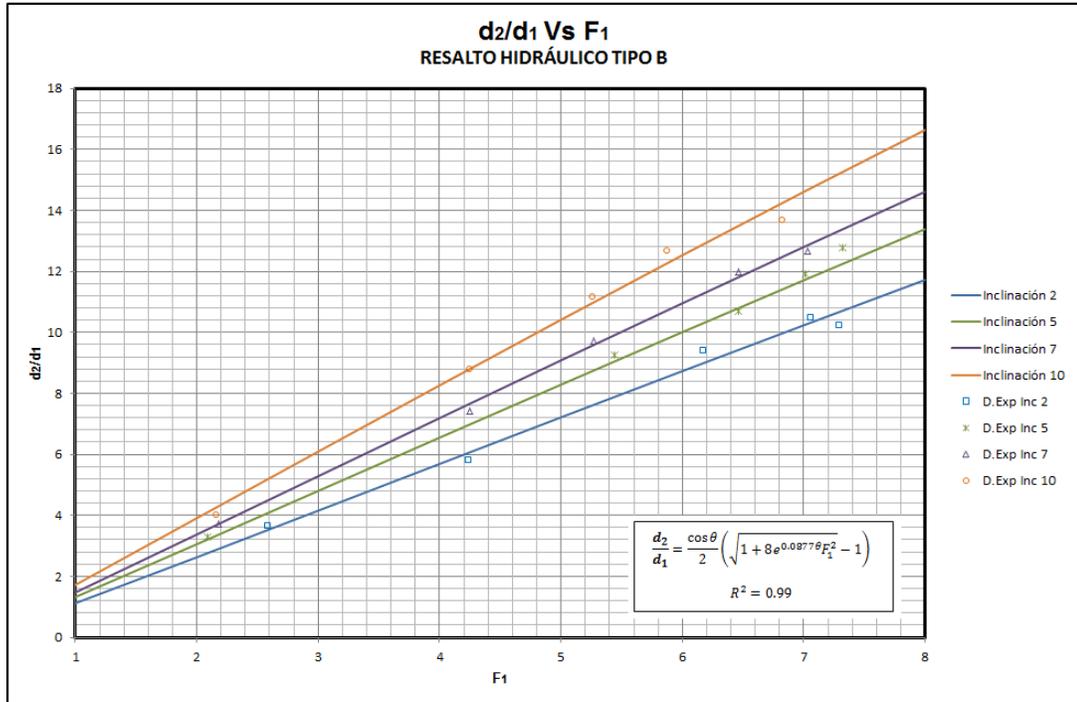


Gráfica 4-60: Validación experimental relación L/d1 Vs F1 para el resalto tipo D-E.

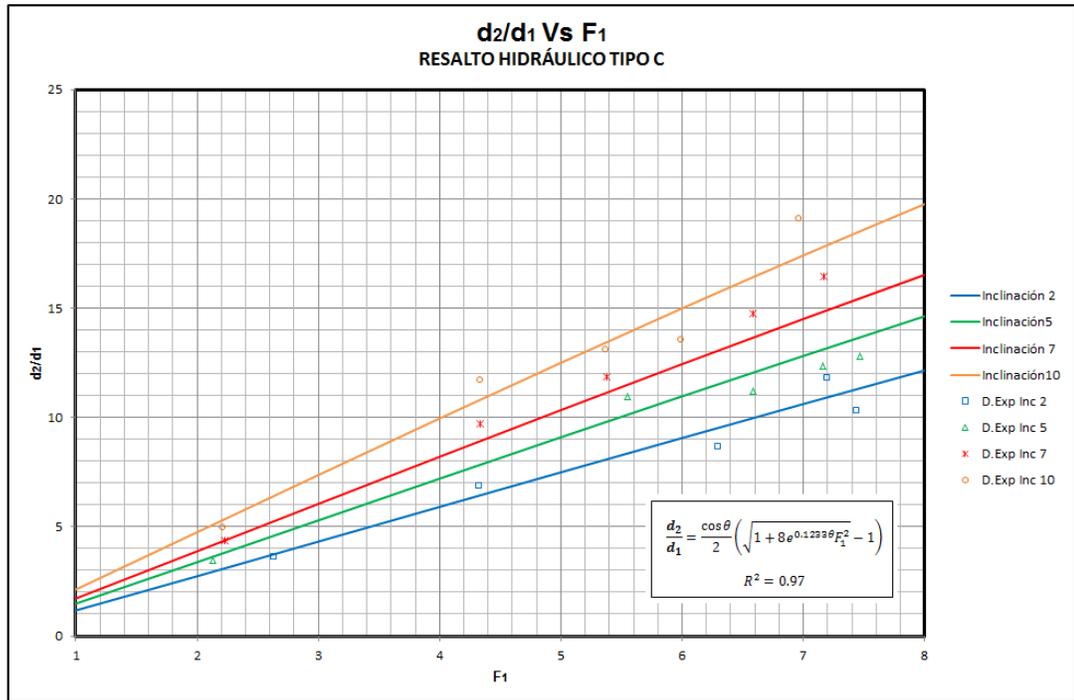
4.3.2 Relación profundidad final de Flujo - profundidad inicial de flujo del resalto (d_2/d_1) (profundidades conjugadas)



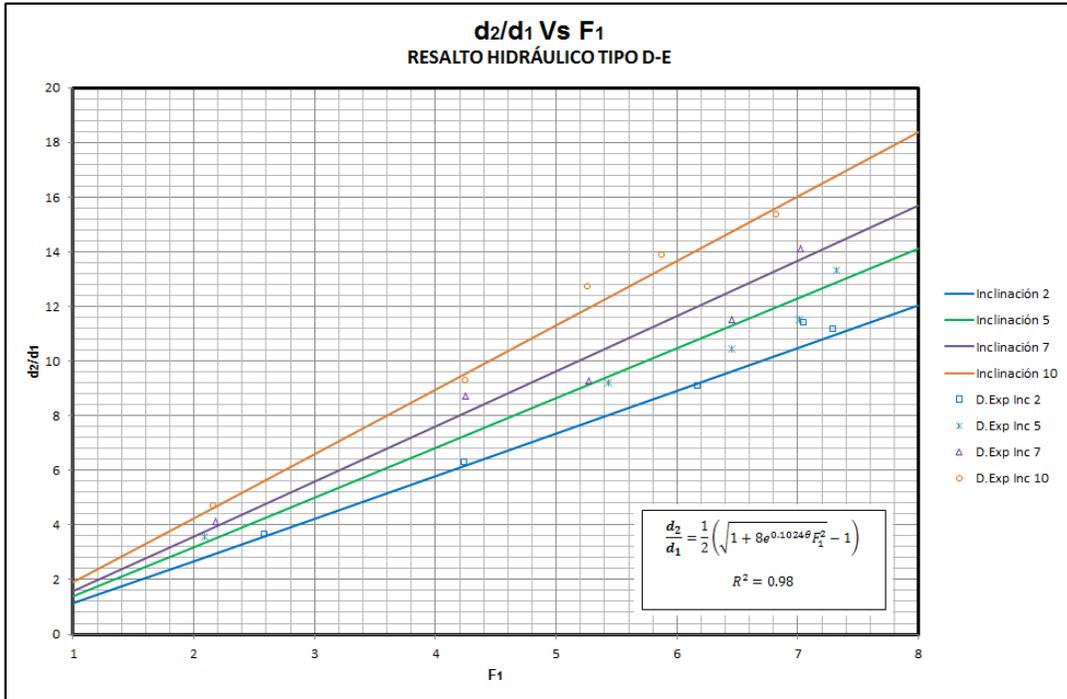
Gráfica 4-61: Validación experimental relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.



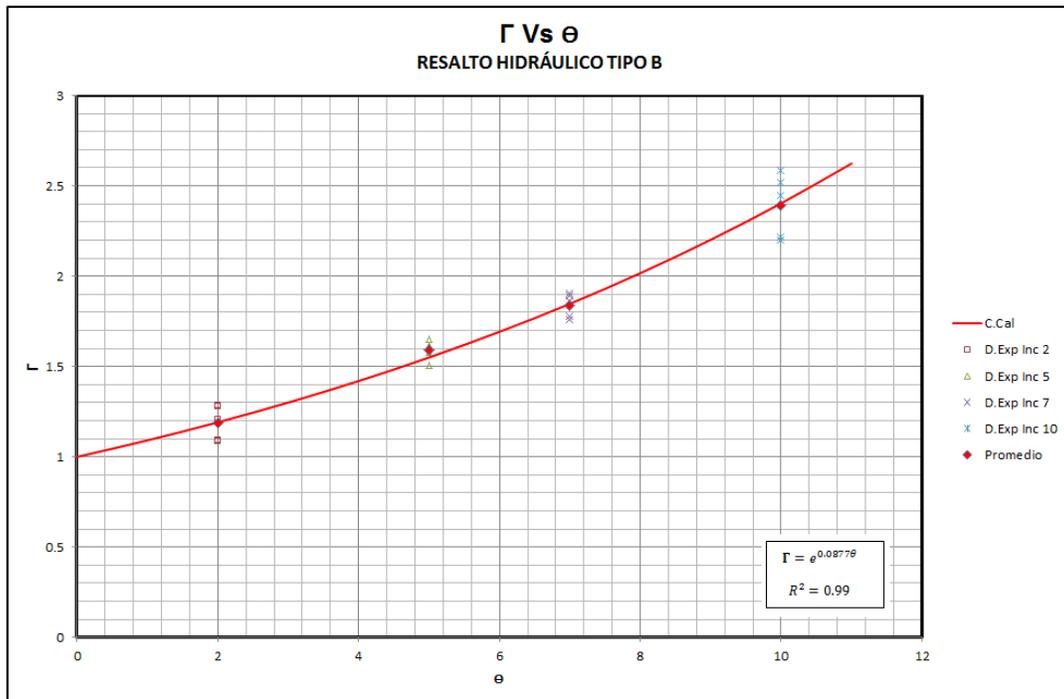
Gráfica 4-62: validación experimental relación d₂/d₁ Vs F₁ para el resalto tipo B.



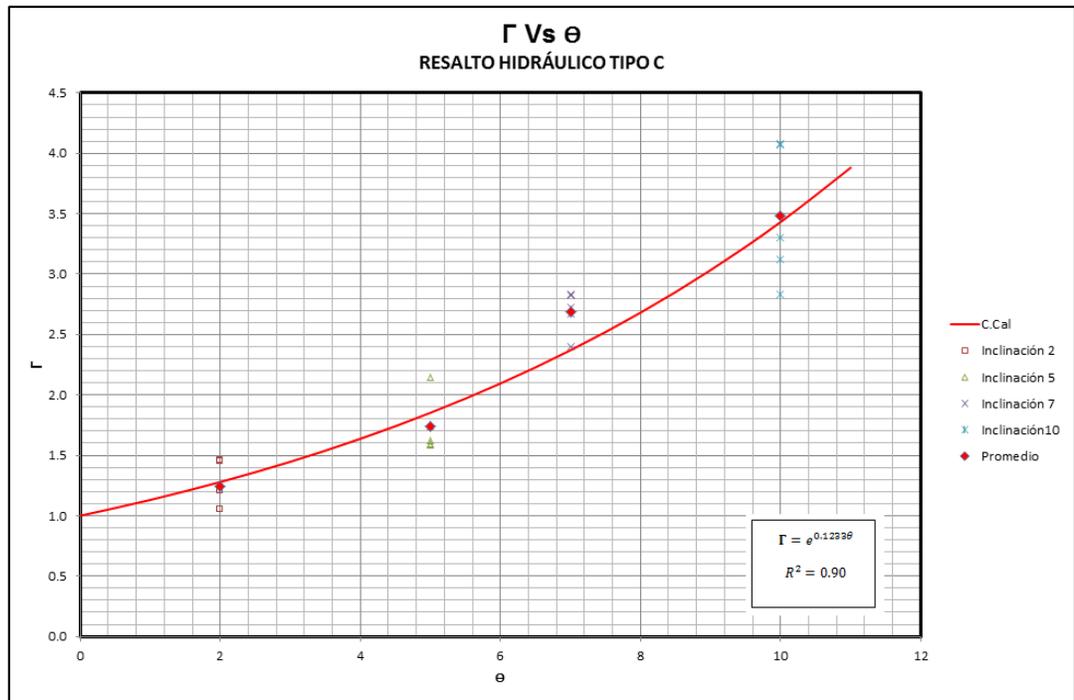
Gráfica 4-63 : Validación experimental relación d₂/d₁ Vs F₁ para el resalto tipo C.



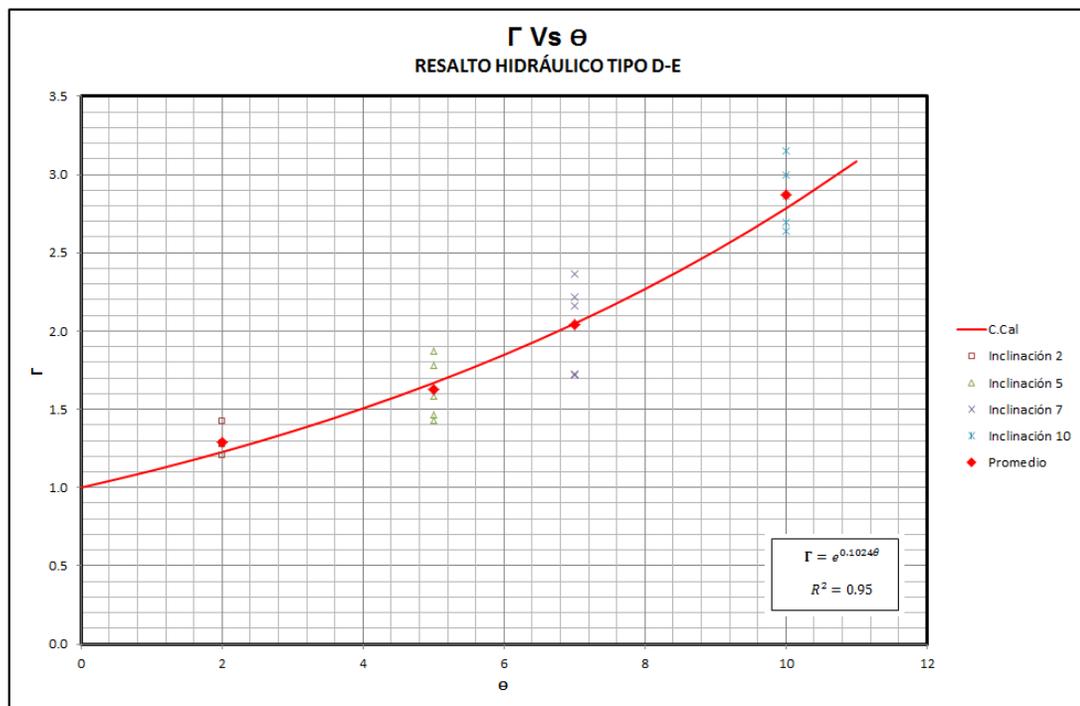
Gráfica 4-64: Ajuste experimental relación d_2/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.



Gráfica 4-65: Validación experimental relación Γ Vs θ para el resalto tipo B.

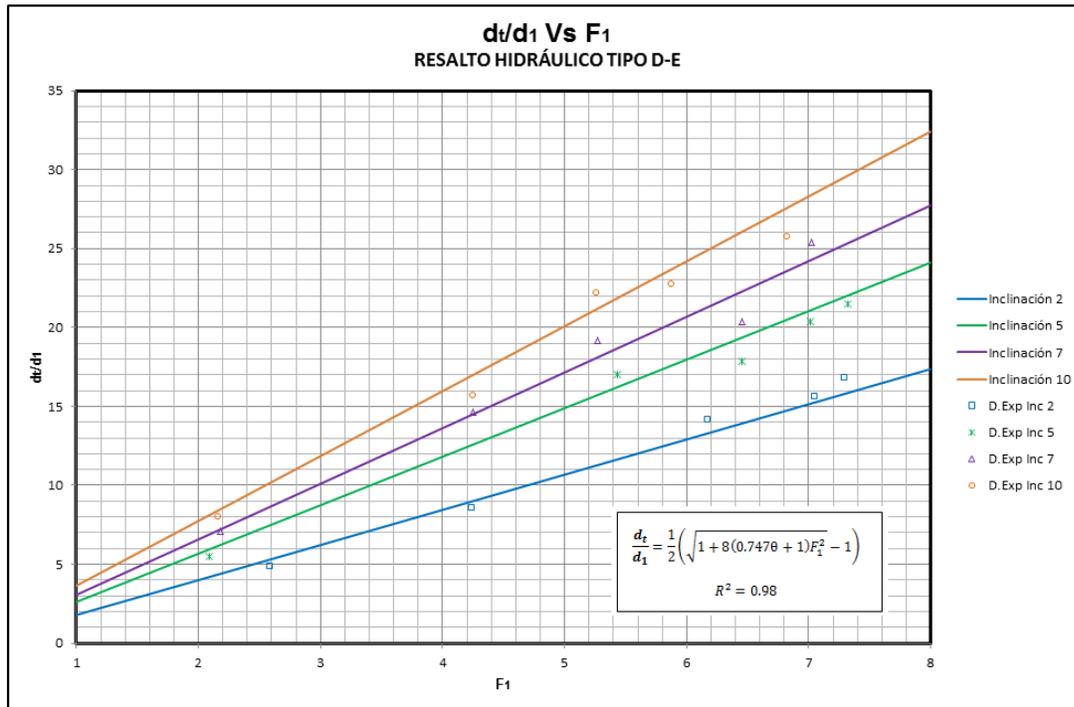


Gráfica 4-66: Validación experimental relación Γ Vs θ para el resalto tipo C.

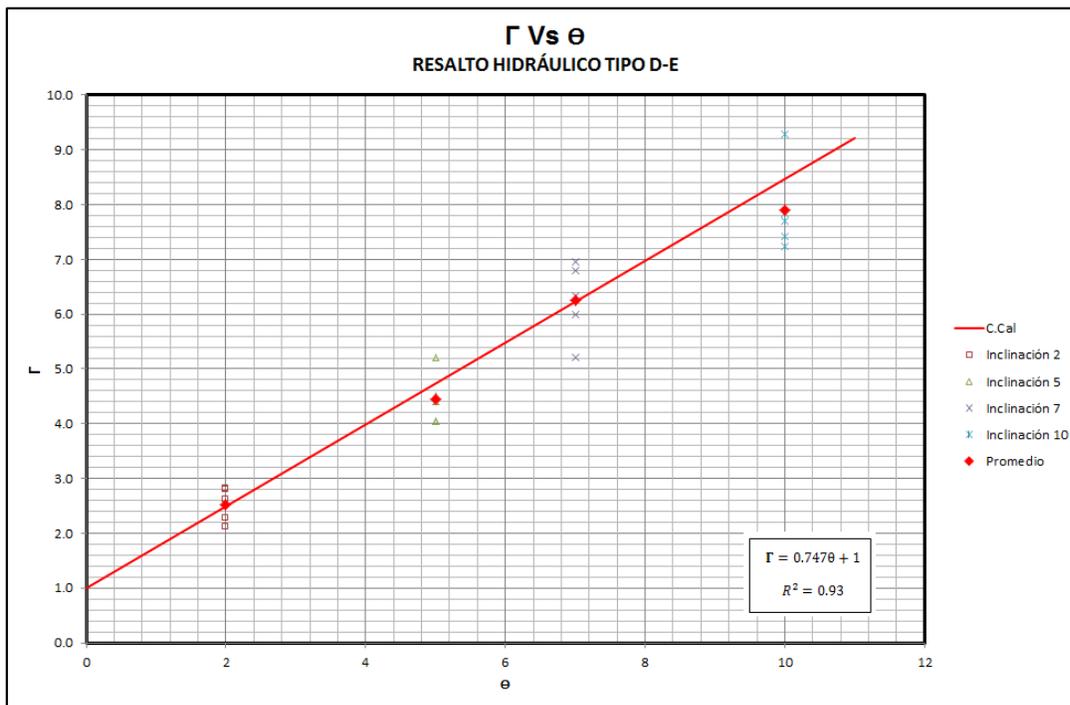


Gráfica 4-67: Ajuste experimental relación Γ Vs θ para el resalto tipo D-E.

4.3.3 Relación profundidad de flujo aguas abajo - profundidad inicial de flujo del resalto (d_t/d_1)

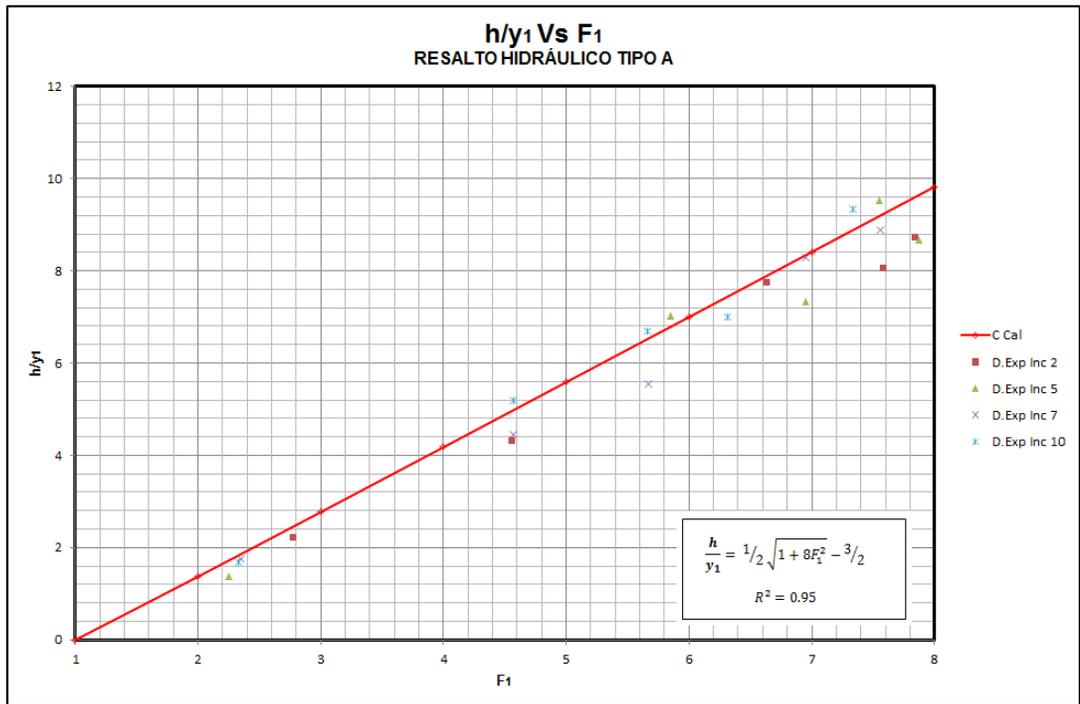


Gráfica 4-68 : Ajuste experimental relación d_t/d_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.

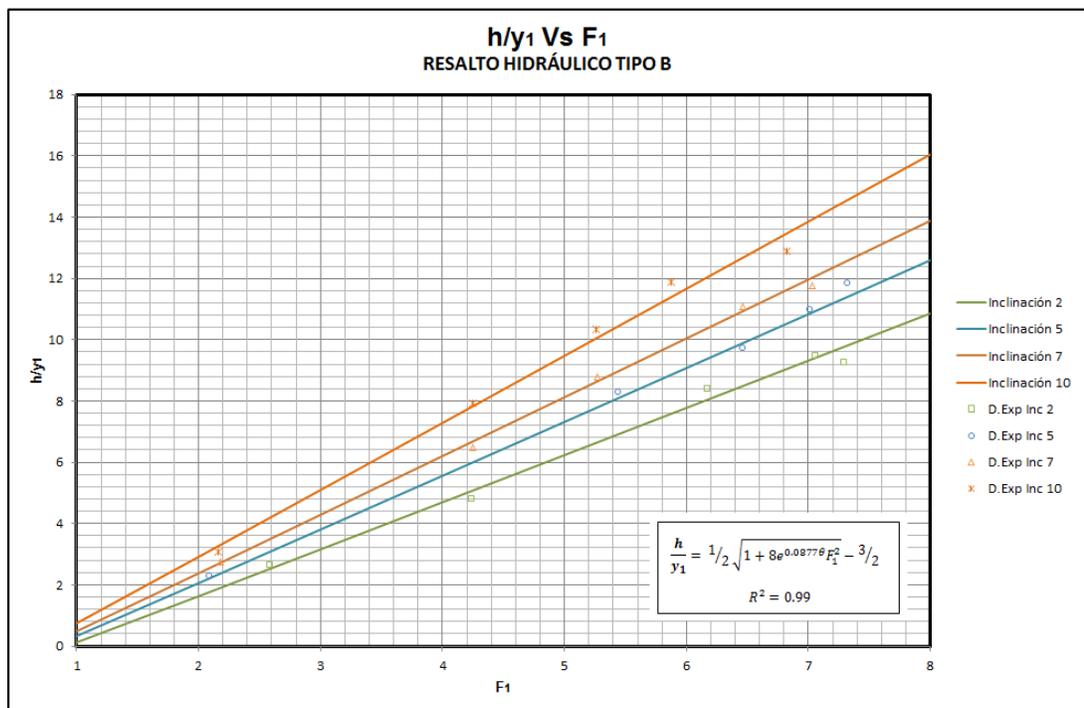


Gráfica 4-69: Validación experimental relación Γ Vs θ para el resalto tipo D-E.

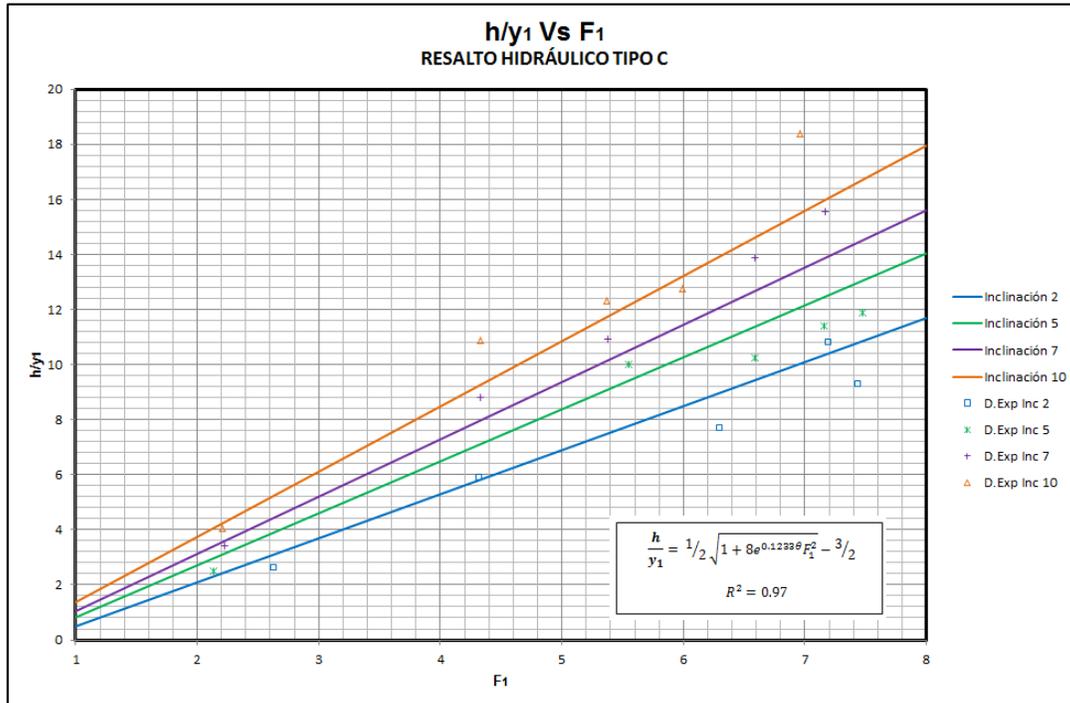
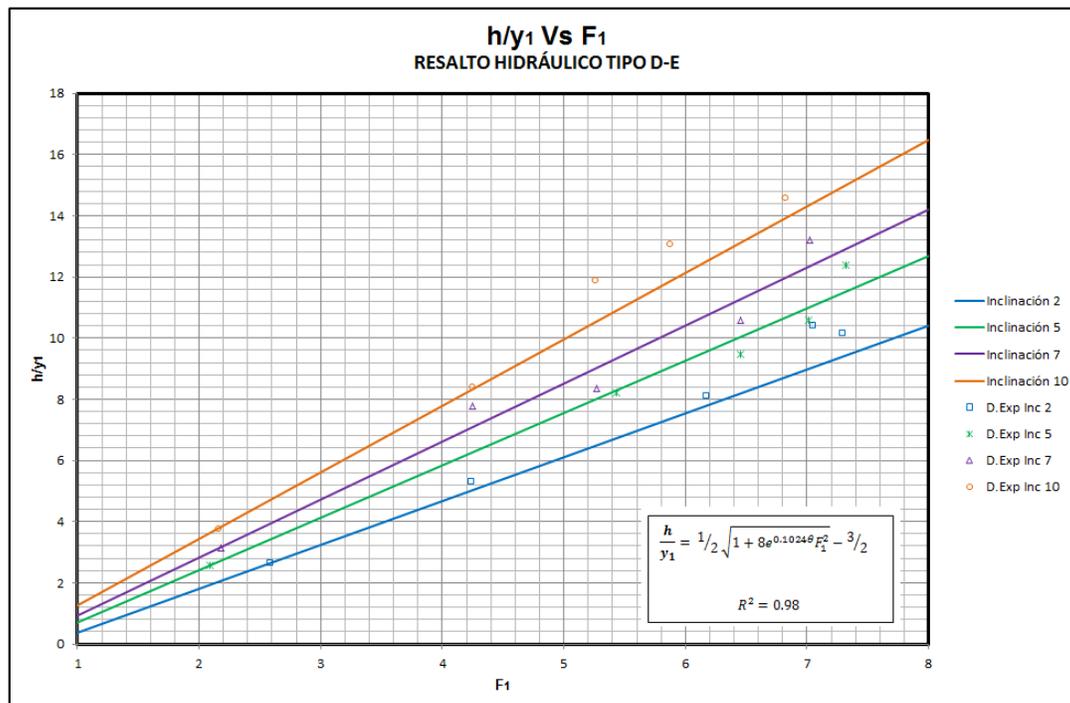
4.3.4 Relación altura - profundidad inicial de flujo del resalto (h/y_1)



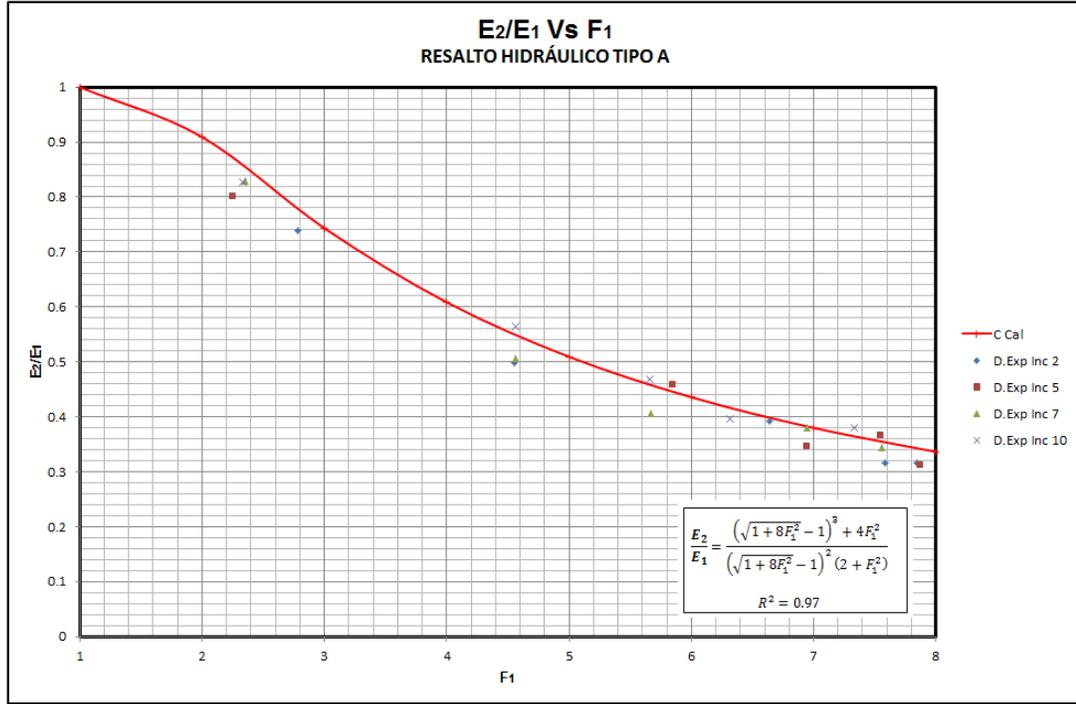
Gráfica 4-70: Validación experimental relación h/y_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.



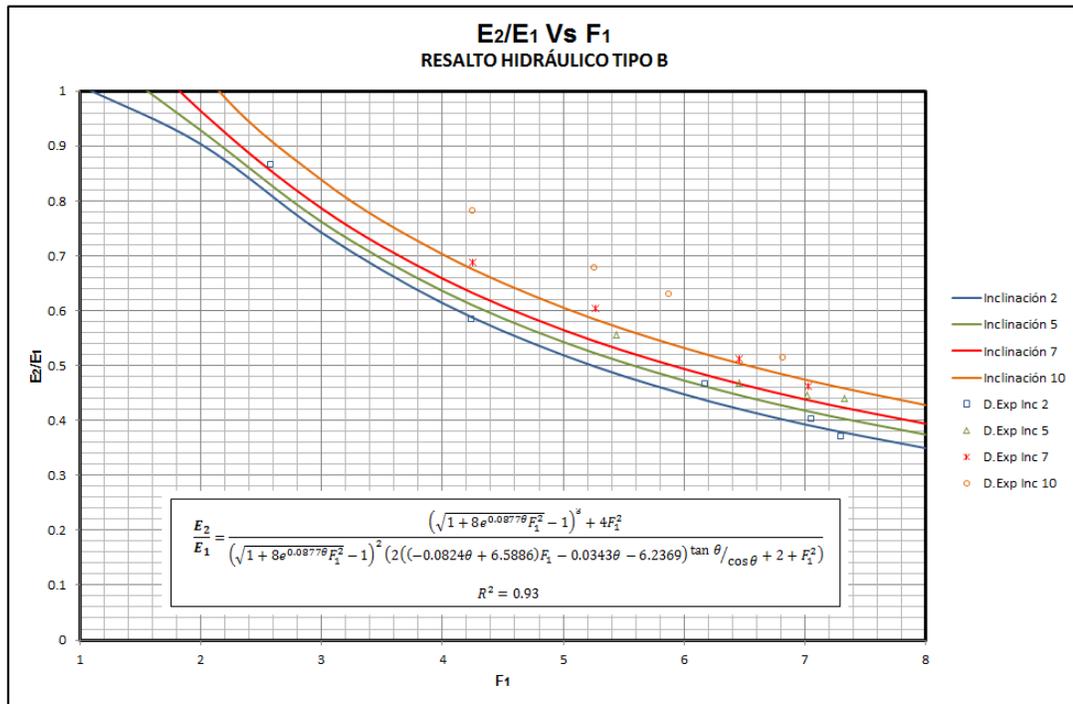
Gráfica 4-71: Validación experimental relación h/y_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.

Gráfica 4-72: Ajuste experimental Relación h/y_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.Gráfica 4-73: Validación experimental relación h/y_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E

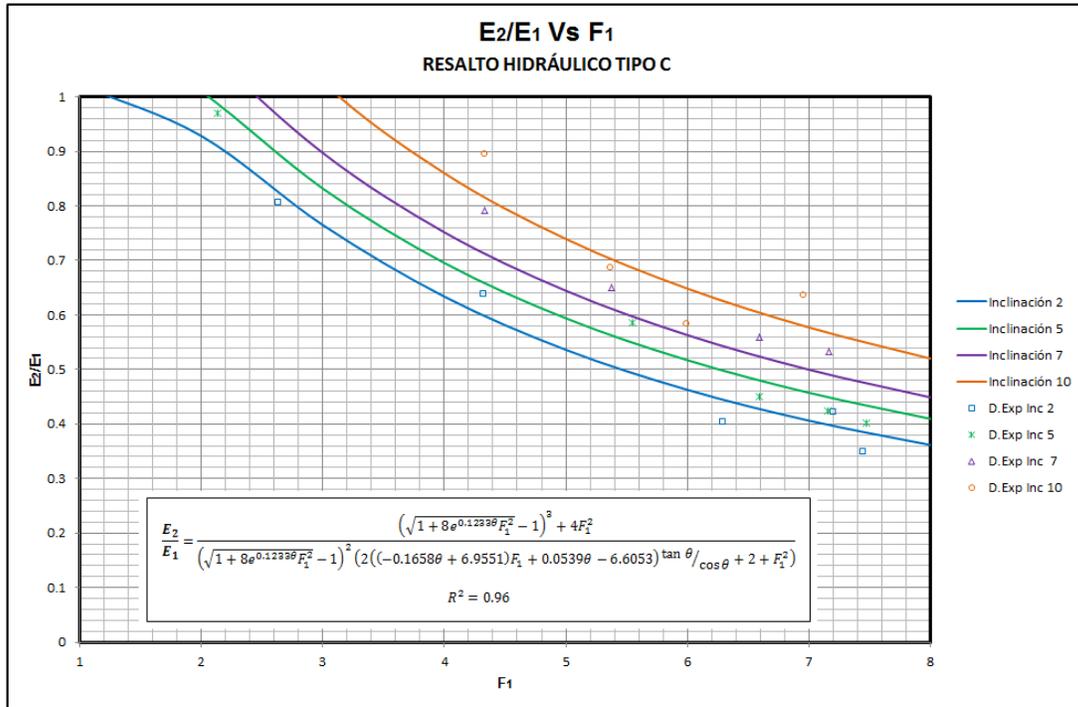
4.3.5 Relación energía final del flujo – energía inicial del flujo del resalto (E_2/E_1) (Eficiencia del resalto)



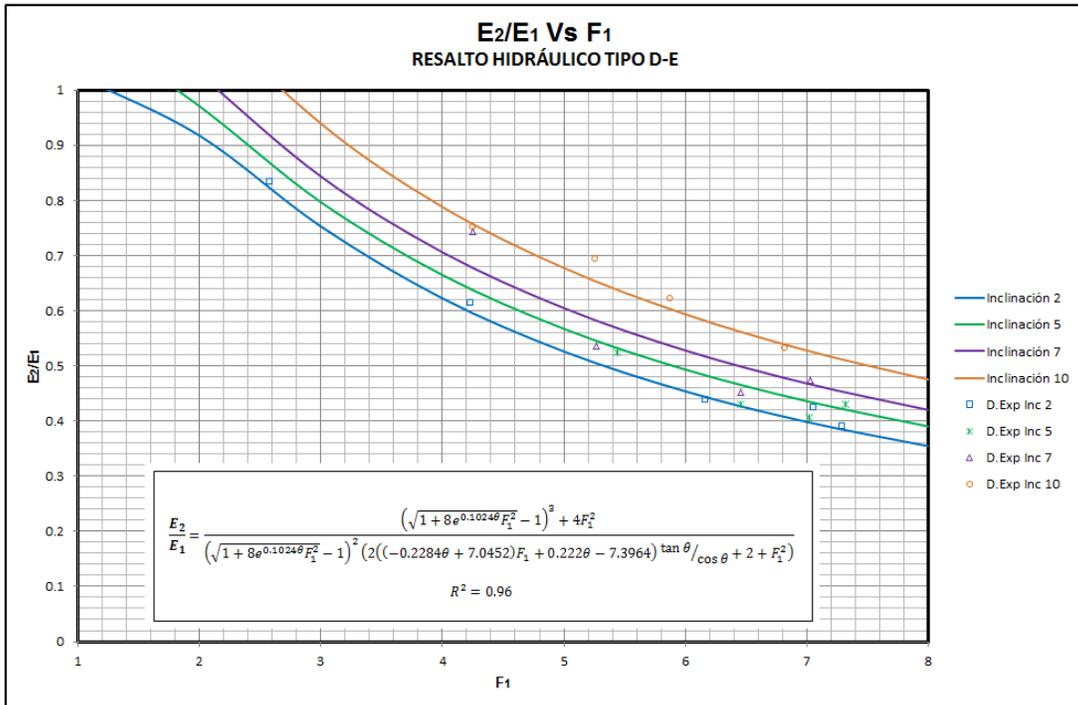
Gráfica 4-74: Validación Experimental relación E_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.



Gráfica 4-75: Ajuste experimental relación E_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.

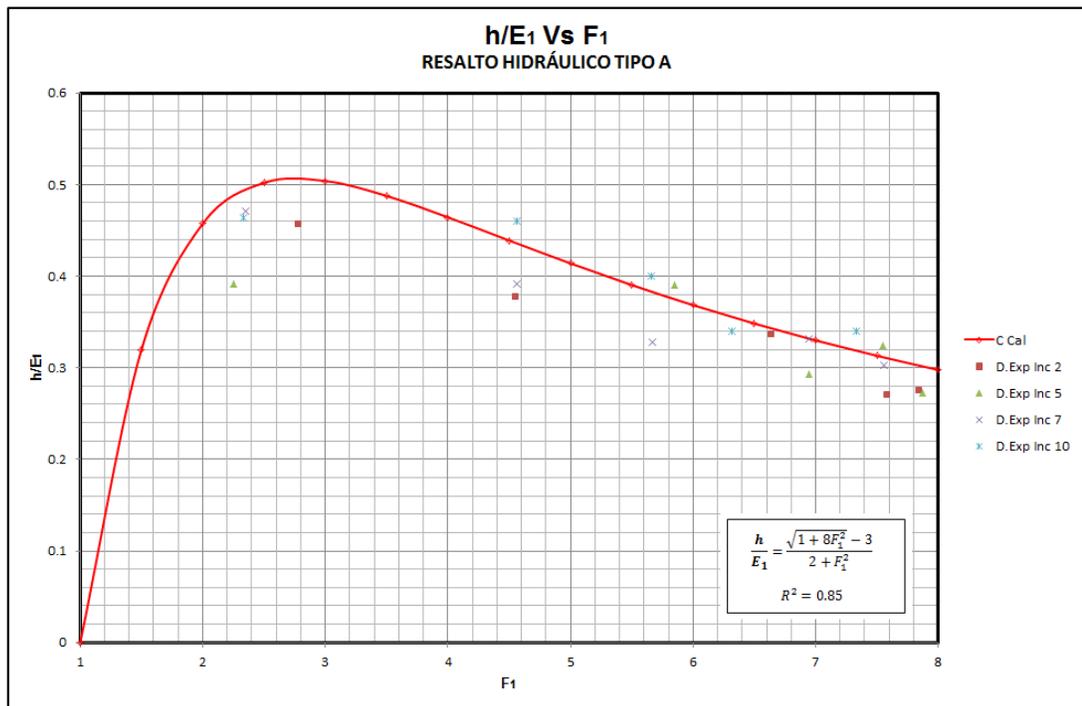


Gráfica 4-76: Validación experimental relación E₂/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo C.

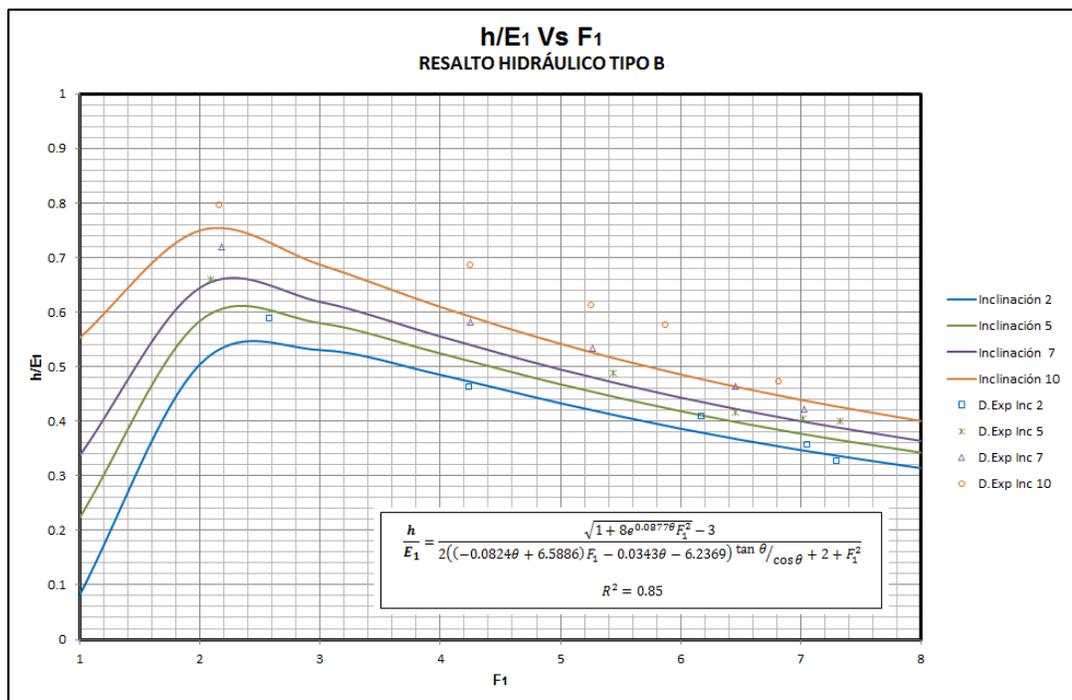


Gráfica 4-77: validación experimental relación E₂/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo D-E.

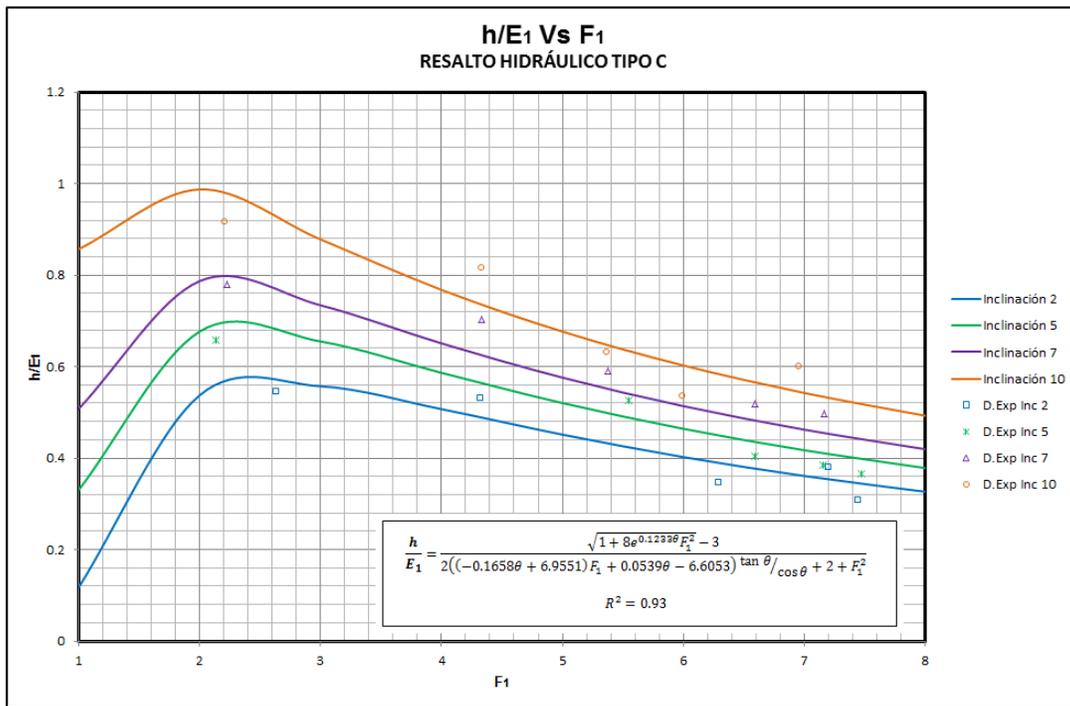
4.3.6 Relación altura – energía inicial de flujo del resalto (h/E_1)



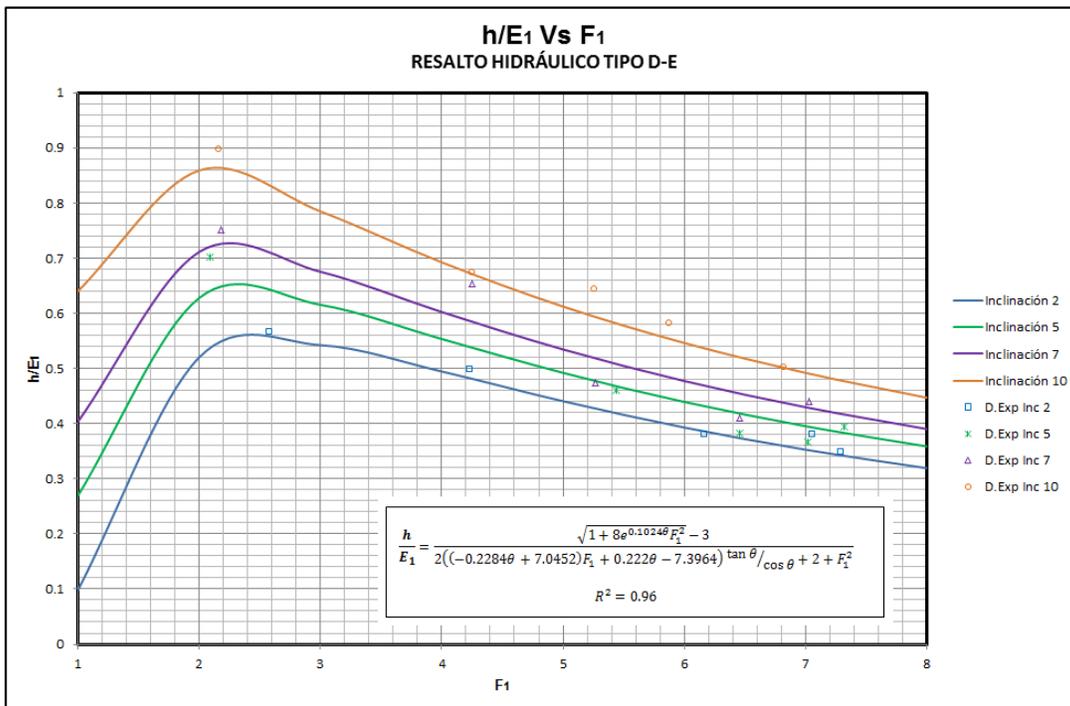
Gráfica 4-78: Ajuste experimental relación h/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.



Gráfica 4-79: Validación experimental relación h/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.

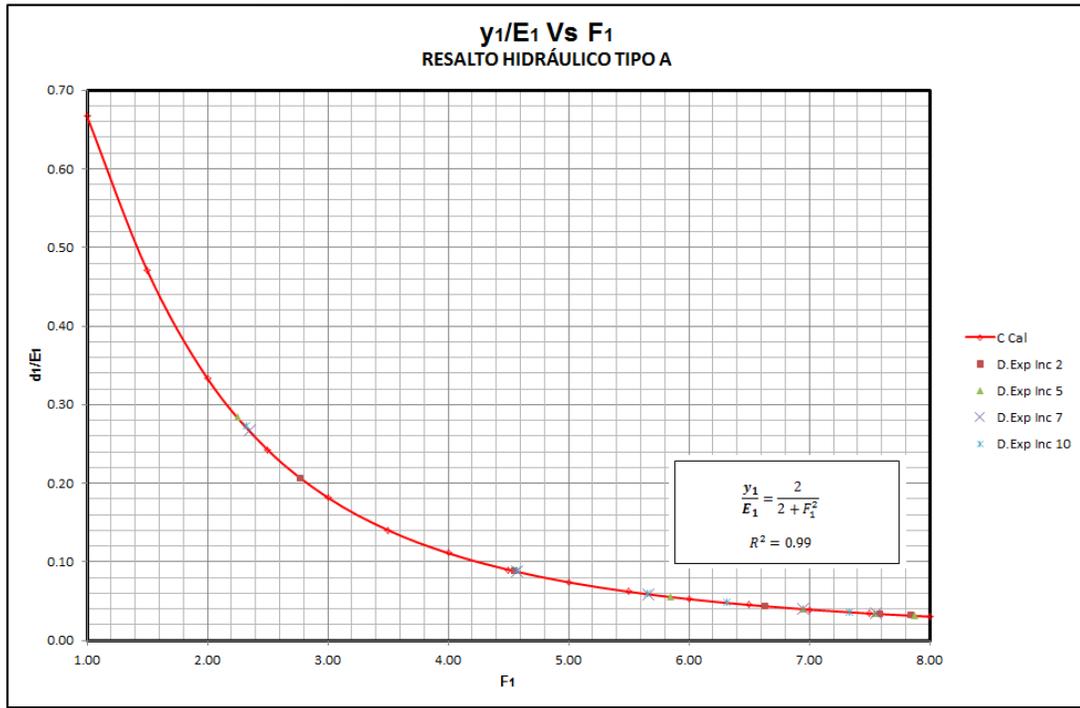


Gráfica 4-80: Validación experimental relación h/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo C.

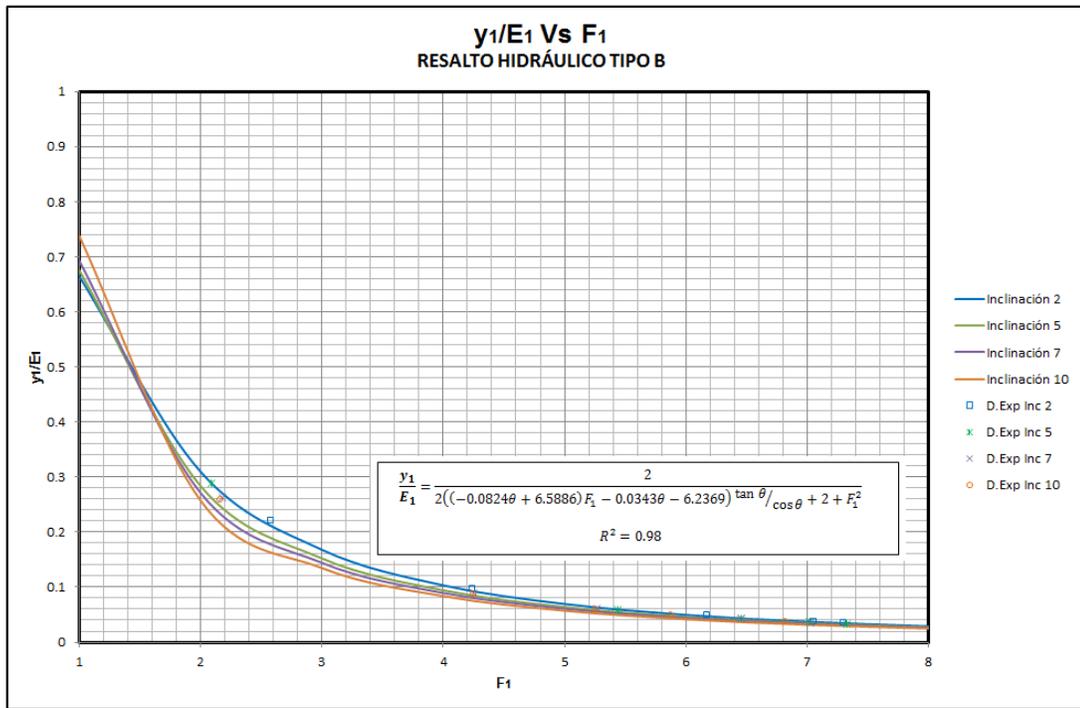


Gráfica 4-81: Validación experimental relación h/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo D-E.

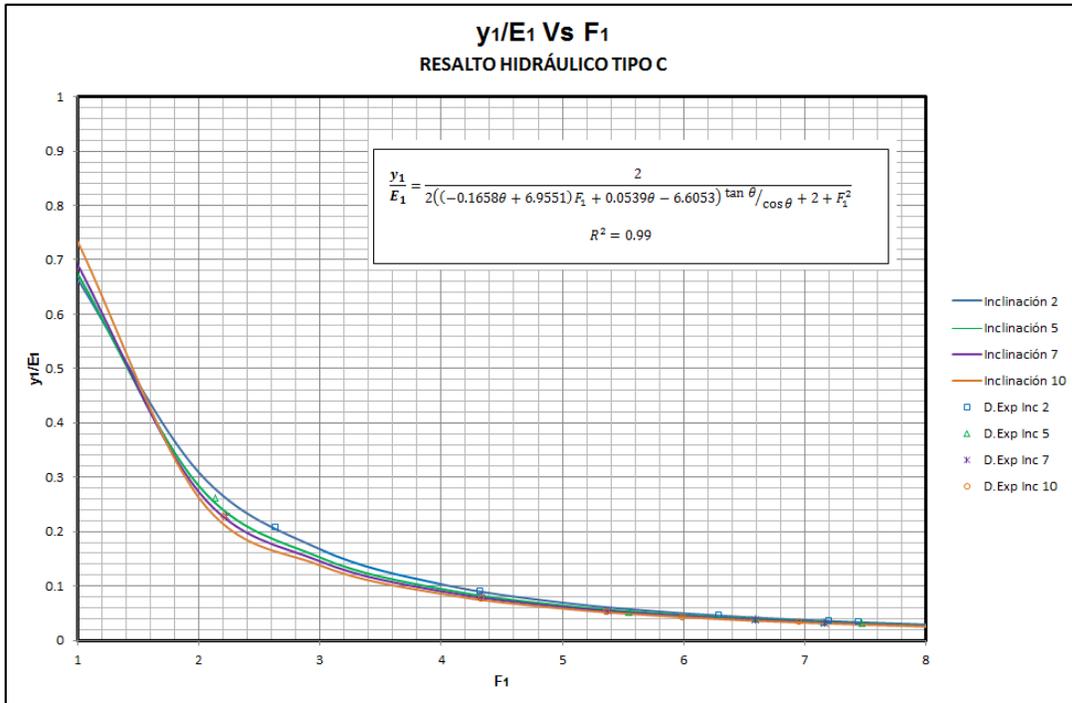
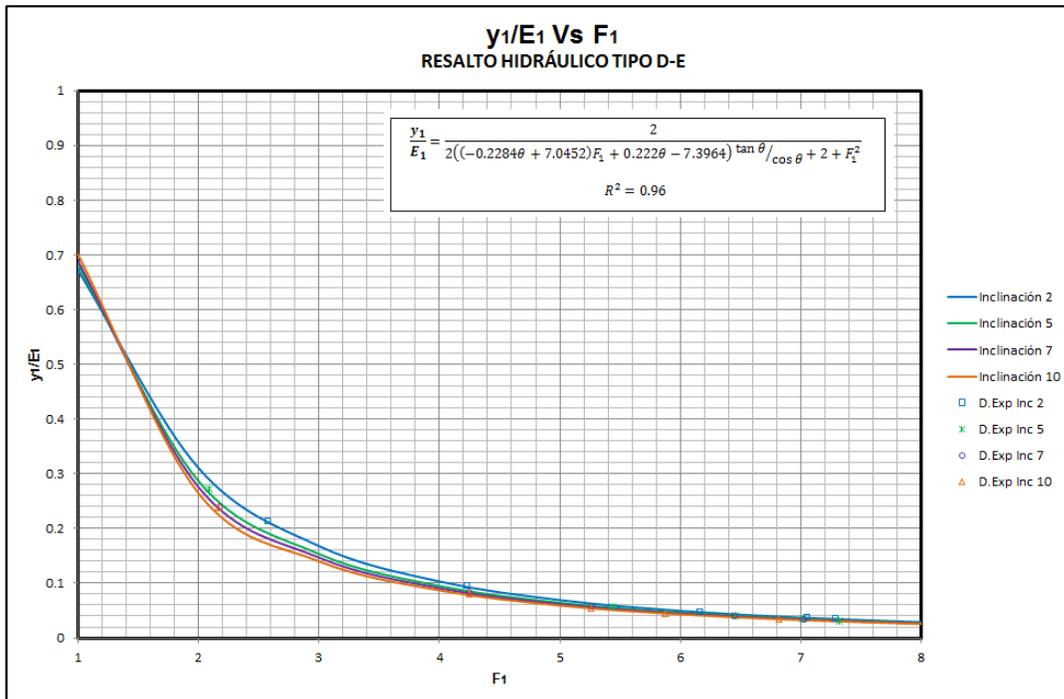
4.3.7 Relación profundidad inicial de flujo –energía Inicial de flujo del resalto (y_1/E_1)



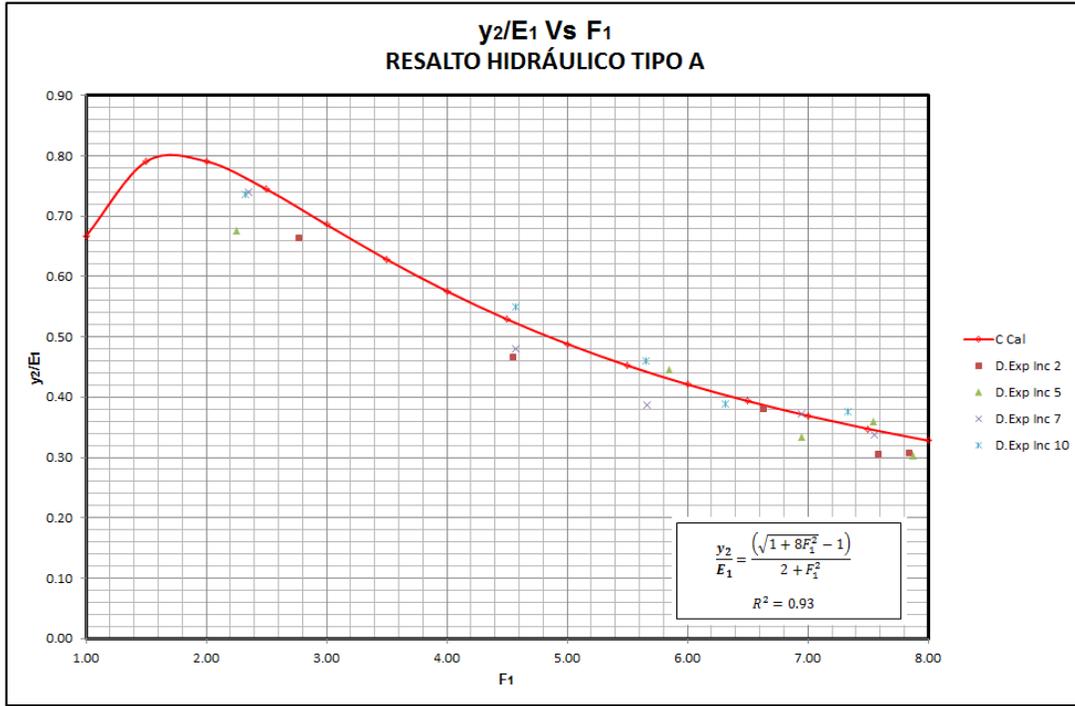
Gráfica 4-82: Validación experimental y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo A.



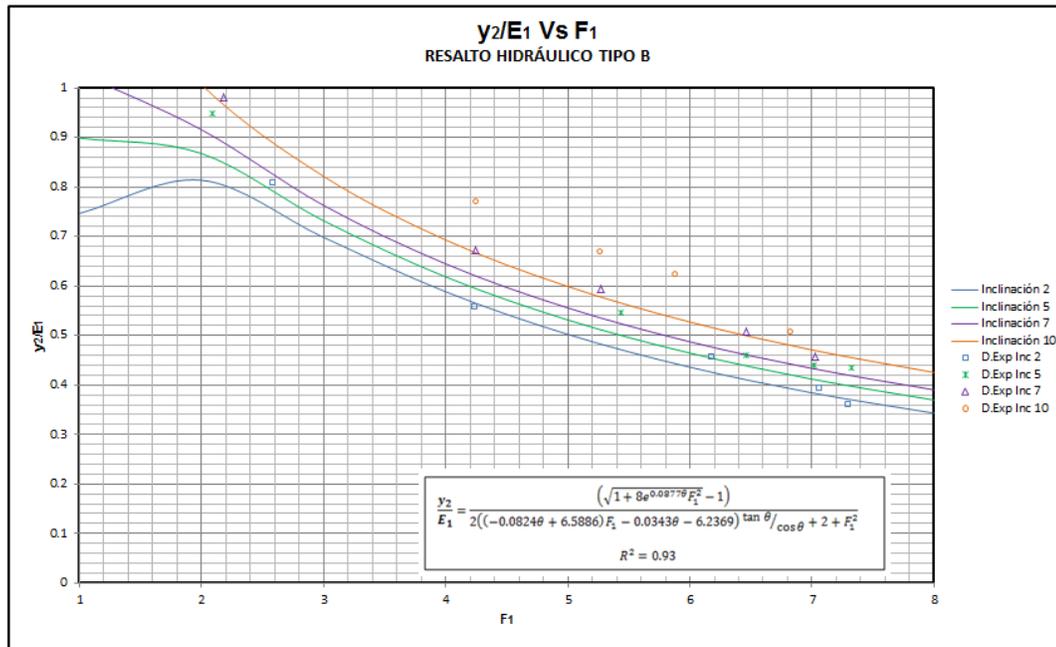
Gráfica 4-83: Validación experimental relación y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.

Gráfica 4-84: Validación experimental relación y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.Gráfica 4-85: Validación experimental relación y_1/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.

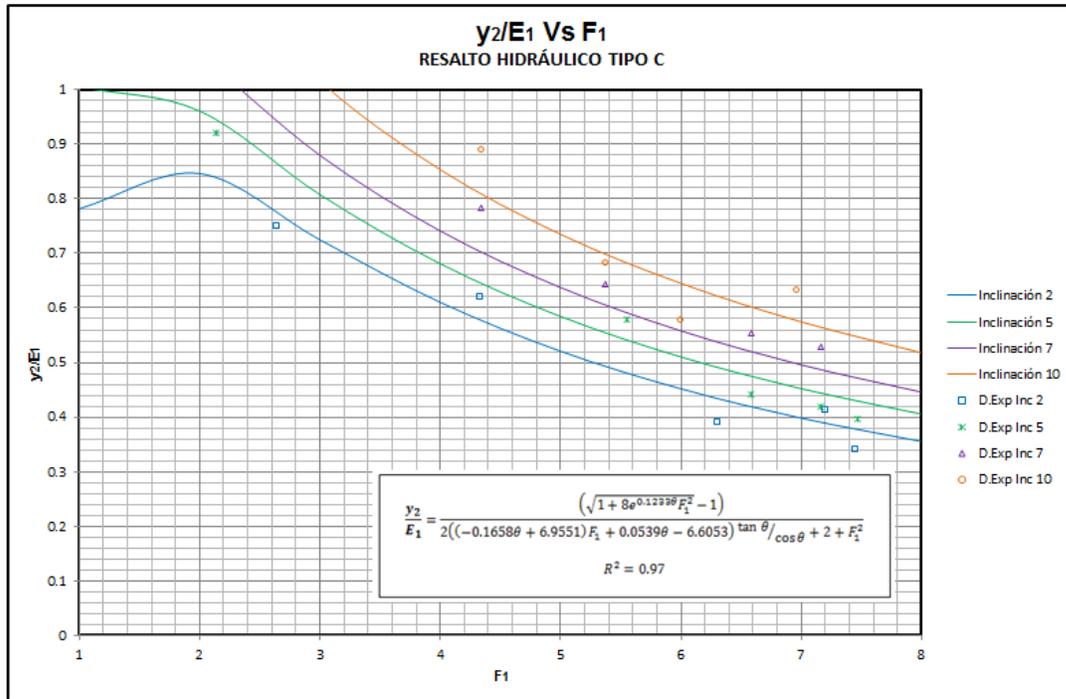
4.3.8 Relación profundidad final de flujo –energía inicial de flujo del resalto (y_2/E_1)



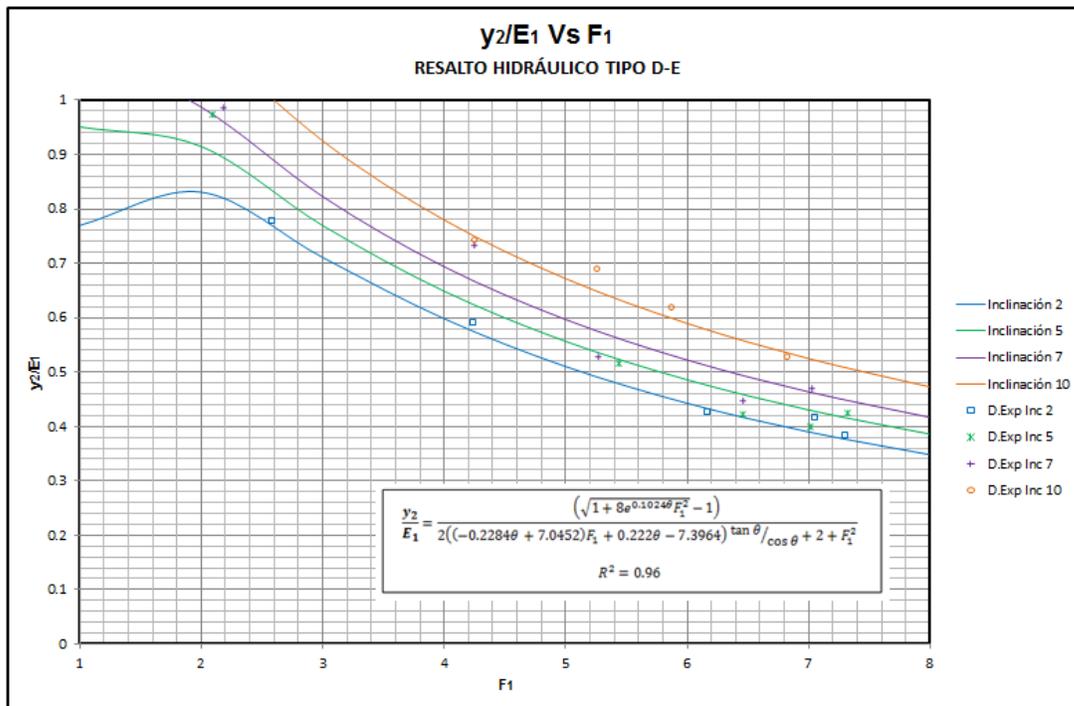
Gráfica 4-86: Validación experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo A



Gráfica 4-87: Validación experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo B.

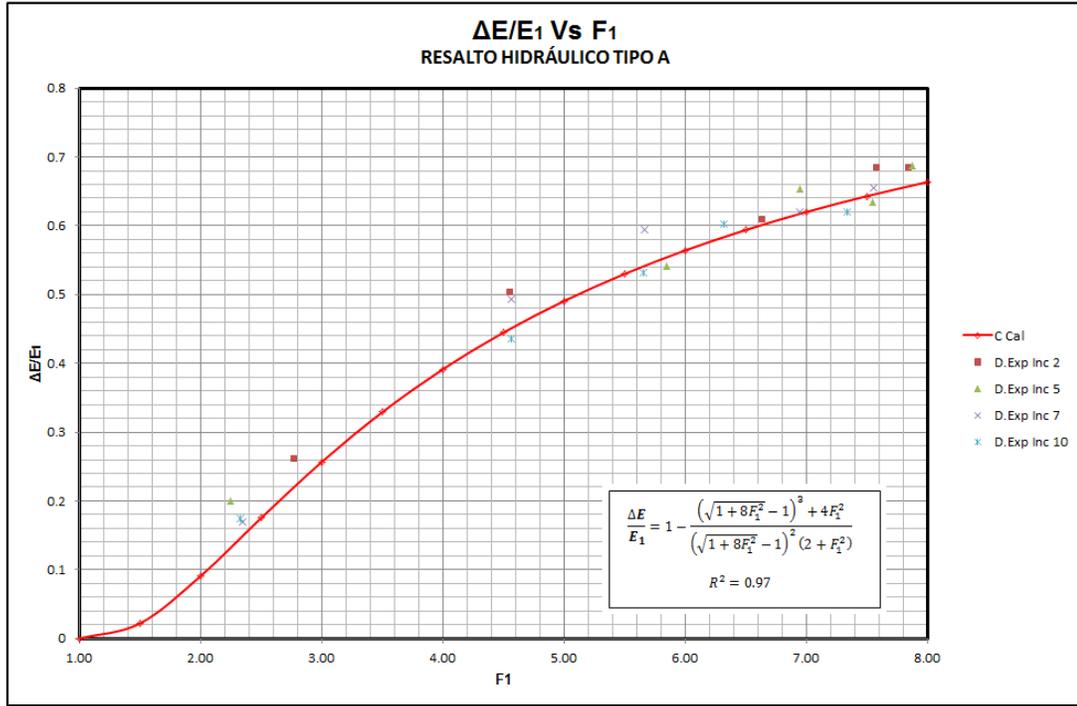


Gráfica 4-88: Validación experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo C.

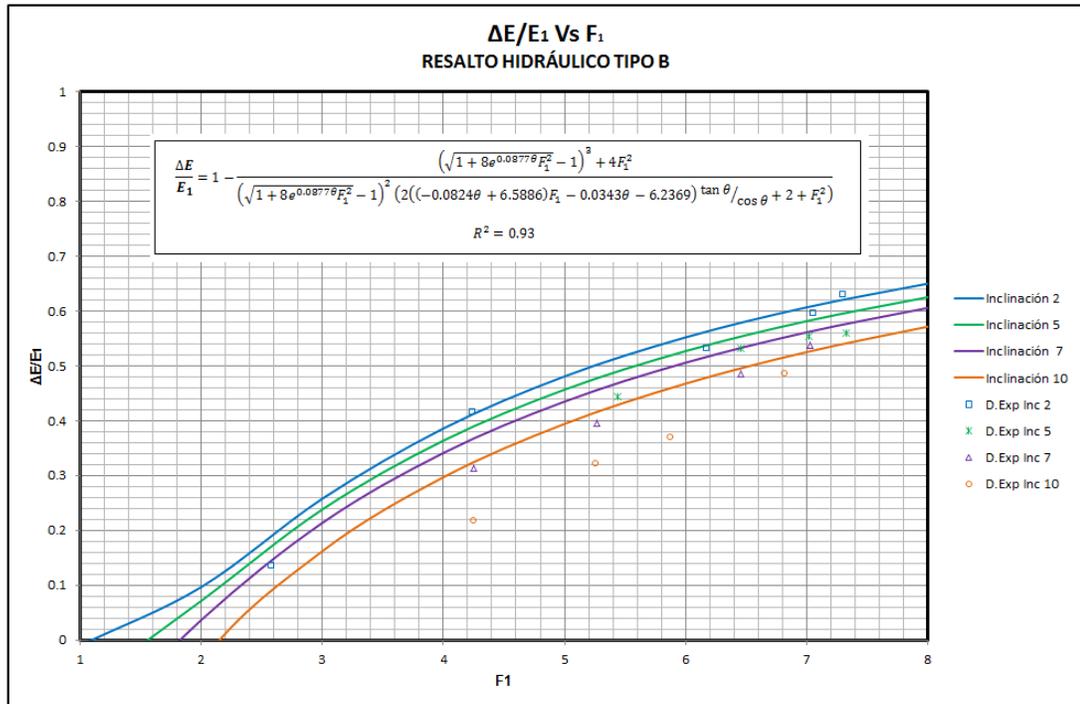


Gráfica 4-89: Validación experimental relación y_2/E_1 Vs F_1 para el resalto tipo D-E.

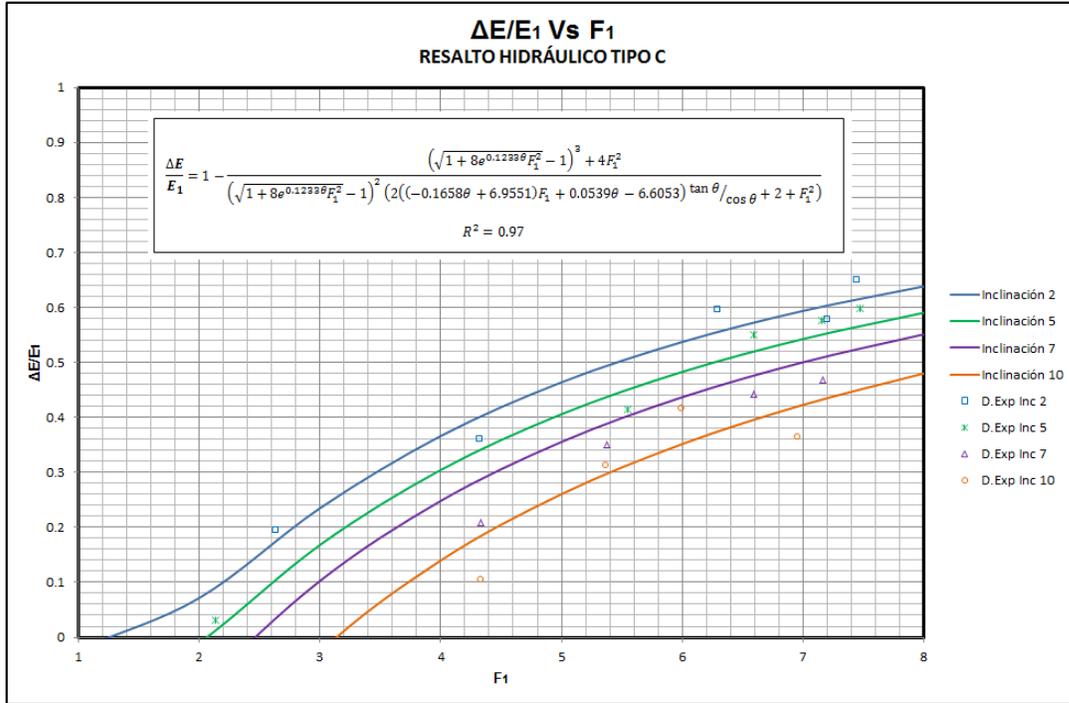
4.3.9 Relación Pérdida de energía –energía inicial del resalto ($\Delta E/E_1$)



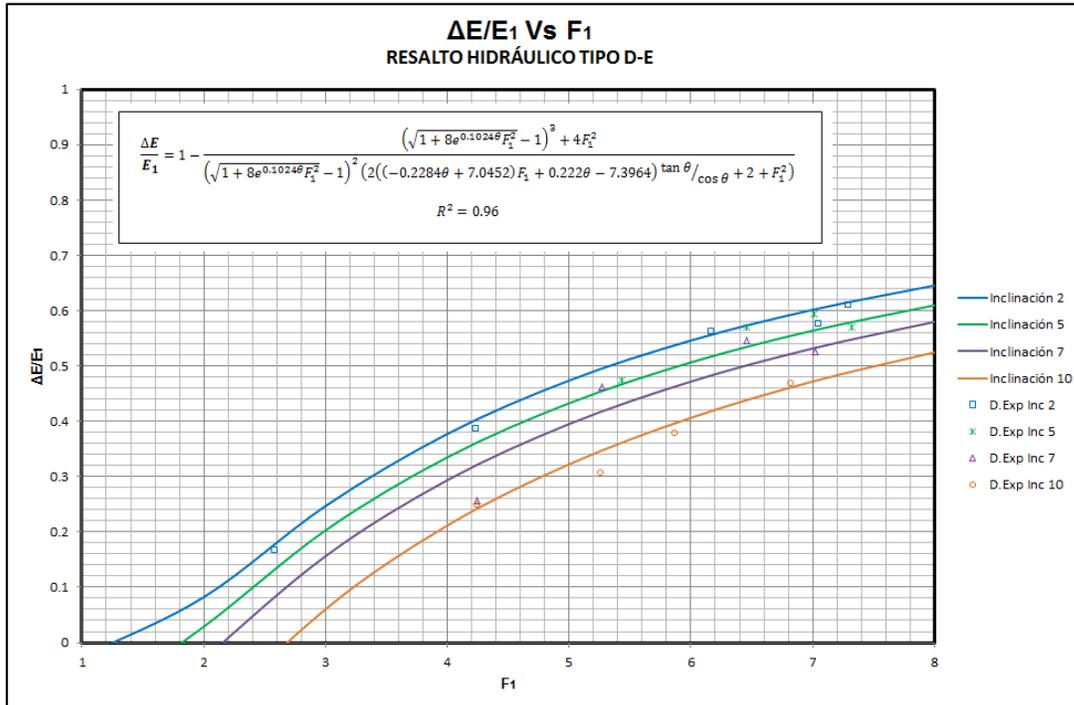
Gráfica 4-90: Validación experimental Relación $\Delta E/E_1$ Vs F_1 para el resalto tipo A.



Gráfica 4-91: Validación experimental relación $\Delta E/E_1$ Vs F_1 para el resalto tipo B.



Gráfica 4-92: Validación experimental relación ΔE/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo C.



Gráfica 4-93: Validación experimental relación ΔE/E₁ Vs F₁ para el resalto tipo D-E.

4.4 RELACIONES MATEMÁTICAS PROPUESTAS PARA LOS RESALTOS HIDRÁULICOS CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

Como resultado de lo anterior se presentan las siguientes relaciones matemáticas para los parámetros que describen el comportamiento de los diferentes tipos de resaltos hidráulicos en canales con pendiente y sección transversal rectangular (ver gráficas en Anexo F-Curvas ajustadas resaltos hidráulicos en canales con pendiente y sección rectangular):

Relación de Parámetros	Resalto Hidráulico Tipo A
$\frac{L}{d_1}$	$7.1425F_1 - 6.73$
r	1
$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$
$\frac{h}{y_1}$	$\frac{1}{2} \sqrt{1 + 8F_1^2} - 3/2$
ΔE	$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$
$\frac{E_2}{E_1}$	$\frac{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^3 + 4F_1^2}{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^2 (2 + F_1^2)}$
$\frac{h}{E_1}$	$\frac{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3}{2 + F_1^2}$
$\frac{y_1}{E_1}$	$\frac{2}{2 + F_1^2}$
$\frac{y_2}{E_1}$	$\frac{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)}{2 + F_1^2}$
$\frac{\Delta E}{E_1}$	$1 - \frac{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^3 + 4F_1^2}{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^2 (2 + F_1^2)}$

Tabla 4-1: Relaciones matemáticas para el resalto hidráulico tipo A.

Relación de Parámetros	Resalto Hidráulico Tipo B
$\frac{L}{d_1}$	$(-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369$
Γ	$e^{0.0877\theta}$
$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{\cos\theta}{2} \left(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1 \right)$
$\frac{h}{y_1}$	$1/2 \sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 3/2$
ΔE	$((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan\theta + (d_2 - d_1) \cos\theta \left(\frac{(d_2 + d_1)^2}{4e^{0.0877\theta} d_1 d_2} - 1 \right)$
$\frac{E_2}{E_1}$	$\frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1)^2 (2((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan\theta / \cos\theta + 2 + F_1^2)}$
$\frac{h}{E_1}$	$\frac{\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 3}{2((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan\theta / \cos\theta + 2 + F_1^2}$
$\frac{y_1}{E_1}$	$\frac{2}{2((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan\theta / \cos\theta + 2 + F_1^2}$
$\frac{y_2}{E_1}$	$\frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1)}{2((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan\theta / \cos\theta + 2 + F_1^2}$
$\frac{\Delta E}{E_1}$	$1 - \frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8e^{0.0877\theta} F_1^2} - 1)^2 (2((-0.0824\theta + 6.5886)F_1 - 0.0343\theta - 6.2369) \tan\theta / \cos\theta + 2 + F_1^2)}$

Tabla 4-2: Relaciones matemáticas para el resalto hidráulico tipo B.

Relación de Parámetros	Resalto Hidráulico Tipo C
$\frac{L}{d_1}$	$(-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053$
Γ	$e^{0.1233\theta}$
$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{\cos\theta}{2} \left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2 - 1} \right)$
$\frac{h}{y_1}$	$1/2 \sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2 - 3}/2$
ΔE	$((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053) \tan\theta + (d_2 - d_1) \cos\theta \left(\frac{(d_2 + d_1)^2}{4e^{0.1233\theta} d_1 d_2} - 1 \right)$
$\frac{E_2}{E_1}$	$\frac{\left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2 - 1} \right)^3 + 4F_1^2}{\left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2 - 1} \right)^2 (2((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053) \tan\theta / \cos\theta + 2 + F_1^2)}$
$\frac{h}{E_1}$	$\frac{\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 3}{2((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053) \tan\theta / \cos\theta + 2 + F_1^2}$
$\frac{y_1}{E_1}$	$\frac{2((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053) \tan\theta / \cos\theta + 2 + F_1^2}{2}$
$\frac{y_2}{E_1}$	$\frac{\left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 1 \right)}{2((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053) \tan\theta / \cos\theta + 2 + F_1^2}$
$\frac{\Delta E}{E_1}$	$1 - \frac{\left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 1 \right)^2 (2((-0.1658\theta + 6.9551)F_1 + 0.0539\theta - 6.6053) \tan\theta / \cos\theta + 2 + F_1^2)}{\left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 1 \right)^3 + 4F_1^2}$

Tabla 4-3. Relaciones matemáticas para el resalto hidráulico tipo C.

Relación de Parámetros	Resalto Hidráulico Tipo D-E
$\frac{L}{d_1}$	$(-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964$
Γ	$e^{0.1024\theta}$
$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1 \right)$
$\frac{h}{y_1}$	$1/2 \sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 3/2$
ΔE	$((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta + (d_2 - d_1) \cos \theta \left(\frac{(d_2 + d_1)^2}{4e^{0.1024\theta} d_1 d_2} - 1 \right)$
$\frac{E_2}{E_1}$	$\frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1)^2 (2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2)}$
$\frac{h}{E_1}$	$\frac{\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 3}{2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$
$\frac{y_1}{E_1}$	$\frac{2}{2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$
$\frac{y_2}{E_1}$	$\frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1)}{2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$
$\frac{\Delta E}{E_1}$	$1 - \frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2)}$

Tabla 4-4. Relaciones matemáticas para el resalto hidráulico tipo D-E.

4.5 DIAGRAMA DEL PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN APRIORI DEL TIPO DE RESALTO HIDRÁULICO CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

Para poder determinar el tipo de resalto que probablemente se formará con determinadas condiciones aguas arriba y aguas abajo, se debe seguir el procedimiento indicado a continuación:

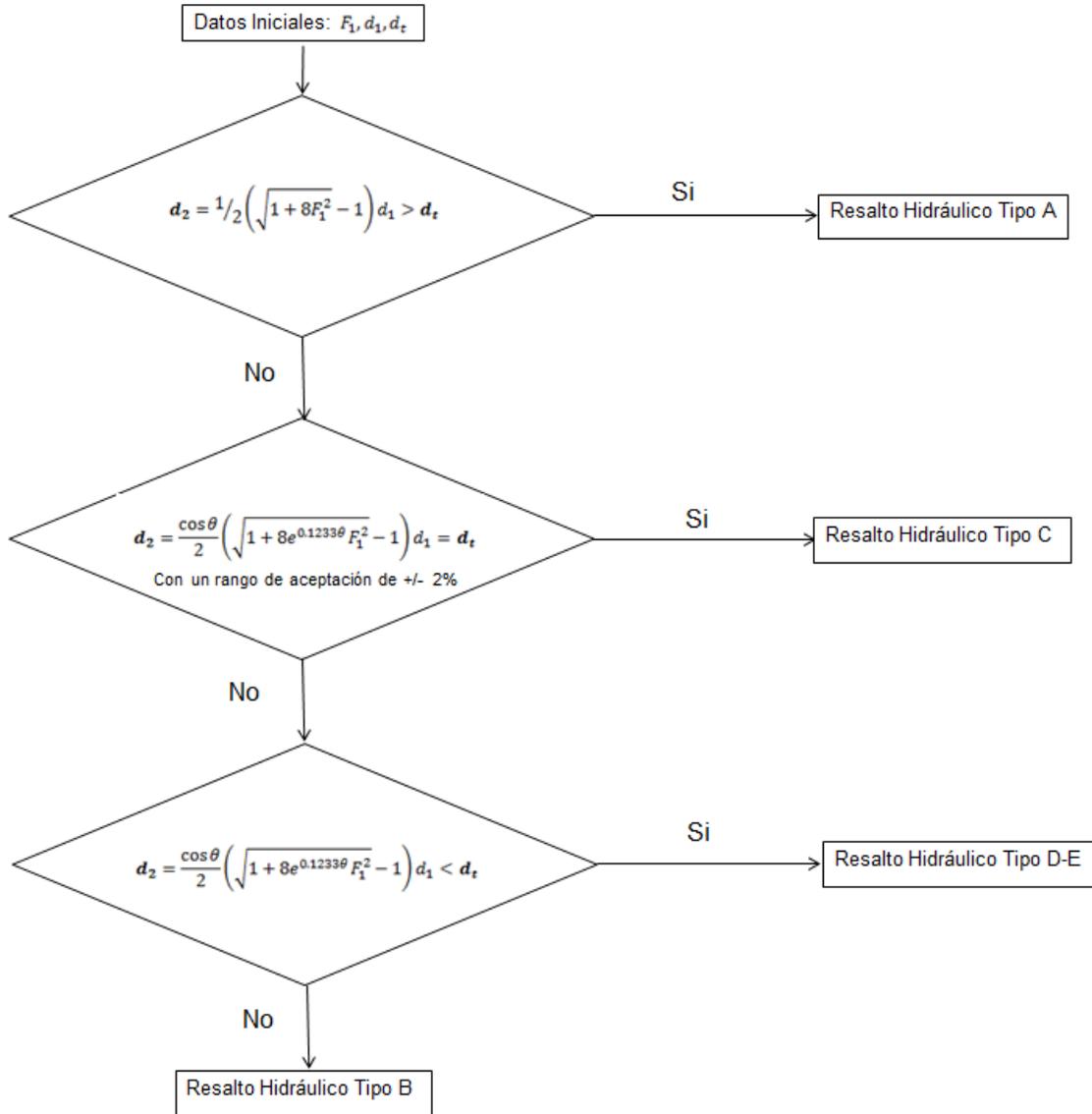


Figura 4-20. Diagrama del procedimiento para la determinación del tipo de resalto hidráulico (adaptada de Frech, 1985)

4.6 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LAS RELACIONES MATEMÁTICAS PROPUESTAS

Para el diseño de una hidroeléctrica se requiere determinar el comportamiento del resalto hidráulico que se desea producir para disipar la energía del flujo en la base de un vertedero de rebose; para lo cual se tienen los siguientes datos:

$$Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$b = 10 \text{ m}$$

$$d_1 = 0.24 \text{ m}$$

$$d_t = 2.5 \text{ m}$$

$$\theta = 8^\circ$$

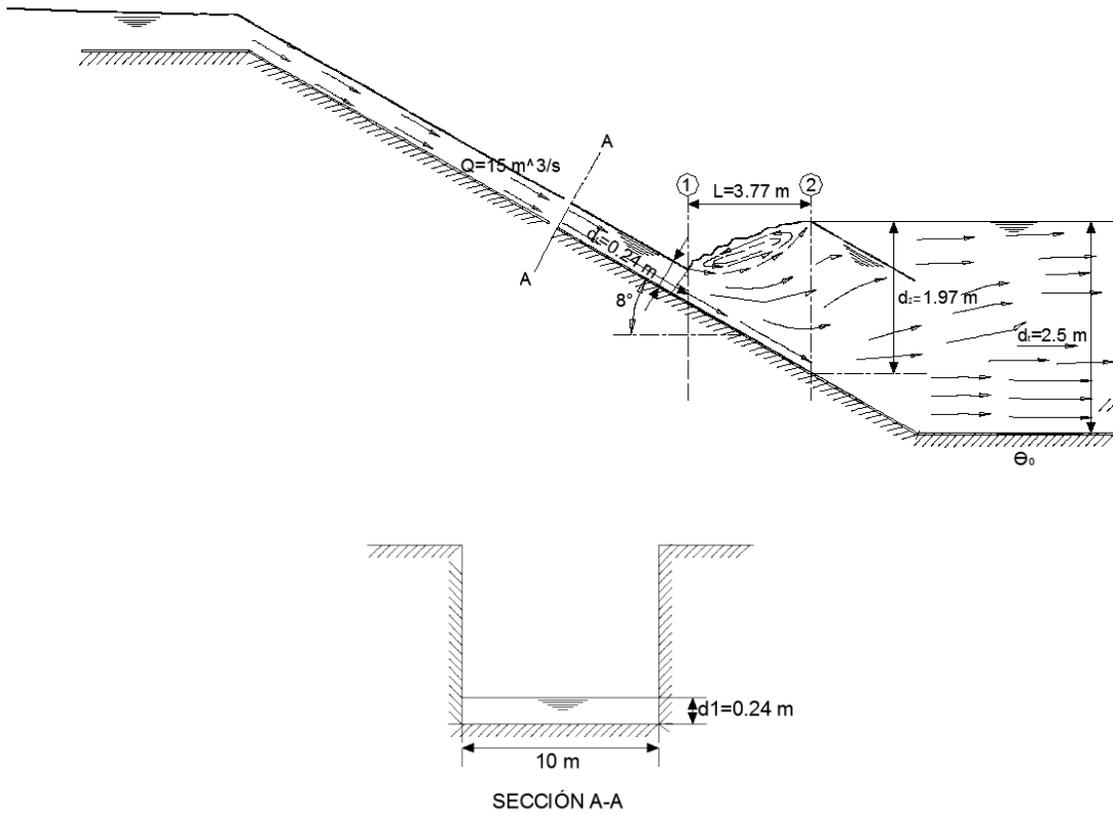


Figura 4-21. Diagrama ejemplo de aplicación

En primer lugar se calcula el número de Froude en la sección de flujo inicial del resalto hidráulico:

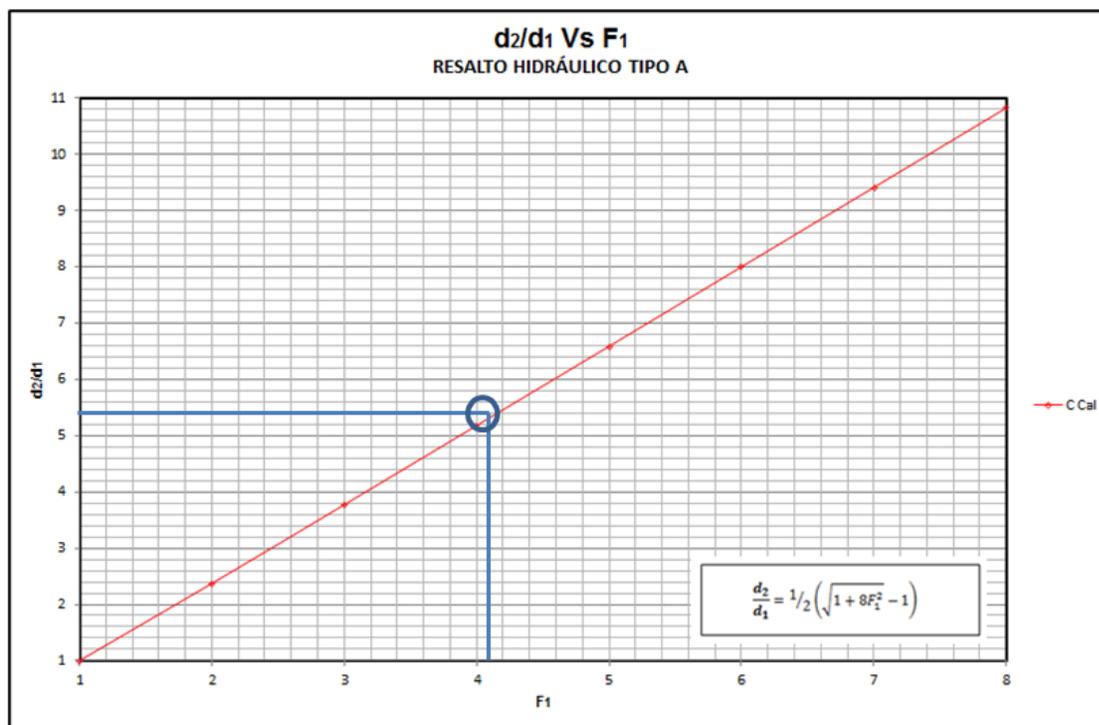
$$F_1^2 = \frac{v^2}{gd_1 \cos \theta} = \frac{Q^2}{gd_1 A^2 \cos \theta} = \frac{Q^2}{gb^2 d_1^3 \cos \theta} \rightarrow F_1 = \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2 d_1^3 \cos \theta}}$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{(15 \text{ m}^3/\text{s})^2}{(9.8 \text{ m}/\text{s}^2)(10 \text{ m})^2 (0.24 \text{ m})^3 \cos 8^\circ}} = 4.09$$

Ahora, siguiendo lo indicado en el procedimiento de determinación de tipo de resalto hidráulico de la figura 4-16, se calcula (d_2), con la ecuación (4-12) o de manera equivalente con la gráfica 4-94 :

$$d_2 = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8(4.09)^2} - 1) 0.24 \text{ m} = 1.27 \text{ m}$$

$$d_2 = 1.27 \text{ m} < d_t = 2.5 \text{ m}$$



Gráfica 4-94. Solución gráfica para d_2/d_1 resalto tipo A

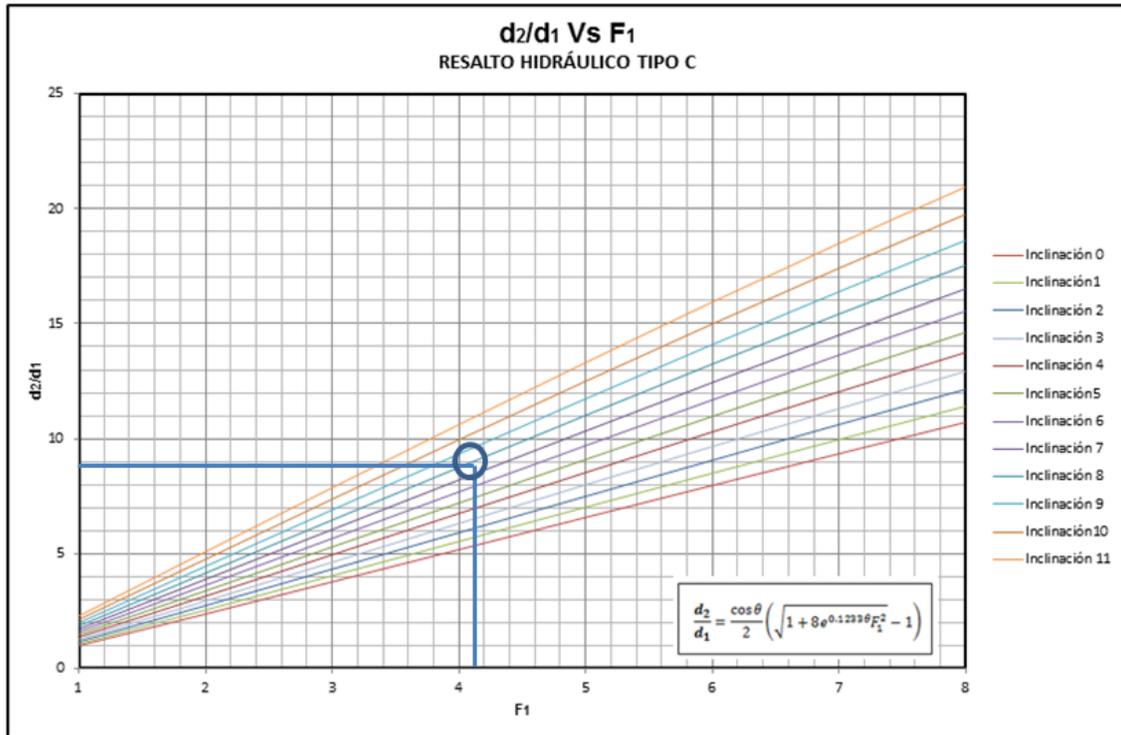
Con lo cual se puede deducir que el resalto hidráulico no es de Tipo A.

Ahora calculando d_2 , con la ecuación (4-14) o con la gráfica 4-95, se tiene:

$$d_2 = \frac{\cos \theta}{2} \left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} F_1^2} - 1 \right) d_1 = \frac{\cos 8^\circ}{2} \left(\sqrt{1 + 8e^{0.1233\theta} (4.09)^2} - 1 \right) 0.24 \text{ m}$$

$$= 2.13 \text{ m}$$

$$d_2 = 2.13 \text{ m} < d_t = 2.5 \text{ m}$$



Grafica 4-95. Solución gráfica para d_2/d_1 resalto tipo C

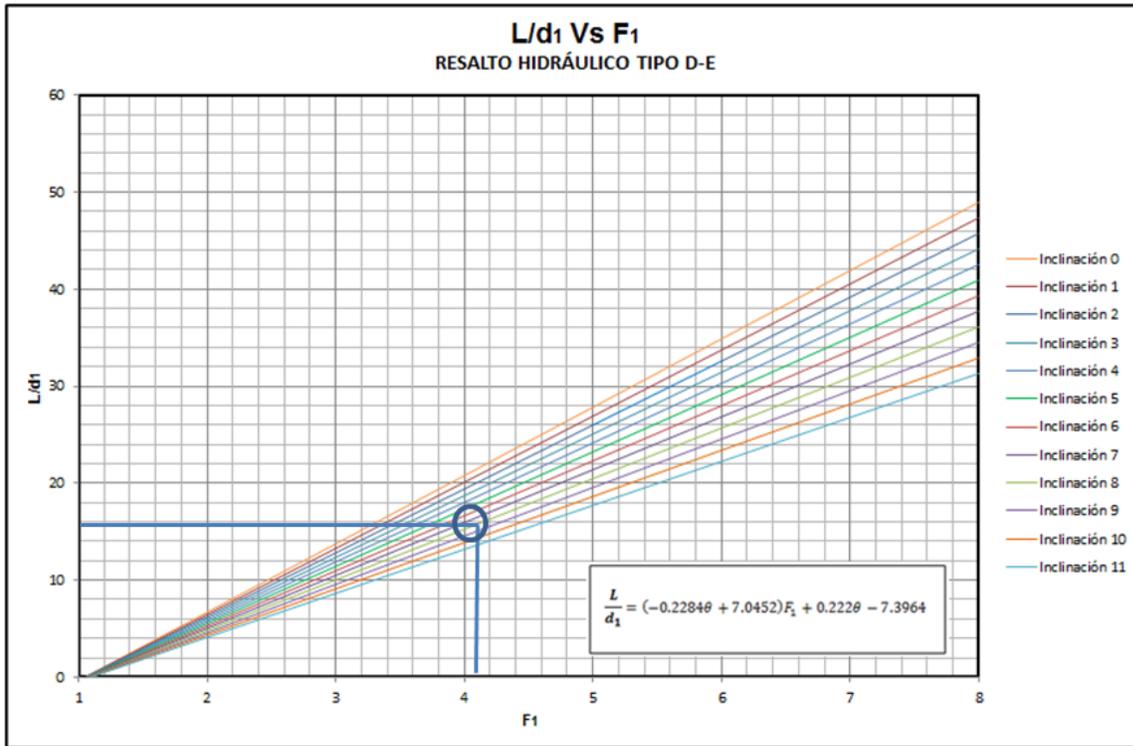
Con lo cual, según el diagrama, el resalto sería de tipo D-E y se desarrolla en el tramo de alta pendiente.

A continuación se calculan las características del resalto tipo D-E:

- Longitud de remolino del resalto L (Ecuación 4-6 o grafica 4-96):

$$L = ((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964)d_1$$

$$L = ((-0.2284(8^\circ) + 7.0452)4.09 + 0.222(8^\circ) - 7.3964)0.24 \text{ m} = 3.77 \text{ m}$$

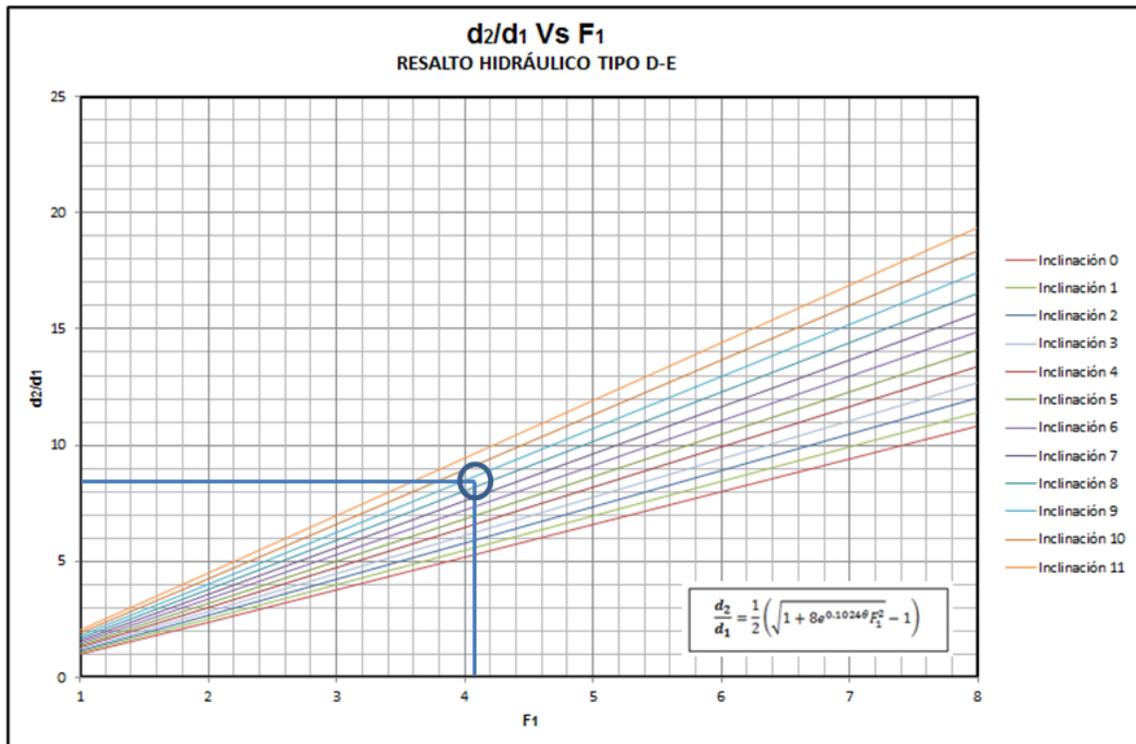


Grafica 4-96. Solución gráfica para L/d_1 resalto tipo C

- Altura final d_2 (Ecuación 4-15 o grafica 4-97) :

$$d_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1 \right) d_1$$

$$d_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8e^{0.1024 \cdot 8^\circ} * 4.09^2} - 1 \right) 0.24 \text{ m} = 1.97 \text{ m}$$



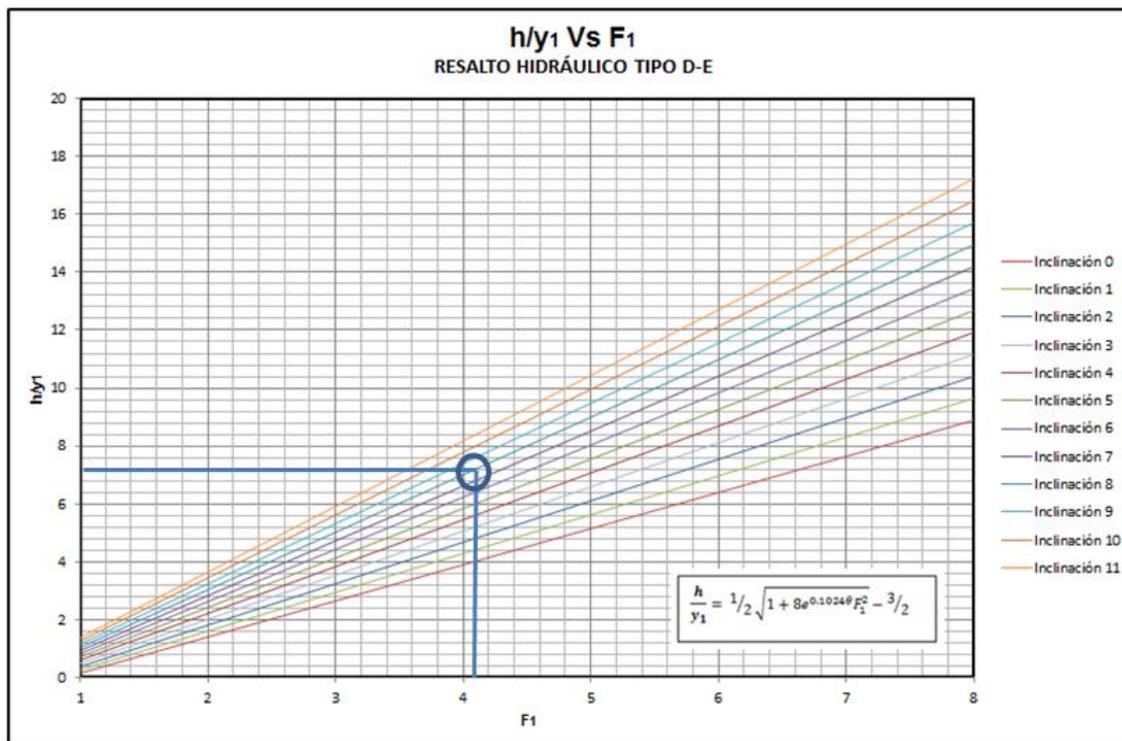
Grafica 4-97. Solución grafica para d_2/d_1 resalto tipo D-E

- Altura del resalto h (Ecuación 4-22 o grafica 4-98):

$$h = \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - \frac{3}{2} \right) y_1$$

$$h = \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - \frac{3}{2} \right) d_1 \cos \theta$$

$$h = \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} 4.09^2} - \frac{3}{2} \right) 0.24 \text{ m} * \cos 8^\circ = 1.71 \text{ m}$$



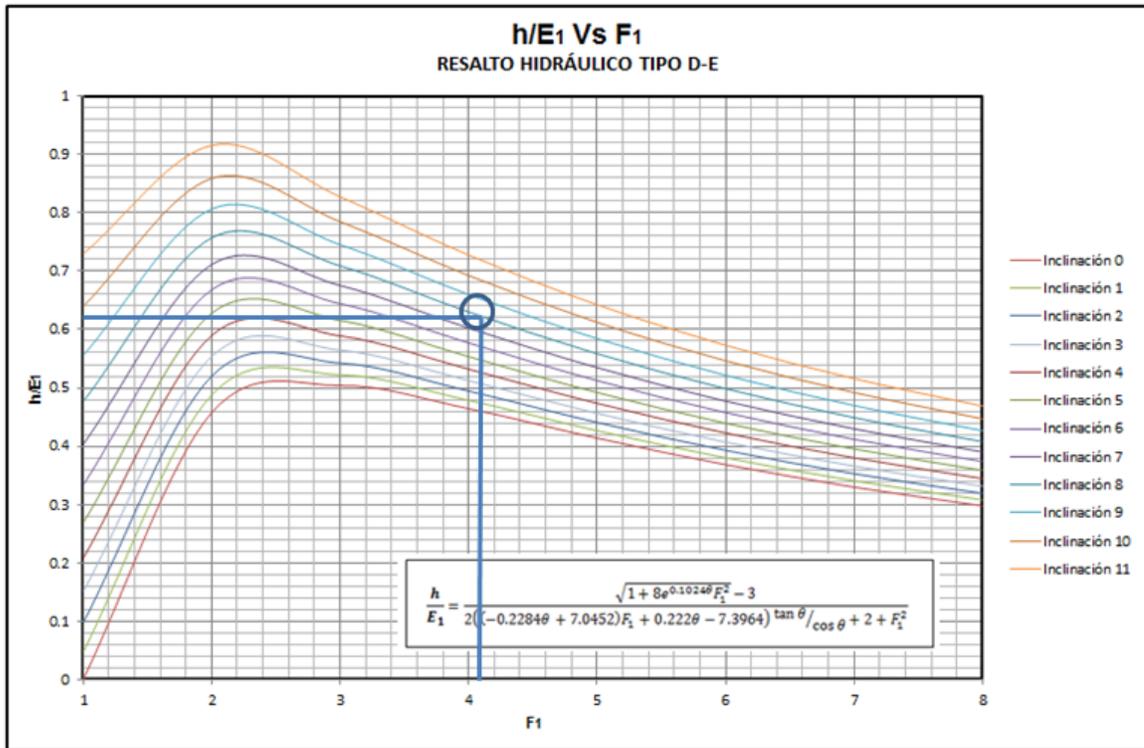
Grafica 4-98. Solución gráfica para h/y_1 resalto tipo D-E

- Energía inicial E_1 (Ecuación 4-31 o grafica 4-99):

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 3}{2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2}$$

$$\frac{h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8e^{0.1024 \cdot 8^\circ} 4.09^2} - 3}{2((-0.2284 \cdot 8^\circ + 7.0452) \cdot 4.09 + 0.222 \cdot 8^\circ - 7.3964) \tan 8^\circ / \cos 8^\circ + 2 + 4.09^2} = 0.62$$

$$E_1 = \frac{h}{0.62} = \frac{1.71 \text{ m}}{0.62} = 2.75 \text{ m}$$



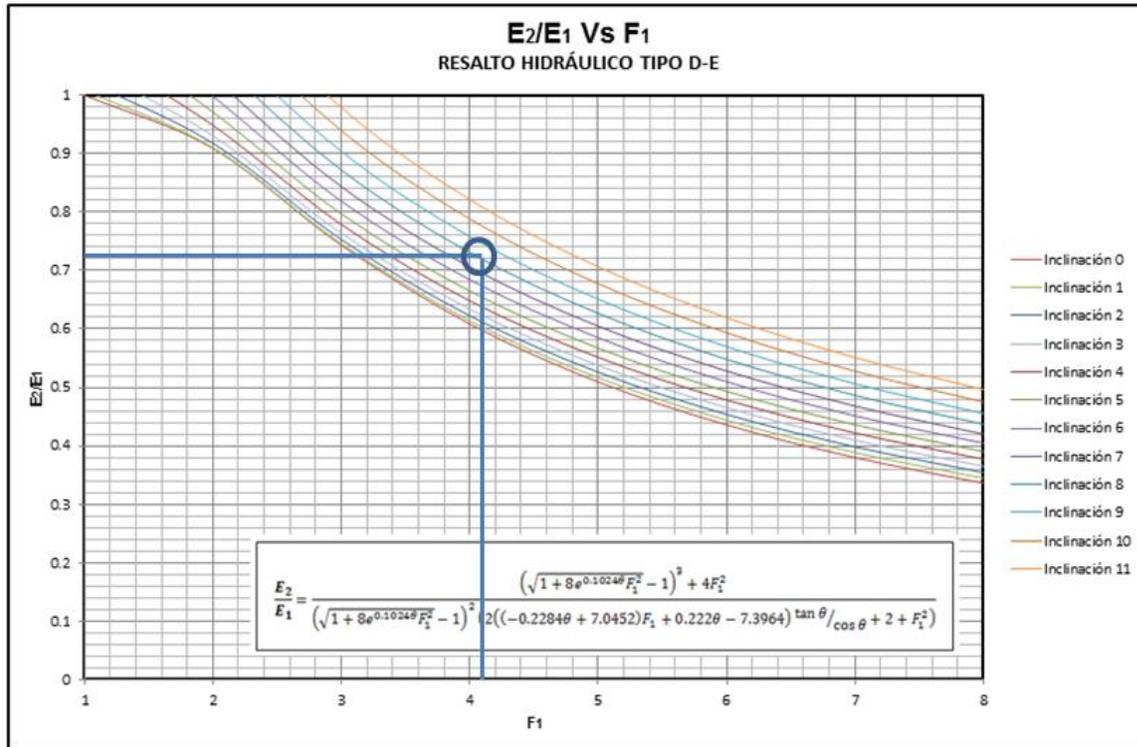
Grafica 4-99. Solución grafica para h/E_1 resalto tipo D-E

- Eficiencia del resalto E_2/E_1 (Ecuación 4-27 o grafica 4-100):

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1)^3 + 4F_1^2}{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024\theta} F_1^2} - 1)^2 (2((-0.2284\theta + 7.0452)F_1 + 0.222\theta - 7.3964) \tan \theta / \cos \theta + 2 + F_1^2)}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024+8 \cdot 4.09^2} - 1})^3 + 4.09^2}{(\sqrt{1 + 8e^{0.1024+8 \cdot 4.09^2} - 1})^2 \left(2((-0.2284(8^\circ) + 7.0452)4.09 + 0.222(8^\circ) - 7.3964) \tan(8^\circ) / \cos(8^\circ) + 2 + 4.09^2 \right)}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = 0.73$$



Grafica 4-100. Solución grafica para E₂/E₁ resalto tipo D-E

Lo que representa que el resalto disipa tan solo el 27% de la energía inicial.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los análisis realizados en el presente trabajo han permitido establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos sobre el comportamiento de los resaltos hidráulicos en canales con pendiente y sección rectangular:

5.1 CONCLUSIONES

- El resalto tipo A se comporta como un resalto en un canal con pendiente horizontal, por cuanto, todas las expresiones matemáticas existentes en la literatura para describir el comportamiento de los resaltos hidráulicos en canales rectangulares con pendiente cero, le son aplicables.
- La relación entre la longitud de remolino turbulento y la profundidad inicial del flujo (L/d_1) varía en forma directamente proporcional al número de Froude y en forma inversamente proporcional al grado de inclinación del canal ($L/d_1 \propto F_1 \alpha^{-1} \Theta$). Para las mismas condiciones aguas arriba (igual número de Froude) y la misma inclinación del canal se tiene que: $L/d_1-A > L/d_1-B > L/d_1-C > L/d_1-D-E$. Como se muestran en las tablas 4-1 a 4-4, la forma matemática de la relación (L/d_1) es lineal-creciente monótona.
- La relación entre profundidades conjugadas (d_2/d_1) varía en forma directamente proporcional con el número de Froude y con la inclinación del canal ($d_2/d_1 \propto F_1 \alpha \Theta$). Para las mismas condiciones aguas arriba (igual número de Froude) y la misma inclinación del canal se tiene que: $d_2/d_1-C > d_2/d_1-D-E > d_2/d_1-B > d_2/d_1-A$. Como se muestran en las tablas 4-1 a 4-4, la forma matemática de la relación (L/d_1) es lineal-creciente monótona.
- La función (Γ) varía en proporción directa con el ángulo de inclinación del canal y es invariante ante el número de Froude. Para una misma inclinación del canal se tiene que: $\Gamma-C > \Gamma-D-E > \Gamma-B > \Gamma-A$. La forma matemática de la función (Γ) es de tipo exponencial (ver tablas 4-1 a 4-4).
- La relación entre la profundidad de flujo aguas abajo y la profundidad de flujo inicial del resalto (d_2/d_1) para el resalto tipo D-E varía en forma directamente

proporcional con el número de Froude y con la inclinación del canal ($d_2/d_1 \propto F_1 \propto \Theta$).

La función (Γ) para este tipo de relación se comporta de manera lineal con respecto a la inclinación del canal y es invariante con relación al número de Froude.

- El coeficiente de corrección (k) varía en proporción directa con la inclinación del canal y en proporción inversa con el número de Froude ($k \propto \Theta \propto^{-1} F_1$). Para una misma inclinación del canal se tiene que: $k-C > k-D-E > k-B > k-A$. La forma matemática del coeficiente (k) es de tipo exponencial.
- La relación entre la altura y la profundidad de flujo inicial del resalto (h/y_1) varía en forma directamente proporcional con el número de Froude y la inclinación del canal ($h/y_1 \propto F_1 \propto \Theta$). Para las mismas condiciones aguas arriba (igual número de Froude) y la misma inclinación del canal se tiene que: $h/y_1-C > h/y_1-D-E > h/y_1-B > h/y_1-A$; con lo que el resalto que mayor altura final produce es el tipo C y el que menor es el tipo A. La forma matemática de la relación (h/y_1) es lineal-creciente monótona (ver tablas 4-1 a 4-4).
- La relación entre la energía de flujo final y la energía de flujo inicial del resalto (E_2/E_1) varía en forma directamente proporcional con la inclinación del canal y en forma inversamente proporcional con el número de Froude ($E_2/E_1 \propto \Theta \propto^{-1} F_1$). Para las mismas condiciones aguas arriba (igual número de Froude) y la misma inclinación del canal se tiene que: $E_2/E_1-C > E_2/E_1-D-E > E_2/E_1-B > E_2/E_1-A$; con lo que el resalto que produce mayor disipación de energía es el tipo A y el que menor disipa es el tipo C.
Para obtener un porcentaje de disipación de energía determinado se necesita un mayor número de Froude entre mayor inclinación tenga el canal.
La forma matemática de la relación (E_2/E_1) es no lineal-decreciente (ver tablas 4-1 a 4-4).
- La relación entre la altura y la energía del flujo inicial del resalto (h/E_1) varía en proporción directa con la inclinación del canal y con el número de Froude para $F_1 < 2.77$ y en forma inversa con el número de Froude para $F_1 > 2.77$ ($h/E_1 \propto \Theta \propto F_1$, para $F_1 < 2.77$, $h/E_1 \propto \Theta \propto^{-1} F_1$, para $F_1 > 2.77$). Para las mismas condiciones aguas arriba (igual número de Froude) y para la misma inclinación del canal, se tiene que: $h/E_1-C > h/E_1-D-E > h/E_1-B > h/E_1-A$.
La máxima altura que puede alcanzar un resalto horizontal corresponde al 50% de la energía total, esta altura máxima aumenta con el aumento de la inclinación del canal.
La forma matemática de la relación (h/E_1) es no lineal-no monótona (ver tablas 4-1, 4-2, 4-3 y 4-4).
- La relación entre la profundidad de flujo inicial y la energía de flujo inicial del resalto (y_1/E_1) varía en forma inversamente proporcional con el número de Froude y la inclinación del canal ($y_1/E_1 \propto^{-1} \Theta \propto^{-1} F_1$, para $F_1 > 1.5$). Para las mismas condiciones aguas arriba (igual número de Froude) y la misma inclinación del canal se tiene la siguiente tendencia para los tipos de resalto: $y_1/E_1-A > y_1/E_1-D-E > y_1/E_1-C > y_1/E_1-B$ para números de Froude mayores a 1.5.

La máxima profundidad inicial de flujo para un resalto horizontal corresponde a aproximadamente el 67% de la energía inicial, esta altura máxima aumenta con el aumento de la inclinación del canal y se da en números de Froude cercanos a la unidad, condición de flujo en la cual el resalto es ondulante y muy débil

La forma matemática de la relación (y_1/E_1) es no lineal-decreciente monótona (ver tablas 4-1,4-2,4-3 y 4-4).

- La relación entre la profundidad de flujo final y la energía de flujo inicial del resalto (y_2/E_1) varía directamente proporcional con la inclinación del canal y en forma inversamente proporcional con el número de Froude, para $F_1 > 1.75$ ($y_2/E_1 \propto \Theta \alpha^{-1} F_1$, para $F_1 > 1.75$). Para las mismas condiciones aguas arriba (igual número de Froude) y la misma inclinación del canal se tiene la siguiente tendencia para los tipos de resalto: $y_2/E_1-C > y_2/E_1-D-E > y_2/E_1-B > y_2/E_1-A$.
La máxima profundidad final que puede alcanzar un resalto horizontal es de aproximadamente el 80% de la energía inicial total, esta profundidad final máxima aumenta con el aumento de la inclinación del canal, desapareciendo para ángulos mayores a 6° .
- La relación entre la pérdida de energía y la energía inicial del resalto ($\Delta E/E_1$) varía en proporción directa con el número de Froude y en proporción inversa con la inclinación del canal ($\Delta E/E_1 \propto F_1 \alpha^{-1} \Theta$). Para las mismas condiciones aguas arriba (igual número de Froude) y la misma inclinación del canal se tiene la siguiente tendencia para los tipos de resalto: $\Delta E/E_1-A > \Delta E/E_1-B > \Delta E/E_1-D-E > \Delta E/E_1-C$; con lo que se confirma que el resalto tipo A es el que ofrece mayor disipación de energía.
- De acuerdo con las deducciones matemáticas y lo observado experimentalmente, a mayor grado de inclinación del canal, el umbral de número de Froude inicial para que se produzca cualquiera de estos tipos de resalto hidráulico aumenta. Así, un resalto hidráulico tipo B, C o D-E no se podría formar para ángulos de inclinación mayores a 6° con números de Froude menores a 2. Lo anterior debido a que se viola el principio de conservación de energía para este fenómeno, arrojando resultados no de pérdida si no de ganancia de energía en el resalto; lo que es ilógico desde el punto de vista físico.
- En general las expresiones halladas teóricamente y ajustadas experimentalmente a través de la función gamma (Γ), arrojan buenos resultados con respecto a los ensayos efectuados en laboratorio, los cuales fueron validados con datos presentados en la literatura por diversos autores (Kindsvater, Bradley & Peterka, Wielogorsky & Wilson, Yasuda & Ohtsu, y Gunal & Nayaratan).
- En la literatura no se encontró un análisis teórico específico, ni relaciones matemáticas para los parámetros que describen los resaltos hidráulicos tipo B, C y D-E, con lo cual se cree que el presente trabajo constituye un avance en cuanto a la certidumbre en los diseños de estructuras hidráulicas, en que se prevea la ocurrencia de este fenómeno.

5.2 RECOMENDACIONES

- Incluir las pérdidas por fricción en el estudio del comportamiento del resalto hidráulico; con el fin de validar las expresiones matemáticas deducidas y ajustadas en el presente trabajo.
- Estudiar el fenómeno de inclusión del aire en cada tipo de resalto.
- Realizar mediciones del perfil real y de la aireación para cada tipo de resalto, con el fin de evaluar la incidencia de estas variables en el factor k .
- Estudiar el resalto tipo F con pendiente adversa, dado que no fue incluido dentro del alcance del presente trabajo.
- Ampliar esta investigación considerando diversas formas de sección transversal del canal: Triangular, trapecial, circular, etc.
- Realizar estudios complementarios que permitan discriminar los comportamientos de los resaltos tipo D y E, lo que implica utilizar un canal de experimentación de mayor longitud.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Sotelo Ávila Gilberto, Hidráulica General, Universidad Autónoma de México (UNAM),2000.

[2] Sotelo Ávila Gilberto, Hidráulica de Canales, Universidad Autónoma de México (UNAM),2002.

[3] French Richard H, Hidráulica de Canales Abiertos, McGraw-Hill, 1988.

[4] Chow Ven Te, Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill, 1959.

[5] Duarte Carlos & Niño José, Introducción a la Mecánica de Fluidos, Universidad Nacional de Colombia, 2002.

[6] Duarte Carlos, Introducción a la Hidráulica de Canales, Universidad Nacional de Colombia, 2005.

[7] Rodríguez Pedro, Hidráulica II, Instituto Tecnológico de Oaxaca, 2008

[8] Bolívar Ronald & Parra Fredy, Rediseño, Construcción y Montaje de un canal de Pendiente Variable en el Laboratorio de Hidráulica, Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero mecánico, unalbog,2004.

[9] Díaz Manuel & Velasco Andrés, Comportamiento del Resalto Hidráulico en el Canal Rectangular de Pendiente Variable en el Laboratorio de Hidráulica, Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil, unalbog,2005.

[10] Delgado Juan & Sotelo Gilberto, Salto hidráulico en Canales Trapeciales de Gran Pendiente, XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

[11] United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Research Study on Stilling Basins, Energy Dissipators and Associated Appurtenances,1955.

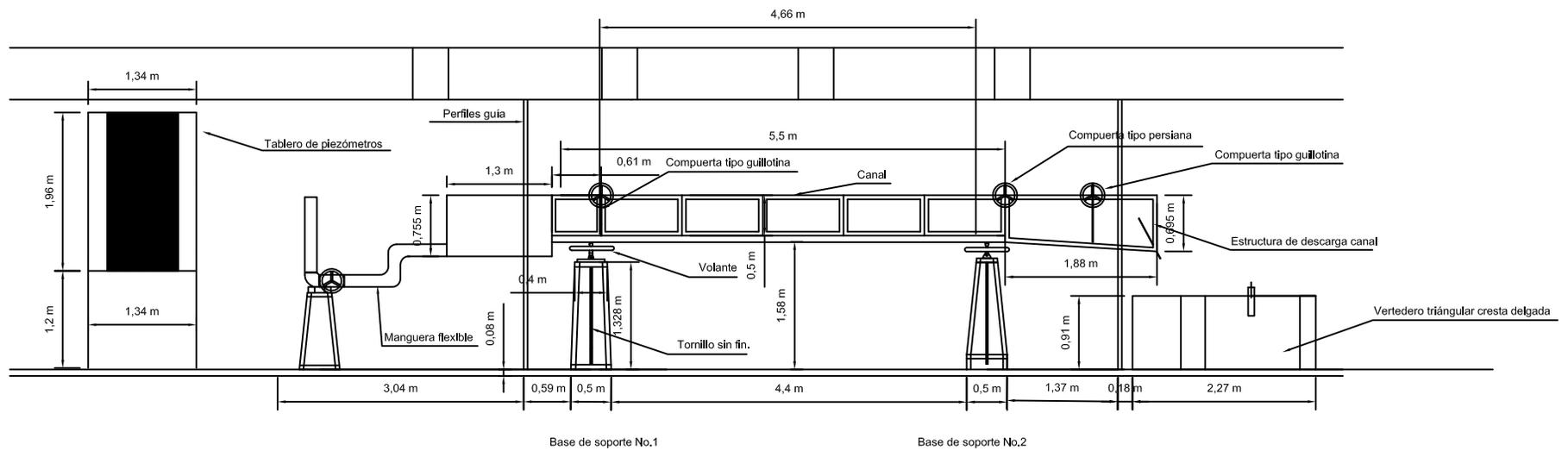
[12] Ohtsu & Yasuda, Hydraulic Jump in Sloping Channels, Journal of Hydraulic Engineering ASCE, Vol 117-July 1991,pp 905-921.

[13] Gunal & Narayanan, Hydraulic Jump in Sloping Channels, Journal of Hydraulic Engineering ASCE, Vol 122-August 1996,pp 436-442.

A. ANEXO:

INSTALACIONES DE LABORATORIO

INSTALACIÓN GENERAL CANAL



PROPIETARIO: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA MAESTRIA EN INGENIERIA RECURSOS HIDRAULICOS	PROYECTO: RESALTO HIDRAULICO EN CANALES DE ALTA PENDIENTE CON SECCION RECTANGULAR	ESPECIFICACIONES:	DISEÑO: VICTOR MANRIQUE ANDRADE MP:2520215328-LCND	REVISO: VICTOR MANRIQUE ANDRADE	REVISIONES: 1.- 2.- 3.- 4.- 5.- 6.-	CONTENIDO: INSTALACION GENERAL	ESCALA: Sin Asignar	FECHA: 25/ABRIL/2010	
							ARCHIVO: PPCA-DESPIECE_GENERAL.Dwg	PLANO NUMERO: 01	REVISION: A1

B. ANEXO:

COSTOS DE LA INVESTIGACIÓN



**PROYECTO COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN
CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR**

COSTOS DE LA INVESTIGACIÓN



COD PPTO			DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
CAP	SCAP	ACT					
1	0	0	INSUMOS				\$ 5,989,500.00
1	1	0	Estructura Metálica				\$ 4,145,000.00
1	1	1	Estructura metálica	KG	600	\$ 5,500.00	\$ 3,300,000.00
1	1	2	Volante	UN	2	\$ 150,000.00	\$ 300,000.00
1	1	3	Tornillos Sin Fin	UN	2	\$ 150,000.00	\$ 300,000.00
1	1	4	Caja Soldadura 6013 West-Arco	KG	15	\$ 8,000.00	\$ 120,000.00
1	1	5	Tornillos y Tuercas	GLB	1	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00
1	1	6	Disco de Pulidora	UN	5	\$ 15,000.00	\$ 75,000.00
1	2	0	Estructura en Acrílico				\$ 210,000.00
1	2	1	Acrílico	M2	2	\$ 60,000.00	\$ 120,000.00
1	2	2	Silicona (Sikaflex 1A)	UN	3	\$ 30,000.00	\$ 90,000.00
1	3	0	Instalaciones para Conducción de Agua				\$ 200,000.00
1	3	1	Manguera en Lona Flexible	ML	4	\$ 50,000.00	\$ 200,000.00
1	4	0	Pintura				\$ 284,500.00
1	4	1	Anticorrosivo Pintulux Plata	GLB	0.5	\$ 56,000.00	\$ 28,000.00
1	4	2	Pintulux Amarillo	GLB	0.5	\$ 80,000.00	\$ 40,000.00
1	4	3	Pintulux Verde	GLB	0.5	\$ 80,000.00	\$ 40,000.00
1	4	4	Pintulux Blanco	GLB	0.5	\$ 80,000.00	\$ 40,000.00
1	4	5	Tinner	GLB	1	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00
1	4	6	Brocha	Un	2	\$ 6,000.00	\$ 12,000.00
1	4	7	Cinta de Enmascarar	GLB	1	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00
1	4	8	Estopa	LB	3	\$ 4,000.00	\$ 12,000.00
1	4	9	Rubí Blanco	GLB	0.5	\$ 40,000.00	\$ 20,000.00
1	4	10	Lija de Agua Fina # 500	UN	5	\$ 1,500.00	\$ 7,500.00
1	4	11	Lija de Agua Fina # 300	UN	5	\$ 1,500.00	\$ 7,500.00
1	4	12	Lija de Agua Fina # 100	UN	5	\$ 1,500.00	\$ 7,500.00
1	5	0	Papelería				\$ 150,000.00
1	5	1	Papelería	GLB	1	\$ 150,000.00	\$ 150,000.00
1	6	0	Edición de Tesis				\$ 1,000,000.00
1	6	1	Edición Tesis (Equipos de computo, cámara fotografica,ect)	GLB	1	\$ 1,000,000.00	\$ 1,000,000.00
2	0	0	HERRAMIENTAS				\$ 200,000.00



**PROYECTO COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN
CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR**

COSTOS DE LA INVESTIGACIÓN



COD PPTO			DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
CAP	SCAP	ACT					
2	1	0	Herramientas Menores				\$ 200,000.00
2	1	1	Alquiler Pulidora	GLB	1	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
2	1	2	Alquiler Pistola Silicona	GLB	1	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
3	0	0	MANO DE OBRA				\$ 18,400,000.00
3	1	0	Montaje Estructura				\$ 400,000.00
3	1	1	Montaje Estructura	GLB	1	\$ 400,000.00	\$ 400,000.00
3	2	0	Ejecución de Investigación				\$ 18,000,000.00
3	2	1	Estudiante (Dedicación medio tiempo)	MES	12	\$ 1,500,000.00	\$ 18,000,000.00
4	0	0	DIRECCIÓN Y/O TUTORÍAS				\$ 6,480,000.00
4	1	0	Dirección y/o Tutorías				\$ 6,480,000.00
4	1	1	Director de Tesis (Dedicación 4 horas/semana)	MES	12	\$ 540,000.00	\$ 6,480,000.00
5	0	0	IMPREVISTOS				\$ 1,553,475.00
5	1	0	Imprevistos				\$ 1,553,475.00
5	1	1	Imprevistos (5%)				\$ 1,553,475.00
T			TOTAL				\$ 32,622,975.00

C. ANEXO:

DATOS EXPERIMENTALES VERTEDERO TRIANGULAR DE CRESTA DELGADA



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES VERTEDERO TRIANGULAR DE CRESTA DELGADA
CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	TANQUE							VERTEDERO		Carga [h] (cm)	Observaciones	
	Posición Inicial Cinta [pic] (cm)	Posición Final Cinta [pfc] (cm)	Δ Cinta [Δc] (cm)	Volumen [V] (lts)	Tiempo Inicial [ti] (seg)	Tiempo Final [tf] (seg)	Δ Tiempo [Δt] (seg)	Caudal [Q] (L/s)	Altura Cresta [ac] (cm)			Altura Lamina de Agua Sobre Cresta [alsc] (cm)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	45	47	2	400	0	15.24	15.24	26.25	38.1	54.8	16.7	
2	52	55	3	600	0	24.91	24.91	24.09	38.1	54.4	16.3	
3	63	65	2	400	0	19.63	19.63	20.38	38.1	52.7	14.6	
4	71	73	2	400	0	26.53	26.53	15.08	38.1	51.1	13	
5	76	78	2	400	0	33.31	33.31	12.01	38.1	49.9	11.8	
6	79	81	2	400	0	42.07	42.07	9.51	38.1	48.6	10.5	
7	82	84	2	400	0	64.9	64.9	6.16	38.1	47.05	8.95	
8	85	86	1	200	0	96.8	96.8	2.07	38.1	43.4	5.3	
9	87	89	2	400	0	16.75	16.75	23.88	38.1	53.5	15.4	
10	102	104	2	400	0	18.01	18.01	22.21	38.1	53	14.9	
11	109	111	2	400	0	21.11	21.11	18.95	38.1	52.5	14.4	
12	113	115	2	400	0	24.7	24.7	16.19	38.1	52	13.9	
13	117	119	2	400	0	28.8	28.8	13.89	38.1	50.9	12.8	
14	120	122	2	400	0	37.48	37.48	10.67	38.1	49.3	11.2	
15	124	125	1	200	0	39.21	39.21	5.10	38.1	46.2	8.1	
16	125	127	2	400	0	19.71	19.71	20.29	38.1	52.9	14.8	
17	129	131	2	400	0	22.45	22.45	17.82	38.1	52.35	14.25	

Columna No.1: Número consecutivo del experimento.

Columna No.2: Lectura inicial de la cinta métrica, la cual marca el nivel inicial del agua en el tanque de almacenamiento.

Columna No.3: Lectura final de la cinta métrica, que marca el nivel final del tanque de almacenamiento en un tiempo determinado.

Columna No.4: Variación del nivel del tanque en un tiempo determinado. $\Delta c = pfc - pic$

Columna No.5: Volumen de almacenamiento en el tanque para un tiempo determinado. $V = \Delta c * 0.2 * 1000$

Columna No.6: Tiempo inicial de la medición del volumen de agua (tiempo en el que se toma la lectura inicial del nivel del tanque).

Columna No.7: Tiempo final de la medición del volumen de agua (tiempo en el que se tomala lectura final del nivel del tanque).

Columna No.8: Intervalo de tiempo de análisis del caudal. $\Delta t = tf - ti$

Columna No.9: Caudal en el intervalo de tiempo de analisis. $Q = \frac{V}{\Delta t}$

Columna No.10: Altura de la cresta del vertedero, respecto a un punto de referencia detrmnado.

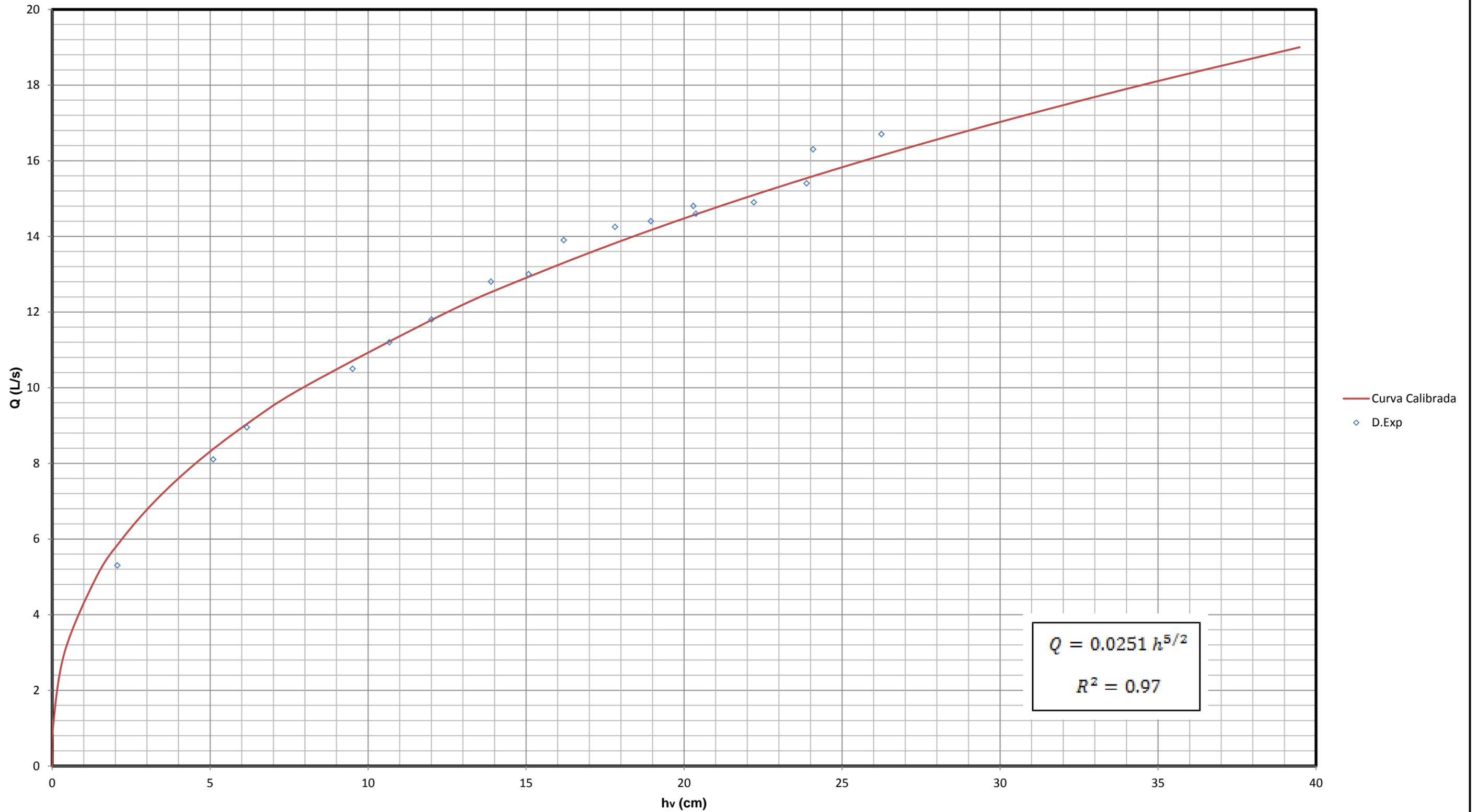
Columna No.11: Altura de la lamina de agua sobre la cresta, respecto a un punto de referencia determinado.

Columna No.12: Carga sobre la cresta del vertedero. $h = alsc - ac$

D. ANEXO:

**CURVA DE CALIBRACIÓN CAUDAL Vs
ALTURA DE LAMINA DE AGUA SOBRE
CRESTA VERTEDERO TRIANGULAR**

Q Vs h_v VERTEDERO TRIÁNGULAR



E. ANEXO:

**DATOS EXPERIMENTALES RESALTOS
HIDRÁULICOS EN CANALES CON
PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR**



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES RESALTO HIDRÁULICO TIPO A-AJUSTE
CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO												Observaciones
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alsc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)	Longitud [L] (cm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	37.70	48.90	11.20	10.41	A	1	20.10	23.90	3.80	9.20	9.20	5.40	5.40	562.00	588.20	26.20	
2	37.70	59.60	21.90	55.64	A	1	20.10	26.50	6.40	40.20	40.20	33.80	33.80	562.00	728.60	166.60	
3	37.70	51.90	14.20	18.84	A	1	20.10	22.40	2.30	23.90	23.90	21.60	21.60	562.00	669.60	107.60	
4	37.70	51.80	14.10	18.51	A	1	20.10	22.90	2.80	21.30	21.30	18.50	18.50	562.00	667.60	105.60	
5	37.70	51.80	14.10	18.51	A	1	20.10	23.50	3.40	18.70	18.70	15.30	15.30	562.00	634.90	72.90	
6	37.70	51.20	13.50	16.60	A	1	20.10	23.80	3.70	15.60	15.60	11.90	11.90	562.00	626.90	64.90	
7	37.70	52.60	14.90	21.24	A	1	20.10	26.60	6.50	13.70	13.70	7.20	7.20	562.00	601.90	39.90	
8	37.70	52.70	15.00	21.60	A	1	20.10	22.90	2.80	26.40	26.40	23.60	23.60	562.00	675.10	113.10	
9	37.70	52.80	15.10	21.96	A	1	20.10	25.60	5.50	17.20	17.20	11.70	11.70	562.00	615.30	53.30	
10	37.70	51.90	14.20	18.84	A	1	20.10	28.40	8.30	9.90	9.90	1.60	1.60	562.00	570.90	8.90	
11	37.70	50.70	13.00	15.11	A	1	20.10	22.40	2.30	18.80	18.80	16.50	16.50	562.00	659.00	97.00	
12	37.70	48.90	11.20	10.41	A	1	20.10	22.10	2.00	14.00	14.00	12.00	12.00	562.00	617.10	55.10	
13	37.70	46.70	9.00	6.02	A	1	20.10	22.40	2.30	7.30	7.30	5.00	5.00	562.00	583.60	21.60	
14	37.70	50.85	13.15	15.55	A	1	20.10	25.80	5.70	11.10	11.10	5.40	5.40	562.00	584.90	22.90	
15	37.70	52.00	14.30	19.17	A	1	20.10	23.50	3.40	19.90	19.90	16.50	16.50	562.00	637.00	75.00	
16	37.70	53.20	15.50	23.45	A	1	20.10	23.00	2.90	28.00	28.00	25.10	25.10	562.00	693.50	131.50	
17	37.70	54.10	16.40	27.00	A	1	20.10	23.10	3.00	29.10	29.10	26.10	26.10	562.00	705.20	143.20	
18	37.70	53.90	16.20	26.19	A	1	20.10	23.10	3.00	29.40	29.40	26.40	26.40	562.00	701.00	139.00	
19	37.70	54.90	17.20	30.42	A	1	20.10	25.60	5.50	23.40	23.40	17.90	17.90	562.00	639.60	77.60	
20	37.70	54.70	17.00	29.54	A	1	20.10	23.60	3.50	31.60	31.60	28.10	28.10	562.00	679.30	117.30	
21	37.00	48.90	11.90	12.11	A	3	20.10	23.30	3.20	12.10	12.10	8.90	8.90	562.00	621.10	59.10	
22	37.00	48.70	11.70	11.61	A	3	20.10	24.30	4.20	9.80	9.80	5.60	5.60	562.00	619.90	57.90	
23	37.00	48.80	11.80	11.86	A	3	20.10	25.70	5.60	8.40	8.40	2.80	2.80	562.00	625.10	63.10	
24	36.65	46.30	9.65	7.17	A	3	20.10	21.40	1.30	11.90	11.90	10.60	10.60	562.00	605.60	43.60	
25	36.65	46.30	9.65	7.17	A	3	20.10	22.00	1.90	9.50	9.50	7.60	7.60	562.00	608.20	46.20	
26	37.00	46.20	9.20	6.36	A	3	20.10	22.10	2.00	8.00	8.00	6.00	6.00	562.00	592.30	30.30	
27	37.00	44.80	7.80	4.21	A	3	20.10	21.00	0.90	8.20	8.20	7.30	7.30	562.00	591.50	29.50	
28	37.00	50.00	13.00	15.11	A	3	20.10	22.40	2.30	20.60	20.60	18.30	18.30	562.00	630.80	68.80	
29	36.60	50.80	14.20	18.84	A	3	20.10	22.80	2.70	22.30	22.30	19.60	19.60	562.00	646.20	84.20	
30	36.60	50.90	14.30	19.17	A	3	20.10	23.00	2.90	20.20	20.20	17.30	17.30	562.00	621.70	59.70	
31	36.90	48.40	11.50	11.12	A	3	20.10	21.90	1.80	16.90	16.90	15.10	15.10	562.00	611.20	49.20	
32	36.90	45.40	8.50	5.22	A	3	20.10	21.20	1.10	9.80	9.80	8.70	8.70	562.00	602.40	40.40	
33	36.90	47.40	10.50	8.86	A	3	20.10	21.80	1.70	13.70	13.70	12.00	12.00	562.00	608.70	46.70	
34	36.90	50.00	13.10	15.40	A	3	20.10	24.60	4.50	13.00	13.00	8.50	8.50	562.00	630.70	68.70	
35	36.90	51.00	14.10	18.51	A	3	20.10	29.00	8.90	8.60	8.60	0.30	0.30	562.00	628.70	66.70	
36	36.90	49.10	12.20	12.89	A	3	20.10	22.50	2.40	17.10	17.10	14.70	14.70	562.00	613.70	51.70	
37	36.90	49.60	12.70	14.25	A	3	20.10	24.00	3.90	13.00	13.00	9.10	9.10	562.00	627.80	65.80	
38	36.90	48.31	11.41	10.90	A	3	20.10	22.30	2.20	14.70	14.70	12.50	12.50	562.00	592.80	30.80	
39	36.90	47.60	10.70	9.28	A	3	20.10	22.10	2.00	11.90	11.90	9.90	9.90	562.00	594.20	32.20	
40	36.90	46.70	9.80	7.45	A	3	20.10	21.70	1.60	11.70	11.70	10.10	10.10	562.00	585.20	23.20	
41	36.90	45.00	8.10	4.63	A	6	20.10	21.10	1.00	9.60	9.60	8.60	8.60	562.00	597.60	35.60	
42	36.90	45.00	8.10	4.63	A	6	20.10	21.20	1.10	8.40	8.40	7.30	7.30	562.00	596.00	34.00	
43	36.90	45.00	8.10	4.63	A	6	20.10	23.30	3.20	4.20	4.20	1.00	1.00	562.00	595.50	33.50	
44	36.90	44.70	7.80	4.21	A	6	20.10	22.00	1.90	5.60	5.60	3.70	3.70	562.00	591.50	29.50	
45	36.90	45.90	9.00	6.02	A	6	20.10	21.40	1.30	11.00	11.00	9.70	9.70	562.00	598.10	36.10	
46	36.90	46.60	9.70	7.26	A	6	20.10	21.40	1.30	13.20	13.20	11.90	11.90	562.00	611.20	49.20	
47	36.20	44.40	8.20	4.77	A	6	20.10	21.40	1.30	8.40	8.40	7.10	7.10	562.00	594.10	32.10	
48	36.20	44.30	8.10	4.63	A	6	20.10	21.80	1.70	6.60	6.60	4.90	4.90	562.00	607.00	45.00	
49	36.20	46.00	9.80	7.45	A	6	20.10	23.60	3.50	6.70	6.70	3.20	3.20	562.00	614.50	52.50	
50	36.20	48.90	12.70	14.25	A	6	20.10	26.80	6.70	8.40	8.40	1.70	1.70	562.00	620.60	58.60	
51	36.20	46.60	10.40	8.65	A	6	20.10	22.30	2.20	10.70	10.70	8.50	8.50	562.00	620.30	58.30	
52	36.20	46.90	10.70	9.28	A	6	20.10	24.90	4.80	6.20	6.20	1.40	1.40	562.00	627.30	65.30	
53	36.20	50.60	14.40	19.51	A	6	20.10	25.40	5.30	14.80	14.80	9.50	9.50	562.00	634.80	72.80	
54	36.20	51.10	14.90	21.24	A	6	20.10	27.80	7.70	13.30	13.30	5.60	5.60	562.00	668.30	106.30	
55	36.20	51.00	14.80	20.89	A	6	20.10	24.20	4.10	19.40	19.40	15.30	15.30	562.00	663.00	101.00	
56	36.20	44.10	7.90	4.35	A	6	20.10	21.30	1.20	7.20	7.20	6.00	6.00	562.00	593.60	31.60	
57	36.20	50.10	13.90	17.86	A	6	20.10	24.70	4.60	13.90	13.90	9.30	9.30	562.00	638.20	76.20	
58	36.20	45.30	9.10	6.19	A	6	20.10	21.90	1.80	8.30	8.30	6.50	6.50	562.00	608.90	46.90	



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES RESALTO HIDRÁULICO TIPO A-AJUSTE
CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO											Observaciones	
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alsc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)		Longitud [L] (cm)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
59	36.20	46.50	10.30	8.44	A	6	20.10	21.50	1.40	13.30	13.30	11.90	11.90	562.00	615.60	53.60	
60	36.20	45.80	9.60	7.08	A	6	20.10	22.80	2.70	7.60	7.60	4.90	4.90	562.00	613.30	51.30	
61	36.20	46.70	10.50	8.86	A	9	20.10	22.40	2.30	10.90	10.90	8.60	8.60	562.00	631.00	69.00	
62	36.20	47.00	10.80	9.50	A	9	20.10	22.00	1.90	14.00	14.00	12.10	12.10	562.00	629.80	67.80	
63	36.20	44.20	8.00	4.49	A	9	20.10	21.70	1.60	6.80	6.80	5.20	5.20	562.00	609.40	47.40	
64	36.20	48.80	12.60	13.97	A	9	20.10	23.30	3.20	13.90	13.90	10.70	10.70	562.00	658.90	96.90	
65	36.20	50.00	13.80	17.54	A	9	20.10	22.40	2.30	24.00	24.00	21.70	21.70	562.00	647.00	85.00	
66	36.20	50.40	14.20	18.84	A	9	20.10	22.90	2.80	23.00	23.00	20.20	20.20	562.00	658.60	96.60	
67	36.20	47.00	10.80	9.50	A	9	20.10	21.90	1.80	13.10	13.10	11.30	11.30	562.00	629.70	67.70	
68	36.20	45.50	9.30	6.54	A	9	20.10	21.80	1.70	10.20	10.20	8.50	8.50	562.00	607.60	45.60	
69	36.20	46.30	10.10	8.04	A	9	20.10	22.20	2.10	10.40	10.40	8.30	8.30	562.00	619.30	57.30	
70	36.20	44.80	8.60	5.38	A	9	20.10	21.70	1.60	8.50	8.50	6.90	6.90	562.00	609.70	47.70	
71	36.20	50.20	14.00	18.18	A	9	20.10	25.00	4.90	14.30	14.30	9.40	9.40	562.00	649.60	87.60	
72	36.20	48.30	12.10	12.63	A	9	20.10	23.00	2.90	14.10	14.10	11.20	11.20	562.00	648.50	86.50	
73	36.20	48.70	12.50	13.69	A	9	20.10	22.40	2.30	16.50	16.50	14.20	14.20	562.00	650.80	88.80	
74	36.20	50.80	14.60	20.19	A	9	20.10	22.90	2.80	23.10	23.10	20.30	20.30	562.00	671.60	109.60	
75	36.20	44.50	8.30	4.92	A	9	20.10	21.40	1.30	8.80	8.80	7.50	7.50	562.00	599.40	37.40	
76	36.20	46.60	10.40	8.65	A	9	20.10	23.60	3.50	8.60	8.60	5.10	5.10	562.00	626.20	64.20	
77	36.20	46.30	10.10	8.04	A	9	20.10	21.80	1.70	12.90	12.90	11.20	11.20	562.00	626.00	64.00	
78	36.20	50.40	14.20	18.84	A	9	20.10	26.00	5.90	12.70	12.70	6.80	6.80	562.00	670.70	108.70	
79	36.20	47.70	11.50	11.12	A	9	20.10	26.30	6.20	6.90	6.90	0.70	0.70	562.00	636.70	74.70	
80	36.20	48.30	12.10	12.63	A	9	20.10	22.10	2.00	18.30	18.30	16.30	16.30	562.00	649.60	87.60	
81	36.20	50.20	14.00	18.18	A	11	20.10	23.60	3.50	18.80	18.80	15.30	15.30	562.00	668.60	106.60	
82	36.20	45.10	8.90	5.86	A	11	20.10	23.50	3.40	5.20	5.20	1.80	1.80	562.00	618.70	56.70	
83	36.20	45.50	9.30	6.54	A	11	20.10	21.90	1.80	9.80	9.80	8.00	8.00	562.00	615.70	53.70	
84	36.20	45.50	9.30	6.54	A	11	20.10	21.50	1.40	11.10	11.10	9.70	9.70	562.00	617.20	55.20	
85	36.20	46.40	10.20	8.24	A	11	20.10	22.20	2.10	10.70	10.70	8.60	8.60	562.00	620.60	58.60	
86	36.20	44.80	8.60	5.38	A	11	20.10	22.20	2.10	6.50	6.50	4.40	4.40	562.00	606.40	44.40	
87	36.20	45.10	8.90	5.86	A	11	20.10	21.30	1.20	11.10	11.10	9.90	9.90	562.00	618.40	56.40	
88	36.20	45.60	9.40	6.72	A	11	20.10	21.90	1.80	9.50	9.50	7.70	7.70	562.00	609.80	47.80	
89	36.20	50.20	14.00	18.18	A	11	20.10	23.20	3.10	18.70	18.70	15.60	15.60	562.00	682.80	120.80	
90	36.20	45.20	9.00	6.02	A	11	20.10	21.30	1.20	11.30	11.30	10.10	10.10	562.00	604.20	42.20	
91	36.20	47.40	11.20	10.41	A	11	20.10	22.80	2.70	11.20	11.20	8.50	8.50	562.00	642.90	80.90	
92	36.20	44.80	8.60	5.38	A	11	20.10	21.10	1.00	10.10	10.10	9.10	9.10	562.00	614.60	52.60	
93	36.20	49.40	13.20	15.69	A	11	20.10	25.90	5.80	10.30	10.30	4.50	4.50	562.00	644.70	82.70	
94	36.20	48.60	12.40	13.42	A	11	20.10	25.60	5.50	9.30	9.30	3.80	3.80	562.00	663.50	101.50	
95	36.20	49.70	13.50	16.60	A	11	20.10	24.00	3.90	16.40	16.40	12.50	12.50	562.00	654.60	92.60	
96	36.20	49.10	12.90	14.82	A	11	20.10	22.70	2.60	17.80	17.80	15.20	15.20	562.00	645.60	83.60	
97	36.20	47.40	11.20	10.41	A	11	20.10	21.70	1.60	17.00	17.00	15.40	15.40	562.00	640.00	78.00	
98	36.20	47.60	11.40	10.88	A	11	20.10	22.10	2.00	16.10	16.10	14.10	14.10	562.00	645.00	83.00	
99	36.20	45.70	9.50	6.90	A	11	20.10	21.40	1.30	12.10	12.10	10.80	10.80	562.00	619.50	57.50	
100	36.20	44.60	8.40	5.07	A	11	20.10	22.00	1.90	6.90	6.90	5.00	5.00	562.00	603.50	41.50	

Columna No.1: Número consecutivo de experimento .

Columna No.2: Altura de la cresta del vertedero tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.3: Altura de la lamina de agua sobre la cresta tomada con el medidor de aguja.

Columna No.4: Altura de carga en el vertedero. $h = als - ac$

Columna No.5: Caudal experimento. $Q = 0.02479h^{2.5}$

Columna No.6: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.7: Inclinación del canal.

Columna No.8: Profundidad del fondo del canal tomada con el medidor de aguja, tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.9: Profundidad de la lamina de agua en la sección inicial del resalto, tomada con el medidor de

Columna No.10: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto. $d_1 = |pfc - pi|$

Columna No.11: Profundidad de la lamina de agua en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regla respecto al fondo del canal.

Columna No.12: Profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidraulico tomada con una regla respecto al fondo del canal. $d_2 = pf$

Columna No.13: Altura del Resalto Hidraulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.14: Profundidad del flujo aguas abajo del Resalto Hidráulico, tomada con una regla respecto al fondo del canal.

Columna No.15: Ubicación del punto inicial del Resalto Hidráulico respecto a un punto determinado, tomada con la cinta metrica adosada al canal.

Columna No.16: Ubicación del punto final del Resalto Hidráulico con respecto a un punto de referencia determinado, tomada con la cinta metrica adosada al canal.



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES RESALTO HIDRÁULICO TIPO A-VALIDACIÓN
CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO											Observaciones	
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alsc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pfl] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)		Longitud [L] (cm)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	36.20	48.7445987	12.54	13.82	A	2	20.10	23.83519698	3.74	12.01072767	12.01	8.28	8.28	562.00	603.9	41.90	
2	36.20	54.69385919	18.49	36.46	A	2	20.10	25.22843397	5.13	27.17456292	27.17	22.05	22.05	562.00	704.9	142.94	
3	36.20	55.77771995	19.58	42.04	A	2	20.10	24.48941745	4.39	38.32851026	38.33	33.94	33.94	562.00	774.3	212.32	
4	36.20	56.01861288	19.82	43.35	A	2	20.10	24.19772673	4.10	37.06197344	37.06	32.96	32.96	562.00	803.2	241.24	
5	36.20	45.90382714	9.70	7.27	A	2	20.10	21.31872972	1.22	11.8539091	11.85	10.64	10.64	562.00	637.8	75.76	
6	36.20	55.09087778	18.89	38.45	A	5	20.10	28.61813166	8.52	20.25138887	20.25	11.73	11.73	562.00	660.6	98.60	
7	36.20	56.74497181	20.54	47.43	A	5	20.10	25.2814479	5.18	41.58952613	41.59	36.41	36.41	562.00	762.5	200.49	
8	36.20	56.59918722	20.40	46.59	A	5	20.10	24.66468381	4.56	38.0785584	38.08	33.51	33.51	562.00	789.4	227.42	
9	36.20	55.83304675	19.63	42.34	A	5	20.10	24.15254019	4.05	42.70634689	42.71	38.65	38.65	562.00	789.0	227.04	
10	36.20	53.11700762	16.92	29.18	A	5	20.10	23.17303538	3.07	29.75071498	29.75	26.68	26.68	562.00	694.5	132.53	
11	36.20	57.28581318	21.09	50.61	A	7	20.10	30.05059349	9.95	27.4255355	27.43	17.47	17.47	562.00	658.8	96.76	
12	36.20	49.11214587	12.91	14.85	A	7	20.10	22.92031018	2.82	15.34294939	15.34	12.52	12.52	562.00	640.2	78.18	
13	36.20	54.0085351	17.81	33.18	A	7	20.10	24.27415518	4.17	27.31675	27.32	23.14	23.14	562.00	731.0	168.99	
14	36.20	53.13871804	16.94	29.27	A	7	20.10	23.4526483	3.35	31.10502637	31.11	27.75	27.75	562.00	691.3	129.26	
15	36.20	58.09260711	21.89	55.59	A	7	20.10	24.96099205	4.86	48.04377483	48.04	43.18	43.18	562.00	774.2	212.24	
16	36.20	51.02168174	14.82	20.97	A	10	20.10	25.67573226	5.58	15.01533914	15.02	9.44	9.44	562.00	618.2	56.19	
17	36.20	55.43701239	19.24	40.24	A	10	20.10	25.59534919	5.50	33.99265738	33.99	28.50	28.50	562.00	743.9	181.92	
18	36.20	51.43104681	15.23	22.44	A	10	20.10	23.32885607	3.23	24.86491836	24.86	21.64	21.64	562.00	660.3	98.32	
19	36.20	55.06432525	18.86	38.32	A	10	20.10	24.38516412	4.29	34.30848301	34.31	30.02	30.02	562.00	708.3	146.32	
20	36.20	55.77368575	19.57	42.02	A	10	20.10	24.22445939	4.12	42.61944853	42.62	38.49	38.49	562.00	724.2	162.16	

Columna No.1: Número consecutivo de experimento .

Columna No.2: Altura de la cresta del vertedero tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.3: Altura de la lamina de agua sobre la cresta tomada con el medidor de aguja.

Columna No.4: Altura de carga en el vertedero. $h = als_c - ac$

Columna No.5: Caudal experimento. $Q = 0.02479h^{2.5}$

Columna No.6: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.7: Inclinación del canal.

Columna No.8: Profundidad del fondo del canal tomada con el medidor de aguja, tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.9: Profundidad de la lamina de agua en la sección inicial del resalto, tomada con el medidor de

Columna No.10: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto. $d_1 = |pfc - pi|$

Columna No.11: Profundidad de la lamina de agua en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.12: Profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal. $d_2 = pfl$

Columna No.13: Altura del Resalto Hidráulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.14: Profundidad del flujo aguas abajo del Resalto Hidráulico, tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.15: Ubicación del punto inicial del Resalto Hidráulico respecto a un punto determinado, tomada con la cinta metrica adosada al canal.

Columna No.16: Ubicación del punto final del Resalto Hidráulico con respecto a un punto de referencia determinado, tomada con la cinta metrica adosada al canal.



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO A-AJUSTE

CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Caudal [Q] (m ³ /s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d2/d1	E2/E1	L/d1	L/d2	h/y1	h/E1	y1/E1	y2/E1	ΔE	ΔE/E1	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (m)	Velocidad Inicial [v1] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F1]	Energía Total Sección Inicial [E1] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (m)	Velocidad Inicial [v2] (m/s)	Número de Froude Sección Final [F2]	Energía Total Sección Final [E2] (m)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	A	1	0.010	0.038	1.24	2.039	0.117	0.092	0.514	0.541	0.105	0.262	0.054	2.421	0.902	6.894	2.847	1.421	0.462	0.325	0.786	0.012	0.098	
2	A	1	0.056	0.064	3.95	4.988	0.860	0.402	0.629	0.317	0.422	1.666	0.338	6.281	0.491	26.027	4.144	5.281	0.393	0.074	0.467	0.438	0.509	
3	A	1	0.019	0.023	3.72	7.838	0.729	0.239	0.358	0.234	0.246	1.076	0.216	10.391	0.337	46.775	4.501	9.391	0.296	0.032	0.328	0.484	0.663	
4	A	1	0.019	0.028	3.00	5.733	0.488	0.213	0.395	0.273	0.221	1.056	0.185	7.607	0.453	37.709	4.957	6.607	0.379	0.057	0.436	0.267	0.547	
5	A	1	0.019	0.034	2.47	4.284	0.346	0.187	0.450	0.332	0.197	0.729	0.153	5.500	0.570	21.438	3.898	4.500	0.442	0.098	0.540	0.149	0.430	
6	A	1	0.017	0.037	2.04	3.385	0.249	0.156	0.484	0.391	0.168	0.649	0.119	4.216	0.674	17.538	4.160	3.216	0.478	0.149	0.627	0.081	0.326	
7	A	1	0.021	0.065	1.49	1.861	0.177	0.137	0.705	0.608	0.162	0.399	0.072	2.108	0.914	6.138	2.912	1.108	0.406	0.366	0.772	0.015	0.086	
8	A	1	0.022	0.028	3.51	6.692	0.655	0.264	0.372	0.231	0.271	1.131	0.236	9.429	0.414	40.387	4.283	8.429	0.360	0.043	0.403	0.384	0.586	
9	A	1	0.022	0.055	1.82	2.471	0.223	0.172	0.580	0.447	0.189	0.533	0.117	3.127	0.848	9.689	3.098	2.127	0.525	0.247	0.772	0.034	0.152	
10	A	1	0.019	0.083	1.03	1.143	0.137	0.099	0.865	0.878	0.137	0.089	0.016	1.193	0.999	1.072	0.899	0.193	0.117	0.605	0.721	0.000	0.001	
11	A	1	0.015	0.023	2.99	6.285	0.477	0.188	0.365	0.269	0.195	0.970	0.165	8.174	0.408	42.167	5.159	7.174	0.346	0.048	0.394	0.282	0.592	
12	A	1	0.010	0.02	2.37	5.340	0.305	0.14	0.338	0.288	0.146	0.551	0.120	7.000	0.478	27.546	3.935	6.000	0.393	0.066	0.459	0.159	0.522	
13	A	1	0.006	0.023	1.19	2.506	0.095	0.073	0.375	0.443	0.080	0.216	0.050	3.174	0.842	9.390	2.958	2.174	0.525	0.242	0.767	0.015	0.158	
14	A	1	0.016	0.057	1.24	1.658	0.135	0.111	0.637	0.610	0.132	0.229	0.054	1.947	0.973	4.017	2.063	0.947	0.399	0.421	0.820	0.004	0.027	
15	A	1	0.019	0.034	2.56	4.438	0.369	0.199	0.438	0.313	0.209	0.750	0.165	5.853	0.566	22.055	3.768	4.853	0.447	0.092	0.540	0.160	0.434	
16	A	1	0.023	0.029	3.68	6.891	0.717	0.28	0.381	0.230	0.287	1.315	0.251	9.655	0.401	45.338	4.696	8.655	0.350	0.040	0.390	0.430	0.599	
17	A	1	0.027	0.03	4.09	7.542	0.883	0.291	0.422	0.250	0.300	1.432	0.261	9.700	0.340	47.726	4.920	8.700	0.296	0.034	0.330	0.583	0.660	
18	A	1	0.026	0.03	3.97	7.314	0.832	0.294	0.405	0.238	0.302	1.390	0.264	9.800	0.363	46.326	4.727	8.800	0.317	0.036	0.353	0.530	0.637	
19	A	1	0.030	0.055	2.51	3.422	0.377	0.234	0.591	0.390	0.252	0.776	0.179	4.255	0.668	14.107	3.316	3.255	0.475	0.146	0.621	0.125	0.332	
20	A	1	0.030	0.035	3.84	6.547	0.785	0.316	0.425	0.241	0.325	1.173	0.281	9.029	0.414	33.509	3.711	8.029	0.358	0.045	0.403	0.460	0.586	
21	A	3	0.012	0.032	1.72	3.072	0.183	0.121	0.455	0.418	0.131	0.590	0.089	3.781	0.719	18.443	4.878	2.781	0.487	0.175	0.662	0.051	0.281	
22	A	3	0.012	0.042	1.26	1.958	0.122	0.098	0.538	0.549	0.113	0.578	0.056	2.333	0.920	13.767	5.900	1.333	0.458	0.343	0.801	0.010	0.080	
23	A	3	0.012	0.056	0.96	1.299	0.103	0.084	0.642	0.707	0.105	0.630	0.028	1.500	1.017	11.252	7.502	0.500	0.271	0.543	0.814	-0.002	-0.017	
24	A	3	0.007	0.013	2.51	7.026	0.333	0.119	0.274	0.254	0.123	0.435	0.106	9.154	0.368	33.492	3.659	8.154	0.318	0.039	0.357	0.211	0.632	
25	A	3	0.007	0.019	1.72	3.977	0.169	0.095	0.343	0.356	0.101	0.461	0.076	5.000	0.597	24.282	4.856	4.000	0.450	0.112	0.562	0.068	0.403	
26	A	3	0.006	0.02	1.45	3.268	0.127	0.08	0.362	0.408	0.087	0.303	0.060	4.000	0.684	15.129	3.782	3.000	0.474	0.158	0.632	0.040	0.316	
27	A	3	0.004	0.009	2.13	7.165	0.240	0.082	0.233	0.261	0.085	0.295	0.073	9.111	0.353	32.733	3.593	8.111	0.305	0.038	0.342	0.155	0.647	
28	A	3	0.015	0.023	2.99	6.289	0.477	0.206	0.333	0.235	0.211	0.687	0.183	8.957	0.443	29.872	3.335	7.957	0.383	0.048	0.432	0.266	0.557	
29	A	3	0.019	0.027	3.17	6.166	0.539	0.223	0.384	0.260	0.230	0.841	0.196	8.259	0.427	31.142	3.771	7.259	0.363	0.050	0.413	0.309	0.573	
30	A	3	0.019	0.029	3.00	5.637	0.489	0.202	0.431	0.307	0.211	0.596	0.173	6.966	0.432	20.558	2.951	5.966	0.354	0.059	0.413	0.278	0.568	
31	A	3	0.011	0.018	2.81	6.686	0.420	0.169	0.299	0.232	0.173	0.491	0.151	9.389	0.413	27.296	2.907	8.389	0.360	0.043	0.403	0.246	0.587	
32	A	3	0.005	0.011	2.16	6.573	0.248	0.098	0.242	0.247	0.101	0.403	0.087	8.909	0.406	36.677	4.117	7.909	0.350	0.044	0.395	0.147	0.594	
33	A	3	0.009	0.017	2.37	5.803	0.303	0.137	0.294	0.254	0.141	0.466	0.120	8.059	0.466	27.433	3.404	7.059	0.396	0.056	0.452	0.162	0.534	
34	A	3	0.015	0.045	1.56	2.342	0.168	0.13	0.538	0.477	0.145	0.686	0.085	2.889	0.859	15.246	5.277	1.889	0.505	0.267	0.773	0.024	0.141	
35	A	3	0.019	0.089	0.95	1.012	0.134	0.086	0.978	1.066	0.135	0.666	-0.003	0.966	1.002	7.484	7.745	-0.034	-0.022	0.662	0.640	0.000	-0.002	
36	A	3	0.013	0.024	2.44	5.034	0.328	0.171	0.343	0.265	0.177	0.516	0.147	7.125	0.539	21.512	3.019	6.125	0.449	0.073	0.522	0.151	0.461	
37	A	3	0.014	0.039	1.66	2.687	0.180	0.13	0.498	0.441	0.142	0.657	0.091	3.333	0.794	16.849	5.055	2.333	0.507	0.217	0.724	0.037	0.206	
38	A	3	0.011	0.022	2.25	4.852	0.281	0.147	0.337	0.281	0.153	0.308	0.125	6.682	0.544	13.981	2.092	5.682	0.446	0.078	0.524	0.128	0.456	
39	A	3	0.009	0.02	2.11	4.767	0.247	0.119	0.355	0.328	0.125	0.322	0.099	5.950	0.507	16.078	2.702	4.950	0.401	0.081	0.482	0.122	0.493	
40	A	3	0.007	0.016	2.12	5.348	0.244	0.117	0.290	0.270	0.121	0.232	0.101	7.312	0.495	14.480	1.980	6.312	0.413	0.065	0.479	0.123	0.505	
41	A	6	0.005	0.01	2.10	6.736	0.236	0.096	0.219	0.226	0.098	0.354	0.086	9.600	0.416	35.405	3.688	8.600	0.365	0.042	0.407	0.138	0.584	
42	A	6	0.005	0.011	1.91	5.839	0.197	0.084	0.250	0.277	0.087	0.338	0.073	7.636	0.439	30.740	4.025	6.636	0.370	0.056	0.425	0.111	0.561	
43	A	6	0.005	0.032	0.66	1.177	0.054	0.042	0.501	0.783	0.055	0.333	0.010	1.313	1.013	10.411	7.932	0.313	0.186	0.594	0.780	-0.001	-0.013	
44	A	6	0.004	0.019	1.01	2.341	0.071	0.056	0.342	0.463	0.062	0.293	0.037	2.947	0.873	15.441	5.239	1.947	0.524	0.269	0.793	0.009	0.127	
45	A	6	0.006	0.013	2.11	5.914	0.239	0.11	0.249	0.240	0.113	0.359	0.097	8.462	0.471	27.617	3.264	7.462	0.406	0.054	0.460	0.126	0.529	
46	A	6	0.007	0.013	2.54	7.132	0.342	0.132	0.250	0.220	0.134	0.489	0.119	10.154	0.393	37.639	3.707	9.154	0.348	0.038	0.386	0.207	0.607	
47	A	6	0.005	0.013	1.67	4.686	0.155	0.084	0.258	0.285	0.087	0.319	0.071	6.462	0.561	24.557	3.800	5.462	0.458	0.084	0.542	0.068	0.439	
48	A	6	0.005	0.017	1.24	3.039	0.095	0.066	0.319	0.397	0.071	0.448	0.049	3.882	0.746	26.326	6.781	2.882	0.516	0.179	0.695	0.024	0.254	
49	A	6	0.007	0.035	0.97	1.656	0.083	0.067	0.506	0.625</														



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO A-AJUSTE

CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Caudal [Q] (m ³ /s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d ₂ /d ₁	E ₂ /E ₁	L/d ₁	L/d ₂	h/y ₁	h/E ₁	y ₁ /E ₁	y ₂ /E ₁	ΔE	ΔE/E ₁	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d ₁] (m)	Velocidad Inicial [v ₁] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F ₁]	Energía Total Sección Inicial [E ₁] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d ₂] (m)	Velocidad Inicial [v ₂] (m/s)	Numero de Froude Sección Final [F ₂]	Energía Total Sección Final [E ₂] (m)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
64	A	9	0.014	0.032	1.98	3.564	0.232	0.139	0.457	0.394	0.148	0.957	0.107	4.344	0.637	29.908	6.885	3.344	0.461	0.138	0.598	0.084	0.363	
65	A	9	0.018	0.023	3.47	7.342	0.635	0.24	0.332	0.218	0.243	0.840	0.217	10.435	0.382	36.502	3.498	9.435	0.342	0.036	0.378	0.392	0.618	
66	A	9	0.019	0.028	3.06	5.871	0.504	0.23	0.372	0.249	0.234	0.954	0.202	8.214	0.465	34.075	4.148	7.214	0.401	0.056	0.456	0.270	0.535	
67	A	9	0.010	0.018	2.40	5.746	0.311	0.131	0.330	0.293	0.135	0.669	0.113	7.278	0.433	37.148	5.104	6.278	0.363	0.058	0.421	0.176	0.567	
68	A	9	0.007	0.017	1.75	4.308	0.173	0.102	0.291	0.293	0.105	0.450	0.085	6.000	0.609	26.493	4.416	5.000	0.493	0.099	0.591	0.068	0.391	
69	A	9	0.008	0.021	1.74	3.856	0.175	0.104	0.351	0.350	0.109	0.566	0.083	4.952	0.623	26.950	5.442	3.952	0.474	0.120	0.594	0.066	0.377	
70	A	9	0.005	0.016	1.53	3.879	0.135	0.085	0.288	0.317	0.088	0.471	0.069	5.313	0.654	29.445	5.543	4.313	0.512	0.119	0.631	0.047	0.346	
71	A	9	0.018	0.049	1.69	2.448	0.193	0.143	0.578	0.491	0.158	0.865	0.094	2.918	0.818	17.657	6.050	1.918	0.486	0.253	0.740	0.035	0.182	
72	A	9	0.013	0.029	1.98	3.733	0.228	0.141	0.407	0.348	0.148	0.854	0.112	4.862	0.647	29.460	6.059	3.862	0.491	0.127	0.618	0.081	0.353	
73	A	9	0.014	0.023	2.71	5.733	0.396	0.165	0.377	0.298	0.170	0.877	0.142	7.174	0.430	38.133	5.316	6.174	0.359	0.058	0.417	0.226	0.570	
74	A	9	0.020	0.028	3.28	6.293	0.575	0.231	0.397	0.266	0.236	1.083	0.203	8.250	0.411	38.661	4.686	7.250	0.353	0.049	0.402	0.339	0.589	
75	A	9	0.005	0.013	1.72	4.847	0.164	0.088	0.254	0.275	0.090	0.369	0.075	6.769	0.551	28.415	4.198	5.769	0.458	0.079	0.538	0.073	0.449	
76	A	9	0.009	0.035	1.12	1.928	0.099	0.086	0.457	0.501	0.096	0.634	0.051	2.457	0.967	18.117	7.373	1.457	0.516	0.354	0.870	0.003	0.033	
77	A	9	0.008	0.017	2.15	5.295	0.252	0.129	0.283	0.253	0.131	0.632	0.112	7.588	0.522	37.184	4.900	6.588	0.444	0.067	0.512	0.121	0.478	
78	A	9	0.019	0.059	1.45	1.919	0.166	0.127	0.674	0.608	0.149	1.074	0.068	2.153	0.897	18.197	8.454	1.153	0.411	0.356	0.767	0.017	0.103	
79	A	9	0.011	0.062	0.82	1.052	0.095	0.069	0.732	0.896	0.095	0.738	0.007	1.113	1.004	11.900	10.693	0.113	0.074	0.652	0.726	0.000	-0.004	
80	A	9	0.013	0.02	2.87	6.518	0.439	0.183	0.314	0.236	0.186	0.865	0.163	9.150	0.423	43.261	4.728	8.150	0.371	0.046	0.416	0.254	0.577	
81	A	11	0.018	0.035	2.36	4.067	0.318	0.188	0.440	0.327	0.194	1.046	0.153	5.371	0.610	29.898	5.566	4.371	0.480	0.110	0.590	0.124	0.390	
82	A	11	0.006	0.034	0.78	1.369	0.065	0.052	0.512	0.724	0.064	0.557	0.018	1.529	0.996	16.370	10.704	0.529	0.278	0.526	0.805	0.000	0.004	
83	A	11	0.007	0.018	1.65	3.966	0.157	0.098	0.303	0.312	0.101	0.527	0.080	5.444	0.644	29.285	5.379	4.444	0.511	0.115	0.626	0.056	0.356	
84	A	11	0.007	0.014	2.12	5.782	0.243	0.111	0.268	0.259	0.113	0.542	0.097	7.929	0.463	38.704	4.882	6.929	0.398	0.058	0.456	0.131	0.537	
85	A	11	0.008	0.021	1.78	3.965	0.183	0.107	0.350	0.345	0.111	0.575	0.086	5.095	0.609	27.392	5.376	4.095	0.471	0.115	0.586	0.071	0.391	
86	A	11	0.005	0.021	1.16	2.588	0.090	0.065	0.376	0.475	0.071	0.436	0.044	3.095	0.792	20.754	6.705	2.095	0.491	0.234	0.725	0.019	0.208	
87	A	11	0.006	0.012	2.22	6.528	0.263	0.111	0.240	0.232	0.112	0.554	0.099	9.250	0.426	46.136	4.988	8.250	0.377	0.046	0.422	0.151	0.574	
88	A	11	0.007	0.018	1.70	4.073	0.164	0.095	0.321	0.336	0.099	0.469	0.077	5.278	0.600	26.068	4.939	4.278	0.469	0.110	0.578	0.066	0.400	
89	A	11	0.018	0.031	2.67	4.879	0.393	0.187	0.442	0.329	0.194	1.186	0.156	6.032	0.493	38.252	6.341	5.032	0.397	0.079	0.476	0.199	0.507	
90	A	11	0.006	0.012	2.28	6.712	0.277	0.113	0.242	0.232	0.114	0.414	0.101	9.417	0.411	34.521	3.666	8.417	0.364	0.043	0.408	0.163	0.589	
91	A	11	0.010	0.027	1.75	3.436	0.183	0.112	0.422	0.407	0.119	0.794	0.085	4.148	0.651	29.412	7.091	3.148	0.465	0.148	0.612	0.064	0.349	
92	A	11	0.005	0.01	2.44	7.876	0.314	0.101	0.242	0.245	0.102	0.516	0.091	10.100	0.325	51.634	5.112	9.100	0.290	0.032	0.321	0.212	0.675	
93	A	11	0.016	0.058	1.23	1.646	0.134	0.103	0.693	0.695	0.126	0.812	0.045	1.776	0.937	13.997	7.882	0.776	0.336	0.433	0.768	0.008	0.063	
94	A	11	0.013	0.055	1.11	1.524	0.117	0.093	0.656	0.693	0.113	0.996	0.038	1.691	0.970	18.115	10.713	0.691	0.326	0.471	0.797	0.003	0.030	
95	A	11	0.017	0.039	1.93	3.157	0.229	0.164	0.460	0.366	0.172	0.909	0.125	4.205	0.750	23.307	5.543	3.205	0.546	0.170	0.716	0.057	0.250	
96	A	11	0.015	0.026	2.59	5.177	0.368	0.178	0.378	0.289	0.182	0.821	0.152	6.846	0.495	31.563	4.610	5.846	0.414	0.071	0.484	0.185	0.505	
97	A	11	0.010	0.016	2.96	7.532	0.461	0.17	0.278	0.217	0.171	0.766	0.154	10.625	0.370	47.854	4.504	9.625	0.334	0.035	0.369	0.290	0.630	
98	A	11	0.011	0.02	2.47	5.633	0.331	0.161	0.307	0.247	0.163	0.815	0.141	8.050	0.492	40.738	5.061	7.050	0.426	0.060	0.486	0.168	0.508	
99	A	11	0.007	0.013	2.41	6.815	0.309	0.121	0.259	0.240	0.122	0.564	0.108	9.308	0.395	43.418	4.665	8.308	0.349	0.042	0.392	0.187	0.605	
100	A	11	0.005	0.019	1.21	2.835	0.094	0.069	0.334	0.410	0.073	0.407	0.050	3.632	0.784	21.441	5.904	2.632	0.534	0.203	0.737	0.020	0.216	

Columna No.1: Número consecutivo del experimento.

Columna No.2: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.3: Inclinación del canal.

Columna No.4: Caudal del experimento.

Columna No.5: Profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico.

Columna No.6: Velocidad media en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $v_1 = \frac{Q}{bd_1}$; $b = 0.22 \text{ m}$ (Ancho del Canal).

Columna No.7: Número de Froude en la sección inicial del Resalto. $F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gd_1 \cos \theta}}$; g : Aceleración de la gravedad terrestre.

Columna No.8: Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $E_1 = z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + d_1 \cos \theta$; z_1 = Altura del canal respecto a un datum determinado. (Para estos experimentos $z_1 = 0$).

Columna No.9: Profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico.

Columna No.10: Velocidad media en la sección final del Resalto Hidráulico. $v_2 = \frac{Q}{bd_2}$

Columna No.11: Número de Froude en la sección final del Resalto Hidráulico. $F_2 = \frac{v_2}{\sqrt{gd_2 \cos \theta}}$

Columna No.13: Longitud del remolino turbulento del Resalto Hidráulico.

Columna No.14: Altura del Resalto Hidráulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.15: Relación entre profundidades conjugadas del Resalto Hidráulico (Profundidad inicial y secuenta). $\frac{d_2}{d_1}$

Columna No.16: Relación entre la Energía total final e inicial del Resalto Hidráulico (Eficiencia del Resalto Hidráulico).

Columna No.17: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1}$

Columna No.18: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_2}$

Columna No.19: Relación entre la longitud y la profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1 \cos \theta}$

Columna No.20: Relación entre la altura Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{h}{E_1}$

Columna No.21: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.22: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.23: Pérdida de Energía ocasionada por el Resalto Hidráulico. $\Delta E = E_1 - E_2$



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO A-VALIDACIÓN

CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Caudal [Q] (m ³ /s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d ₂ /d ₁	E ₂ /E ₁	L/d ₁	L/d ₂	h/y ₁	h/E ₁	y ₁ /E ₁	y ₂ /E ₁	ΔE	ΔE/E ₁	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d ₁] (m)	Velocidad Inicial [v ₁] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F ₁]	Energía Total Sección Inicial [E ₁] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d ₂] (m)	Velocidad Inicial [v ₂] (m/s)	Numero de Froude Sección Final [F ₂]	Energía Total Sección Final [E ₂] (m)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	A	2	0.014	0.03735197	1.68	2.779	0.181	0.120107277	0.523	0.482	0.134	0.419	0.083	3.216	0.738	11.210	3.486	2.216	0.456	0.206	0.662	0.047	0.262	
2	A	2	0.036	0.05128434	3.23	4.558	0.584	0.271745629	0.610	0.374	0.291	1.429	0.220	5.299	0.498	27.855	5.257	4.299	0.378	0.088	0.466	0.293	0.502	
3	A	2	0.042	0.043894175	4.35	6.637	1.010	0.383285103	0.499	0.257	0.396	2.122	0.339	8.732	0.392	48.342	5.536	7.732	0.336	0.043	0.380	0.614	0.608	
3	A	2	0.043	0.040977267	4.81	7.586	1.219	0.370619734	0.532	0.279	0.385	2.411	0.330	9.045	0.316	58.837	6.505	8.045	0.270	0.034	0.304	0.835	0.684	
5	A	2	0.007	0.012187297	2.71	7.846	0.387	0.118539091	0.279	0.259	0.122	0.757	0.106	9.726	0.316	62.123	6.387	8.726	0.275	0.031	0.306	0.265	0.684	
6	A	5	0.038	0.085181317	2.05	2.249	0.299	0.202513889	0.863	0.613	0.240	0.982	0.117	2.377	0.801	11.531	4.850	1.377	0.392	0.284	0.676	0.060	0.199	
3	A	5	0.047	0.051814479	4.16	5.847	0.934	0.415895261	0.518	0.257	0.428	1.997	0.364	8.027	0.458	38.547	4.802	7.027	0.390	0.055	0.445	0.506	0.542	
8	A	5	0.047	0.045646838	4.64	6.946	1.143	0.380785584	0.556	0.288	0.395	2.266	0.335	8.342	0.346	49.633	5.950	7.342	0.293	0.040	0.333	0.747	0.654	
4	A	5	0.042	0.040525402	4.75	7.546	1.190	0.427063469	0.451	0.221	0.436	2.262	0.387	10.538	0.366	55.811	5.296	9.538	0.325	0.034	0.359	0.754	0.634	
10	A	5	0.029	0.030730354	4.32	7.876	0.980	0.29750715	0.446	0.261	0.307	1.320	0.267	9.681	0.313	42.963	4.438	8.681	0.272	0.031	0.304	0.674	0.687	
11	A	7	0.051	0.099505935	2.31	2.349	0.371	0.274255355	0.839	0.513	0.308	0.960	0.175	2.756	0.830	9.652	3.502	1.756	0.471	0.268	0.739	0.063	0.170	
4	A	7	0.015	0.028203102	2.39	4.568	0.320	0.153429494	0.440	0.360	0.162	0.776	0.125	5.440	0.507	27.513	5.057	4.440	0.391	0.088	0.479	0.158	0.493	
13	A	7	0.033	0.041741552	3.61	5.667	0.707	0.2731675	0.552	0.339	0.287	1.677	0.231	6.544	0.406	40.183	6.140	5.544	0.327	0.059	0.387	0.420	0.594	
5	A	7	0.029	0.033526483	3.97	6.946	0.836	0.311050264	0.428	0.246	0.318	1.283	0.278	9.278	0.380	38.268	4.125	8.278	0.332	0.040	0.372	0.518	0.620	
15	A	7	0.056	0.04860992	5.20	7.556	1.426	0.480437748	0.526	0.243	0.491	2.107	0.432	9.884	0.344	43.337	4.385	8.884	0.303	0.034	0.337	0.935	0.656	
16	A	10	0.021	0.055757323	1.71	2.329	0.204	0.150153391	0.635	0.527	0.168	0.553	0.094	2.693	0.826	9.925	3.685	1.693	0.463	0.274	0.737	0.035	0.174	
5	A	10	0.040	0.054953492	3.33	4.568	0.619	0.339926574	0.538	0.297	0.350	1.792	0.285	6.186	0.565	32.601	5.270	5.186	0.461	0.089	0.549	0.269	0.435	
18	A	10	0.022	0.032288561	3.16	5.657	0.541	0.248649184	0.410	0.265	0.253	0.968	0.216	7.701	0.469	29.988	3.894	6.701	0.400	0.060	0.460	0.287	0.531	
6	A	10	0.038	0.042851641	4.06	6.317	0.884	0.34308483	0.508	0.279	0.351	1.441	0.300	8.006	0.397	33.627	4.200	7.006	0.340	0.048	0.388	0.533	0.603	
20	A	10	0.042	0.041244594	4.63	7.336	1.134	0.426194485	0.448	0.221	0.430	1.597	0.385	10.333	0.379	38.719	3.747	9.333	0.340	0.036	0.376	0.704	0.621	

Columna No.1: Número consecutivo del experimento.

Columna No.2: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.3: Inclinación del canal.

Columna No.4: Caudal del experimento.

Columna No.5: Profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico.

Columna No.6: Velocidad media en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $v_1 = \frac{Q}{bd_1}$, $b = 0.22 \text{ m}$ (Ancho del Canal).

Columna No.7: Número de Froude en la sección inicial del Resalto. $F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gd_1 \cos \theta}}$; g : Aceleración de la gravedad terrestre.

Columna No.8: Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $E_1 = z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + d_1 \cos \theta$; z_1 = Altura del canal respecto a un datum determinado (Para estos experimentos $z_1 = 0$).

Columna No.9: Profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico.

Columna No.10: Velocidad media en la sección final del Resalto Hidráulico. $v_2 = \frac{Q}{bd_2}$

Columna No.11: Número de Froude en la sección final del Resalto Hidráulico. $F_2 = \frac{v_2}{\sqrt{gd_2 \cos \theta}}$

Columna No.13: Longitud del remolino turbulento del Resalto Hidráulico.

Columna No.14: Altura del Resalto Hidráulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.15: Relación entre profundidades conjugadas del Resalto Hidráulico (Profundidad inicial y secunete). $\frac{d_2}{d_1}$

Columna No.16: Relación entre la Energía total final e inicial del Resalto Hidráulico (Eficiencia del Resalto Hidráulico).

Columna No.17: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1}$

Columna No.18: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_2}$

Columna No.19: Relación entre la longitud y la profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1 \cos \theta}$

Columna No.20: Relación entre la altura Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{h}{E_1}$

Columna No.21: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.22: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.23: Pérdida de Energía ocasionada por el Resalto Hidráulico. $\Delta E = E_1 - E_2$



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO B-AJUSTE
CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO												Observaciones
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alasc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)	Longitud [L] (cm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	37.7	51.7	14	18.180	B	1	20.1	23.9	3.8	17	17	13.2	13.2	540	596.6	56.6	
2	37.7	52.8	15.1	21.964	B	1	20.1	27.6	7.5	14.3	14.3	6.8	6.8	520	552	32	
3	37.7	51.2	13.5	16.600	B	1	20.1	26	5.9	12.1	12.1	6.2	6.2	530	554.1	24.1	
4	37.7	50.1	12.4	13.422	B	1	20.1	25	4.9	11.8	11.8	6.9	6.9	535	580	45	
5	37.7	50.5	12.8	14.531	B	1	20.1	25.4	5.3	13.2	13.2	7.9	7.9	520	689.4	169.4	
6	37.7	51.5	13.8	17.538	B	1	20.1	23.1	3	20.6	20.6	17.6	17.6	540	622.4	82.4	
7	37.7	51.1	13.4	16.294	B	1	20.1	22.6	2.5	19.1	19.1	16.6	16.6	545	638.9	93.9	
8	37.7	51.3	13.6	16.909	B	1	20.1	25.2	5.1	13.8	13.8	8.7	8.7	530	572.2	42.2	
9	37.7	51.3	13.6	16.909	B	1	20.1	24.7	4.6	15	15	10.4	10.4	540	582.2	42.2	
10	37.7	46.5	8.8	5.695	B	1	20.1	21.3	1.2	10	10	8.8	8.8	548	588.3	40.3	
11	37.7	43.5	5.8	2.008	B	1	20.1	20.9	0.8	4.3	4.3	3.5	3.5	545	561	16	
12	37.7	52.5	14.8	20.890	B	1	20.1	23.2	3.1	25.3	25.3	22.2	22.2	520	605.4	85.4	
13	37.7	52.5	14.8	20.890	B	1	20.1	25.3	5.2	19.5	19.5	14.3	14.3	525	570.7	45.7	
14	37.7	52.5	14.8	20.890	B	1	20.1	22.7	2.6	27.1	27.1	24.5	24.5	540	655.6	115.6	
15	37.7	52.7	15	21.603	B	1	20.1	30	9.9	14.2	14.2	4.3	4.3	530	710.4	180.4	
16	37.7	44.6	6.9	3.100	B	1	20.1	21.8	1.7	5.1	5.1	3.4	3.4	528.9	563.9	35	
17	37.7	47.3	9.6	7.079	B	1	20.1	21.8	1.7	11.2	11.2	9.5	9.5	545.4	595.2	49.8	
18	37.7	44.6	6.9	3.100	B	1	20.1	21	0.9	6.9	6.9	6	6	534.7	558.6	23.9	
19	37.7	51.5	13.8	17.538	B	1	20.1	22.9	2.8	21	21	18.2	18.2	544.6	611.7	67.1	
20	37.7	44.1	6.4	2.569	B	1	20.1	21.1	1	5.3	5.3	4.3	4.3	523.4	543.4	20	
21	37	48.9	11.9	12.110	B	3	20.1	21.9	1.8	19	19	17.2	17.2	550	611.7	61.7	
22	37	48.7	11.7	11.608	B	3	20.1	22.8	2.7	17.2	17.2	14.5	14.5	540	596.9	56.9	
23	37	48.8	11.8	11.857	B	3	20.1	22.3	2.2	18.2	18.2	16	16	530	581.3	51.3	
24	36.65	46.3	9.65	7.171	B	3	20.1	22.4	2.3	11.5	11.5	9.2	9.2	520	547.6	27.6	
25	36.65	46.3	9.65	7.171	B	3	20.1	24.3	4.2	8.5	8.5	4.3	4.3	540	620	80	
26	37	46.5	9.5	6.896	B	3	20.1	22	1.9	12	12	10.1	10.1	530	561.8	31.8	
27	37	44.8	7.8	4.212	B	3	20.1	21.3	1.2	9.2	9.2	8	8	537	562.9	25.9	
28	37	50.1	13.1	15.398	B	3	20.1	22.9	2.8	19.4	19.4	16.6	16.6	530	583.6	53.6	
29	36.6	50.8	14.2	18.836	B	3	20.1	22.5	2.4	28.4	28.4	26	26	510	599.6	89.6	
30	36.6	50.9	14.3	19.170	B	3	20.1	25.6	5.5	16.7	16.7	11.2	11.2	510	541.6	31.6	
31	36.9	48.9	12	12.366	B	3	20.1	22	1.9	18.9	18.9	17	17	540	599.1	59.1	
32	36.9	45.3	8.4	5.070	B	3	20.1	21.8	1.7	9.5	9.5	7.8	7.8	545	574.8	29.8	
33	36.9	47.7	10.8	9.502	B	3	20.1	21.6	1.5	18.9	18.9	17.4	17.4	550	604.7	54.7	
34	36.9	50	13.1	15.398	B	3	20.1	22.4	2.3	21.3	21.3	19	19	545	635.2	90.2	
35	36.9	51	14.1	18.507	B	3	20.1	25.1	5	18.9	18.9	13.9	13.9	530	577.8	47.8	
36	36.9	48.6	11.7	11.608	B	3	20.1	23.8	3.7	13.1	13.1	9.4	9.4	541.7	579.2	37.5	
37	36.9	45.2	8.3	4.920	B	3	20.1	21.3	1.2	9.7	9.7	8.5	8.5	548.1	590.5	42.4	
38	36.9	49.1	12.2	12.888	B	3	20.1	24.3	4.2	14.9	14.9	10.7	10.7	521.5	581.5	60	
39	36.9	45.7	8.8	5.695	B	3	20.1	21.6	1.5	11.3	11.3	9.8	9.8	545.2	580.9	35.7	
40	36.9	46	9.1	6.193	B	3	20.1	21.6	1.5	11.9	11.9	10.4	10.4	550	578.4	28.4	
41	36.9	45.1	8.2	4.773	B	6	20.1	21.8	1.7	10	10	8.3	8.3	540	559.6	19.6	
42	36.9	45	8.1	4.629	B	6	20.1	21.4	1.3	10.6	10.6	9.3	9.3	530	557.7	27.7	
43	36.9	45	8.1	4.629	B	6	20.1	21.4	1.3	10.4	10.4	9.1	9.1	540	565.1	25.1	
44	36.9	44.7	7.8	4.212	B	6	20.1	21.9	1.8	8	8	6.2	6.2	545	625	80	
45	36.9	46.8	9.9	7.645	B	6	20.1	21.5	1.4	15.1	15.1	13.7	13.7	545	598.3	53.3	
46	36.9	46.7	9.8	7.453	B	6	20.1	21.4	1.3	17.8	17.8	16.5	16.5	530	588.6	58.6	
47	36.2	44.4	8.2	4.773	B	6	20.1	21.3	1.2	11.1	11.1	9.9	9.9	540	569.6	29.6	
48	36.2	44.3	8.1	4.629	B	6	20.1	21.1	1	11.7	11.7	10.7	10.7	540	574.5	34.5	
49	36.2	46	9.8	7.453	B	6	20.1	22.4	2.3	11.1	11.1	8.8	8.8	520	555.6	35.6	
50	36.2	48.9	12.7	14.249	B	6	20.1	25.3	5.2	16.4	16.4	11.2	11.2	540	558.8	18.8	
51	36.2	46.8	10.6	9.069	B	6	20.1	21.8	1.7	16.2	16.2	14.5	14.5	548	608.7	60.7	
52	36.2	46.9	10.7	9.284	B	6	20.1	21.9	1.8	15.8	15.8	14	14	540	580	40	
53	36.2	51.1	14.9	21.244	B	6	20.1	24.1	4	28.1	28.1	24.1	24.1	530	589.2	59.2	
54	36.2	51.1	14.9	21.244	B	6	20.1	29.2	9.1	16.6	16.6	7.5	7.5	515	590	75	
55	36.2	51	14.8	20.890	B	6	20.1	23.8	3.7	28.6	28.6	24.9	24.9	510	601.9	91.9	
56	36.2	44.2	8	4.487	B	6	20.1	21.5	1.4	9.5	9.5	8.1	8.1	540	568.2	28.2	
57	36.2	50.3	14.1	18.507	B	6	20.1	23.4	3.3	23.9	23.9	20.6	20.6	530	605.8	75.8	
58	36.2	49.6	13.4	16.294	B	6	20.1	22.8	2.7	24.9	24.9	22.2	22.2	520.6	588.2	67.6	
59	36.2	48.7	12.5	13.695	B	6	20.1	22.1	2	23.9	23.9	21.9	21.9	515.8	601.1	85.3	
60	36.2	49.2	13	15.105	B	6	20.1	25.2	5.1	15.4	15.4	10.3	10.3	532.7	587.7	55	
61	36.2	46.6	10.4	8.647	B	9	20.1	22.7	2.6	14.7	14.7	12.1	12.1	520.9	557.2	36.3	
62	36.2	51.1	14.9	21.244	B	9	20.1	23.5	3.4	32.1	32.1	28.7	28.7	511.6	601.6	90	
63	36.2	45.6	9.4	6.716	B	9	20.1	21.4	1.3	15.8	15.8	14.5	14.5	518.5	554.4	35.9	
64	36.2	46	9.8	7.453	B	9	20.1	22.7	2.6	12.9	12.9	10.3	10.3	510.6	545.6	35	
65	36.2	48.9	12.7	14.249	B	9	20.1	22.1	2	27.5	27.5	25.5	25.5	537.7	603.4	65.7	
66	36.2	46.2	10	7.839	B	9	20.1	22.2	2.1	14.8	14.8	12.7	12.7	540.3	575.4	35.1	
67	36.2	44.5	8.3	4.920	B	9	20.1	21.6	1.5	11.3	11.3	9.8	9.8	512.8	533.8	21	
68	36.2	49.1	12.9	14.817	B	9	20.1	27.4	7.3	14.6	14.6	7.3	7.3	523.6	578.6	55	
69	36.2	49.1	12.9	14.817	B	9	20.1	22.3	2.2	28.9	28.9	26.7	26.7	523.6	602.6	79	



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO B-AJUSTE
CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO												Observaciones
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alsc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)	Longitud [L] (cm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
70	36.2	50.8	14.6	20.191	B	9	20.1	23.8	3.7	29.2	29.2	25.5	25.5	520.6	598.9	78.3	
71	36.2	44.9	8.7	5.534	B	9	20.1	21.3	1.2	15.5	15.5	14.3	14.3	518	546.9	28.9	
72	36.2	47.3	11.1	10.176	B	9	20.1	22	1.9	19.1	19.1	17.2	17.2	528.9	587.5	58.6	
73	36.2	50.6	14.4	19.507	B	9	20.1	22.7	2.6	32.3	32.3	29.7	29.7	539.9	639.2	99.3	
74	36.2	45.6	9.4	6.716	B	9	20.1	21.6	1.5	14.2	14.2	12.7	12.7	534.2	564.4	30.2	
75	36.2	51	14.8	20.890	B	9	20.1	26.4	6.3	23.6	23.6	17.3	17.3	536.6	621.6	85	
76	36.2	49.5	13.3	15.992	B	9	20.1	22.6	2.5	29.9	29.9	27.4	27.4	546.1	605	58.9	
77	36.2	49.5	13.3	15.992	B	9	20.1	22.4	2.3	32.7	32.7	30.4	30.4	516.9	574.8	57.9	
78	36.2	46.5	10.3	8.441	B	9	20.1	23.2	3.1	12.5	12.5	9.4	9.4	548	583	35	
79	36.2	48.1	11.9	12.110	B	9	20.1	24.2	4.1	18.5	18.5	14.4	14.4	546.7	621.7	75	
80	36.2	47.3	11.1	10.176	B	9	20.1	21.9	1.8	19.4	19.4	17.6	17.6	546.2	610.1	63.9	
81	36.2	45	8.8	5.695	B	11	20.1	22.5	2.4	10.9	10.9	8.5	8.5	524.3	559.3	35	
82	36.2	48.7	12.5	13.695	B	11	20.1	22.3	2.2	27.6	27.6	25.4	25.4	547.4	598.7	51.3	
83	36.2	44.6	8.4	5.070	B	11	20.1	22	1.9	11.3	11.3	9.4	9.4	547.4	572.4	25	
84	36.2	49.9	13.7	17.222	B	11	20.1	22.7	2.6	33	33	30.4	30.4	531.8	613.6	81.8	
85	36.2	45.4	9.2	6.364	B	11	20.1	22.3	2.2	12.3	12.3	10.1	10.1	526.2	546.4	20.2	
86	36.2	45.3	9.1	6.193	B	11	20.1	21.2	1.1	17.2	17.2	16.1	16.1	521.5	562.1	40.6	
87	36.2	45.8	9.6	7.079	B	11	20.1	21.6	1.5	19.2	19.2	17.7	17.7	547.5	594.9	47.4	
88	36.2	51.1	14.9	21.244	B	11	20.1	23.9	3.8	33.1	33.1	29.3	29.3	516.3	571.5	55.2	
89	36.2	47.4	11.2	10.407	B	11	20.1	21.9	1.8	22.8	22.8	21	21	536.2	575.9	39.7	
90	36.2	49.9	13.7	17.222	B	11	20.1	25.7	5.6	22.5	22.5	16.9	16.9	540.4	625.4	85	
91	36.2	45.6	9.4	6.716	B	11	20.1	22.6	2.5	13.7	13.7	11.2	11.2	530.7	575.7	45	
92	36.2	48.9	12.7	14.249	B	11	20.1	22.3	2.2	28.9	28.9	26.7	26.7	515.1	596.5	81.4	
93	36.2	46.6	10.4	8.647	B	11	20.1	22.3	2.2	16.8	16.8	14.6	14.6	524.4	555	30.6	
94	36.2	50.1	13.9	17.857	B	11	20.1	25.1	5	24.4	24.4	19.4	19.4	523.8	598.8	75	
95	36.2	49.1	12.9	14.817	B	11	20.1	25.1	5	22.1	22.1	17.1	17.1	514.3	609.3	95	
96	36.2	50.2	14	18.180	B	11	20.1	22.9	2.8	32.5	32.5	29.7	29.7	517.4	576.5	59.1	
97	36.2	47.4	11.2	10.407	B	11	20.1	21.8	1.7	22.8	22.8	21.1	21.1	531.1	598.2	67.1	
98	36.2	50.7	14.5	19.847	B	11	20.1	26.2	6.1	25.9	25.9	19.8	19.8	523.6	549.2	25.6	
99	36.2	50.7	14.5	19.847	B	11	20.1	22.6	2.5	37.6	37.6	35.1	35.1	520.6	628.1	107.5	
100	36.2	44.7	8.5	5.222	B	11	20.1	21.2	1.1	14.9	14.9	13.8	13.8	522.2	550	27.8	

Columna No.1: Número consecutivo de experimento .

Columna No.2: Altura de la cresta del vertedero tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.3: Altura de la lamina de agua sobre la cresta tomada con el medidor de aguja.

Columna No.4: Altura de carga en el vertedero. $h = als - ac$

Columna No.5: Caudal experimento. $Q = 0.02479h^{2.5}$

Columna No.6: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.7: Inclinación del canal.

Columna No.8: Profundidad del fondo del canal tomada con el medidor de aguja, tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.9: Profundidad de la lamina de agua en la sección inicial del resalto, tomada con el medidor de aguja

Columna No.10: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto. $d_1 = pfc - pi$

Columna No.11: Profundidad de la lamina de agua en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.12: Profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidraulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal. $d_2 = pf$

Columna No.13: Altura del Resalto Hidraulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.14: Profundidad del flujo aguas abajo del Resalto Hidráulico, tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.15: Ubicación del punto inicial del Resalto Hidráulico respecto a un punto determinado, tomada con la cinta métrica adosada al canal.

Columna No.16: Ubicación del punto final del Resalto Hidráulico con respecto a un punto de referencia determinado, tomada con la cinta métrica adosada al canal.



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO B-VALIDACIÓN

CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO												Observaciones
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alsc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yf] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)	Longitud [L] (cm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	36.2	51.17957138	14.97957138	21.529	B	2	20.1	25.36901256	5.269012563	19.27495033	19.27495033	14.00593777	14.00593777	546.2	599.8350694	53.63506937	
2	36.2	50.42301833	14.22301833	18.913	B	2	20.1	23.57485357	3.474853567	20.11002945	20.11002945	16.63517588	16.63517588	524.3	599.1476789	74.84767888	
3	36.2	48.12480894	11.92480894	12.173	B	2	20.1	22.11635556	2.016355557	18.9563154	18.9563154	16.93995985	16.93995985	547.4	611.3222821	63.92228205	
4	36.2	50.39748793	14.19748793	18.828	B	2	20.1	22.56671012	2.466710125	25.83531058	25.83531058	23.36860045	23.36860045	547.4	640.5903601	93.1903601	
5	36.2	47.39750263	11.19750263	10.401	B	2	20.1	21.72386145	1.623861446	16.63202666	16.63202666	15.00816522	15.00816522	531.8	597.510708	65.71070797	
6	36.2	48.51215477	12.31215477	13.186	B	5	20.1	24.48018307	4.380183071	14.34011736	14.34011736	9.959934294	9.959934294	526.2	554.0125155	27.81251555	
7	36.2	49.07312528	12.87312528	14.740	B	5	20.1	22.59513039	2.495130395	23.0960688	23.0960688	20.60093841	20.60093841	521.5	590.1582791	68.65827906	
8	36.2	46.45318576	10.25318576	8.345	B	5	20.1	21.62229447	1.522294473	16.28214392	16.28214392	14.75984944	14.75984944	547.5	598.7279637	51.22796372	
9	36.2	45.86249951	9.662499506	7.194	B	5	20.1	21.40489331	1.30489331	15.56912957	15.56912957	14.26423626	14.26423626	516.3	563.2811132	46.98111318	
10	36.2	50.1493903	13.9493903	18.016	B	5	20.1	22.4386491	2.338649096	29.89147781	29.89147781	27.55282872	27.55282872	536.2	625.6394667	89.43946672	
11	36.2	48.54644095	12.34644095	13.278	B	7	20.1	24.38002265	4.280022655	15.89591411	15.89591411	11.61589146	11.61589146	540.4	570.0457478	29.64574777	
12	36.2	49.02233285	12.82233285	14.595	B	7	20.1	23.0258762	2.925876203	21.75298695	21.75298695	18.82711074	18.82711074	530.7	583.7294704	53.02947044	
13	36.2	48.80782761	12.60782761	13.992	B	7	20.1	22.56376946	2.463769457	23.95578566	23.95578566	21.4920162	21.4920162	515.1	578.9214694	63.82146936	
14	36.2	48.05501545	11.85501545	11.996	B	7	20.1	22.04134181	1.941341808	23.26509595	23.26509595	21.32375414	21.32375414	524.4	585.8815227	61.48152273	
15	36.2	43.63761984	7.437619842	3.740	B	7	20.1	20.94391188	0.84391188	10.69161751	10.69161751	9.847705627	9.847705627	523.8	554.3430645	30.54306445	
16	36.2	48.52757623	12.32757623	13.227	B	10	20.1	24.40474041	4.304740409	17.24137231	17.24137231	12.9366319	12.9366319	514.3	539.0652261	24.76522615	
17	36.2	50.89783003	14.69783003	20.531	B	10	20.1	23.78297967	3.682979666	32.30972361	32.30972361	28.62674394	28.62674394	517.4	580.9472646	63.54726464	
18	36.2	43.93758496	7.737584962	4.128	B	10	20.1	21.19610675	1.096106746	12.21936529	12.21936529	11.12325854	11.12325854	531.1	556.3790972	25.27909723	
19	36.2	45.39941956	9.199419555	6.363	B	10	20.1	21.45886844	1.358868437	17.22782889	17.22782889	15.86896046	15.86896046	523.6	559.3966604	35.79666041	
20	36.2	50.2504117	14.0504117	18.344	B	10	20.1	22.59118395	2.491183946	34.057461	34.057461	31.56627705	31.56627705	520.6	605.8311906	85.23119065	

Columna No.1: Número consecutivo de experimento .

Columna No.2: Altura de la cresta del vertedero tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.3: Altura de la lamina de agua sobre la cresta tomada con el medidor de aguja.

Columna No.4: Altura de carga en el vertedero. $h = als - ac$

Columna No.5: Caudal experimento. $Q = 0.02479h^{2.5}$

Columna No.6: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.7: Inclinación del canal.

Columna No.8: Profundidad del fondo del canal tomada con el medidor de aguja, tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.9: Profundidad de la lamina de agua en la sección inicial del resalto, tomada con el medidor de aguja

Columna No.10: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto. $d_1 = pfc - pi$

Columna No.11: Profundidad de la lamina de agua en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.12: Profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidraulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal. $d_2 = pf$

Columna No.13: Altura del Resalto Hidraulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.14: Profundidad del flujo aguas abajo del Resalto Hidráulico, tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.15: Ubicación del punto inicial del Resalto Hidráulico respecto a un punto determinado, tomada con la cinta metrica adosada al canal.

Columna No.16: Ubicación del punto final del Resalto Hidráulico con respecto a un punto de referencia determinado, tomada con la cinta metrica adosada al canal.



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO B-AJUSTE
CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Caudal [Q] (m³/s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d2/d1	E2/E1	L/d1	L/d2	h/y1	h/E1	y1/E1	y2/E1	ΔE	ΔE/E1	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (m)	Velocidad Inicial [v1] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F1]	Energía Total Sección Inicial [E1] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (m)	Velocidad Inicial [v2] (m/s)	Número de Froude Sección Final [F2]	Energía Total Sección Final [E2] (m)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	B	1	0.018	0.038	2.17	3.562	0.284	0.17	0.486	0.376	0.182	0.566	0.132	4.474	0.641	14.892	3.329	3.474	0.465	0.134	0.599	0.102	0.359	
2	B	1	0.022	0.075	1.33	1.552	0.168	0.143	0.698	0.590	0.168	0.668	0.320	1.907	0.998	4.266	2.237	0.907	0.405	0.446	0.851	0.000	0.002	
3	B	1	0.017	0.059	1.28	1.681	0.144	0.121	0.624	0.572	0.141	0.241	0.062	2.051	0.975	4.084	1.991	1.051	0.429	0.408	0.838	0.004	0.025	
4	B	1	0.013	0.049	1.25	1.796	0.132	0.118	0.517	0.481	0.132	0.450	0.069	2.408	0.998	9.182	3.813	1.409	0.523	0.371	0.894	0.000	0.002	
5	B	1	0.015	0.053	1.25	1.728	0.147	0.132	0.500	0.440	0.145	1.694	0.079	2.491	0.985	31.957	12.831	1.491	0.538	0.361	0.898	0.002	0.015	
6	B	1	0.018	0.03	2.66	4.899	0.397	0.206	0.387	0.272	0.214	0.824	0.176	6.867	0.538	27.462	3.999	5.868	0.443	0.076	0.519	0.183	0.462	
7	B	1	0.016	0.025	2.96	5.983	0.481	0.191	0.388	0.283	0.199	0.939	0.166	7.640	0.413	37.554	4.915	6.641	0.345	0.052	0.397	0.282	0.587	
8	B	1	0.017	0.051	1.51	2.131	0.170	0.138	0.557	0.479	0.154	0.422	0.087	2.706	0.902	8.273	3.058	1.706	0.511	0.299	0.810	0.017	0.098	
9	B	1	0.017	0.046	1.67	2.487	0.192	0.15	0.512	0.422	0.163	0.422	0.104	3.261	0.851	9.173	2.813	2.261	0.542	0.240	0.781	0.029	0.149	
10	B	1	0.006	0.012	2.16	6.288	0.253	0.1	0.259	0.261	0.103	0.403	0.088	8.333	0.409	33.578	4.029	7.335	0.348	0.047	0.396	0.149	0.591	
11	B	1	0.002	0.008	1.14	4.074	0.076	0.043	0.212	0.327	0.045	0.160	0.035	5.375	0.598	19.997	3.720	4.376	0.468	0.106	0.568	0.030	0.402	
12	B	1	0.021	0.031	3.06	5.555	0.517	0.253	0.375	0.238	0.260	0.854	0.222	8.161	0.504	27.544	3.375	7.163	0.430	0.060	0.490	0.256	0.496	
13	B	1	0.021	0.052	1.83	2.557	0.226	0.195	0.487	0.352	0.207	0.457	0.143	3.750	0.917	8.787	2.343	2.751	0.633	0.230	0.863	0.019	0.083	
14	B	1	0.021	0.026	3.65	7.232	0.716	0.271	0.350	0.215	0.277	1.156	0.245	10.423	0.387	44.455	4.265	9.425	0.342	0.036	0.379	0.439	0.613	
15	B	1	0.022	0.099	0.99	1.007	0.165	0.142	0.692	0.586	0.166	1.804	0.043	1.434	1.009	18.219	12.702	0.435	0.261	0.600	0.861	-0.002	-0.009	
16	B	1	0.003	0.051	0.83	2.030	0.055	0.051	0.276	0.391	0.055	0.350	0.034	3.000	0.997	20.585	6.862	2.000	0.617	0.309	0.926	0.000	0.003	
17	B	1	0.007	0.017	1.89	4.635	0.204	0.112	0.287	0.274	0.116	0.498	0.095	6.588	0.570	29.290	4.446	5.589	0.466	0.083	0.549	0.088	0.430	
18	B	1	0.003	0.009	1.57	5.270	0.136	0.069	0.204	0.248	0.071	0.239	0.060	7.667	0.523	26.552	3.463	6.668	0.441	0.066	0.507	0.065	0.477	
19	B	1	0.018	0.028	2.85	5.433	0.447	0.21	0.380	0.264	0.217	0.671	0.182	7.500	0.486	23.961	3.195	6.501	0.407	0.063	0.470	0.230	0.514	
20	B	1	0.003	0.01	1.17	3.728	0.081	0.053	0.220	0.306	0.055	0.200	0.043	5.300	0.683	19.997	3.773	4.301	0.529	0.123	0.652	0.026	0.317	
21	B	3	0.012	0.018	3.06	7.282	0.511	0.19	0.290	0.212	0.194	0.616	0.172	10.556	0.380	34.231	3.243	9.570	0.337	0.035	0.372	0.316	0.620	
22	B	3	0.012	0.027	1.95	3.800	0.236	0.172	0.307	0.236	0.177	0.568	0.145	6.370	0.748	21.045	3.304	5.379	0.613	0.114	0.727	0.060	0.252	
23	B	3	0.012	0.022	2.45	5.277	0.341	0.182	0.296	0.222	0.186	0.512	0.160	8.273	0.546	23.286	2.815	7.284	0.469	0.064	0.533	0.155	0.454	
24	B	3	0.007	0.023	1.42	2.966	0.133	0.115	0.283	0.267	0.119	0.276	0.092	5.000	0.898	11.984	2.397	4.007	0.694	0.173	0.868	0.013	0.102	
25	B	3	0.007	0.085	0.78	1.210	0.094	0.085	0.383	0.420	0.092	0.799	0.043	2.024	0.988	19.022	9.399	1.027	0.460	0.448	0.908	0.001	0.012	
26	B	3	0.007	0.019	1.65	3.824	0.166	0.12	0.261	0.241	0.123	0.318	0.101	6.316	0.744	16.714	2.646	5.324	0.609	0.114	0.723	0.043	0.256	
27	B	3	0.004	0.012	1.60	4.654	0.149	0.092	0.208	0.219	0.094	0.259	0.080	7.667	0.404	21.554	2.811	6.677	0.539	0.081	0.619	0.054	0.366	
28	B	3	0.015	0.028	2.50	4.773	0.360	0.194	0.361	0.262	0.201	0.535	0.166	6.929	0.557	19.117	2.759	5.938	0.461	0.078	0.538	0.160	0.443	
29	B	3	0.019	0.024	3.57	7.357	0.696	0.284	0.301	0.181	0.289	0.895	0.260	11.833	0.415	37.282	3.151	10.850	0.374	0.034	0.408	0.407	0.585	
30	B	3	0.019	0.055	1.58	2.158	0.191	0.167	0.522	0.408	0.181	0.316	0.112	3.036	0.946	5.738	1.890	2.041	0.586	0.287	0.874	0.010	0.054	
31	B	3	0.012	0.019	2.96	6.857	0.481	0.297	0.297	0.219	0.194	0.590	0.170	9.947	0.403	31.063	3.123	8.961	0.354	0.039	0.393	0.287	0.597	
32	B	3	0.005	0.017	1.36	3.322	0.118	0.095	0.243	0.251	0.098	0.298	0.078	5.588	0.828	17.505	3.133	4.596	0.859	0.143	0.802	0.020	0.172	
33	B	3	0.010	0.015	2.88	7.512	0.452	0.189	0.229	0.268	0.192	0.546	0.174	12.600	0.424	36.417	2.890	11.617	0.385	0.033	0.418	0.260	0.576	
34	B	3	0.015	0.023	3.04	6.411	0.519	0.213	0.329	0.227	0.219	0.901	0.190	9.261	0.421	39.164	4.229	8.274	0.366	0.044	0.411	0.300	0.579	
35	B	3	0.019	0.05	1.68	2.404	0.207	0.189	0.445	0.327	0.199	0.477	0.139	3.780	0.963	9.547	2.526	2.785	0.673	0.242	0.914	0.008	0.037	
36	B	3	0.012	0.037	1.43	2.369	0.150	0.131	0.403	0.356	0.139	0.374	0.094	3.541	0.926	10.121	2.859	2.545	0.625	0.246	0.871	0.011	0.074	
37	B	3	0.005	0.012	1.86	5.436	0.200	0.097	0.231	0.237	0.100	0.423	0.085	8.083	1.098	35.285	4.365	7.094	0.425	0.060	0.485	0.100	0.502	
38	B	3	0.013	0.042	1.39	2.174	0.157	0.149	0.393	0.325	0.157	0.599	0.107	3.548	0.401	14.266	4.021	2.552	0.683	0.267	0.950	0.000	-0.001	
39	B	3	0.006	0.015	1.73	4.502	0.176	0.113	0.229	0.218	0.116	0.357	0.098	7.533	0.657	23.767	3.155	6.544	0.557	0.085	0.642	0.060	0.343	
40	B	3	0.006	0.019	1.88	4.895	0.202	0.119	0.237	0.219	0.122	0.284	0.104	7.933	0.604	18.907	2.383	6.944	0.515	0.074	0.589	0.080	0.396	
41	B	6	0.005	0.017	1.28	3.134	0.110	0.1	0.217	0.220	0.102	0.195	0.083	5.882	0.929	11.466	1.949	4.915	0.754	0.153	0.908	0.008	0.071	
42	B	6	0.005	0.013	1.62	4.545	0.161	0.106	0.199	0.195	0.108	0.275	0.093	8.154	0.671	21.191	2.599	7.199	0.578	0.080	0.659	0.053	0.329	
43	B	6	0.005	0.013	1.62	4.545	0.160	0.104	0.202	0.201	0.106	0.250	0.091	8.000	0.665	19.202	2.400	7.044	0.571	0.081	0.652	0.053	0.335	
44	B	6	0.004	0.018	1.06	2.538	0.117	0.08	0.239	0.271	0.083	0.796	0.062	4.444	0.706	44.201	9.945	3.469	0.529	0.153	0.682	0.034	0.294	
45	B	6	0.008	0.014	2.48	6.716	0.356	0.151	0.230	0.190	0.154	0.530	0.137	10.786	0.432	37.863	3.510	9.845	0.385	0.039	0.424	0.202	0.568	
46	B	6	0.007	0.013	2.61	7.317	0.390	0.178	0.190	0.144	0.180	0.583	0.165	13.692	0.462	44.830	3.274	12.768	0.424	0.033	0.457	0.210	0.538	
47	B	6	0.005	0.012	1.81	5.284	0.194	0.111	0.195	0.188	0.113	0.294	0.099	9.250	0.582	24.532	2.652	8.301	0.511	0.062	0.572	0.081	0.418	
48	B	6	0.005	0.01	2.10	6.736	0.254	0.117	0.180	0.168	0.119	0.343	0.107	11.700	0.468	34.311	2.933	10.764	0.422	0.039	0.461	0.135	0.532	
49	B	6	0.007	0.023	1.47	3.109	0.152	0.111	0.305	0.293	0.116	0.354	0.088	4.826	0.761	15.393	3.190							



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO B-AJUSTE CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Caudal [Q] (m³/s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d2/d1	E2/E1	L/d1	L/d2	h/y1	h/E1	y1/E1	y2/E1	ΔE	ΔE/E1	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (m)	Velocidad Inicial [v1] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F1]	Energía Total Sección Inicial [E1] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (m)	Velocidad Inicial [v2] (m/s)	Numero de Froude Sección Final [F2]	Energía Total Sección Final [E2] (m)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
87	B	11	0.007	0.015	2.15	5.644	0.294	0.192	0.168	0.123	0.193	0.465	0.177	12.800	0.657	31.019	2.423	12.040	0.602	0.050	0.652	0.101	0.343	
88	B	11	0.021	0.038	2.54	4.201	0.419	0.331	0.292	0.163	0.335	0.542	0.294	8.711	0.800	14.259	1.637	7.874	0.701	0.089	0.790	0.084	0.200	
89	B	11	0.010	0.018	2.63	6.312	0.408	0.228	0.207	0.140	0.230	0.390	0.210	12.667	0.565	21.650	1.709	11.904	0.516	0.043	0.559	0.177	0.435	
90	B	11	0.017	0.056	1.40	1.904	0.236	0.225	0.348	0.236	0.231	0.834	0.170	4.018	0.981	14.900	3.708	3.093	0.722	0.233	0.955	0.004	0.019	
91	B	11	0.007	0.025	1.22	2.489	0.143	0.137	0.223	0.194	0.140	0.442	0.112	5.480	0.973	17.669	3.224	4.583	0.784	0.171	0.955	0.004	0.027	
92	B	11	0.014	0.022	2.94	6.396	0.541	0.289	0.224	0.134	0.292	0.799	0.267	13.136	0.539	36.320	2.765	12.382	0.494	0.040	0.534	0.249	0.461	
93	B	11	0.009	0.022	1.79	3.881	0.213	0.168	0.234	0.184	0.171	0.300	0.146	7.636	0.800	13.654	1.788	6.779	0.686	0.101	0.787	0.043	0.200	
94	B	11	0.018	0.05	1.62	2.340	0.255	0.244	0.333	0.217	0.250	0.736	0.195	4.880	0.979	14.724	3.017	3.971	0.765	0.193	0.957	0.005	0.021	
95	B	11	0.015	0.05	1.35	1.941	0.232	0.221	0.305	0.209	0.226	0.933	0.172	4.420	0.972	18.651	4.220	3.503	0.740	0.211	0.952	0.006	0.028	
96	B	11	0.018	0.028	2.95	5.684	0.528	0.325	0.254	0.144	0.328	0.580	0.298	11.607	0.622	20.719	1.785	10.824	0.564	0.052	0.616	0.200	0.378	
97	B	11	0.010	0.017	2.78	6.877	0.475	0.228	0.207	0.140	0.230	0.659	0.211	13.412	0.484	38.745	2.889	12.663	0.445	0.035	0.480	0.245	0.516	
98	B	11	0.020	0.061	1.48	1.930	0.196	0.259	0.348	0.221	0.265	0.251	0.199	4.246	1.354	4.120	0.970	3.325	1.017	0.306	1.323	-0.069	-0.354	
99	B	11	0.020	0.025	3.61	7.355	0.791	0.376	0.240	0.126	0.379	1.055	0.351	15.040	0.479	42.210	2.807	14.321	0.444	0.031	0.475	0.412	0.521	
100	B	11	0.005	0.011	2.16	6.630	0.275	0.149	0.159	0.133	0.150	0.273	0.138	13.545	0.547	24.808	1.831	12.799	0.503	0.039	0.543	0.124	0.453	

Columna No.1: Número consecutivo del experimento.

Columna No.2: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.3: Inclinación del canal.

Columna No.4: Caudal del experimento.

Columna No.5: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico.

Columna No.6: Velocidad media en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $v_1 = \frac{Q}{bd_1}$; $b = 0.22 \text{ m}$ (Ancho del Canal).

Columna No.7: Número de Froude en la sección inicial del Resalto. $F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gd_1 \cos \theta}}$; g : Aceleración de la gravedad terrestre.

Columna No.8: Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $E_1 = z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + d_1 \cos \theta$; z_1 : Altura del canal respecto a un datum determinado. (Para estos experimentos $z_1 = L \tan \theta$).

Columna No.9: Profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico.

Columna No.10: Velocidad media en la sección final del Resalto Hidráulico. $v_2 = \frac{Q}{bd_2}$

Columna No.11: Número de Froude en la sección final del Resalto Hidráulico. $F_2 = \frac{v_2}{\sqrt{gd_2 \cos \theta}}$

Columna No.13: Longitud del remolino turbulento del Resalto Hidráulico.

Columna No.14: Altura del Resalto Hidráulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.15: Relación entre profundidades conjugadas del Resalto Hidráulico (Profundidad inicial y secunente). $\frac{d_2}{d_1}$

Columna No.16: Relación entre la Energía total final e inicial del Resalto Hidráulico (Eficiencia del Resalto Hidráulico).

Columna No.17: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1}$

Columna No.18: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_2}$

Columna No.19: Relación entre la longitud y la profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1 \cos \theta}$

Columna No.20: Relación entre la altura Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{h}{E_1}$

Columna No.21: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.22: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección final del Resalto Hidráulico. $\frac{d_2 \cos \theta}{E_2}$

Columna No.23: Pérdida de Energía ocasionada por el Resalto Hidráulico. $\Delta E = E_1 - E_2$



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO B-VALIDACIÓN

CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Caudal [Q] (m³/s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d2/d1	E2/E1	L/d1	L/d2	h/y1	h/E1	y1/E1	y2/E1	ΔE	ΔE/E1	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (m)	Velocidad Inicial [v1] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F1]	Energía Total Sección Inicial [E1] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (m)	Velocidad Inicial [v2] (m/s)	Número de Froude Sección Final [F2]	Energía Total Sección Final [E2] (m)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	B	2	0.022	0.052690126	1.86	2.584	0.238	0.192749503	0.508	0.369	0.206	0.536	0.140	3.658	0.866	10.173	2.781	2.660	0.589	0.221	0.810	0.032	0.134	
2	B	2	0.019	0.034748536	2.47	4.239	0.360	0.201100294	0.427	0.304	0.210	0.748	0.166	5.787	0.585	21.527	3.720	4.791	0.462	0.097	0.559	0.149	0.415	
3	B	2	0.012	0.020163556	2.74	6.172	0.415	0.189563154	0.292	0.214	0.194	0.639	0.169	9.401	0.467	31.683	3.370	8.407	0.408	0.049	0.457	0.221	0.533	
4	B	2	0.019	0.024667101	3.47	7.055	0.654	0.258353106	0.331	0.208	0.264	0.931	0.234	10.474	0.403	37.756	3.605	9.480	0.357	0.038	0.395	0.390	0.597	
5	B	2	0.010	0.016238614	2.91	7.297	0.460	0.166320267	0.284	0.223	0.170	0.657	0.150	10.242	0.371	40.441	3.948	9.249	0.326	0.035	0.362	0.289	0.629	
6	B	5	0.013	0.043801831	1.37	2.091	0.151	0.143401174	0.418	0.353	0.152	0.277	0.100	3.274	1.007	6.325	1.932	2.286	0.660	0.289	0.948	-0.001	-0.007	
7	B	5	0.015	0.024951304	2.69	5.438	0.422	0.230960688	0.290	0.193	0.235	0.684	0.206	9.256	0.557	27.412	2.961	8.292	0.488	0.059	0.547	0.187	0.443	
8	B	5	0.008	0.015222945	2.49	6.460	0.354	0.162821439	0.233	0.185	0.166	0.510	0.148	10.696	0.468	33.524	3.134	9.737	0.417	0.043	0.460	0.188	0.532	
9	B	5	0.007	0.013048933	2.51	7.018	0.354	0.156691296	0.210	0.170	0.158	0.468	0.143	11.931	0.447	35.867	3.006	10.977	0.404	0.037	0.440	0.196	0.553	
10	B	5	0.018	0.023386491	3.50	7.325	0.687	0.298914778	0.274	0.160	0.303	0.891	0.276	12.782	0.441	38.099	2.981	11.830	0.401	0.034	0.435	0.384	0.559	
11	B	7	0.013	0.042800227	1.41	2.184	0.162	0.158959141	0.380	0.305	0.166	0.294	0.116	3.714	1.027	6.875	1.851	2.742	0.719	0.262	0.982	-0.004	-0.027	
12	B	7	0.015	0.029258762	2.27	4.248	0.323	0.217529869	0.305	0.210	0.222	0.526	0.188	7.435	0.687	17.989	2.420	6.491	0.583	0.090	0.673	0.101	0.313	
13	B	7	0.014	0.024637695	2.58	5.270	0.403	0.239557857	0.265	0.174	0.243	0.633	0.215	9.723	0.603	25.711	2.644	8.796	0.534	0.061	0.594	0.160	0.397	
14	B	7	0.012	0.019413418	2.81	6.460	0.459	0.232650959	0.234	0.156	0.235	0.610	0.213	11.984	0.513	31.434	2.623	11.074	0.465	0.042	0.507	0.223	0.487	
15	B	7	0.004	0.008439119	2.01	7.027	0.234	0.106916175	0.159	0.156	0.108	0.303	0.099	12.669	0.463	35.922	2.835	11.764	0.421	0.036	0.457	0.126	0.537	
16	B	10	0.013	0.043047404	1.40	2.166	0.163	0.172413723	0.349	0.270	0.179	0.244	0.130	4.005	1.094	5.666	1.415	3.067	0.796	0.260	1.056	-0.015	-0.094	
17	B	10	0.021	0.036829797	2.53	4.248	0.419	0.323097236	0.289	0.163	0.327	0.626	0.287	8.773	0.782	16.992	1.937	7.908	0.685	0.087	0.772	0.091	0.218	
18	B	10	0.004	0.010961067	1.71	5.261	0.182	0.122193653	0.154	0.141	0.123	0.249	0.111	11.148	0.677	22.712	2.037	10.320	0.612	0.059	0.671	0.059	0.323	
19	B	10	0.006	0.013588684	2.13	5.875	0.275	0.172278289	0.168	0.130	0.174	0.353	0.159	12.678	0.631	25.943	2.046	11.874	0.577	0.049	0.626	0.102	0.369	
20	B	10	0.018	0.024911839	3.35	6.823	0.670	0.34057461	0.245	0.135	0.344	0.839	0.316	13.671	0.513	33.693	2.465	12.882	0.472	0.037	0.509	0.326	0.487	

Columna No.1: Número consecutivo del experimento.

Columna No.2: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.3: Inclinación del canal.

Columna No.4: Caudal del experimento.

Columna No.5: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico.

Columna No.6: Velocidad media en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $v_1 = \frac{Q}{bd_1}$; $b = 0.22$ m (Ancho del Canal).

Columna No.7: Número de Froude en la sección inicial del Resalto. $F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gd_1 \cos \theta}}$; g : Aceleración de la gravedad terrestre.

Columna No.8: Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $E_1 = z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + d_1 \cos \theta$; z_1 : Altura del canal respecto a un datum determinado. (Para estos experimentos $z_1 = L \tan \theta$).

Columna No.9: Profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico.

Columna No.10: Velocidad media en la sección final del Resalto Hidráulico. $v_2 = \frac{Q}{bd_2}$

Columna No.11: Número de Froude en la sección final del Resalto Hidráulico. $F_2 = \frac{v_2}{\sqrt{gd_2 \cos \theta}}$

Columna No.13: Longitud del remolino turbulento del Resalto Hidráulico.

Columna No.14: Altura del Resalto Hidráulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.15: Relación entre profundidades conjugadas del Resalto Hidráulico (Profundidad inicial y secunente). $\frac{d_2}{d_1}$

Columna No.16: Relación entre la Energía total final e inicial del Resalto Hidráulico (Eficiencia del Resalto Hidráulico).

Columna No.17: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1}$

Columna No.18: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_2}$

Columna No.19: Relación entre la longitud y la profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1 \cos \theta}$

Columna No.20: Relación entre la altura Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{h}{E_1}$

Columna No.21: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.22: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.23: Pérdida de Energía ocasionada por el Resalto Hidráulico. $\Delta E = E_1 - E_2$



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO C-AJUSTE

CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO												Observaciones
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alsc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)	Longitud [L] (cm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	37.7	52.7	15	21.60253286	C	1	20.1	25.7	5.6	18.7	18.7	13.1	13.1	470	525.1	55.1	
2	37.7	52.7	15	21.60253286	C	1	20.1	25.2	5.1	18.9	18.9	13.8	13.8	490	543.5	53.5	
3	37.7	52.4	14.7	20.53855397	C	1	20.1	23.3	3.2	26.2	26.2	23	23	515	619.9	104.9	
4	37.7	52.4	14.7	20.53855397	C	1	20.1	23.1	3	27	27	24	24	530	618	88	
5	37.7	52.1	14.4	19.50665293	C	1	20.1	23.5	3.4	24.4	24.4	21	21	520	620	100	
6	37.6	50.3	12.7	14.24904733	C	1	20.1	22.6	2.5	21.4	21.4	18.9	18.9	520	593.2	73.2	
7	37.6	49.7	12.1	12.62524901	C	1	20.1	25.1	5	12.7	12.7	7.7	7.7	510	630	120	
8	37.6	49.7	12.1	12.62524901	C	1	20.1	22	1.9	20	20	18.1	18.1	500	561.3	61.3	
9	37.6	49.5	11.9	12.10999406	C	1	20.1	21.9	1.8	20.8	20.8	19	19	490	582	92	
10	37.6	51.8	14.2	18.83637759	C	1	20.1	24.4	4.3	18.3	18.3	14	14	520	591.7	71.7	
11	37.6	51.7	14.1	18.50650072	C	1	20.1	23.5	3.4	20.7	20.7	17.3	17.3	490	571.1	81.1	
12	37.6	51.6	14	18.18011458	C	1	20.1	24.9	4.8	17.5	17.5	12.7	12.7	500	554.9	54.9	
13	37.6	51.2	13.6	16.90922869	C	1	20.1	23.9	3.8	19.9	19.9	16.1	16.1	500	546.9	46.9	
14	37.6	51.2	13.6	16.90922869	C	1	20.1	23.4	3.3	21.2	21.2	17.9	17.9	530	594.5	64.5	
15	37.6	50.45	12.85	14.67352127	C	1	20.1	23.3	3.2	19	19	15.8	15.8	540	596.6	56.6	
16	37.6	52.4	14.8	20.88963325	C	1	20.1	22.8	2.7	28.1	28.1	25.4	25.4	486.5	579.4	92.9	
17	37.6	52.3	14.7	20.53855397	C	1	20.1	24	3.9	21.1	21.1	17.2	17.2	515.7	586.5	70.8	
18	37.6	49.6	12	12.36601138	C	1	20.1	25.3	5.2	10.7	10.7	5.5	5.5	492.8	513.9	21.1	
19	37.6	51	13.4	16.2944056	C	1	20.1	24	3.9	18.3	18.3	14.4	14.4	510.4	574.7	64.3	
20	37.6	49.8	12.2	12.88772034	C	1	20.1	22	1.9	19	19	17.1	17.1	540	615	75	
21	37	48.9	11.9	12.10999406	C	3	20.1	26.7	6.6	10.1	10.1	3.5	3.5	530	560	30	
22	37	48.7	11.7	11.60756652	C	3	20.1	22.9	2.8	17.4	17.4	14.6	14.6	500	540.5	40.5	
23	37	48.8	11.8	11.85718361	C	3	20.1	22.9	2.8	17.8	17.8	15	15	510	568.1	58.1	
24	36.65	46.4	9.75	7.35847919	C	3	20.1	21.7	1.6	14.2	14.2	12.6	12.6	538	581.5	43.5	
25	36.65	46.3	9.65	7.171249129	C	3	20.1	24.1	4	8.4	8.4	4.4	4.4	538	573	35	
26	37	46.5	9.5	6.895814019	C	3	20.1	21.4	1.3	15.2	15.2	13.9	13.9	510	557	47	
27	37	44.8	7.8	4.212239278	C	3	20.1	21.4	1.3	8.2	8.2	6.9	6.9	540	568.6	28.6	
28	37	50.1	13.1	15.39766143	C	3	20.1	23.9	3.8	19.4	19.4	15.6	15.6	535	589.6	54.6	
29	36.6	50.9	14.3	19.16975756	C	3	20.1	24.6	4.5	21.1	21.1	16.6	16.6	485	549.5	64.5	
30	36.6	60	23.4	65.66231199	C	3	20.1	28.5	8.4	51	51	42.6	42.6	485	674.6	189.6	
31	36.9	49.9	13	15.10549312	C	3	20.1	22.6	2.5	22.9	22.9	20.4	20.4	520	586.6	66.6	
32	36.9	45.4	8.5	5.221843371	C	3	20.1	21.5	1.4	10.9	10.9	9.5	9.5	550	576	26	
33	36.9	47.7	10.8	9.502457054	C	3	20.1	25.5	5.4	10.1	10.1	4.7	4.7	510	560	50	
34	36.9	50	13.1	15.39766143	C	3	20.1	23.1	3	19.8	19.8	16.8	16.8	520	569	49	
35	36.9	51	14.1	18.50650072	C	3	20.1	23.2	3.1	25.5	25.5	22.4	22.4	500	582.6	82.6	
36	36.9	53.3	16.4	27.00139157	C	3	20.1	23.9	3.8	29.2	29.2	25.4	25.4	526.6	653.7	127.1	
37	36.9	54.6	17.7	32.67455584	C	3	20.1	24.2	4.1	37.5	37.5	33.4	33.4	527.2	639.1	111.9	
38	36.9	53	16.1	25.78346119	C	3	20.1	23.1	3	31.5	31.5	28.5	28.5	490.1	629.2	139.1	
39	36.9	59.8	22.9	62.2107207	C	3	20.1	25.2	5.1	69.3	69.3	64.2	64.2	542.7	806.7	264	
40	36.9	57.3	20.4	46.596355	C	3	20.1	30.3	10.2	33	33	22.8	22.8	494	552.4	58.4	
41	36.9	45.1	8.2	4.773216769	C	6	20.1	21.8	1.7	10.7	10.7	9	9	520	538.7	18.7	
42	36.9	45	8.1	4.629020179	C	6	20.1	21.1	1	12.5	12.5	11.5	11.5	530	565.5	35.5	
43	36.9	45	8.1	4.629020179	C	6	20.1	21	0.9	14.7	14.7	13.8	13.8	525	559.7	34.7	
44	36.9	44.7	7.8	4.212239278	C	6	20.1	23.4	3.3	6.9	6.9	3.6	3.6	525	560	35	
45	36.9	46.8	9.9	7.644771575	C	6	20.1	21.5	1.4	20.1	20.1	18.7	18.7	520	557.2	37.2	
46	36.9	46.7	9.8	7.453181821	C	6	20.1	21.6	1.5	17.5	17.5	16	16	510	547.4	37.4	
47	36.2	44.4	8.2	4.773216769	C	6	20.1	21.2	1.1	11.9	11.9	10.8	10.8	515	546.2	31.2	
48	36.2	44.3	8.1	4.629020179	C	6	20.1	21.6	1.5	10.7	10.7	9.2	9.2	530	559.1	29.1	
49	36.2	46.2	10	7.83928632	C	6	20.1	22.9	2.8	13.3	13.3	10.5	10.5	517	540.8	23.8	
50	36.2	49	12.8	14.53119902	C	6	20.1	22.5	2.4	28.8	28.8	26.4	26.4	480	538.8	58.8	
51	36.2	46.7	10.5	8.8562481	C	6	20.1	22.4	2.3	16.8	16.8	14.5	14.5	500	529.6	29.6	
52	36.2	46.9	10.7	9.28401794	C	6	20.1	24.5	4.4	11.7	11.7	7.3	7.3	500	535	35	
53	36.2	51.1	14.9	21.24428885	C	6	20.1	24.5	4.4	31.3	31.3	26.9	26.9	460	507.4	47.4	
54	36.2	51	14.8	20.88963325	C	6	20.1	22.7	2.6	37.5	37.5	34.9	34.9	480	592.8	112.8	
55	36.2	51	14.8	20.88963325	C	6	20.1	23.9	3.8	31.7	31.7	27.9	27.9	460	536.2	76.2	
56	36.2	44.2	8	4.487469339	C	6	20.1	21.1	1	11.8	11.8	10.8	10.8	525	552.6	27.6	
57	36.2	50.3	14.1	18.50650072	C	6	20.1	24.4	4.3	24.9	24.9	20.6	20.6	500	548.8	48.8	
58	36.2	47.9	11.7	11.60756652	C	6	20.1	23.9	3.8	16.6	16.6	12.8	12.8	505.4	539.9	34.5	
59	36.2	46.5	10.3	8.440527487	C	6	20.1	21.9	1.8	19.7	19.7	17.9	17.9	517.8	558.8	41	
60	36.2	46.4	10.2	8.23714965	C	6	20.1	21.8	1.7	17.2	17.2	15.5	15.5	493.3	545.5	52.2	
61	36.2	46.7	10.5	8.8562481	C	9	20.1	21.7	1.6	25.2	25.2	23.6	23.6	505	554.8	49.8	
62	36.2	44.7	8.5	5.221843371	C	9	20.1	23.6	3.5	9.9	9.9	6.4	6.4	482.4	512.4	30	
63	36.2	49	12.8	14.53119902	C	9	20.1	22.8	2.7	29.3	29.3	26.6	26.6	505	569.7	64.7	
64	36.2	50.7	14.5	19.84707598	C	9	20.1	22.6	2.5	38.8	38.8	36.3	36.3	468.3	555.6	87.3	
65	36.2	44.5	8.3	4.920075393	C	9	20.1	21.3	1.2	14.8	14.8	13.6	13.6	504.8	537.5	32.7	
66	36.2	47.5	11.3	10.6407597	C	9	20.1	22.7	2.6	21.2	21.2	18.6	18.6	493.3	522.5	29.2	
67	36.2	45.2	9	6.02397	C	9	20.1	21.7	1.6	15.4	15.4	13.8	13.8	517.2	539.4	22.2	
68	36.2	50.2	14	18.18011458	C	9	20.1	22.5	2.4	38	38	35.6	35.6	499.5	581.2	81.7	
69	36.2	45.5	9.3	6.538586872	C	9	20.1	21.9	1.8	15.2	15.2	13.4	13.4	526.8	554.3	27.5	



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO C-AJUSTE CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO													Observaciones
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alsc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)	Longitud [L] (cm)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
70	36.2	48.7	12.5	13.69466961	C	9	20.1	24	3.9	22.2	22.2	18.3	18.3	472.6	502.4	29.8		
71	36.2	49.5	13.3	15.99210487	C	9	20.1	25.5	5.4	20.8	20.8	15.4	15.4	472.5	517.5	45		
72	36.2	48.4	12.2	12.88772034	C	9	20.1	22	1.9	28.1	28.1	26.2	26.2	467.3	541.5	74.2		
73	36.2	45.6	9.4	6.715775361	C	9	20.1	21.3	1.2	20.3	20.3	19.1	19.1	475	518.2	43.2		
74	36.2	45.4	9.2	6.364233351	C	9	20.1	21.5	1.4	18.2	18.2	16.8	16.8	507.9	541.9	34		
75	36.2	51.1	14.9	21.24428885	C	9	20.1	24.5	4.4	36.1	36.1	31.7	31.7	503	564	61		
76	36.2	44.5	8.3	4.920075393	C	9	20.1	21.3	1.2	15.6	15.6	14.4	14.4	467.5	497.2	29.7		
77	36.2	49.2	13	15.10549312	C	9	20.1	23.4	3.3	30.1	30.1	26.8	26.8	484.9	526.6	41.7		
78	36.2	50.5	14.3	19.16975756	C	9	20.1	24	3.9	34.8	34.8	30.9	30.9	492.4	543.5	51.1		
79	36.2	47.3	11.1	10.1761611	C	9	20.1	21.8	1.7	28.1	28.1	26.4	26.4	480.3	520.5	40.2		
80	36.2	50.7	14.5	19.84707598	C	9	20.1	24.3	4.2	29.5	29.5	25.3	25.3	499.2	558.5	59.3		
81	36.2	49.4	13.2	15.69319441	C	11	20.1	23.2	3.1	31.7	31.7	28.6	28.6	469	514.5	45.5		
82	36.2	50.4	14.2	18.83637759	C	11	20.1	25	4.9	29.9	29.9	25	25	475.4	515.7	40.3		
83	36.2	48.31619238	12.11619238	12.66752959	C	11	20.1	23.77313313	3.673133132	26.27932556	26.27932556	22.60619243	22.60619243	505.4	535.4824456	30.0824456		
84	36.2	51	14.8	20.88963325	C	11	20.1	25.8	5.7	29.4	29.4	23.7	23.7	474	534	60		
85	36.2	47.6	11.4	10.87773952	C	11	20.1	22.2	2.1	27	27	24.9	24.9	518.1	562	43.9		
86	36.2	48.40806781	12.20806781	12.90903741	C	11	20.1	24.55785423	4.457854232	23.53061484	23.53061484	19.07276061	19.07276061	517.8	536.5649223	18.76492227		
87	36.2	49.5	13.3	15.99210487	C	11	20.1	23.1	3	30.6	30.6	27.6	27.6	516.4	574.4	58		
88	36.2	58.11224555	21.91224555	55.7177201	C	11	20.1	30.18392723	10.08392723	62.35477648	62.35477648	52.27084925	52.27084925	493.3	566.1433054	72.84330543		
89	36.2	44.7	8.5	5.221843371	C	11	20.1	22.2	2.1	13.5	13.5	11.4	11.4	521.1	556.1	35		
90	36.2	47.64571144	11.44571144	10.9871109	C	11	20.1	23.67710506	3.577105065	22.39755832	22.39755832	18.82045325	18.82045325	505	525.3182534	20.31825339		
91	36.2	46.9	10.7	9.28401794	C	11	20.1	22	1.9	23.4	23.4	21.5	21.5	519.2	557.2	38		
92	36.2	44.9	8.7	5.534452422	C	11	20.1	21.2	1.1	20	20	18.9	18.9	526.7	551.3	24.6		
93	36.2	45.4	9.2	6.364233351	C	11	20.1	21.3	1.2	22.1	22.1	20.9	20.9	524.4	568.8	44.4		
94	36.2	46.1	9.9	7.644771575	C	11	20.1	21.7	1.6	20.3	20.3	18.7	18.7	477.5	521.3	43.8		
95	36.2	50.5	14.3	19.16975756	C	11	20.1	25.1	5	31.2	31.2	26.2	26.2	479.7	544.7	65		
96	36.2	49.41344739	13.21344739	15.73319324	C	11	20.1	24.31972506	4.219725064	29.47761928	29.47761928	25.25789421	25.25789421	482.4	515.7164477	33.31644772		
97	36.2	47.8	11.6	11.36112923	C	11	20.1	22.4	2.3	25.4	25.4	23.1	23.1	520	560.3	40.3		
98	36.2	53.8996948	17.6996948	32.67314732	C	11	20.1	26.76947187	6.669471874	49.72614881	49.72614881	43.05667694	43.05667694	505	559.1891205	54.1891205		
99	36.2	50	13.8	17.53776485	C	11	20.1	23	2.9	40.1	40.1	37.2	37.2	469.5	530.2	60.7		
100	36.2	45.8	9.6	7.078717967	C	11	20.1	22.2	2.1	18.3	18.3	16.2	16.2	488.7	513.4	24.7		

Columna No.1: Número consecutivo de experimento .

Columna No.2: Altura de la cresta del vertedero tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.3: Altura de la lamina de agua sobre la cresta tomada con el medidor de aguja.

Columna No.4: Altura de carga en el vertedero. $h = als - ac$

Columna No.5: Caudal experimento. $Q = 0.02479h^{2.5}$

Columna No.6: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.7: Inclinación del canal.

Columna No.8: Profundidad del fondo del canal tomada con el medidor de aguja, tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.9: Profundidad de la lamina de agua en la sección inicial del resalto, tomada con el medidor de aguja

Columna No.10: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto. $d_1 = [pfc - pi]$

Columna No.11: Profundidad de la lamina de agua en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.12: Profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal. $d_2 = pf$

Columna No.13: Altura del Resalto Hidraulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.14: Profundidad del flujo aguas abajo del Resalto Hidráulico, tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.15: Ubicación del punto inicial del Resalto Hidráulico respecto a un punto determinado, tomada con la cinta métrica adosada al canal.

Columna No.16: Ubicación del punto final del Resalto Hidráulico con respecto a un punto de referencia determinado, tomada con la cinta métrica adosada al canal.



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO C-VALIDACIÓN

CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO												Observaciones
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alsc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)	Longitud [L] (cm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	36.2	48.9952483	12.7952483	14.51771687	C	2	20.1	24.09863109	3.998631093	14.48876565	14.48876565	10.49013456	14.48876565	505.4	545.6902197	40.29021968	
2	36.2	45.72388447	9.523884467	6.939238635	C	2	20.1	21.85754711	1.757547108	12.0859035	12.0859035	10.3283564	12.0859035	517.8	554.9628643	37.16286432	
3	36.2	58.15472404	21.95472404	55.98819718	C	2	20.1	25.60336001	5.50336001	47.67793997	47.67793997	42.17457996	47.67793997	493.3	701.6703309	208.3703309	
4	36.2	58.64642122	22.44642122	59.17582183	C	2	20.1	25.32328836	5.223288361	61.55195509	61.55195509	56.32866673	61.55195509	505	732.740502	227.740502	
5	36.2	50.93138602	14.73138602	20.64835944	C	2	20.1	22.6313542	2.531354197	26.03821327	26.03821327	23.50685907	26.03821327	482.4	592.9921244	110.5921244	
6	36.2	52.11021366	15.91021366	25.03032892	C	5	20.1	26.72717936	6.627179356	23.16435489	23.16435489	16.53717553	23.16435489	505	545.6901415	40.69014154	
7	36.2	53.81847657	17.61847657	32.29961975	C	5	20.1	24.25432428	4.154324284	45.51224018	45.51224018	41.35791589	45.51224018	468.3	593.7297494	125.4297494	
8	36.2	59.41808228	23.21808228	64.39355345	C	5	20.1	25.96648219	5.866482192	65.78813152	65.78813152	59.92164933	65.78813152	504.8	687.2735341	182.4735341	
9	36.2	56.9456731	20.7456731	48.59542138	C	5	20.1	24.70155869	4.601558693	56.87807594	56.87807594	52.27651725	56.87807594	493.3	654.4540882	161.1540882	
10	36.2	53.39074363	17.19074363	30.37478312	C	5	20.1	23.36936953	3.26936953	41.91647553	41.91647553	38.647106	41.91647553	517.2	648.3060255	131.1060255	
11	36.2	51.99240751	15.79240751	24.56956018	C	7	20.1	26.4663457	6.366345697	27.86166201	27.86166201	21.49531632	27.86166201	499.5	545.7463321	46.24633213	
12	36.2	54.82248169	18.62248169	37.0997016	C	7	20.1	25.47823798	5.378237977	52.35695058	52.35695058	46.9787126	52.35695058	526.8	619.8317829	93.03178292	
13	36.2	54.94278386	18.74278386	37.70177258	C	7	20.1	24.80821563	4.708215627	55.72840395	55.72840395	51.02018832	55.72840395	472.6	589.9480956	117.3480956	
14	36.2	47.57329448	11.37329448	10.81414621	C	7	20.1	21.88789561	1.787895614	26.40077553	26.40077553	24.61287992	26.40077553	472.5	532.2047168	59.70471675	
15	36.2	48.47163435	12.27163435	13.07773531	C	7	20.1	22.0187175	1.918717496	31.54757186	31.54757186	29.62885436	31.54757186	467.3	539.508456	72.20845601	
16	36.2	49.23208905	13.03208905	15.19888132	C	10	20.1	24.76058847	4.660588468	23.12726451	23.12726451	18.46667604	23.12726451	475	500.6015917	25.60159168	
17	36.2	51.32969189	15.12969189	22.07251071	C	10	20.1	23.91440947	3.814409469	44.57209709	44.57209709	40.75768762	44.57209709	507.9	571.4512513	63.5512513	
18	36.2	57.96804372	21.76804372	54.8056117	C	10	20.1	26.16470043	6.064700426	79.46332902	79.46332902	73.39862859	79.46332902	503	643.9083627	140.9083627	
19	36.2	54.35296649	18.15296649	34.80531286	C	10	20.1	24.26315516	4.163155156	56.41906007	56.41906007	52.25590492	56.41906007	467.5	581.5390339	114.0390339	
20	36.2	56.84875592	20.64875592	48.02985254	C	10	20.1	24.77032478	4.670324783	89.18999028	89.18999028	84.5196655	89.18999028	484.9	628.0867261	143.1867261	

Columna No.1: Número consecutivo de experimento .

Columna No.2: Altura de la cresta del vertedero tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.3: Altura de la lamina de agua sobre la cresta tomada con el medidor de aguja.

Columna No.4: Altura de carga en el vertedero. $h = a_{lsc} - ac$

Columna No.5: Caudal experimento. $Q = 0.02479h^{2.5}$

Columna No.6: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.7: Inclinación del canal.

Columna No.8: Profundidad del fondo del canal tomada con el medidor de aguja, tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.9: Profundidad de la lamina de agua en la sección inicial del resalto, tomada con el medidor de aguja

Columna No.10: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto. $d_1 = |pfc - pi|$

Columna No.11: Profundidad de la lamina de agua en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.12: Profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal. $d_2 = pf$

Columna No.13: Altura del Resalto Hidraulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.14: Profundidad del flujo aguas abajo del Resalto Hidráulico, tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.15: Ubicación del punto inicial del Resalto Hidráulico respecto a un punto determinado, tomada con la cinta metrica adosada al canal.

Columna No.16: Ubicación del punto final del Resalto Hidráulico con respecto a un punto de referencia determinado, tomada con la cinta metrica adosada al canal.



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CAÑALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO C-AJUSTE
CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	AGUAS ARRIBA RESALTO					AGUAS ABAJO RESALTO					Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d2/d1	E2/E1	L/d1	L/d2	h/y1	h/E1	y1/E1	y2/E1	ΔE	ΔE/E1	Observaciones
			Caudal [Q] (m³/s)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (m)	Velocidad Inicial [v1] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F1]	Energía Total Sección Inicial [E1] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (m)	Velocidad Inicial [v2] (m/s)	Número de Froude Sección Final [F2]	Energía Total Sección Final [E2] (m)														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
1	C	1	0.022	0.056	1.75	2.366	0.222	0.187	0.525	0.387719956	0.201053412	0.551	0.131	3.339	0.904	9.838	2.946	2.340	0.589	0.252	0.841	0.021	0.096		
2	C	1	0.022	0.051	1.93	2.722	0.249	0.189	0.520	0.381581981	0.202757559	0.535	0.138	3.706	0.813	10.489	2.830	2.706	0.554	0.205	0.758	0.047	0.187		
3	C	1	0.021	0.032	2.92	5.207	0.484	0.262	0.356	0.222276637	0.268471319	1.049	0.230	8.188	0.555	32.776	4.003	7.189	0.475	0.066	0.541	0.216	0.445		
4	C	1	0.021	0.03	3.11	5.737	0.539	0.27	0.346	0.212471218	0.276093514	0.880	0.240	9.000	0.512	29.329	3.259	8.001	0.445	0.056	0.501	0.263	0.488		
5	C	1	0.020	0.034	2.61	4.516	0.398	0.244	0.363	0.234895073	0.25073041	1.000	0.210	7.176	0.630	29.407	4.098	6.178	0.475	0.085	0.613	0.147	0.370		
6	C	1	0.014	0.025	2.59	5.232	0.380	0.214	0.303	0.20980126	0.218668741	0.732	0.189	8.560	0.576	29.276	3.420	7.561	0.498	0.066	0.563	0.161	0.424		
7	C	1	0.013	0.05	1.15	1.639	0.138	0.127	0.452	0.404865026	0.137407061	1.200	0.077	2.540	0.995	23.996	9.447	1.540	0.558	0.362	0.920	0.001	0.005		
8	C	1	0.013	0.019	3.02	6.997	0.495	0.2	0.287	0.204866454	0.204196387	0.613	0.181	10.526	0.413	32.258	3.065	9.528	0.366	0.038	0.404	0.290	0.587		
9	C	1	0.012	0.018	3.06	7.278	0.511	0.208	0.265	0.185278411	0.211569578	0.920	0.190	11.556	0.414	4.222	10.557	51.103	0.372	0.035	0.407	0.299	0.586		
10	C	1	0.019	0.043	1.99	3.066	0.258	0.183	0.468	0.349218018	0.194157021	0.717	0.140	4.256	0.754	16.672	3.917	3.256	0.544	0.167	0.710	0.063	0.246		
11	C	1	0.019	0.034	2.47	4.284	0.360	0.207	0.406	0.285196821	0.215417121	0.811	0.173	6.088	0.598	23.849	3.917	5.089	0.480	0.094	0.575	0.145	0.402		
12	C	1	0.018	0.048	1.72	2.509	0.209	0.175	0.472	0.360425437	0.186365087	0.549	0.127	3.646	0.893	11.436	3.137	2.646	0.609	0.230	0.839	0.022	0.107		
13	C	1	0.017	0.038	2.02	3.313	0.255	0.199	0.386	0.276452215	0.206603212	0.469	0.161	5.237	0.811	12.340	2.356	4.238	0.632	0.149	0.781	0.048	0.189		
14	C	1	0.017	0.033	2.33	4.094	0.321	0.212	0.363	0.251417728	0.218699332	0.645	0.179	6.424	0.682	19.542	3.042	5.425	0.558	0.103	0.661	0.102	0.318		
15	C	1	0.015	0.032	2.08	3.720	0.263	0.19	0.351	0.257146037	0.196280831	0.566	0.158	5.938	0.745	17.685	2.978	4.938	0.600	0.122	0.722	0.067	0.255		
16	C	1	0.021	0.027	6.834	6.834	0.674	0.281	0.338	0.203538808	0.286819754	0.929	0.254	10.407	0.426	34.402	3.306	9.409	0.377	0.040	0.417	0.387	0.574		
17	C	1	0.021	0.039	2.39	3.870	0.343	0.211	0.442	0.307554449	0.2209777	0.708	0.172	5.410	0.643	18.151	3.355	4.411	0.501	0.114	0.614	0.122	0.357		
18	C	1	0.012	0.052	1.08	1.514	0.115	0.107	0.525	0.512778569	0.121065247	0.211	0.055	2.058	1.051	4.057	1.058	1.058	0.477	0.451	0.929	-0.006	-0.051		
19	C	1	0.016	0.039	1.90	3.071	0.234	0.183	0.405	0.302090994	0.191348924	0.643	0.144	4.692	0.818	16.485	3.513	3.693	0.615	0.167	0.782	0.043	0.182		
20	C	1	0.013	0.019	3.08	7.142	0.517	0.19	0.308	0.225850779	0.194845077	0.750	0.171	10.000	0.377	39.468	3.947	9.002	0.331	0.037	0.368	0.322	0.623		
21	C	3	0.012	0.066	0.83	1.037	0.117	0.101	0.545	0.547901491	0.116139124	0.300	0.035	1.530	0.992	4.539	2.966	0.532	0.300	0.563	0.863	0.001	0.008		
22	C	3	0.012	0.028	1.88	3.598	0.230	0.174	0.303	0.232251176	0.178686402	0.404	0.146	6.214	0.776	14.444	2.324	5.223	0.635	0.122	0.756	0.051	0.224		
23	C	3	0.012	0.028	1.92	3.675	0.247	0.178	0.303	0.229293717	0.182672816	0.580	0.150	6.357	0.739	20.722	3.260	5.366	0.607	0.113	0.720	0.065	0.261		
24	C	3	0.007	0.016	2.09	5.280	0.261	0.142	0.236	0.199708322	0.144827842	0.434	0.126	8.875	0.554	27.150	3.059	7.887	0.482	0.061	0.543	0.117	0.446		
25	C	3	0.007	0.04	0.81	1.302	0.092	0.084	0.388	0.427776077	0.091675147	0.350	0.044	2.100	0.995	8.738	4.161	1.103	0.478	0.434	0.912	0.000	0.005		
26	C	3	0.007	0.013	2.41	6.756	0.334	0.152	0.206	0.168899908	0.154167402	0.469	0.139	11.692	0.462	36.104	3.088	10.708	0.416	0.039	0.455	0.180	0.538		
27	C	3	0.004	0.013	1.47	4.127	0.139	0.082	0.233	0.26051508	0.084778779	0.286	0.069	6.308	0.612	21.970	3.483	5.316	0.498	0.094	0.592	0.054	0.388		
28	C	3	0.015	0.038	1.84	3.019	0.239	0.164	0.361	0.261693408	0.20063379	0.545	0.156	5.105	0.652	14.349	2.811	4.112	0.652	0.158	0.810	0.039	0.162		
29	C	3	0.019	0.045	1.94	2.916	0.270	0.211	0.413	0.287232481	0.219692085	0.644	0.166	4.689	0.814	14.314	3.053	3.695	0.616	0.167	0.782	0.050	0.186		
30	C	3	0.066	0.084	3.55	3.917	0.827	0.51	0.585	0.261819216	0.527456116	1.893	0.426	6.071	0.638	22.540	3.713	5.080	0.516	0.101	0.617	0.299	0.362		
31	C	3	0.015	0.025	2.75	5.550	0.444	0.229	0.300	0.200180743	0.233581994	0.665	0.204	9.160	0.526	26.603	2.904	8.173	0.459	0.056	0.515	0.211	0.474		
32	C	3	0.005	0.014	1.70	4.578	0.174	0.109	0.218	0.210729194	0.111416853	0.260	0.095	7.786	0.640	18.546	2.382	6.796	0.546	0.080	0.626	0.063	0.360		
33	C	3	0.010	0.054	0.80	1.100	0.113	0.101	0.428	0.429926749	0.110321477	0.499	0.047	1.870	0.979	9.247	4.944	0.873	0.418	0.478	0.896	0.002	0.021		
34	C	3	0.015	0.03	2.33	4.303	0.333	0.198	0.353	0.253803492	0.204368465	0.489	0.168	6.600	0.614	16.311	2.471	5.609	0.505	0.090	0.595	0.129	0.386		
35	C	3	0.019	0.031	2.71	4.924	0.449	0.255	0.330	0.208715475	0.260546562	0.825	0.224	8.226	0.580	26.609	3.235	7.237	0.498	0.069	0.567	0.189	0.420		
36	C	3	0.027	0.038	3.23	5.294	0.636	0.292	0.420	0.248514928	0.301004554	1.269	0.254	7.684	0.473	33.402	4.347	6.695	0.399	0.060	0.459	0.335	0.527		
37	C	3	0.033	0.041	3.62	5.716	0.768	0.375	0.396	0.206634771	0.38299489	1.117	0.334	9.146	0.498	27.255	2.980	8.159	0.435	0.053	0.488	0.385	0.502		
38	C	3	0.026	0.03	3.91	7.206	0.881	0.315	0.372	0.211795144	0.322055324	1.389	0.285	10.500	0.366	46.303	4.410	9.514	0.324	0.034	0.358	0.559	0.634		
39	C	3	0.062	0.051	5.54	7.844	1.756	0.693	0.408	0.156605133	0.701486324	2.636	0.642	13.588	0.399	51.694	3.804	12.607	0.366	0.029	0.395	1.055	0.601		
40	C	3	0.047	0.102	2.08	2.077	0.352	0.33	0.642	0.356961722	0.350995762	0.583	0.228	3.235	0.997	5.718	1.767	2.240	0.648	0.289	0.937	0.001	0.003		
41	C	6	0.005	0.017	1.28	3.134	0.119	0.107	0.203	0.198459152	0.10909561	0.186	0.090	6.294	0.913	10.940	1.738	5.329	0.754	0.142	0.896	0.010	0.087		
42	C	6	0.005	0.01	2.10	6.736	0.273	0.168	0.460	0.182426226	0.126444155	0.353	0.115	12.500	0.464	35.306	2.824	11.569	0.422	0.036	0.458	0.146	0.536		
43	C	6	0.005	0.009	2.34	7.890	0.324	0.147	0.143	0.119522237	0.148044237	0.345	0.138	16.333	0.457	38.344	2.348	15.423	0.426	0.028	0.454	0.176	0.543		
44	C	6	0.004	0.033	0.58	1.023	0.087	0.069	0.277	0.338201118	0.072924483	0.348	0.036	2.091	0.842	10.548	5.045	1.102	0.418	0.379	0.797	0.014	0.158		
45	C	6	0.008	0.014	2.48	6.716	0.367	0.201	0.173	0.123454256	0.202523325	0.370	0.187	14.357	0.552	26.426	1.841	13.436	0.510	0.038	0.548	0.164	0.448		
46	C	6	0.007	0.015	2.26	5.904	0.314	0.175	0.194	0.148156355	0.17691013	0.372	0.160	11.667	0.563	24.797	2.125	10.731	0.510	0.048	0.557	0.137	0.437		
47	C	6	0.005	0.011																					



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO C-AJUSTE
CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Caudal [Q] (m³/s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d2/d1	E2/E1	L/d1	L/d2	h/y1	h/E1	y1/E1	y2/E1	ΔE	ΔE/E1	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (m)	Velocidad Inicial [v1] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F1]	Energía Total Sección Inicial [E1] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (m)	Velocidad Inicial [v2] (m/s)	Número de Froude Sección Final [F2]	Energía Total Sección Final [E2] (m)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
94	C	11	0.008	0.016	2.17	5.533	0.340	0.203	0.171	0.122430602	0.204493457	0.430	0.187	12.688	0.602	26.872	2.118	11.925	0.551	0.046	0.598	0.135	0.398	
95	C	11	0.019	0.05	1.74	2.511	0.328	0.312	0.279	0.161121782	0.31597539	0.638	0.263	6.240	0.964	12.761	2.045	5.357	0.802	0.150	0.952	0.012	0.036	
96	C	11	0.016	0.042197251	1.69	2.659	0.251	0.294776193	0.243	0.143995127	0.297776078	0.327	0.253	6.986	1.185	7.750	1.109	6.116	1.008	0.165	1.173	-0.046	-0.185	
97	C	11	0.011	0.023	2.25	4.771	0.356	0.254	0.203	0.129999132	0.256106838	0.396	0.231	11.043	0.719	17.200	1.557	10.250	0.649	0.063	0.713	0.100	0.281	
98	C	11	0.033	0.066694719	2.23	2.779	0.422	0.497261488	0.299	0.136484477	0.501807891	0.532	0.432	7.456	1.190	7.976	1.070	6.595	1.024	0.155	1.179	-0.080	-0.190	
99	C	11	0.018	0.029	2.75	5.202	0.529	0.401	0.199	0.101164284	0.403014259	0.596	0.373	13.828	0.761	20.546	1.486	13.086	0.704	0.054	0.757	0.126	0.239	
100	C	11	0.007	0.021	1.53	3.407	0.187	0.183	0.176	0.13244864	0.184575661	0.242	0.162	8.714	0.985	11.546	1.325	7.877	0.867	0.110	0.977	0.003	0.015	

Columna No.1: Número consecutivo del experimento.

Columna No.2: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.3: Inclinación del canal.

Columna No.4: Caudal del experimento.

Columna No.5: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico.

Columna No.6: Velocidad media en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $v_1 = \frac{Q}{bd_1}$; $b = 0.22$ m (Ancho del Canal).

Columna No.7: Número de Froude en la sección inicial del Resalto. $F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gd_1 \cos \theta}}$; g: Aceleración de la gravedad terrestre.

Columna No.8: Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $E_1 = z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + d_1 \cos \theta$; z_1 = Altura del canal respecto a un datum determinado. (Para estos experimentos $z_1 = L \tan \theta$).

Columna No.9: Profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico.

Columna No.10: Velocidad media en la sección final del Resalto Hidráulico. $v_2 = \frac{Q}{bd_2}$

Columna No.11: Número de Froude en la sección final del Resalto Hidráulico. $F_2 = \frac{v_2}{\sqrt{gd_2 \cos \theta}}$

Columna No.12: Energía total en la sección final del Resalto Hidráulico. $E_2 = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + d_2 \cos \theta$

Columna No.13: Longitud del remolino turbulento del Resalto Hidráulico.

Columna No.14: Altura del Resalto Hidráulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.15: Relación entre profundidades conjugadas del Resalto Hidráulico (Profundidad inicial y secunente). $\frac{d_2}{d_1}$

Columna No.16: Relación entre la Energía total final e inicial del Resalto Hidráulico (Eficiencia del Resalto Hidráulico).

Columna No.17: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1}$

Columna No.18: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_2}$

Columna No.19: Relación entre la longitud y la profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1 \cos \theta}$

Columna No.20: Relación entre la altura Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{h}{E_1}$

Columna No.21: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.22: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.23: Pérdida de Energía ocasionada por el Resalto Hidráulico. $\Delta E = E_1 - E_2$

Columna No.24: Relación entre la pérdida de Energía y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico.



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO C-VALIDACIÓN

CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Caudal [Q] (m³/s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d2/d1	E2/E1	L/d1	L/d2	h/y1	h/E1	y1/E1	y2/E1	ΔE	ΔE/E1	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (m)	Velocidad Inicial [v1] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F1]	Energía Total Sección Inicial [E1] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (m)	Velocidad Inicial [v2] (m/s)	Número de Froude Sección Final [F2]	Energía Total Sección Final [E2] (m)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	C	2	0.015	0.03986311	1.65	2.636	0.193	0.144887657	0.455	0.382143412	0.155460444	0.403	0.105	3.623	0.806	10.070	2.779	2.626	0.544	0.207	0.751	0.037	0.194	
2	C	2	0.007	0.017575471	1.79	4.323	0.195	0.120859035	0.261	0.239755332	0.124330566	0.371	0.103	6.877	0.639	21.132	3.073	5.881	0.531	0.090	0.621	0.070	0.361	
3	C	2	0.056	0.0550336	4.62	6.295	1.218	0.4767794	0.534	0.246885393	0.491300972	2.082	0.422	8.663	0.403	37.839	4.368	7.669	0.346	0.045	0.392	0.726	0.597	
4	C	2	0.059	0.052232884	5.15	7.196	1.483	0.615519551	0.437	0.177892098	0.62525286	2.276	0.563	11.784	0.422	43.574	3.698	10.791	0.380	0.035	0.415	0.858	0.578	
5	C	2	0.021	0.025313542	3.71	7.443	0.765	0.260382133	0.360	0.225602505	0.267004365	1.105	0.235	10.286	0.349	43.662	4.245	9.293	0.307	0.033	0.341	0.498	0.651	
6	C	5	0.025	0.066271794	1.72	2.133	0.252	0.231643549	0.491	0.326442687	0.243939109	0.405	0.166	3.495	0.969	6.117	1.750	2.509	0.658	0.262	0.920	0.008	0.031	
7	C	5	0.032	0.041543243	3.53	5.546	0.787	0.455122402	0.323	0.152959267	0.460426286	1.250	0.414	10.955	0.585	30.078	2.745	9.997	0.526	0.053	0.578	0.327	0.415	
8	C	5	0.064	0.058664822	4.99	6.589	1.486	0.657881315	0.445	0.175465511	0.86797025	1.818	0.599	11.214	0.449	30.986	2.763	10.257	0.403	0.039	0.443	0.818	0.551	
9	C	5	0.049	0.046015587	4.80	7.158	1.361	0.568780759	0.388	0.164720901	0.576467753	1.605	0.523	12.361	0.424	34.888	2.823	11.408	0.384	0.034	0.418	0.784	0.576	
10	C	5	0.030	0.032693695	4.22	7.471	1.056	0.419164755	0.329	0.162744661	0.424694594	1.306	0.387	12.821	0.402	39.949	3.116	11.870	0.366	0.031	0.397	0.631	0.598	
11	C	7	0.025	0.063663457	1.75	2.228	0.276	0.27861662	0.401	0.243362867	0.286805724	0.459	0.215	4.376	1.038	7.210	1.647	3.409	0.779	0.229	1.008	-0.010	-0.038	
12	C	7	0.037	0.05378238	3.14	4.333	0.668	0.523569506	0.322	0.142651506	0.528956974	0.923	0.470	9.735	0.792	17.169	1.764	8.808	0.704	0.080	0.784	0.139	0.208	
13	C	7	0.038	0.047082156	3.64	5.376	0.865	0.557284039	0.308	0.132012277	0.562103806	1.165	0.511	11.836	0.650	24.738	2.090	10.925	0.590	0.054	0.644	0.303	0.350	
14	C	7	0.011	0.017878956	2.75	6.589	0.476	0.264007755	0.186	0.116127391	0.265774634	0.593	0.246	14.766	0.559	33.145	2.245	13.877	0.518	0.037	0.555	0.210	0.441	
15	C	7	0.013	0.019187175	3.10	7.168	0.596	0.315475719	0.188	0.107510553	0.317285345	0.717	0.296	16.442	0.532	37.353	2.272	15.565	0.497	0.032	0.529	0.279	0.468	
16	C	10	0.015	0.046605885	1.48	2.209	0.202	0.231272645	0.299	0.19984455	0.235820749	0.252	0.185	4.962	1.165	5.410	1.090	4.039	0.916	0.227	1.143	-0.033	-0.165	
17	C	10	0.022	0.038144095	2.63	4.333	0.501	0.445720971	0.225	0.108473642	0.448303427	0.626	0.408	11.685	0.896	16.408	1.404	10.865	0.815	0.075	0.890	0.052	0.104	
18	C	10	0.055	0.060647004	4.11	5.366	1.164	0.79463329	0.313	0.113146724	0.799642534	1.388	0.735	13.103	0.687	22.881	1.746	12.305	0.631	0.051	0.682	0.365	0.313	
19	C	10	0.035	0.041631552	3.80	5.992	0.975	0.564190601	0.280	0.120108532	0.568198299	1.123	0.523	13.552	0.583	26.976	1.991	12.761	0.537	0.042	0.579	0.407	0.417	
20	C	10	0.048	0.046703248	4.67	6.959	1.408	0.891899903	0.245	0.083388116	0.89495374	1.410	0.846	19.097	0.635	30.193	1.581	18.392	0.601	0.033	0.633	0.513	0.365	

Columna No.1: Número consecutivo del experimento.

Columna No.2: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.3: Inclinación del canal.

Columna No.4: Caudal del experimento.

Columna No.5: Profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico.

Columna No.6: Velocidad media en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $v_1 = \frac{Q}{b d_1}$, $b = 0.22 \text{ m}$ (Ancho del Canal).

Columna No.7: Número de Froude en la sección inicial del Resalto. $F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g d_1 \cos \theta}}$, θ : Aceleración de la gravedad terrestre.

Columna No.8: Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $E_1 = z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + d_1 \cos \theta$; z_1 : Altura del canal respecto a un datum determinado. (Para estos experimentos $z_1 = L \tan \theta$).

Columna No.9: Profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico.

Columna No.10: Velocidad media en la sección final del Resalto Hidráulico. $v_2 = \frac{Q}{b d_2}$.

Columna No.11: Número de Froude en la sección final del Resalto Hidráulico. $F_2 = \frac{v_2}{\sqrt{g d_2 \cos \theta}}$.

Columna No.12: Energía total en la sección final del Resalto Hidráulico. $E_2 = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + d_2 \cos \theta + \frac{h}{2g}$.

Columna No.13: Longitud del remolino turbulento del Resalto Hidráulico.

Columna No.14: Altura del Resalto Hidráulico. $h = d_2 - d_1$.

Columna No.15: Relación entre profundidades conjugadas del Resalto Hidráulico (Profundidad inicial y secuencia). $\frac{d_2}{d_1}$.

Columna No.16: Relación entre la Energía total final e inicial del Resalto Hidráulico (Eficiencia del Resalto Hidráulico).

Columna No.17: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1}$.

Columna No.18: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_2}$.

Columna No.19: Relación entre la longitud y la profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1 \cos \theta}$.

Columna No.20: Relación entre la altura Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{h}{v_1}$.

Columna No.21: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_2 \cos \theta}{v_1}$.

Columna No.22: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{E_1}{d_2 \cos \theta}$.

Columna No.23: Pérdida de Energía ocasionada por el Resalto Hidráulico. $\Delta E = E_1 - E_2$.

Columna No.24: Relación entre la pérdida de Energía y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico.



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO D-E-AJUSTE

CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO												Observaciones
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alasc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)	Longitud [L] (cm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	42.4	48.5	6.1	2.278	E	0	20.8	21.5	0.7	26.2	5.4	4.7	5.4	410	436.1	26.1	
2	42.4	52.1	9.7	7.265	E	0	20.8	22.2	1.4	32.7	11.9	10.5	11.9	277.5	329.5	52	
3	42.4	51.6	9.2	6.364	E	0	20.8	23	2.2	28.9	8.1	5.9	8.1	272.5	301.7	29.2	
4	42.4	54.5	12.1	12.625	E	0	20.8	23.1	2.3	37.3	16.5	14.2	16.5	379	431.4	52.4	
5	42.4	51.4	9	6.024	E	0	20.6	22.3	1.7	28.9	8.3	6.6	8.3	390	428.2	38.2	
6	42.4	54	11.6	11.361	E	0	20.6	23.2	2.6	34.4	13.8	11.2	13.8	440	478.5	38.5	
7	42.4	53.6	11.2	10.407	E	0	20.6	23.6	3	31.1	10.5	7.5	10.5	290	337.5	47.5	
8	42.4	52.9	10.5	8.856	E	0	20.6	22.6	2	32	11.4	9.4	11.4	270	319.1	49.1	
9	39.5	52.7	13.2	15.693	E	0	20.6	22.7	2.1	40.8	20.2	18.1	20.2	350	448.4	98.4	
10	39.5	49.8	10.3	8.441	E	0	20.6	23.1	2.5	30.3	9.7	7.2	9.7	260	294.9	34.9	
11	39.5	49.9	10.4	8.647	E	0	20.6	22.5	1.9	32.3	11.7	9.8	11.7	175	222.6	47.6	
12	39.5	50.2	10.7	9.284	E	0	20.6	22.3	1.7	34.4	13.8	12.1	13.8	340	401.4	61.4	
13	39.5	50.1	10.6	9.069	E	0	20.6	22.3	1.7	34	13.4	11.7	13.4	335	385.9	50.9	
14	39.5	49.9	10.4	8.647	E	0	20.6	22.1	1.5	34.1	13.5	12	13.5	270	331.6	61.6	
15	39.5	50	10.5	8.856	E	0	20.6	22.2	1.6	34.1	13.5	11.9	13.5	360	425.3	65.3	
16	39.5	49.9	10.4	8.647	E	0	20.6	22.4	1.8	33.5	12.9	11.1	12.9	320	380.4	60.4	
17	39.5	50	10.5	8.856	E	0	20.6	22.3	1.7	34.2	13.6	11.9	13.6	250	292.8	42.8	
18	38.7	49.5	10.8	9.502	E	0	20.4	22	1.6	34.5	14.1	12.5	14.1	270	325.7	55.7	
19	38.7	49.4	10.7	9.284	E	0	20.4	24.3	3.9	28.5	8.1	4.2	8.1	260	276.1	16.1	
20	38.7	53.2	14.5	19.847	E	0	20.4	22.8	2.4	45.4	25	22.6	25	345	463.5	118.5	
21	38.7	51.4	12.7	14.249	E	1	20.4	23	2.6	38.1	17.7	15.1	22	240	323.3	83.3	
22	38.7	51.3	12.6	13.970	E	1	20.4	22.8	2.4	38.2	17.8	15.4	23.4	270	348.8	78.8	
23	38.7	51.3	12.6	13.970	E	1	20.4	22.9	2.5	37.1	16.7	14.2	23.7	255	333	78	
24	38.7	51.9	13.2	15.693	E	1	20.4	23.1	2.7	36.8	16.4	13.7	27.4	290	384.5	94.5	
25	38.1	51.35	13.25	15.842	E	1	20.5	24.4	3.9	36.7	16.2	12.3	21.4	215	281	66	
26	38.1	51.3	13.2	15.693	E	1	20.5	23.5	3	36.9	16.4	13.4	23.4	365	443.7	78.7	
27	38.1	51.3	13.2	15.693	E	1	20.5	22.9	2.4	38.8	18.3	15.9	25.2	288	360.7	72.7	
28	38.1	51.5	13.4	16.294	E	1	20.3	27	6.7	33.1	12.8	6.1	16.6	250	340	90	
29	38.1	51.4	13.3	15.992	E	1	20.3	23.6	3.3	37.2	16.9	13.6	23.8	385	434.9	49.9	
30	38.1	51.5	13.4	16.294	E	1	20.3	23	2.7	38.5	18.2	15.5	27.8	240	315.6	75.6	
31	38.1	51.5	13.4	16.294	E	1	20.3	25	4.7	34.8	14.5	9.8	20.7	310	351.1	41.1	
32	38.1	48.55	10.45	8.751	E	1	20.3	24.5	4.2	29	8.7	4.5	12.7	155	247	92	
33	38.1	49	10.9	9.724	E	1	20.3	21.9	1.6	35	14.7	13.1	21.2	210	291.2	81.2	
34	38.1	48.9	10.8	9.502	E	1	20.3	22.8	2.5	31.4	11.1	8.6	17.1	330	382.4	52.4	
35	38.1	48.9	10.8	9.502	E	1	20.3	21.9	1.6	35.2	14.9	13.3	22.2	202	264.6	62.6	
36	38.1	51.9	13.8	17.538	E	1	20.3	23.5	3.2	37.3	17	13.8	26.1	270	340	70	
37	38.1	51.8	13.7	17.222	E	1	20.3	24.7	4.4	35.5	15.2	10.8	23.4	250	300.2	50.2	
38	38.1	52.9	14.8	20.890	E	1	20.3	26.3	6	37.8	17.5	11.5	21.2	355	409.9	54.9	
39	38.1	52.7	14.6	20.191	E	1	20.3	22.9	2.6	45.6	25.3	22.7	31.6	390	508.9	118.9	
40	38.1	52.9	14.8	20.890	E	1	20.3	23.5	3.2	43.1	22.8	19.6	29.6	260	334.7	74.7	
41	38.1	52.1	14	18.180	E	3	20.5	23.9	3.4	40.5	20	16.6	32.5	380	436.6	56.6	
42	38.1	52.1	14	18.180	E	3	20.5	27.8	7.3	34.9	14.4	7.1	23.1	200	260	60	
43	38.1	52.1	14	18.180	E	3	20.5	22.9	2.4	43.2	22.7	20.3	41.3	400	465.8	65.8	
44	38.1	52.1	14	18.180	E	3	20.5	23.7	3.2	43	22.5	19.3	36	230	313.8	83.8	
45	38.1	52.1	14	18.180	E	3	20.5	23.2	2.7	43.6	23.1	20.4	39.4	365	449.7	84.7	
46	38.1	52.1	14	18.180	E	3	20.5	23.1	2.6	45.5	25	22.4	37.6	255	319.3	64.3	
47	38.1	51.85	13.75	17.379	E	3	20.5	24.4	3.9	40	19.5	15.6	28	250	297.1	47.1	
48	38.1	50.6	12.5	13.695	E	3	20.5	23.2	2.7	36.4	15.9	13.2	28.5	195	247.6	52.6	
49	38.1	50.6	12.5	13.695	E	3	20.5	22.7	2.2	38.5	18	15.8	32.8	300	349.4	49.4	
50	38.1	50.7	12.6	13.970	E	3	20.5	23.7	3.2	37.3	16.8	13.6	28.3	300	341.4	41.4	
51	38.1	47.1	9	6.024	E	3	20.5	22.1	1.6	30.6	10.1	8.5	16.8	140	170.2	30.2	
52	38.1	47.1	9	6.024	E	3	20.5	21.7	1.2	32	11.5	10.3	19.3	325	373.1	48.1	
53	38.1	46.8	8.7	5.534	E	3	20.5	21.8	1.3	31.2	10.7	9.4	17.3	270	308.8	38.8	
54	38.1	50.3	12.2	12.888	E	3	20.4	26.9	6.5	30.3	9.9	3.4	17	225	285	60	
55	38.1	50.3	12.2	12.888	E	3	20.4	25.7	5.3	32.3	11.9	6.6	19.4	260	295	35	
56	38.1	50.3	12.2	12.888	E	3	20.4	22.2	1.8	41.9	21.5	19.7	31.8	280	341.2	61.2	
57	38.1	50.45	12.35	13.288	E	3	20.4	25.1	4.7	33.1	12.7	8	22.4	310	330	20	
58	38.1	52.9	14.8	20.890	E	3	20.4	23.1	2.7	47.1	26.7	24	41.5	380	487.6	107.6	
59	38.1	52.7	14.6	20.191	E	3	20.4	24.6	4.2	40.1	19.7	15.5	30.3	220	294.3	74.3	
60	38.1	52.5	14.4	19.507	E	3	20.4	26.1	5.7	38.7	18.3	12.6	26	290	319.3	29.3	
61	38.1	48.4	10.3	8.441	E	6	20.4	21.9	1.5	37.9	17.5	16	33.1	180	229.7	49.7	
62	38.1	48.4	10.3	8.441	E	6	20.4	22	1.6	37	16.6	15	31.8	280	322.8	42.8	
63	38.1	48.3	10.2	8.237	E	6	20.4	22.4	2	35.3	14.9	12.9	25.2	210	252	42	
64	38.1	48.35	10.25	8.338	E	6	20.4	22	1.6	39	18.6	17	26.4	250	289.8	39.8	
65	38.1	48.3	10.2	8.237	E	6	20.4	24.8	4.4	31.4	11	6.6	16.6	190	225	35	
66	38.1	48.3	10.2	8.237	E	6	20.4	22.6	2.2	36.1	15.7	13.5	25.1	210	243.8	33.8	
67	38.1	48.3	10.2	8.237	E	6	20.4	24.7	4.3	30.6	10.2	5.9	16.8	240	268	28	
68	38.1	48.3	10.2	8.237	E	6	20.4	22.5	2.1	35.2	14.8	12.7	25.6	210	236.4	26.4	
69	38.1	48.3	10.2	8.237	E	6	20.4	23.6	3.2	31.7	11.3	8.1	19.9	240	256.6	16.6	



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO D-E-AJUSTE

CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO												Observaciones
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura Lamina Agua sobre Cresta [alsc] (cm)	Carga [hv] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)	Longitud [L] (cm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
70	38.1	51.65	13.55	16.754	E	6	20.4	23	2.6	46.1	25.7	23.1	46.2	270	358	88	
71	38.1	51.4	13.3	15.992	E	6	20.4	23.8	3.4	43.6	23.2	19.8	39.5	210	258.8	48.8	
72	38.1	51.4	13.3	15.992	E	6	20.4	23	2.6	46	25.6	23	41.6	250	298.5	48.5	
73	38.1	51.4	13.3	15.992	E	6	20.4	23	2.6	45.7	25.3	22.7	40.6	210	289.9	79.9	
74	38.1	51.4	13.3	15.992	E	6	20.4	25	4.6	40.7	20.3	15.7	32	220	255	35	
75	38.1	51.4	13.3	15.992	E	6	20.4	26.4	6	37.7	17.3	11.3	28.6	170	215	45	
76	38.1	51.4	13.3	15.992	E	6	20.4	24.2	3.8	40.4	20	16.2	34.8	220	268	48	
77	38.1	50.7	12.6	13.970	E	6	20.4	23.9	3.5	40.9	20.5	17	33.1	280	316.5	36.5	
78	38.1	50.7	12.6	13.970	E	6	20.4	27.7	7.3	34.2	13.8	6.5	25	180	218	38	
79	38.1	46.8	8.7	5.534	E	6	20.4	21.5	1.1	33.5	13.1	12	21.6	175	217.1	42.1	
80	38.1	46.8	8.7	5.534	E	6	20.4	24.2	3.8	27.5	7.1	3.3	11.7	145	170	25	
81	37.7	49.4	11.7	11.608	E	9	20.4	22.4	2	46.4	26	24	47.8	245	301.9	56.9	
82	37.7	49.3	11.6	11.361	E	9	20.4	25.5	5.1	34.3	13.9	8.8	26.8	180	208	28	
83	37.7	49.2	11.5	11.118	E	9	20.4	22.6	2.2	41.7	21.3	19.1	38.2	210	261.2	51.2	
84	37.7	49.2	11.5	11.118	E	9	20.4	24.1	3.7	38.1	17.7	14	32	205	237	32	
85	37.7	49.2	11.5	11.118	E	9	20.4	22.2	1.8	44.4	24	22.2	41.5	260	312.4	52.4	
86	37.7	49.2	11.5	11.118	E	9	20.4	22.2	1.8	43.7	23.3	21.5	45.6	160	213.7	53.7	
87	37.7	49.2	11.5	11.118	E	9	20.4	23.1	2.7	41.8	21.4	18.7	33.3	230	264.6	34.6	
88	37.7	49.2	11.5	11.118	E	9	20.4	25.4	5	36.9	16.5	11.5	25.4	175	225	50	
89	37.7	47.6	9.9	7.645	E	9	20.4	22.4	2	38.3	17.9	15.9	28	210	232.6	22.6	
90	37.7	47.6	9.9	7.645	E	9	20.4	22	1.6	39.1	18.7	17.1	32.9	215	248.3	33.3	
91	37.7	47.6	9.9	7.645	E	9	20.4	22.3	1.9	38	17.6	15.7	28.1	225	248.2	23.2	
92	37.7	47.6	9.9	7.645	E	9	20.4	22.3	1.9	36.5	16.1	14.2	33	270	294	24	
93	37.7	50.15	12.45	13.558	E	9	20.4	22.7	2.3	47.3	26.9	24.6	49.5	220	271.4	51.4	
94	37.7	48.4	10.7	9.284	E	9	20.4	23	2.6	38.8	18.4	15.8	28.6	240	274.8	34.8	
95	37.7	48.4	10.7	9.284	E	9	20.4	22.1	1.7	40.8	20.4	18.7	34.9	230	277.5	47.5	
96	37.7	48.4	10.7	9.284	E	9	20.4	23.9	3.5	34	13.6	10.1	28	230	251.7	21.7	
97	37.7	48.6	10.9	9.724	E	9	20.4	22.9	2.5	39	18.6	16.1	31.8	240	281.1	41.1	
98	37.7	48.6	10.9	9.724	E	9	20.4	22.4	2	41.9	21.5	19.5	41	150	184.5	34.5	
99	37.7	49	11.3	10.641	E	9	20.4	22.2	1.8	45.3	24.9	23.1	42.5	230	291	61	
100	37.7	49	11.3	10.641	E	9	20.4	22	1.6	45	24.6	23	48.7	240	307.1	67.1	
101	37.7	46	8.3	4.920	E	11	20.4	22.2	1.8	33.5	13.1	11.3	22.1	168	186.9	18.9	
102	37.7	49.2	11.5	11.118	E	11	20.4	22.1	1.7	50.1	29.7	28	56.9	210	257.2	47.2	
103	37.7	49.1	11.4	10.878	E	11	20.4	22.7	2.3	44.7	24.3	22	46.6	190	226.9	36.9	
104	37.7	50.3	12.6	13.970	E	11	20.4	26.7	6.3	40.8	20.4	14.1	37.6	210	260	50	
105	37.7	49	11.3	10.641	E	11	20.4	23.1	2.7	43	22.6	19.9	38.7	230	267.9	37.9	
106	37.7	48.9	11.2	10.407	E	11	20.4	23.3	2.9	39.7	19.3	16.4	37	140	174.6	34.6	
107	37.7	48.8	11.1	10.176	E	11	20.4	24.3	3.9	37.2	16.8	12.9	33.5	160	205	45	
108	37.7	48.8	11.1	10.176	E	11	20.4	25.6	5.2	36.1	15.7	10.5	29.1	170	205	35	
109	37.7	49	11.3	10.641	E	11	20.4	22.8	2.4	42.9	22.5	20.1	42.8	170	207.4	37.4	
110	37.7	48.9	11.2	10.407	E	11	20.4	22.8	2.4	43.7	23.3	20.9	40	190	217.9	27.9	
111	37.7	48.9	11.2	10.407	E	11	20.4	24.1	3.7	38.1	17.7	14	36.1	190	220	30	
112	37.7	48.9	11.2	10.407	E	11	20.4	23.3	2.9	39.8	19.4	16.5	40.2	200	222	22	
113	37.7	48.8	11.1	10.176	E	11	20.4	22.1	1.7	48.7	28.3	26.6	48.3	210	242.8	32.8	
114	37.7	48.7	11	9.949	E	11	20.4	22.3	1.9	44.7	24.3	22.4	47.3	230	263.6	33.6	
115	37.7	48.7	11	9.949	E	11	20.4	22.4	2	46.3	25.9	23.9	39.1	220	254	34	
116	37.7	48.7	11	9.949	E	11	20.4	22.1	1.7	46	25.6	23.9	43.6	210	257.3	47.3	
117	37.7	48.65	10.95	9.836	E	11	20.4	22.3	1.9	43.5	23.1	21.2	41	130	165.4	35.4	
118	37.7	48.7	11	9.949	E	11	20.4	22.7	2.3	44.2	23.8	21.5	42.6	190	227.5	37.5	
119	37.7	48.4	10.7	9.284	E	11	20.4	22.1	1.7	45.5	25.1	23.4	43.6	180	216.2	36.2	
120	37.7	48.5	10.8	9.502	E	11	20.4	23	2.6	41.6	21.2	18.6	36	240	263.2	23.2	

Columna No.1: Número consecutivo de experimento .

Columna No.2: Altura de la cresta del vertedero tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido..

Columna No.3: Altura de la lamina de agua sobre la cresta tomada con el medidor de aguja.

Columna No.4: Altura de carga en el vertedero. $h = a_{sc} - ac$

Columna No.5: Caudal experimento. $Q = 0.02479h^{2.5}$

Columna No.6: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.7: Inclinación del canal.

Columna No.8: Profundidad del fondo del canal tomada con el medidor de aguja, tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.9: Profundidad de la lamina de agua en la sección inicial del resalto, tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.10: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto. $d_1 = |pfc - pi|$

Columna No.11: Profundidad de la lamina de agua en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.12: Profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidraulico tomada con una regleta respecto al fondo del canal. $d_2 = pf$

Columna No.13: Altura del Resalto Hidraulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.14: Profundidad del flujo aguas abajo del Resalto Hidráulico, tomada con una regleta respecto al fondo del canal.

Columna No.15: Ubicación del punto inicial del Resalto Hidráulico respecto a un punto determinado, tomada con la cinta métrica adosada al canal.

Columna No.16: Ubicación del punto final del Resalto Hidráulico con respecto a un punto de referencia determinado, tomada con la cinta métrica adosada al canal.

Columna No.17: Longitud del remolino del Resalto Hidráulico. $L = pfr - pir$



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO D-E-VALIDACIÓN

CAPTURA DE DATOS DIRECTOS



ID	VERTEDERO				RESALTO HIDRÁULICO												Observaciones
	Altura Cresta [ac] (cm)	Altura sobre Lamina Agua sobre Cresta [alsc] (cm)	Carga [hw] (cm)	Caudal [Q] (L/s)	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [Θ] (°)	Profundidad Inicial Fondo de Canal [pfc] (cm)	Profundidad Inicial Lamina de Agua [pi] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (cm)	Profundidad Final Lamina de Agua [pf] (cm)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (cm)	Altura Resalto [h] (cm)	Profundidad de Flujo Aguas Abajo [Yt] (cm)	Posición Punto Inicial [pir] (cm)	Posición Punto Final [pfr] (cm)	Longitud [L] (cm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	37.7	51.13442421	13.43442	16.399	E	2	20.8	25.19586676	4.39586676	36.85648328	16.05648328	11.66061652	21.23320925	310	353.7493071	43.74930714	
2	37.7	51.86247328	14.16247	18.712	E	2	20.8	24.2511558	3.451155801	42.54252384	21.74252384	18.29136803	29.57898371	380	445.9908812	65.99088118	
3	37.7	47.13091937	9.430919	6.771	E	2	20.8	22.16412433	1.364124332	33.21697528	12.41697528	11.05285094	19.29395276	220	269.2219777	49.22197774	
4	37.7	51.58277911	13.88278	17.802	E	2	20.8	23.17688842	2.376888416	47.92760139	27.12760139	24.75071298	37.17837526	290	390.5058013	100.5058013	
5	37.7	49.82312737	12.12313	12.686	E	2	20.8	22.65418884	1.854188844	41.4708908	20.6708908	18.81670196	31.13245694	180	258.6389133	78.63891326	
6	37.7	49.08885151	11.38885	10.851	E	5	20.8	24.64755236	3.847552356	34.55326323	13.75326323	9.905710871	21.03290393	280	301.6311184	21.63111839	
7	37.7	50.48340336	12.7834	14.484	E	5	20.8	23.26687178	2.466871777	43.47170612	22.67170612	20.20483434	42.06344265	210	268.3692203	58.36922034	
8	37.7	45.75684501	8.056845	4.568	E	5	20.8	21.81888416	1.018884162	31.42099731	10.62099731	9.602113145	18.19440509	250	283.3553764	33.35537643	
9	37.7	44.98880742	7.288807	3.556	E	5	20.8	21.61589792	0.815897918	30.20886409	9.408864093	8.592966175	16.59419037	190	219.8321012	29.83210116	
10	37.7	49.56279865	11.8628	12.016	E	5	20.8	22.58566829	1.785668289	44.58248265	23.78248265	21.99681436	38.35672544	210	281.2914171	71.29141709	
11	37.7	50.95702392	13.25702	15.863	E	7	20.8	25.62024371	4.820243707	40.68208687	19.88208687	15.06184316	34.08550773	240	271.4418248	31.44182484	
12	37.7	47.15876109	9.458761	6.821	E	7	20.8	22.5625866	1.762586605	36.20776959	15.40776959	13.64518299	25.76180684	210	237.426267	27.42626697	
13	37.7	48.01403113	10.31403	8.469	E	7	20.8	22.56344883	1.76344883	37.17423385	16.37423385	14.61078502	33.78230137	240	279.0491957	39.04919569	
14	37.7	48.22091417	10.52091	8.900	E	7	20.8	22.39148823	1.591488229	39.11184774	18.31184774	16.72035951	32.41569802	270	320.505037	50.50503702	
15	37.7	50.23033702	12.53034	13.778	E	7	20.8	22.81354294	2.013542935	49.23548735	28.43548735	26.42194442	51.12841363	210	281.6880755	71.68807549	
16	37.7	51.94726609	14.24727	18.994	E	10	20.8	26.28048761	5.480487609	46.57881047	25.77881047	20.29832286	43.91337896	250	276.36861	26.36860999	
17	37.7	52.42074265	14.72074	20.611	E	10	20.8	24.49353871	3.693538714	55.03406315	34.23406315	30.54052443	57.86905747	210	261.4492828	51.44928285	
18	37.7	52.40453925	14.70454	20.554	E	10	20.8	23.9967745	3.196774503	61.44473923	40.64473923	37.44796473	70.87729056	220	285.7434229	65.7434229	
19	37.7	47.22297272	9.522973	6.938	E	10	20.8	22.23983735	1.439837354	40.78983628	19.98983628	18.5499892	32.78259761	170	204.461079	34.46107902	
20	37.7	49.69391603	11.99392	12.350	E	10	20.8	22.71414524	1.914145244	50.17857347	29.37857347	27.46442822	49.3624654	220	271.795388	51.79538803	

Columna No.1: Número consecutivo de experimento .
Columna No.2: Altura de la cresta del vertedero tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.
Columna No.3: Altura de la lamina de agua sobre la cresta tomada con el medidor de aguja.
Columna No.4: Altura de carga en el vertedero. $h = als - ac$
Columna No.5: Caudal experimento. $Q = 0.02479h^{2.5}$
Columna No.6: Tipo de Resalto Hidráulico.
Columna No.7: Inclinación del canal.
Columna No.8: Profundidad del fondo del canal tomada con el medidor de aguja, tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.
Columna No.9: Profundidad de la lamina de agua en la sección inicial del resalto, tomada con el medidor de aguja respecto a un punto de referencia establecido.

Columna No.10: Profundidad de flujo en la sección inicial del Resalto. $d_1 = pfc - pi$
Columna No.11: Profundidad de la lamina de agua en la sección final del Resalto Hidráulico tomada con una regla respecto al fondo del canal.
Columna No.12: Profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidraulico tomada con una regla respecto al fondo del canal. $d_2 = pf$
Columna No.13: Altura del Resalto Hidraulico. $h = d_2 - d_1$
Columna No.14: Profundidad del flujo aguas abajo del Resalto Hidráulico, tomada con una regla respecto al fondo del canal.
Columna No.15: Ubicación del punto inicial del Resalto Hidráulico respecto a un punto determinado, tomada con la cinta métrica adosada al canal.
Columna No.16: Ubicación del punto final del Resalto Hidráulico con respecto a un punto de referencia determinado, tomada con la cinta métrica adosada al canal.
Columna No.17: Longitud del remolino del Resalto Hidráulico. $L = pfr - pir$



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR

DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO D-E-AJUSTE
CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ]	Caudal [Q] (m³/s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d2/d1	E2/E1	L/d1	L/d2	h/y1	h/E1	y1/E1	y2/E1	ΔE	ΔE/E1	Observaciones	ΔE/E1	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (m)	Velocidad Inicial [v1] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F1]	Energía Total Sección Inicial [E1] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (m)	Velocidad Inicial [v2] (m/s)	Número de Froude Sección Final [F2]	Energía Total Sección Final [E2] (m)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	E	0	0.002	0.007	1.48	5.645	0.119	0.054	0.192	0.263	0.056	0.054	0.261	0.047	7.714	7.714	0.471	37.286	4.833	6.714	0.396	0.059	0.456	0.063	0.529	
2	E	0	0.007	0.014	2.36	6.364	0.298	0.119	0.277	0.257	0.123	0.119	0.520	0.105	8.500	8.500	0.413	37.143	4.370	7.500	0.353	0.047	0.400	0.175	0.587	
3	E	0	0.006	0.022	1.31	6.830	0.110	0.081	0.357	0.401	0.088	0.081	0.292	0.059	3.682	3.682	0.795	13.273	3.605	2.682	0.536	0.200	0.736	0.023	0.205	
4	E	0	0.013	0.023	2.50	5.253	0.340	0.165	0.348	0.273	0.171	0.165	0.524	0.142	7.174	7.174	0.503	22.783	3.176	6.174	0.417	0.068	0.485	0.169	0.497	
5	E	0	0.006	0.017	1.61	3.944	0.149	0.083	0.330	0.366	0.089	0.083	0.482	0.066	4.882	4.882	0.593	22.471	4.602	3.882	0.442	0.114	0.566	0.061	0.407	
6	E	0	0.011	0.026	1.99	3.933	0.227	0.138	0.374	0.322	0.145	0.138	0.385	0.112	5.308	5.308	0.639	14.808	2.790	4.308	0.493	0.115	0.608	0.082	0.361	
7	E	0	0.010	0.03	1.58	2.907	0.157	0.105	0.451	0.444	0.115	0.105	0.475	0.075	3.500	3.500	0.736	15.833	4.524	2.500	0.479	0.191	0.670	0.041	0.264	
8	E	0	0.009	0.025	2.19	4.548	0.226	0.114	0.353	0.336	0.114	0.353	0.294	0.094	5.700	5.700	0.531	26.550	4.307	6.700	0.415	0.068	0.503	0.106	0.469	
9	E	0	0.016	0.021	3.40	7.484	0.509	0.202	0.353	0.251	0.208	0.202	0.984	0.181	6.619	6.619	0.342	46.857	4.871	8.619	0.297	0.034	0.658	0.401	0.858	
10	E	0	0.008	0.025	1.53	3.099	0.145	0.097	0.396	0.405	0.105	0.097	0.724	0.072	3.880	3.880	0.724	13.960	3.598	2.880	0.496	0.172	0.669	0.040	0.276	
11	E	0	0.009	0.019	2.07	4.792	0.237	0.117	0.336	0.314	0.123	0.117	0.476	0.098	6.158	6.158	0.518	25.053	4.068	5.158	0.413	0.080	0.493	0.114	0.482	
12	E	0	0.009	0.017	2.48	6.079	0.331	0.138	0.306	0.263	0.143	0.138	0.614	0.121	8.118	8.118	0.431	36.118	4.449	7.118	0.365	0.051	0.417	0.188	0.569	
13	E	0	0.009	0.017	2.42	5.938	0.317	0.134	0.308	0.268	0.139	0.134	0.509	0.117	7.882	7.882	0.438	29.941	3.799	6.882	0.369	0.054	0.423	0.178	0.562	
14	E	0	0.009	0.015	2.62	6.831	0.365	0.135	0.291	0.253	0.139	0.135	0.616	0.120	9.000	9.000	0.382	41.067	4.563	8.000	0.329	0.041	0.370	0.226	0.618	
15	E	0	0.009	0.016	2.52	6.351	0.339	0.135	0.288	0.259	0.140	0.135	0.653	0.119	8.437	8.437	0.412	40.813	4.837	7.437	0.351	0.069	0.399	0.199	0.588	
16	E	0	0.009	0.019	2.19	5.196	0.261	0.129	0.305	0.271	0.134	0.129	0.604	0.111	7.167	7.167	0.512	33.556	4.882	6.167	0.385	0.065	0.484	0.127	0.488	
17	E	0	0.009	0.017	2.37	5.799	0.303	0.136	0.296	0.256	0.140	0.136	0.464	0.119	8.000	8.000	0.386	25.176	3.147	7.000	0.393	0.056	0.449	0.162	0.536	
18	E	0	0.010	0.016	2.70	6.814	0.387	0.141	0.306	0.260	0.146	0.141	0.557	0.125	8.812	8.812	0.376	34.813	3.950	7.812	0.323	0.041	0.364	0.242	0.624	
19	E	0	0.009	0.039	1.08	1.749	0.099	0.081	0.521	0.584	0.095	0.081	0.961	0.042	2.077	2.077	0.961	4.128	1.988	1.077	0.426	0.395	0.821	0.004	0.039	
20	E	0	0.020	0.024	3.76	7.747	0.744	0.25	0.361	0.230	0.257	0.25	1.185	0.226	10.417	10.417	0.345	49.375	4.740	9.417	0.304	0.032	0.336	0.488	0.655	
21	E	1	0.014	0.026	2.49	4.933	0.357	0.177	0.366	0.278	0.184	0.177	0.836	0.151	6.808	6.862	0.515	32.034	4.705	5.809	0.423	0.073	0.496	0.173	0.485	
22	E	1	0.014	0.024	2.65	5.453	0.395	0.178	0.357	0.270	0.184	0.178	0.788	0.154	7.417	7.417	0.498	32.828	4.426	6.418	0.390	0.061	0.451	0.210	0.532	
23	E	1	0.017	0.044	1.78	6.314	0.427	0.182	0.317	0.270	0.187	0.182	0.744	0.167	6.880	6.880	0.374	31.556	4.700	6.167	0.365	0.030	0.454	0.127	0.526	
24	E	1	0.016	0.027	2.64	5.134	0.396	0.164	0.435	0.343	0.174	0.174	0.945	0.137	6.074	10.148	0.435	34.995	5.761	5.075	0.343	0.068	0.411	0.226	0.565	
25	E	1	0.016	0.039	1.85	2.985	0.224	0.162	0.445	0.353	0.172	0.172	0.660	0.123	4.154	5.487	0.767	16.920	4.073	3.154	0.548	0.174	0.722	0.052	0.233	
26	E	1	0.016	0.03	2.38	4.383	0.332	0.164	0.435	0.343	0.174	0.174	0.787	0.134	5.467	7.800	0.523	26.229	4.798	4.467	0.404	0.090	0.494	0.158	0.477	
27	E	1	0.016	0.024	2.97	6.126	0.487	0.183	0.390	0.291	0.191	0.191	0.727	0.159	7.625	10.502	0.392	30.287	3.972	6.626	0.327	0.049	0.376	0.296	0.608	
28	E	1	0.016	0.067	1.11	1.364	0.145	0.128	0.579	0.516	0.145	0.145	0.900	0.061	1.910	2.478	1.000	13.431	7.030	0.911	0.421	0.462	0.883	0.000	0.000	
29	E	1	0.016	0.033	2.20	3.872	0.289	0.169	0.430	0.334	0.178	0.178	0.499	0.121	5.121	7.212	0.617	15.119	2.952	4.122	0.471	0.114	0.585	0.111	0.383	
30	E	1	0.017	0.044	1.74	4.323	0.414	0.181	0.427	0.367	0.187	0.187	0.744	0.167	6.819	9.480	0.462	27.490	4.363	5.266	0.365	0.040	0.454	0.127	0.521	
31	E	1	0.016	0.047	1.58	2.321	0.181	0.145	0.511	0.428	0.158	0.158	0.938	0.085	4.404	2.07	0.876	4.743	2.085	2.085	0.260	0.022	0.124	0.226	0.124	
32	E	1	0.009	0.042	0.95	1.476	0.104	0.087	0.457	0.495	0.098	0.098	0.920	0.045	2.071	3.024	0.941	21.901	10.573	1.072	0.434	0.405	0.838	0.006	0.059	
33	E	1	0.010	0.016	2.76	6.973	0.419	0.147	0.301	0.250	0.152	0.152	0.812	0.131	9.187	13.250	0.362	50.742	5.523	8.189	0.313	0.038	0.351	0.268	0.638	
34	E	1	0.010	0.025	1.73	3.489	0.186	0.111	0.389	0.373	0.119	0.119	0.644	0.096	4.440	6.840	0.637	20.957	4.720	3.441	0.462	0.134	0.596	0.068	0.363	
35	E	1	0.010	0.016	2.70	6.814	0.398	0.149	0.290	0.240	0.153	0.153	0.932	0.133	9.312	13.875	0.385	39.119	4.201	8.314	0.334	0.040	0.374	0.245	0.615	
36	E	1	0.018	0.032	2.49	4.447	0.361	0.17	0.469	0.363	0.181	0.181	0.700	0.138	5.313	8.156	0.593	21.872	4.117	4.313	0.383	0.089	0.471	0.179	0.497	
37	E	1	0.017	0.044	1.78	6.314	0.427	0.182	0.317	0.270	0.187	0.182	0.744	0.167	6.819	9.480	0.462	27.490	4.363	5.266	0.365	0.040	0.454	0.127	0.521	
38	E	1	0.021	0.06	1.58	2.063	0.197	0.175	0.543	0.414	0.159	0.159	0.917	0.087	2.917	3.533	0.932	11.407	3.302	1.917	0.583	0.304	0.887	0.007	0.037	
39	E	1	0.020	0.026	3.53	6.990	0.682	0.253	0.363	0.230	0.260	0.260	0.316	0.189	0.227	9.731	12.154	0.381	45.724	4.699	8.732	0.333	0.038	0.371	0.422	0.619
40	E	1	0.021	0.032	2.97	5.296	0.494	0.228	0.416	0.278	0.237	0.237	0.296	0.196	7.125	9.250	0.480	23.340	3.276	6.126	0.397	0.065	0.462	0.257	0.520	
41	E	3	0.018	0.034	2.43	4.211	0.365	0.2	0.413	0.295	0.208	0.208	0.565	0.225	5.882	9.559	0.572	16.624	2.826	4.889	0.455	0.093	0.548	0.156	0.428	
42	E	3	0.018	0.073	1.13	1.339	0.170	0.144	0.574	0.483	0.161	0.161	0.599	0.071	1.973	3.164	0.931	8.208	4.161	0.974	0.419	0.430	0.848	0.009	0.053	
43	E	3	0.018	0.024	3.44	7.101	0.563	0.227	0.364	0.244	0.233	0.233	0.413	0.203	9.458	17.208	0.352	27.379	2.895	8.470	0.306	0.036	0.342	0.429	0.648	
44	E	3	0.018	0.027	2.09	4.016	0.252	0.187	0.427	0.326	0.187	0.187	0.637	0.136	5.812	8.36	0.440	26.322	3.462	3.640	0.440	0.049	0.449	0.162	0.574	
45	E	3	0.018	0.027	3.06	5.358	0.231	0.159	0.358	0.238	0.237	0.237	0.394	0.432	6.004	14.593	0.432	31.327	3.696	7.566	0.372	0.049	0.420	0.312	0.568	
46	E	3	0.018	0.026	3.18	6.298	0.574	0.25	0.331	0.211	0.255	0.255	0.642	0.224	9.615	14.462	0.444	24.697	2.568	8.627	0.390	0.045	0.435			



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO D-E-AJUSTE
CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Caudal [Q] (m³/s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d2/d1	E2/E1	L/d1	L/d2	h/y1	h/E1	y1/E1	y2/E1	ΔE	ΔE/E1	Observaciones	ΔE/E1	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (m)	Velocidad Inicial [v1] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F1]	Energía Total Sección Inicial [E1] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (m)	Velocidad Inicial [v2] (m/s)	Número de Froude Sección Final [F2]	Energía Total Sección Final [E2] (m)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
114	E	11	0.010	0.019	2.38	5.564	0.371	0.243	0.198	0.122	0.240	0.473	0.330	0.224	12.789	24.895	0.547	17.359	1.357	12.010	0.803	0.050	0.642	0.131	0.353	
115	E	11	0.010	0.02	2.26	5.152	0.345	0.259	0.175	0.111	0.256	0.391	0.334	0.239	12.950	19.550	0.741	16.668	1.289	12.174	0.593	0.057	0.737	0.089	0.259	
116	E	11	0.010	0.017	2.66	6.574	0.468	0.256	0.177	0.113	0.253	0.436	0.464	0.239	15.059	25.647	0.541	27.312	1.814	14.322	0.511	0.036	0.537	0.215	0.459	
117	E	11	0.010	0.019	2.35	5.501	0.368	0.231	0.194	0.130	0.229	0.41	0.347	0.212	12.158	21.579	0.621	18.289	1.504	11.367	0.575	0.051	0.616	0.140	0.379	
118	E	11	0.010	0.023	1.97	4.178	0.291	0.238	0.190	0.126	0.235	0.426	0.368	0.215	10.348	18.522	0.809	16.005	1.547	9.523	0.738	0.078	0.802	0.056	0.191	
119	E	11	0.009	0.017	2.48	6.135	0.400	0.251	0.168	0.108	0.248	0.436	0.355	0.234	14.765	25.647	0.620	20.903	1.416	14.022	0.585	0.042	0.616	0.152	0.380	
120	E	11	0.010	0.026	1.66	3.320	0.210	0.212	0.204	0.143	0.210	0.36	0.228	0.186	8.154	13.846	0.999	8.759	1.074	7.288	0.884	0.121	0.989	0.000	0.001	

Columna No.1: Número consecutivo del experimento.

Columna No.2: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.3: Inclinación del canal.

Columna No.4: Caudal del experimento.

Columna No.5: Profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico.

Columna No.6: Velocidad media en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $v_1 = \frac{Q}{b d_1}$, $b = 0.22$ m (Ancho del Canal).

Columna No.7: Número de Froude en la sección inicial del Resalto. $F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g d_1 \cos \theta}}$; g : Aceleración de la gravedad terrestre.

Columna No.8: Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $E_1 = z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + d_1 \cos \theta$; z_1 : Altura del canal respecto a un datum determinado. (Para estos experimentos $z_1 = L \tan \theta$).

Columna No.9: Profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico.

Columna No.10: Velocidad media en la sección final del Resalto Hidráulico. $v_2 = \frac{Q}{b d_2}$

Columna No.11: Número de Froude en la sección final del Resalto Hidráulico. $F_2 = \frac{v_2}{\sqrt{g d_2 \cos \theta}}$

Columna No.13: Longitud del remolino turbulento del Resalto Hidráulico.

Columna No.14: Altura del Resalto Hidráulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.15: Relación entre profundidades conjugadas del Resalto Hidráulico (Profundidad inicial y secunete). $\frac{d_2}{d_1}$

Columna No.16: Relación entre la Energía total final e inicial del Resalto Hidráulico (Eficiencia del Resalto Hidráulico). $\frac{E_2}{E_1}$

Columna No.17: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1}$

Columna No.18: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_2}$

Columna No.19: Relación entre la longitud y la profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1 \cos \theta}$

Columna No.20: Relación entre la altura Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{h}{E_1}$

Columna No.21: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.22: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cos \theta}{E_1}$

Columna No.23: Pérdida de Energía ocasionada por el Resalto Hidráulico. $\Delta E = E_1 - E_2$



INVESTIGACIÓN COMPORTAMIENTO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR
DATOS EXPERIMENTALES RESALTO TIPO D-E-VALIDACIÓN
CÁLCULO DE DATOS INDIRECTOS



ID	Tipo de Resalto	Inclinación Canal [θ] (°)	Caudal [Q] (m³/s)	AGUAS ARRIBA RESALTO				AGUAS ABAJO RESALTO				Longitud Resalto [L] (m)	Altura Resalto [h] (m)	d2/d1	E2/E1	L/d1	L/d2	h/y1	h/E1	y1/E1	y2/E1	ΔE	ΔE/E1	Observaciones	ΔE/E1	Observaciones
				Profundidad de Flujo Sección Inicial [d1] (m)	Velocidad Inicial [v1] (m/s)	Número de Froude Sección Inicial [F1]	Energía Total Sección Inicial [E1] (m)	Profundidad de Flujo Sección Final [d2] (m)	Velocidad Inicial [v2] (m/s)	Número de Froude Sección Final [F2]	Energía Total Sección Final [E2] (m)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	E	2	0.016	0.043958668	1.70	2.583	0.206	0.160564833	0.464	0.370	0.171	0.212332093	0.437	0.117	3.653	4.830	0.833	9.946	2.723	2.654	0.567	0.214	0.780	0.034	0.167	
2	E	2	0.019	0.034511558	2.46	4.237	0.367	0.217425238	0.391	0.268	0.225	0.295789837	0.660	0.183	6.300	8.571	0.613	19.110	3.033	5.303	0.496	0.094	0.592	0.142	0.387	
3	E	2	0.007	0.013641243	2.26	6.170	0.290	0.124169753	0.248	0.225	0.127	0.192939528	0.492	0.111	9.103	14.144	0.438	36.061	3.962	8.107	0.381	0.047	0.428	0.163	0.562	
4	E	2	0.018	0.023768884	3.40	7.052	0.650	0.271276014	0.298	0.183	0.276	0.371783753	1.004	0.248	11.413	15.642	0.424	42.259	3.703	10.419	0.381	0.037	0.417	0.374	0.576	
5	E	2	0.013	0.018541888	3.11	7.294	0.539	0.206708908	0.279	0.196	0.211	0.311324569	0.786	0.188	11.148	16.790	0.391	42.386	3.802	10.154	0.349	0.034	0.383	0.328	0.609	
6	E	5	0.011	0.038475524	1.28	2.091	0.141	0.137532632	0.359	0.309	0.144	0.210329039	0.215	0.099	3.575	5.467	1.019	5.601	1.567	2.584	0.703	0.272	0.972	-0.003	-0.019	
7	E	5	0.014	0.024668718	2.67	5.436	0.438	0.226717061	0.290	0.195	0.230	0.420634426	0.581	0.202	9.190	17.051	0.525	23.571	2.565	8.222	0.461	0.056	0.515	0.208	0.475	
8	E	5	0.005	0.010188842	2.04	6.458	0.251	0.106209973	0.195	0.192	0.108	0.181944051	0.332	0.096	10.424	17.857	0.430	32.613	3.129	9.460	0.383	0.040	0.422	0.143	0.570	
9	E	5	0.004	0.008158979	1.98	7.015	0.234	0.094088641	0.172	0.179	0.095	0.165941904	0.297	0.086	11.532	20.339	0.407	36.424	3.159	10.572	0.367	0.035	0.400	0.139	0.593	
10	E	5	0.012	0.017856683	3.06	7.322	0.557	0.237824827	0.230	0.151	0.240	0.383567254	0.710	0.220	13.319	21.480	0.430	39.772	2.986	12.366	0.395	0.032	0.426	0.317	0.570	
11	E	7	0.016	0.048202437	1.50	2.184	0.200	0.198820869	0.363	0.261	0.204	0.340855077	0.312	0.151	4.125	7.071	1.019	6.474	1.570	3.148	0.752	0.239	0.986	-0.004	-0.019	
12	E	7	0.007	0.017625986	1.76	4.246	0.209	0.154077696	0.201	0.164	0.155	0.257618068	0.272	0.136	8.742	14.616	0.743	15.444	1.767	7.800	0.654	0.084	0.733	0.054	0.257	
13	E	7	0.008	0.017634498	2.18	5.288	0.308	0.163742338	0.235	0.186	0.165	0.337823014	0.388	0.146	9.285	19.157	0.537	21.979	2.367	8.348	0.474	0.057	0.528	0.143	0.463	
14	E	7	0.009	0.015914882	2.54	6.458	0.407	0.183118477	0.221	0.165	0.184	0.324156698	0.501	0.167	11.506	20.368	0.453	31.498	2.737	10.585	0.411	0.039	0.447	0.222	0.547	
15	E	7	0.014	0.020135429	3.11	7.024	0.600	0.284354874	0.220	0.132	0.285	0.511284136	0.712	0.264	14.122	25.392	0.474	35.338	2.502	13.221	0.440	0.033	0.470	0.316	0.526	
16	E	10	0.019	0.054804876	1.58	2.165	0.226	0.257788105	0.335	0.212	0.260	0.43913379	0.260	0.203	4.704	8.013	1.147	4.738	1.007	3.761	0.897	0.239	1.122	-0.033	-0.147	
17	E	10	0.021	0.036935387	2.54	4.246	0.454	0.342340631	0.274	0.150	0.341	0.578690575	0.507	0.305	9.269	15.668	0.752	13.718	1.480	8.396	0.673	0.080	0.743	0.113	0.248	
18	E	10	0.021	0.031967745	2.92	5.259	0.581	0.406447392	0.230	0.116	0.403	0.708772906	0.647	0.374	12.714	22.172	0.694	20.253	1.593	11.895	0.645	0.054	0.689	0.178	0.306	
19	E	10	0.007	0.014398374	2.19	5.872	0.319	0.198898363	0.158	0.114	0.198	0.327825976	0.339	0.185	13.883	22.768	0.622	23.570	1.698	13.082	0.582	0.045	0.618	0.120	0.378	
20	E	10	0.012	0.019141452	2.93	6.820	0.547	0.293785735	0.191	0.113	0.291	0.493624654	0.510	0.275	15.348	25.788	0.532	26.648	1.736	14.569	0.502	0.034	0.529	0.256	0.468	

Columna No.1: Número consecutivo del experimento.

Columna No.2: Tipo de Resalto Hidráulico.

Columna No.3: Inclinación del canal.

Columna No.4: Caudal del experimento.

Columna No.5: Profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico.

Columna No.6: Velocidad media en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $v_1 = \frac{Q}{b \cdot d_1}$, $b = 0.22 \text{ m}$ (Ancho del Canal).

Columna No.7: Número de Froude en la sección inicial del Resalto. $F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot d_1 \cdot \cos \theta}}$; g: Aceleración de la gravedad terrestre.

Columna No.8: Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $E_1 = z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + d_1 \cos \theta$; z_1 : Altura del canal respecto a un datum determinado. (Para estos experimentos $z_1 = L \cdot \tan \theta$).

Columna No.9: Profundidad de flujo en la sección final del Resalto Hidráulico.

Columna No.10: Velocidad media en la sección final del Resalto Hidráulico. $v_2 = \frac{Q}{b \cdot d_2}$

Columna No.11: Número de Froude en la sección final del Resalto Hidráulico. $F_2 = \frac{v_2}{\sqrt{g \cdot d_2 \cdot \cos \theta}}$

Columna No.13: Longitud del remolino turbulento del Resalto Hidráulico.

Columna No.14: Altura del Resalto Hidráulico. $h = d_2 - d_1$

Columna No.15: Relación entre profundidades conjugadas del Resalto Hidráulico (Profundidad inicial y secunete). $\frac{d_2}{d_1}$

Columna No.16: Relación entre la Energía total final e inicial del Resalto Hidráulico (Eficiencia del Resalto Hidráulico).

Columna No.17: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1}$

Columna No.18: Relación entre la longitud del remolino turbulento y la profundidad del flujo en la sección final del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_2}$

Columna No.19: Relación entre la longitud y la profundidad del flujo en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{L}{d_1 \cdot \cos \theta}$

Columna No.20: Relación entre la altura Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{E_1}{d_1}$

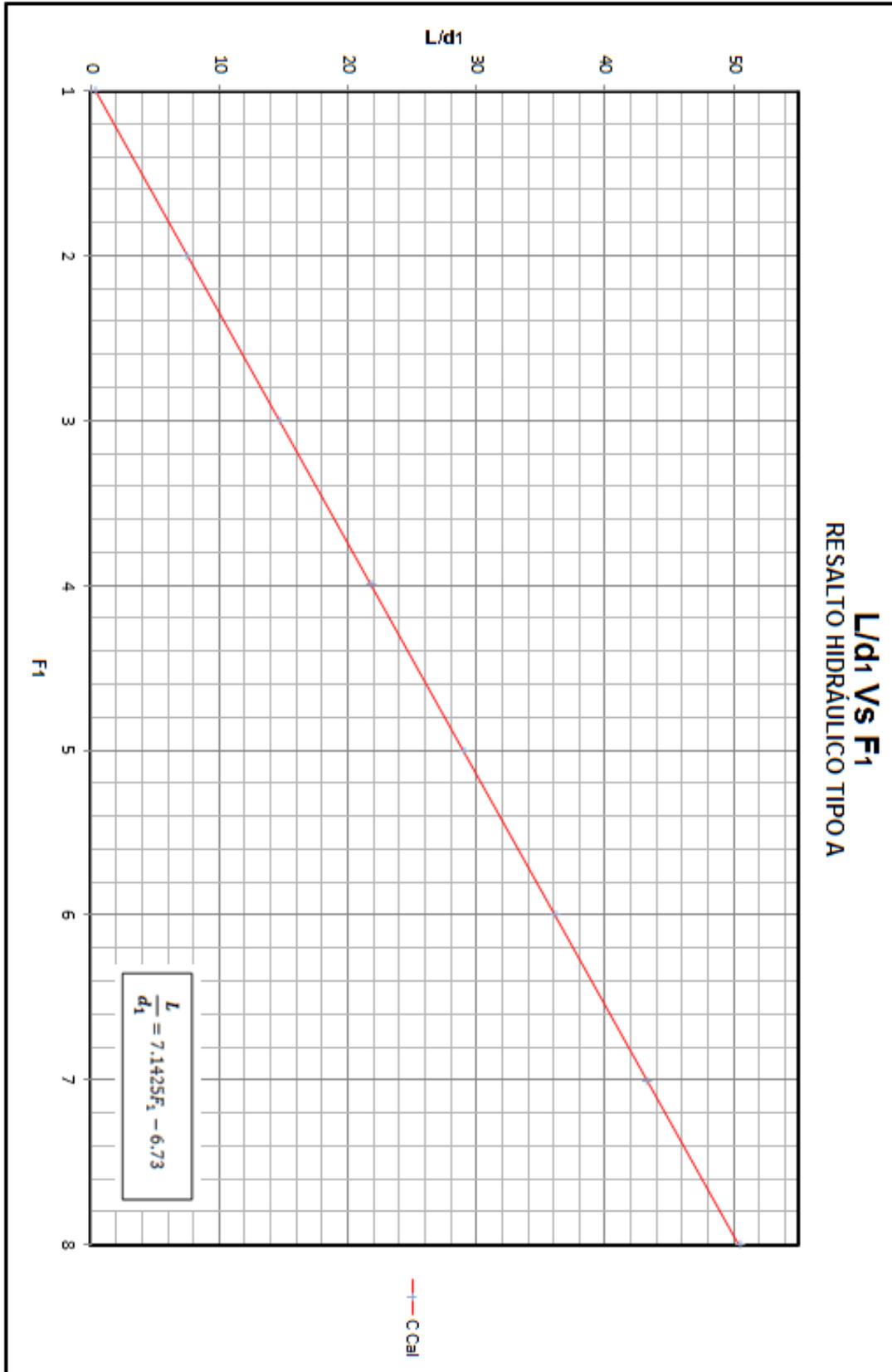
Columna No.21: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cdot \cos \theta}{E_1}$

Columna No.22: Relación entre la profundidad de flujo y la Energía total en la sección inicial del Resalto Hidráulico. $\frac{d_1 \cdot \cos \theta}{E_1}$

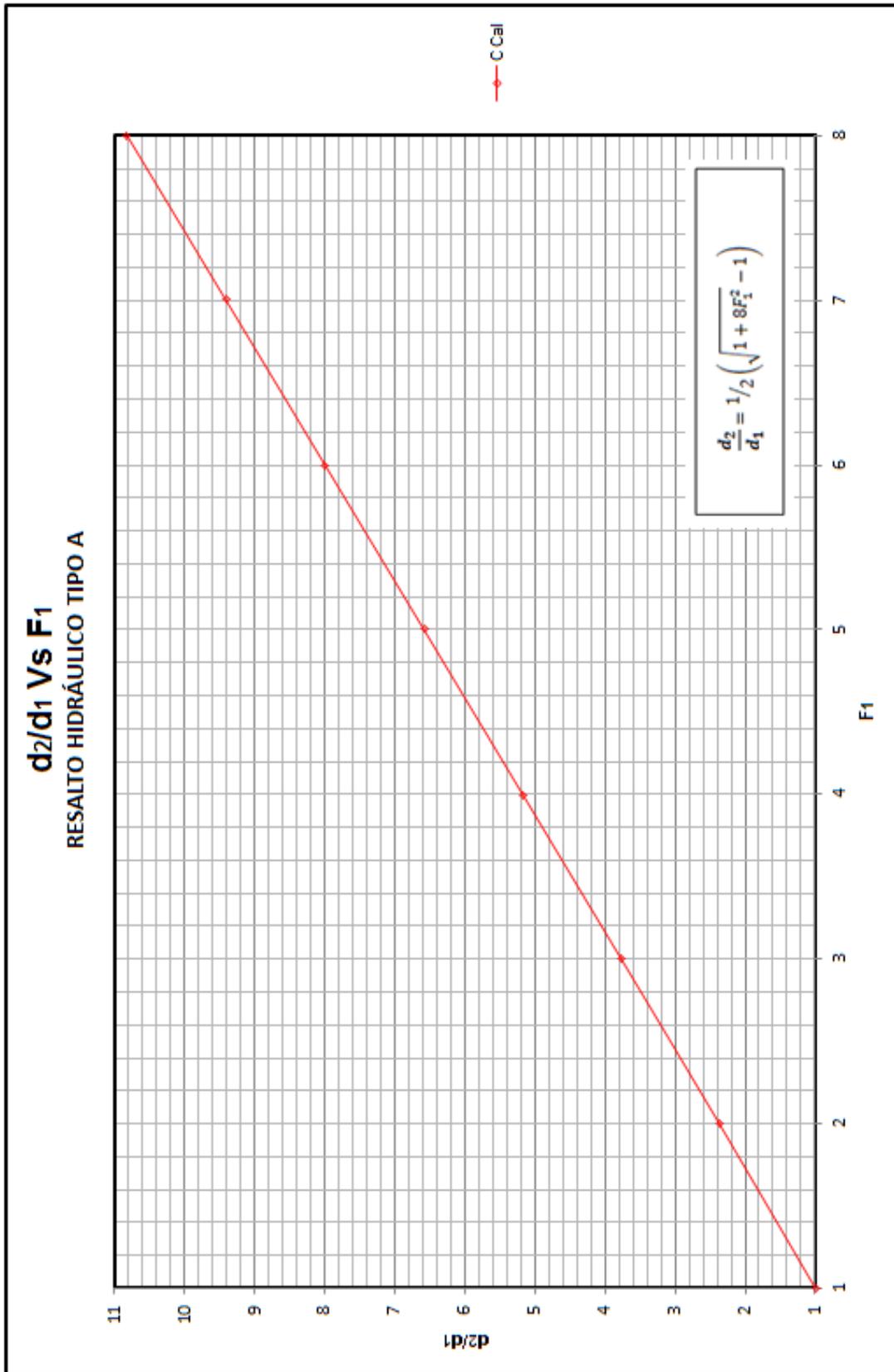
Columna No.23: Pérdida de Energía ocasionada por el Resalto Hidráulico. $\Delta E = E_1 - E_2$

F. ANEXO:

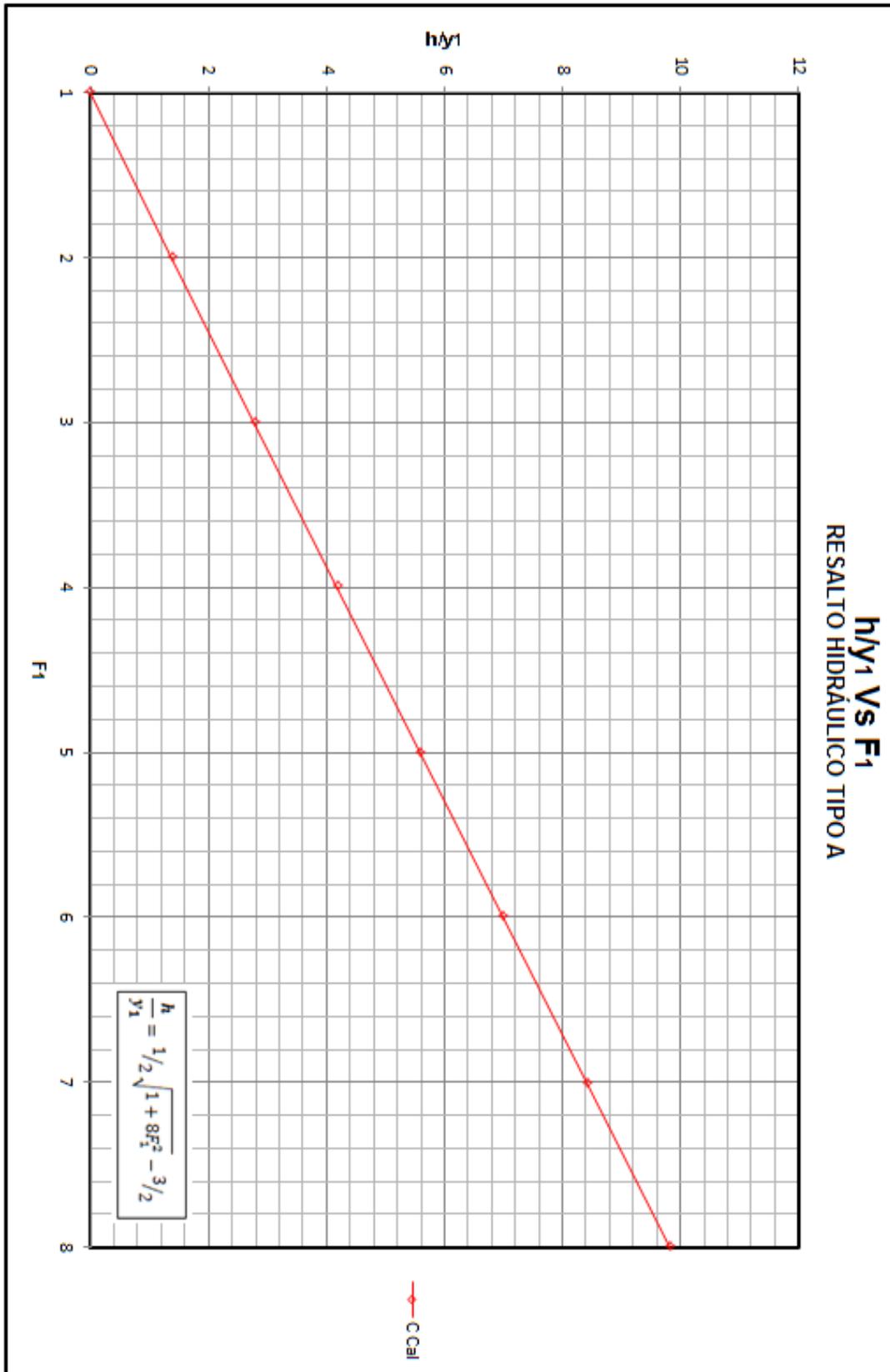
**CURVAS AJUSTADAS RESALTOS
HIDRÁULICOS EN CANALES CON
PENDIENTE Y SECCIÓN RECTANGULAR**

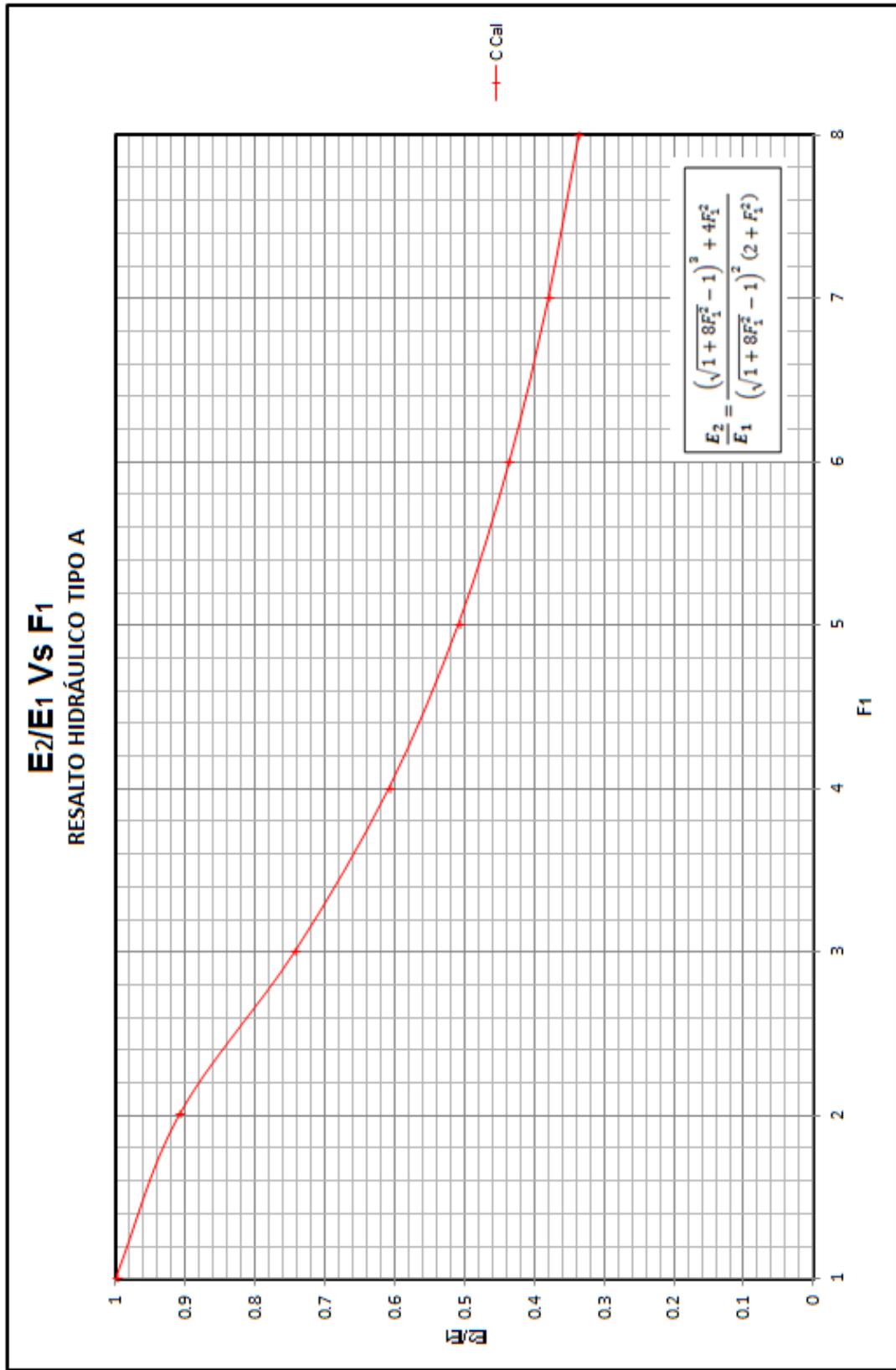


Gráfica F-1 Relación L/d1 Vs F1 para el Resalto Tipo A.

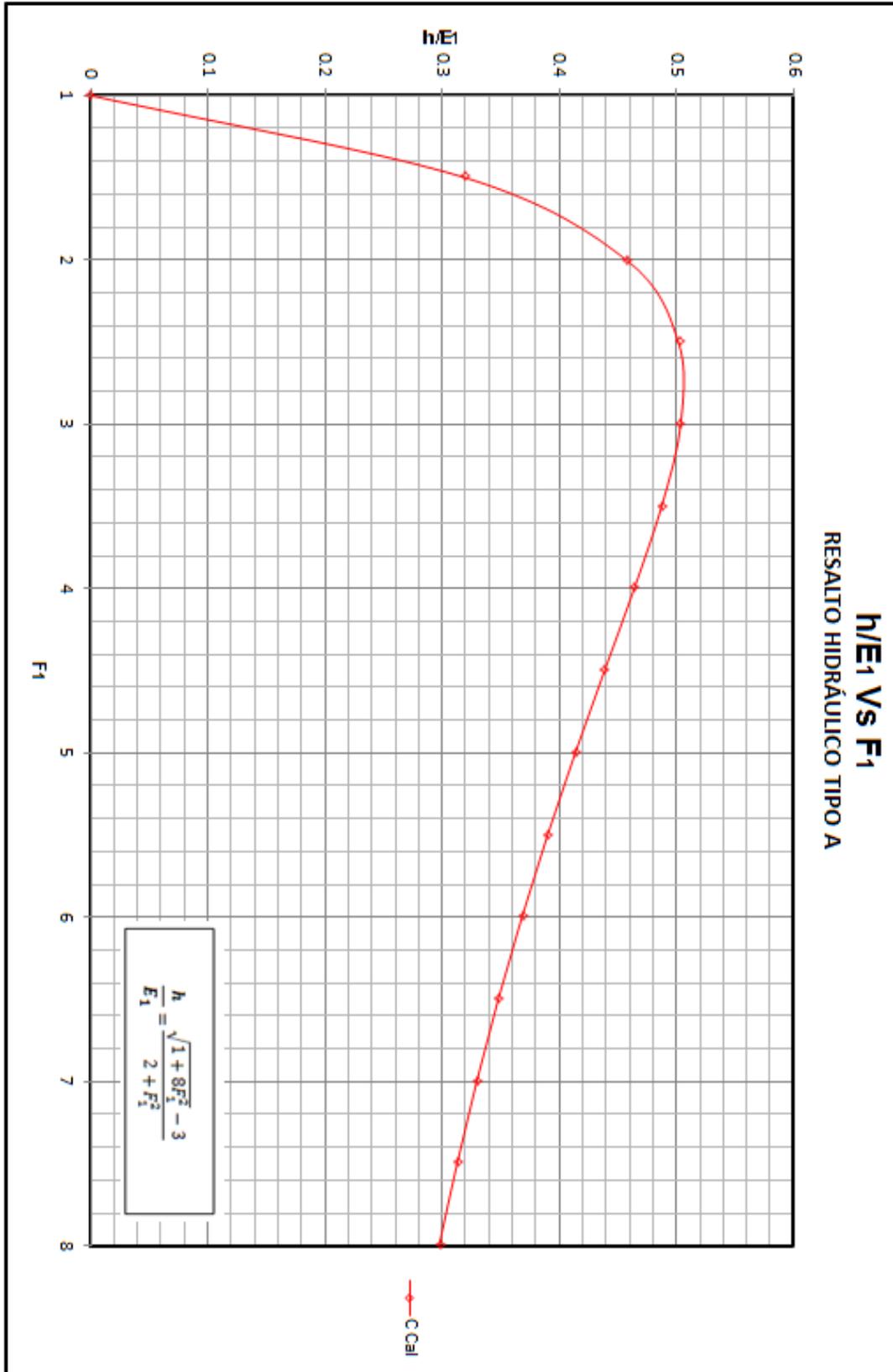


Gráfica F-2 Relación d_2/d_1 Vs F_1 para Resalto Tipo A.

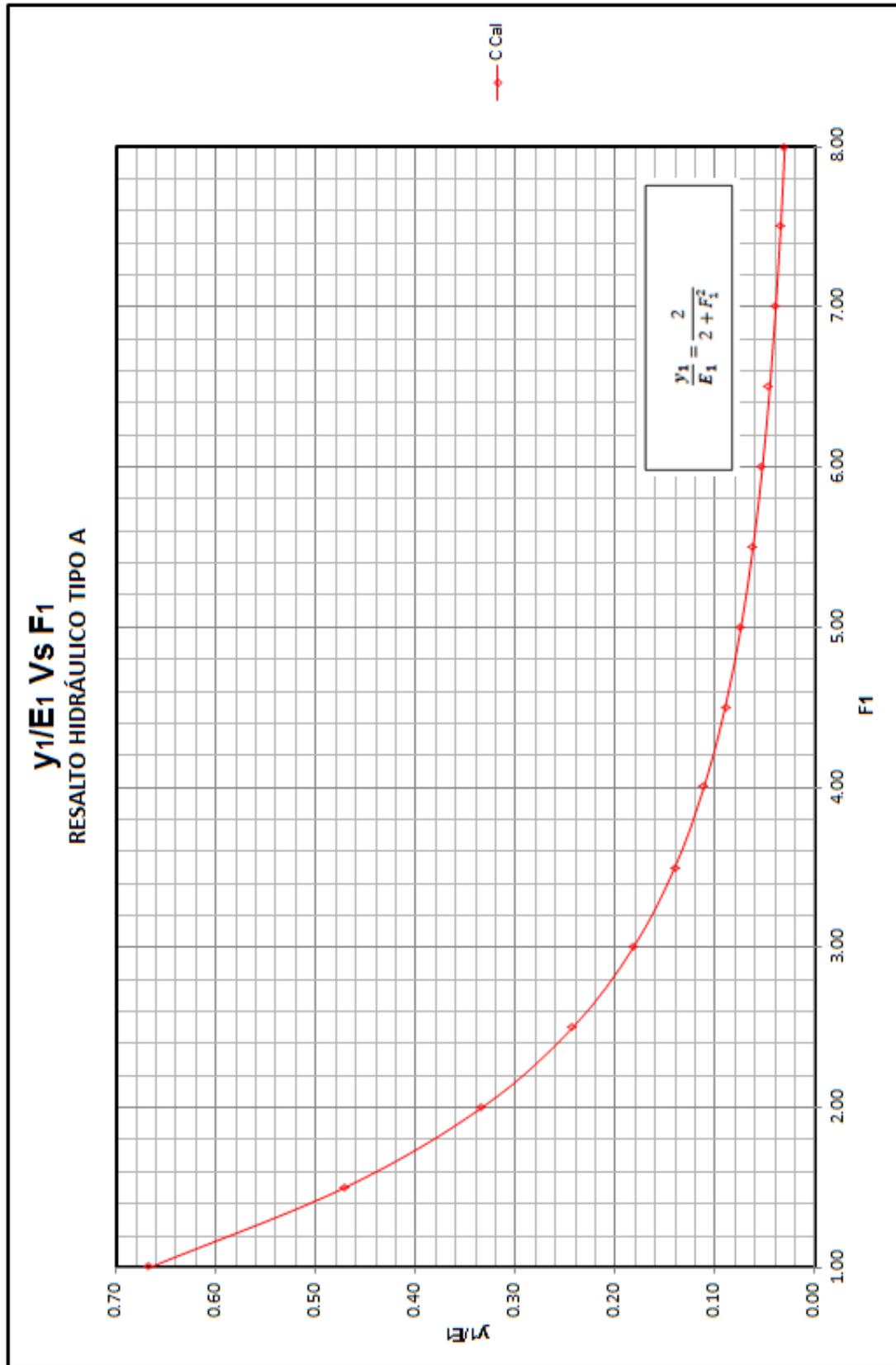
Gráfica F-3 Relación h/y_1 Vs F_1 para Resalto Tipo A.



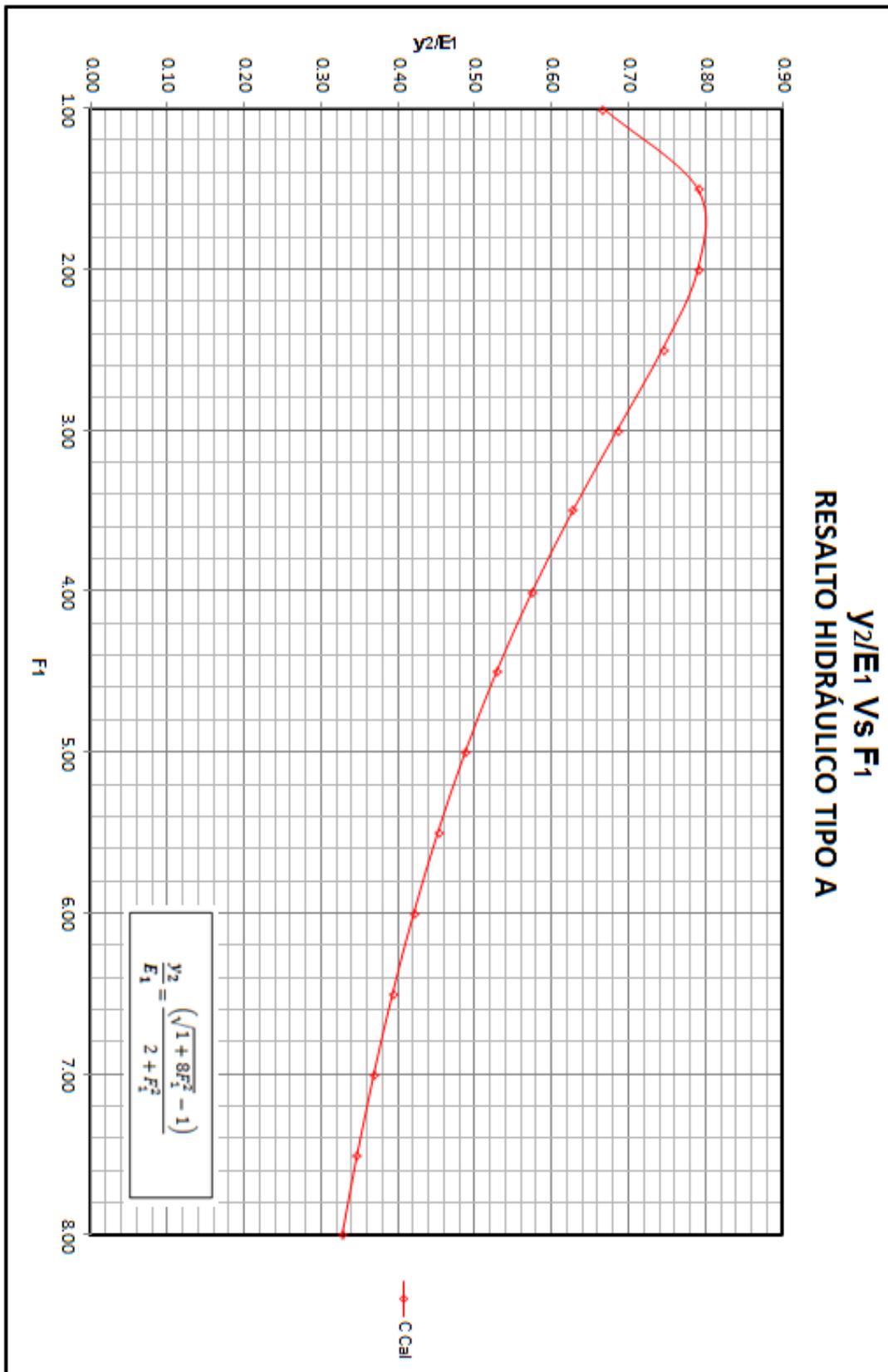
Gráfica F-4 Relación E₂/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo A.



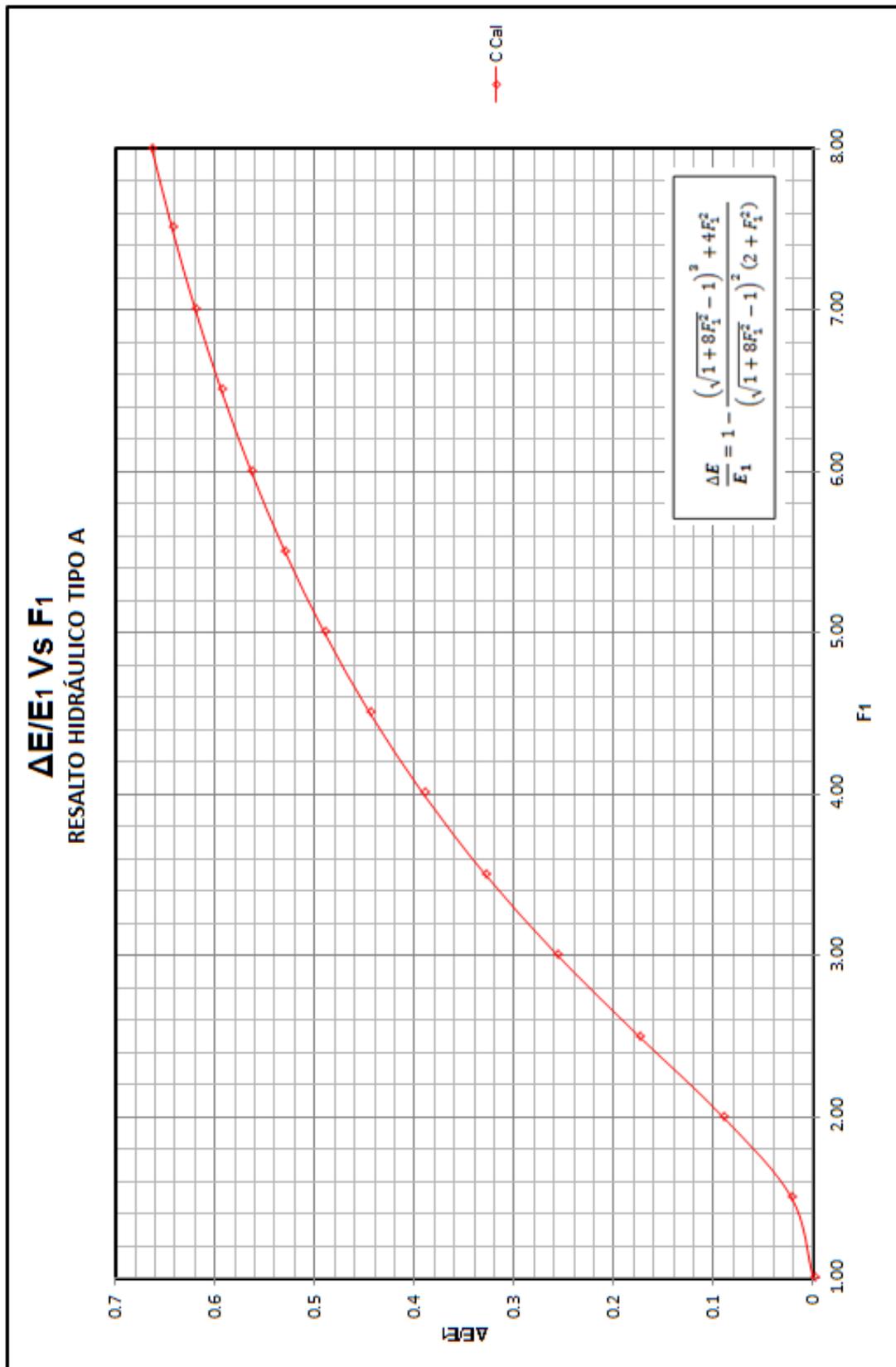
Gráfica F-5 Relación h/E_1 Vs F_1 para Resalto Tipo A.



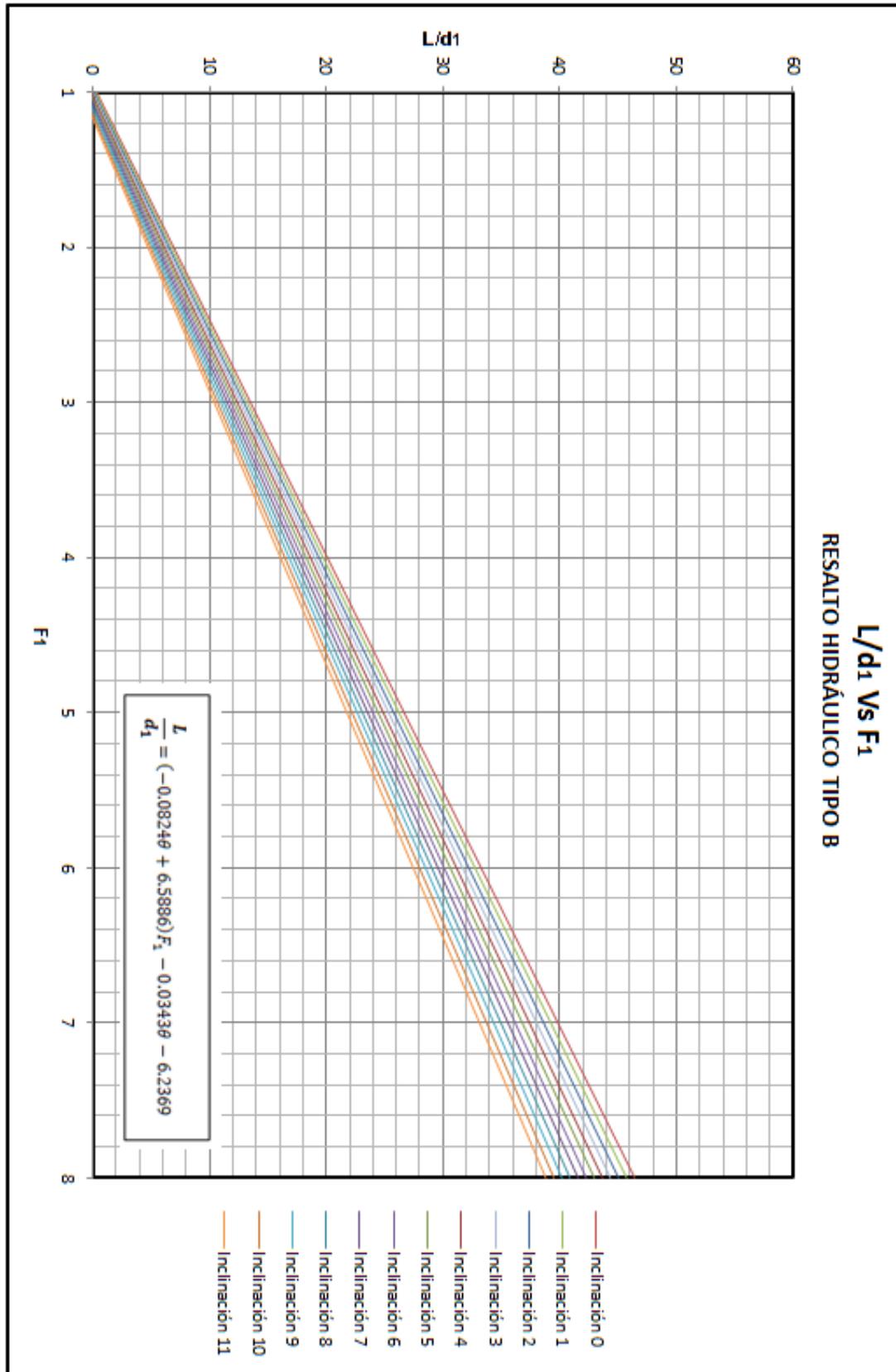
Gráfica F-6 Relación y₁/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo A.



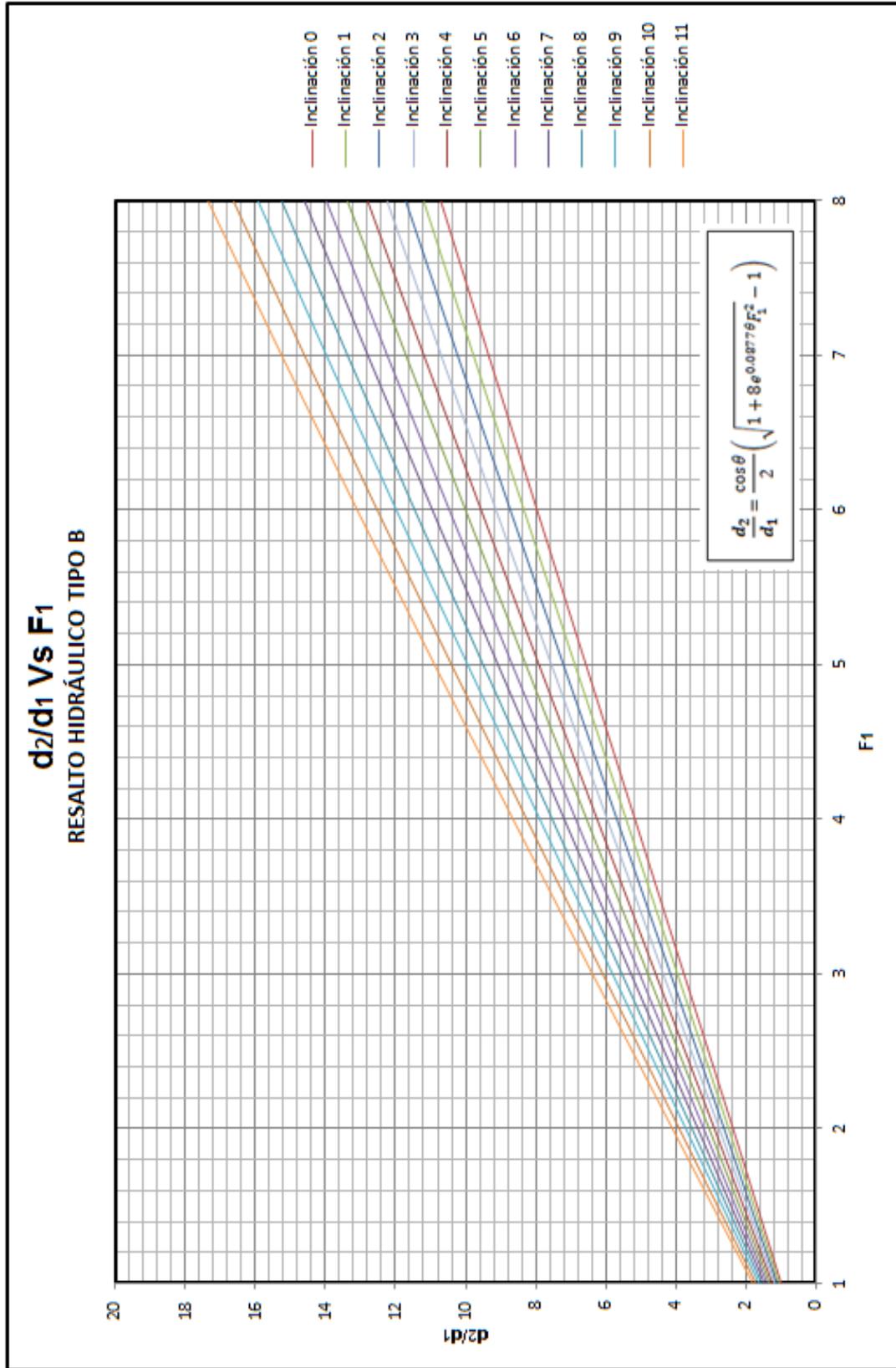
Gráfica F-7 Relación y_2/E_1 Vs F_1 para Resalto Tipo A.



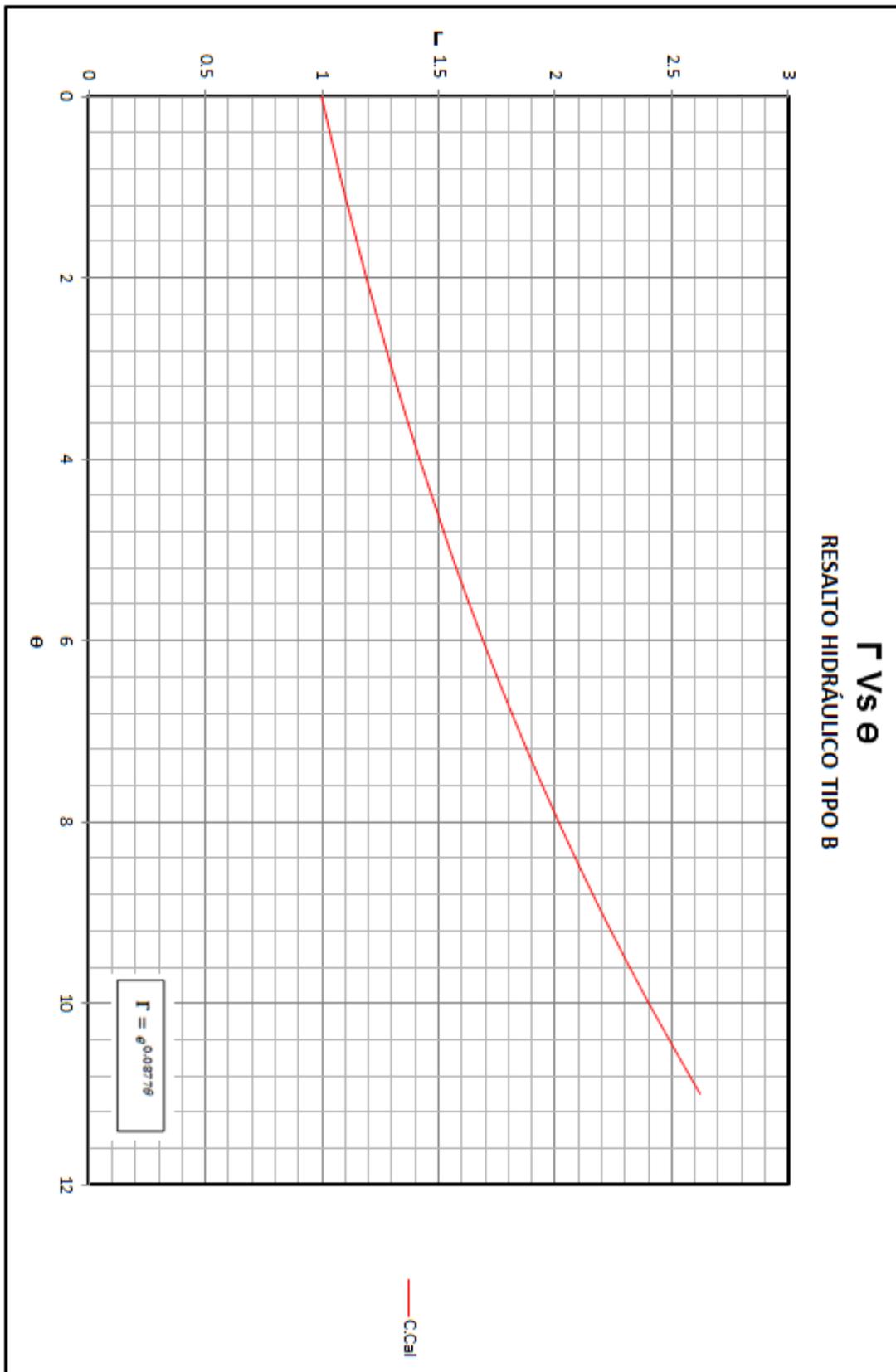
Gráfica F-8 Relación ΔE/E1 Vs F1 para Resalto Tipo A.

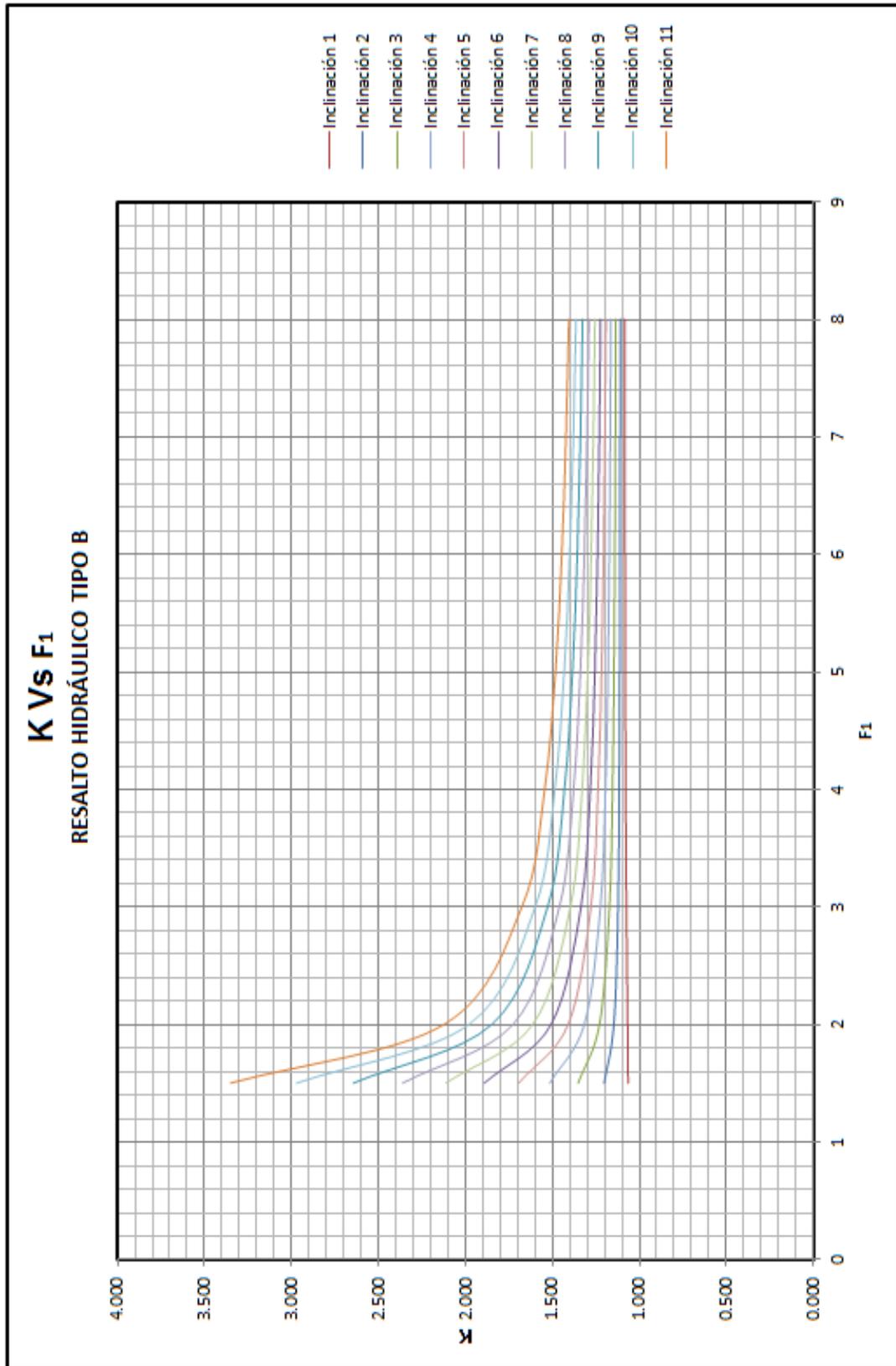


Gráfica F-9 Relación L/d₁ Vs F₁ para Resalto Tipo B.

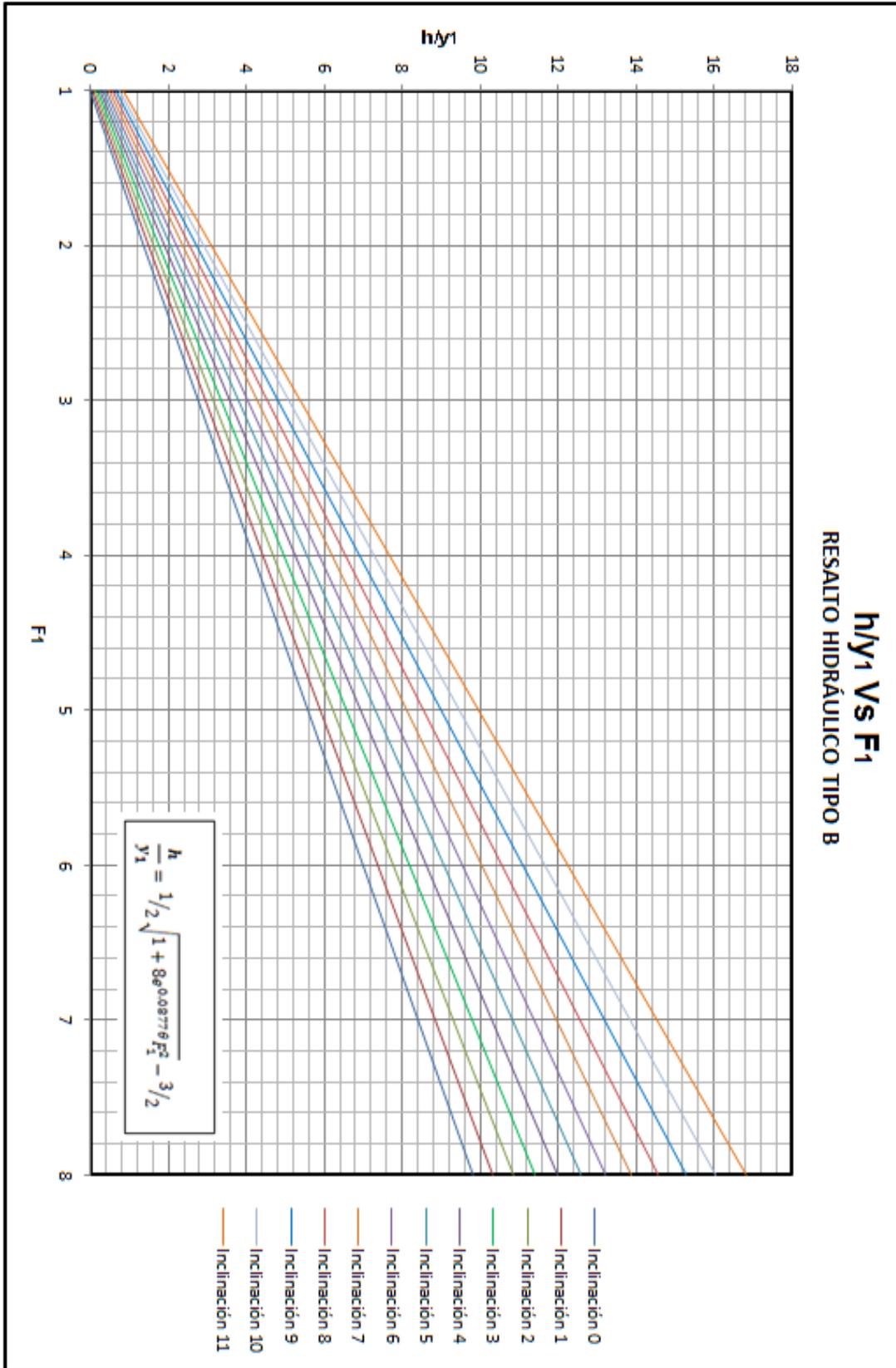


Gráfica F-10 Relación d₂/d₁ Vs F₁ para Resalto Tipo B.

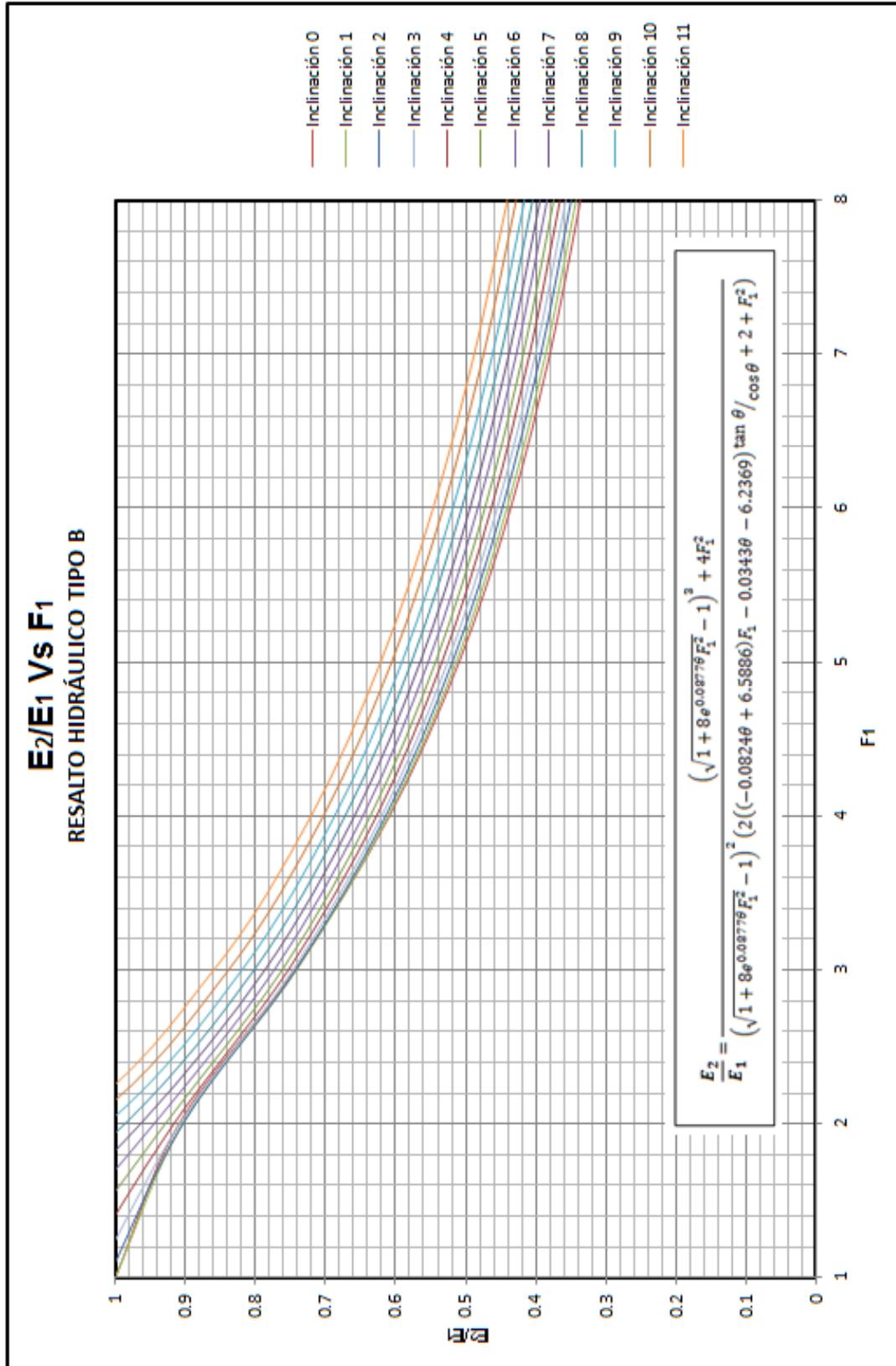
Gráfica F-11 Relación Γ Vs θ para Resalto Tipo B.



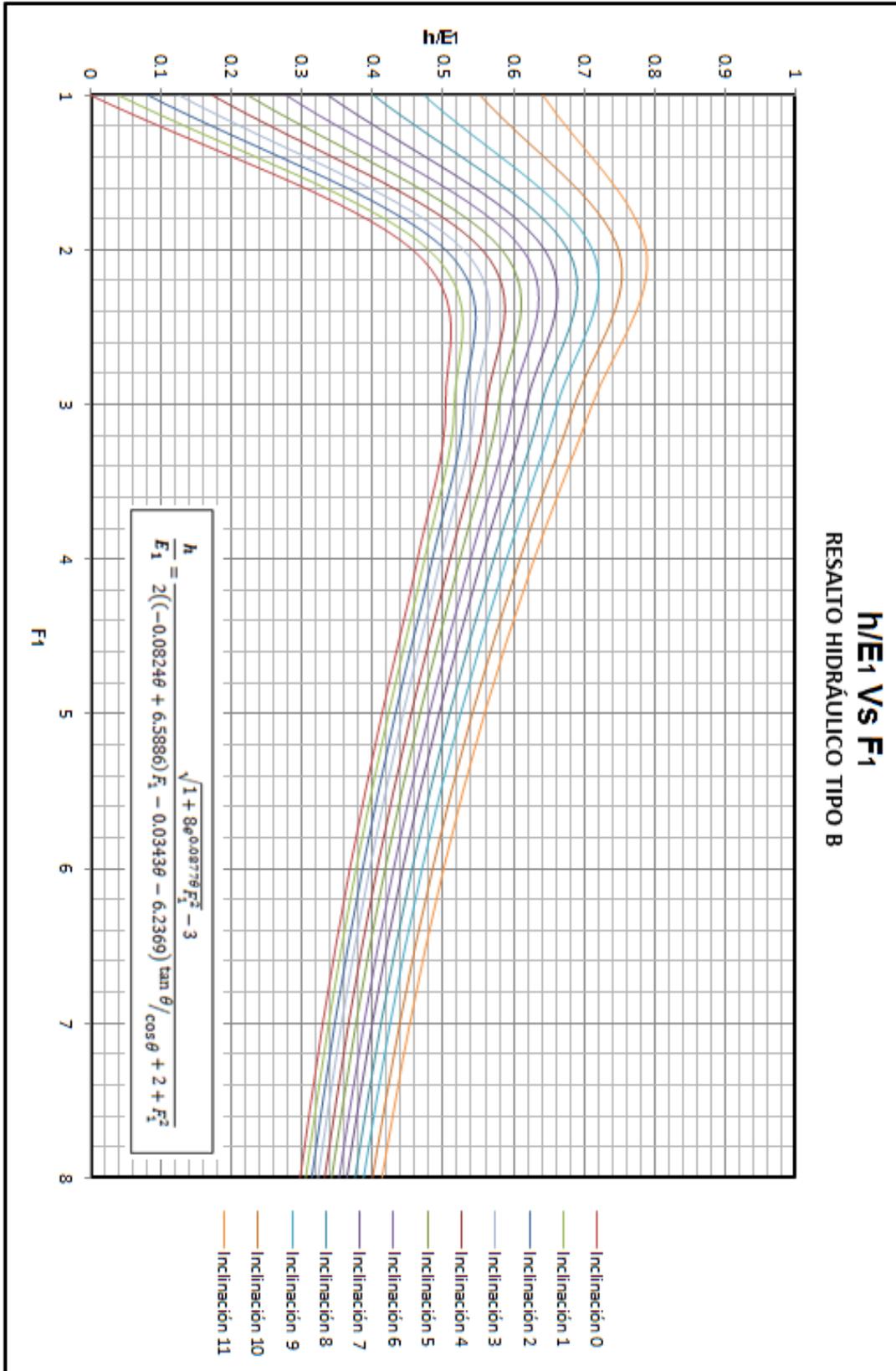
Gráfica F-12 Relación K Vs F₁ para Resalto Tipo B.



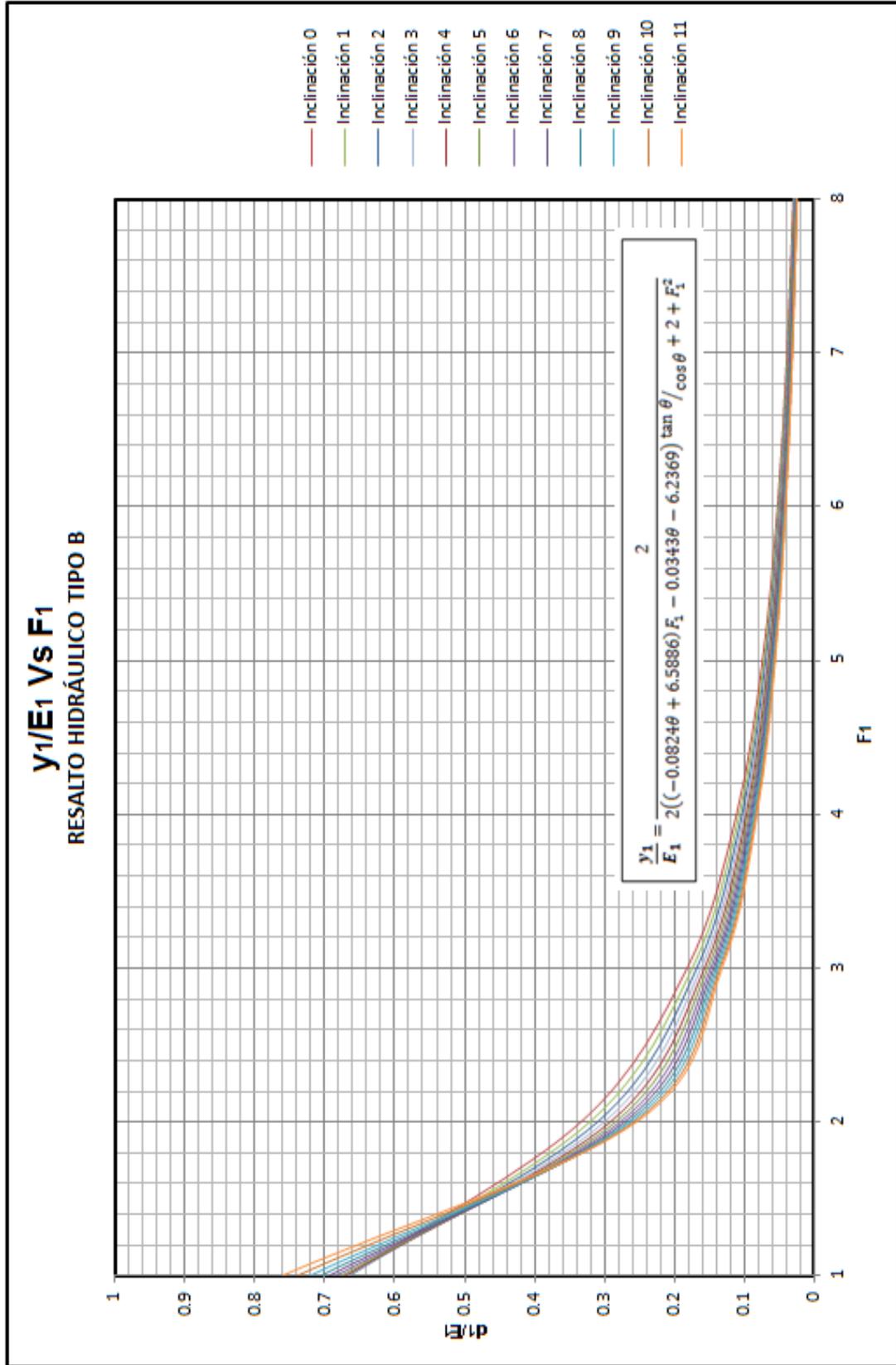
Gráfica F-13 Relación h/y_1 Vs F_1 para Resalto Tipo B.



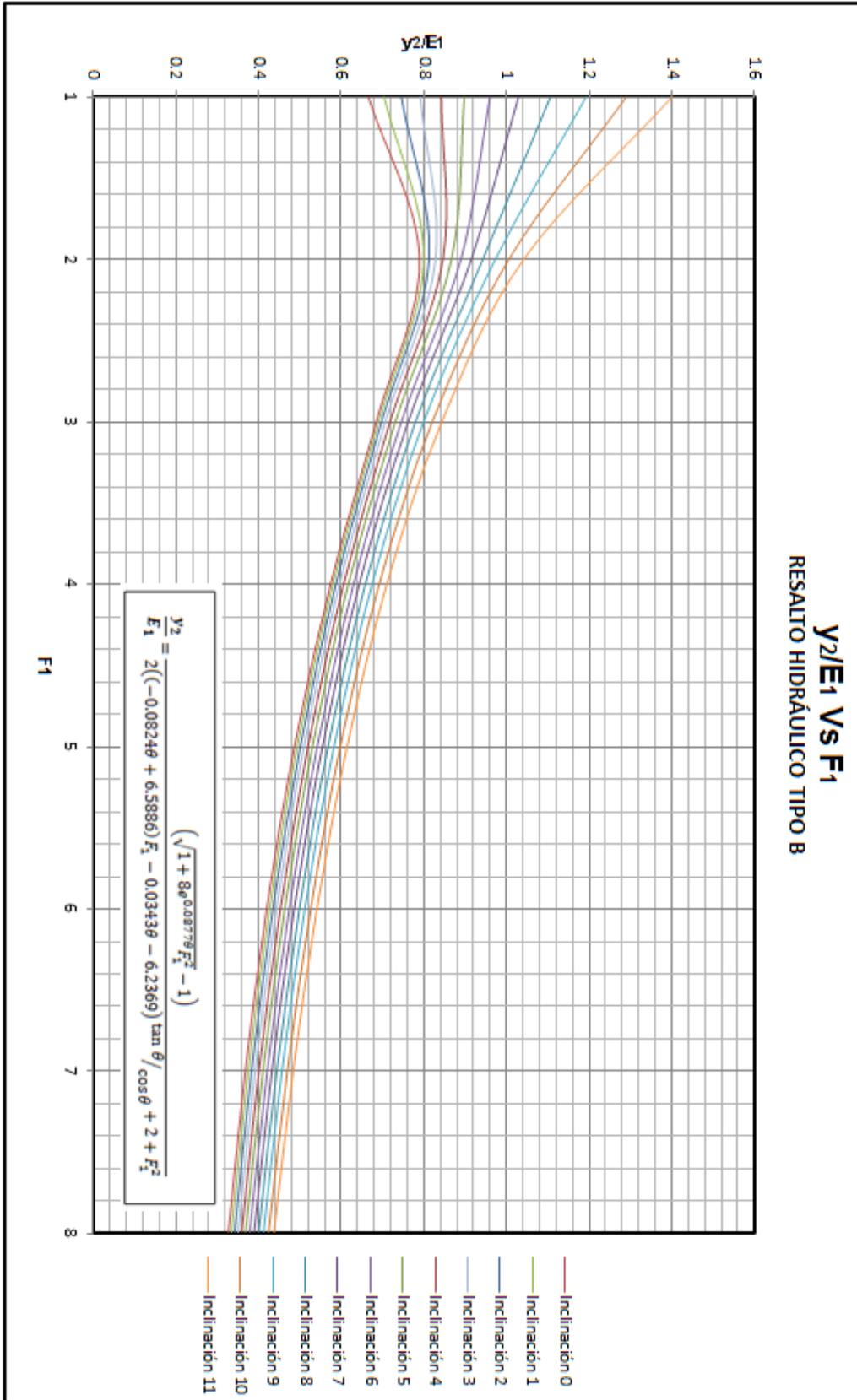
Gráfica F-14 Relación E₂/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo B.



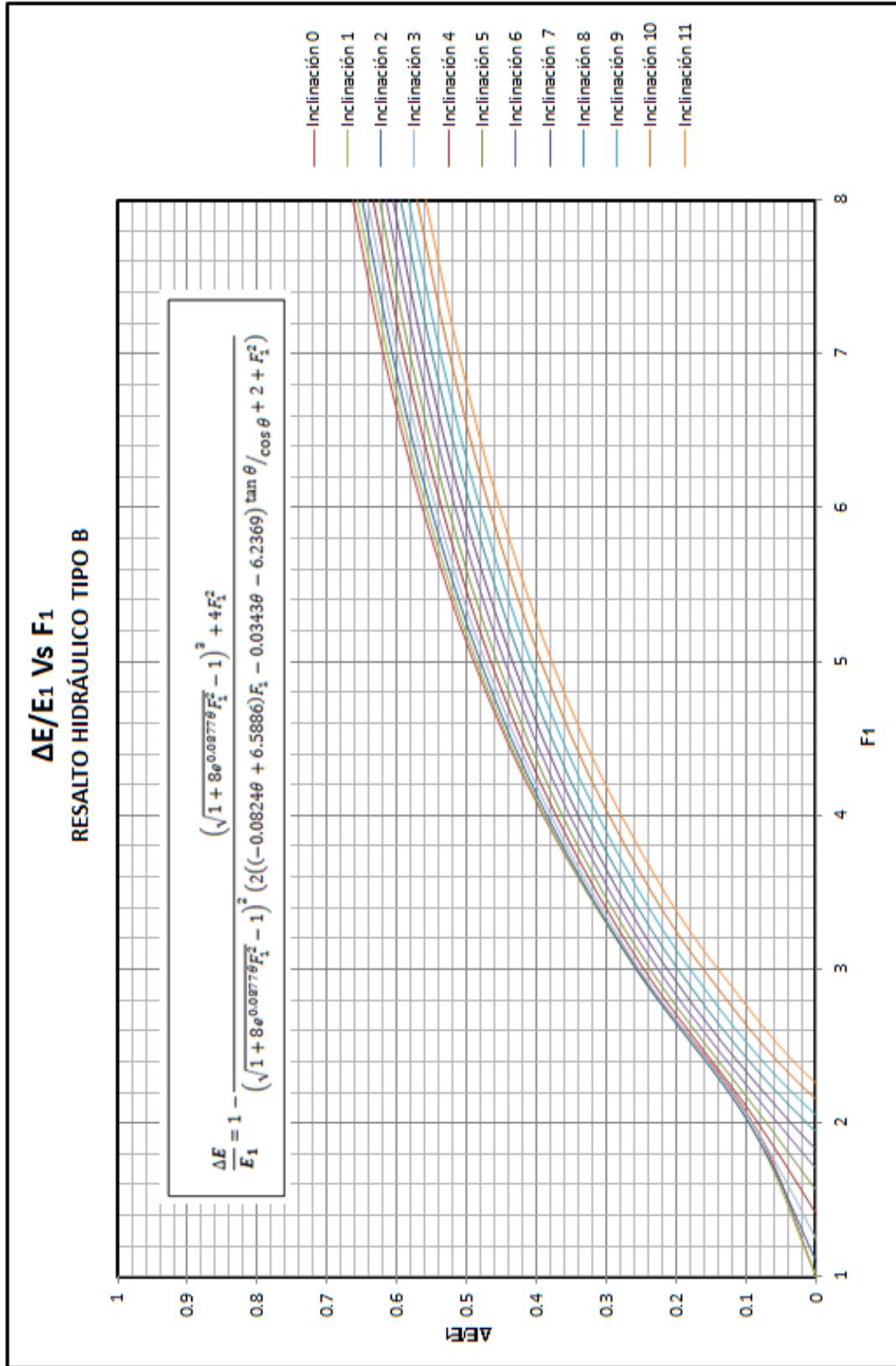
Gráfica F-15 Relación h/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo B.



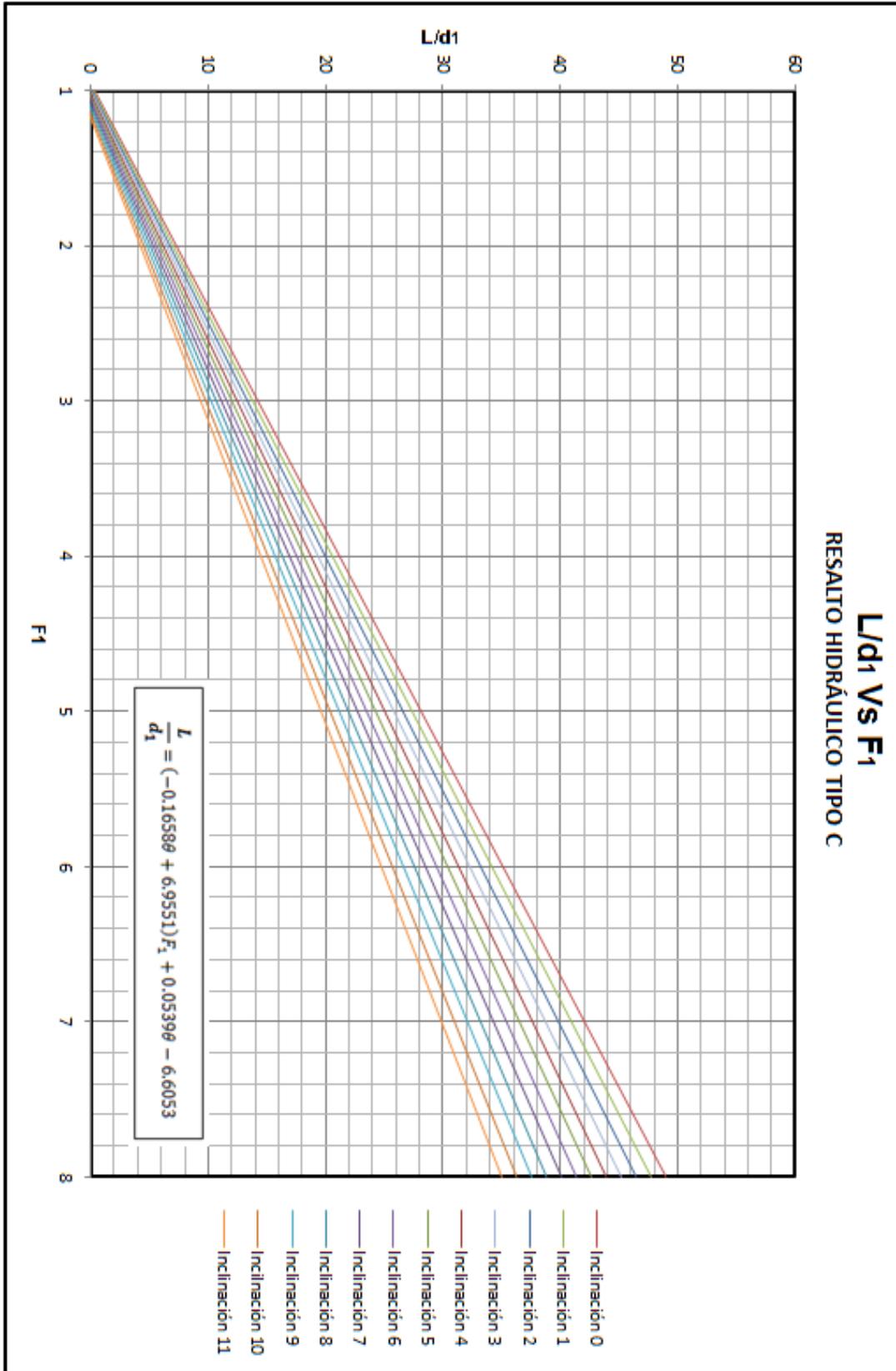
Gráfica F-16 Relación y_1/E_1 Vs F_1 para Resalto Tipo B.



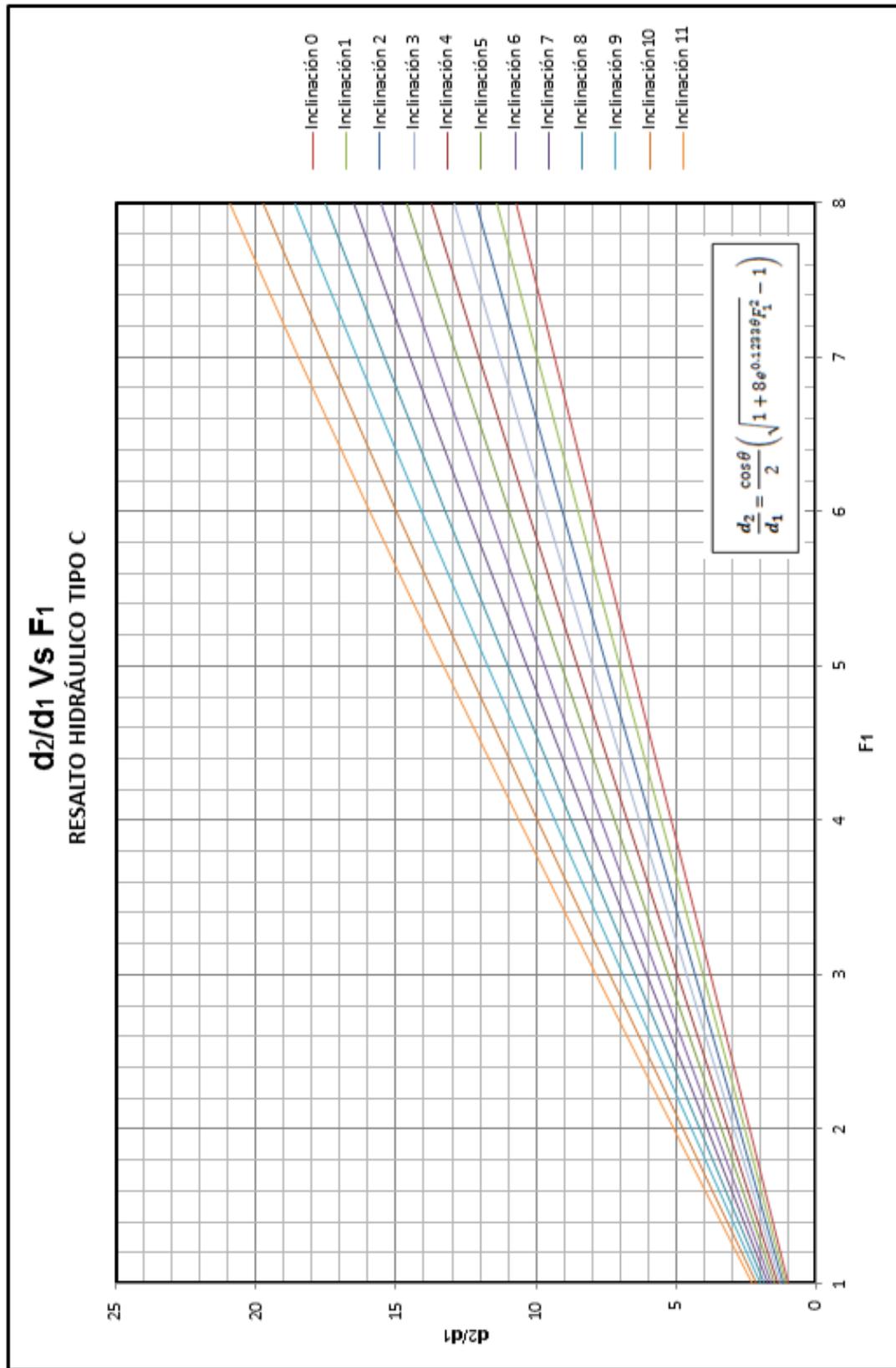
Gráfica F-17 Relación y₂/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo B.



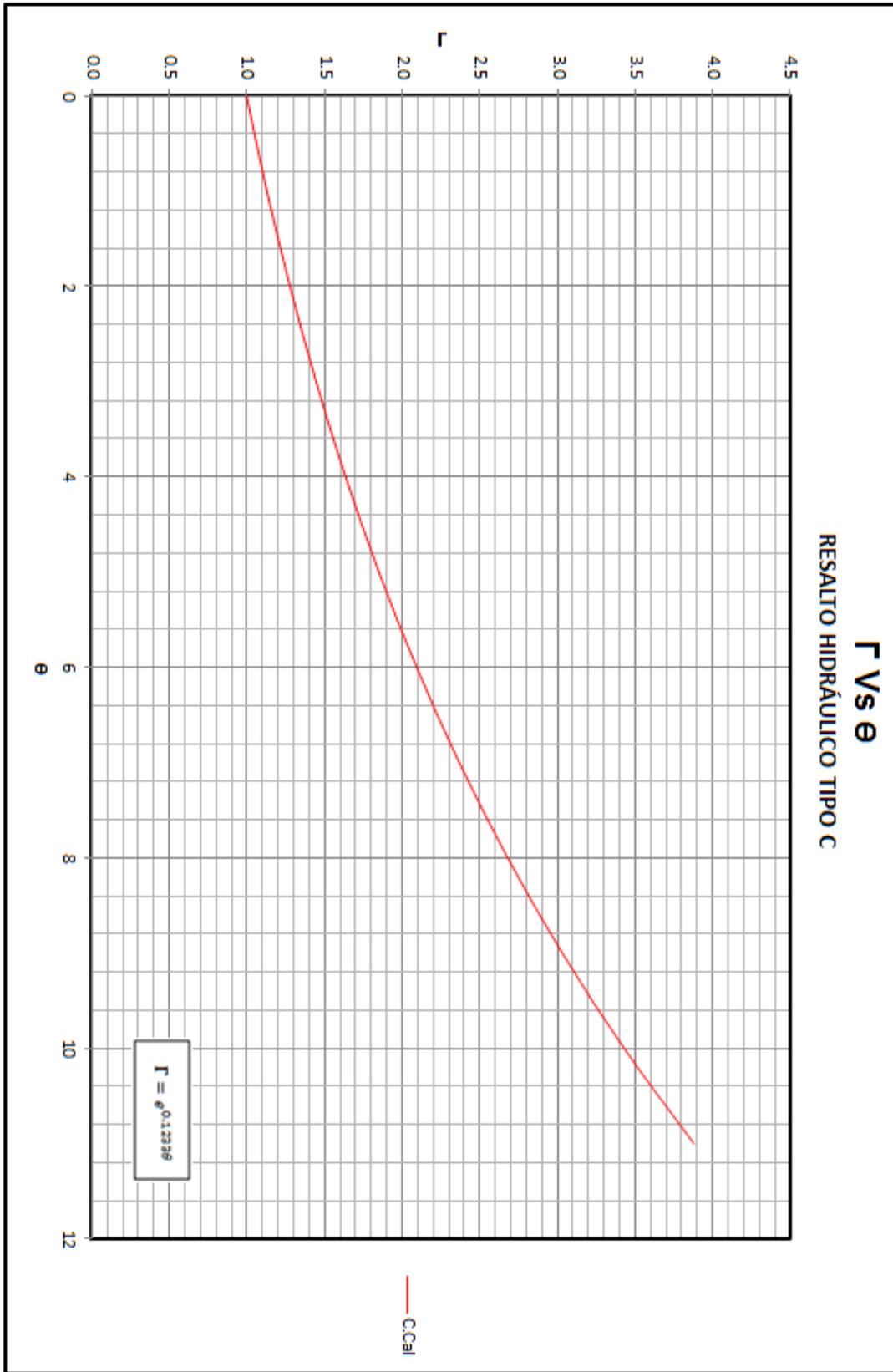
Gráfica F-18 Relación $\Delta E/E_1$ Vs F_1 para Resalto Tipo B.

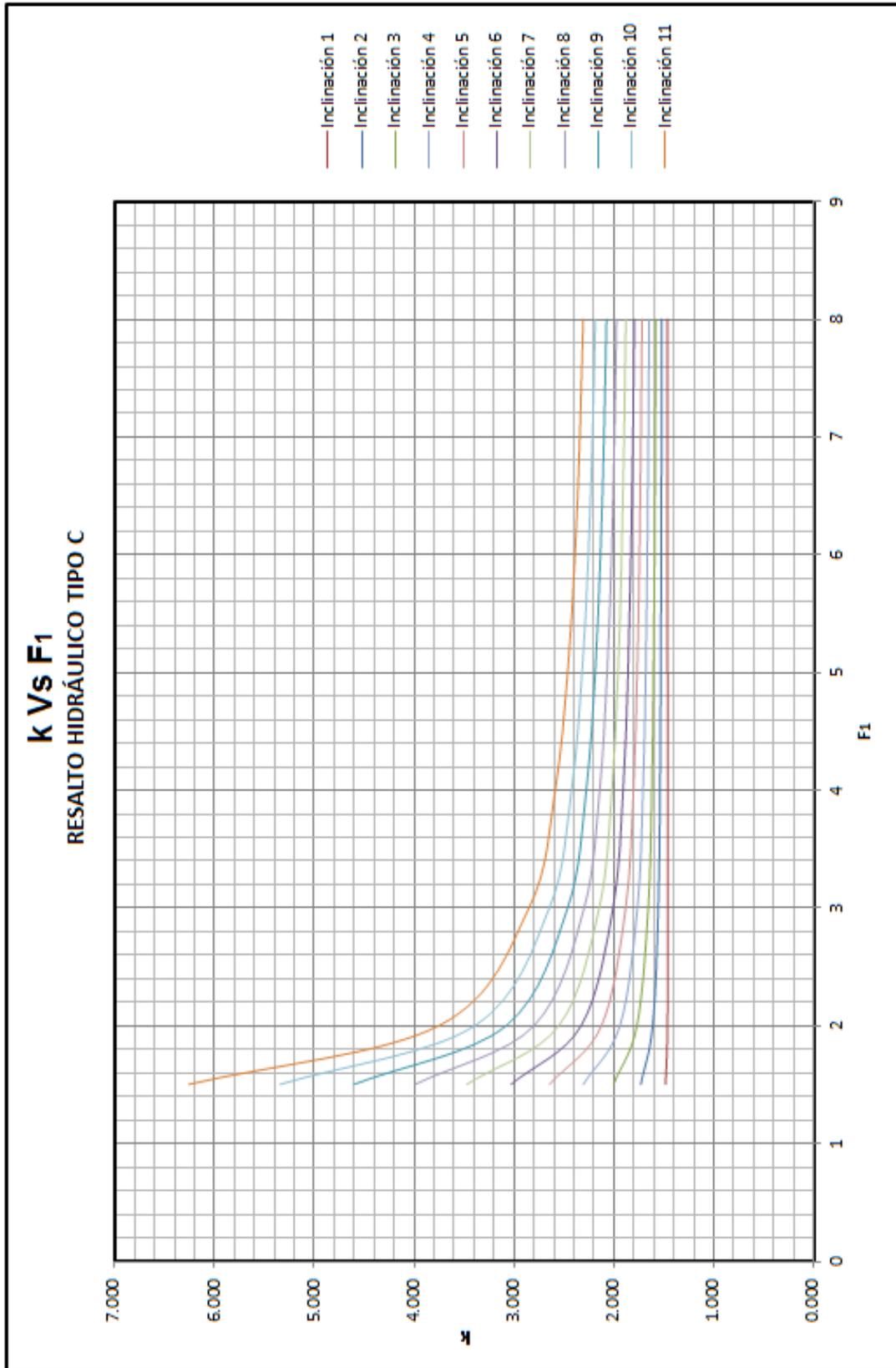


Gráfica F-19 Relación L/d1 Vs F1 para Resalto Tipo C.

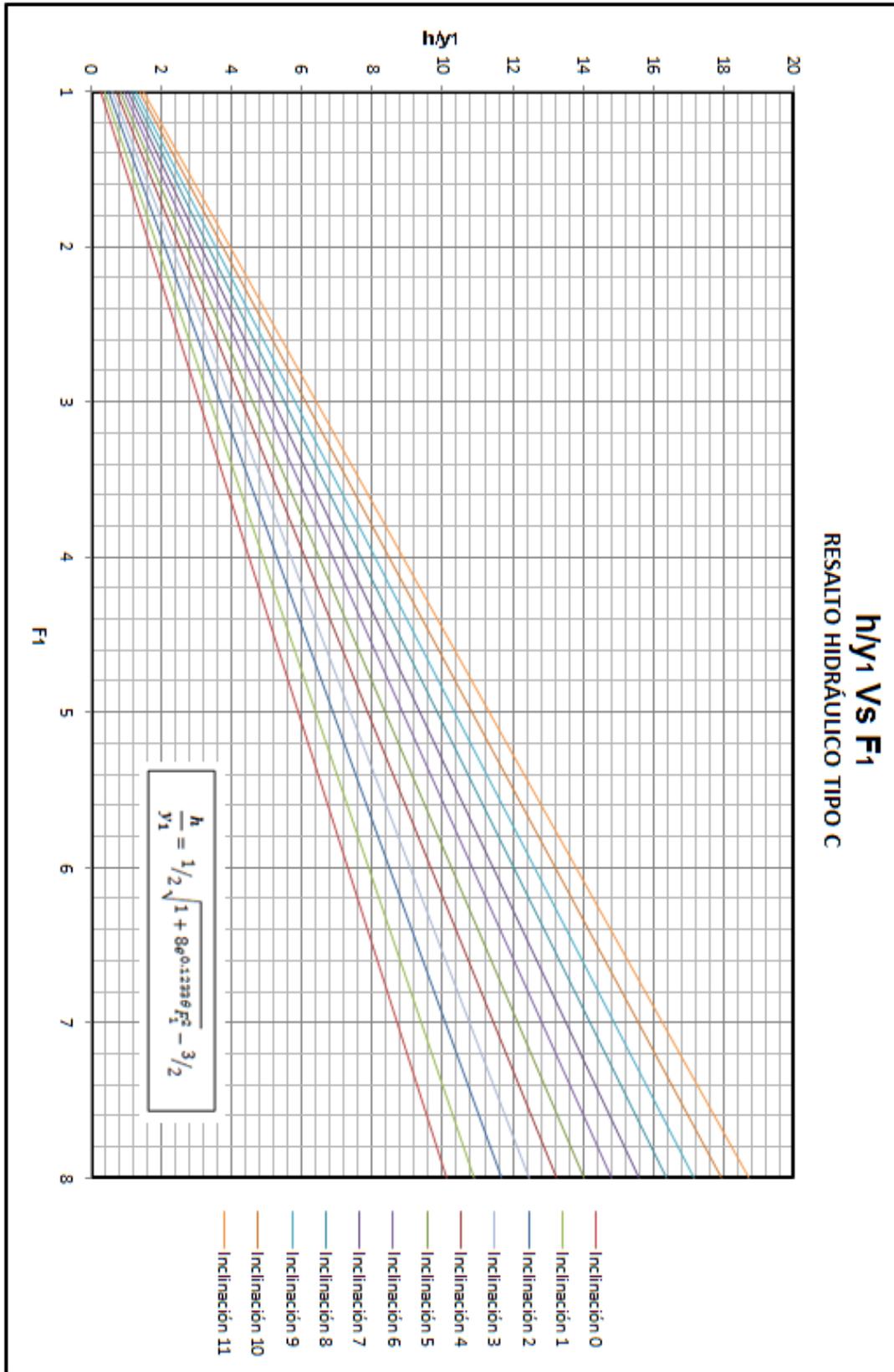


Gráfica F-20 Relación d_2/d_1 Vs F_1 para Resalto Tipo C.

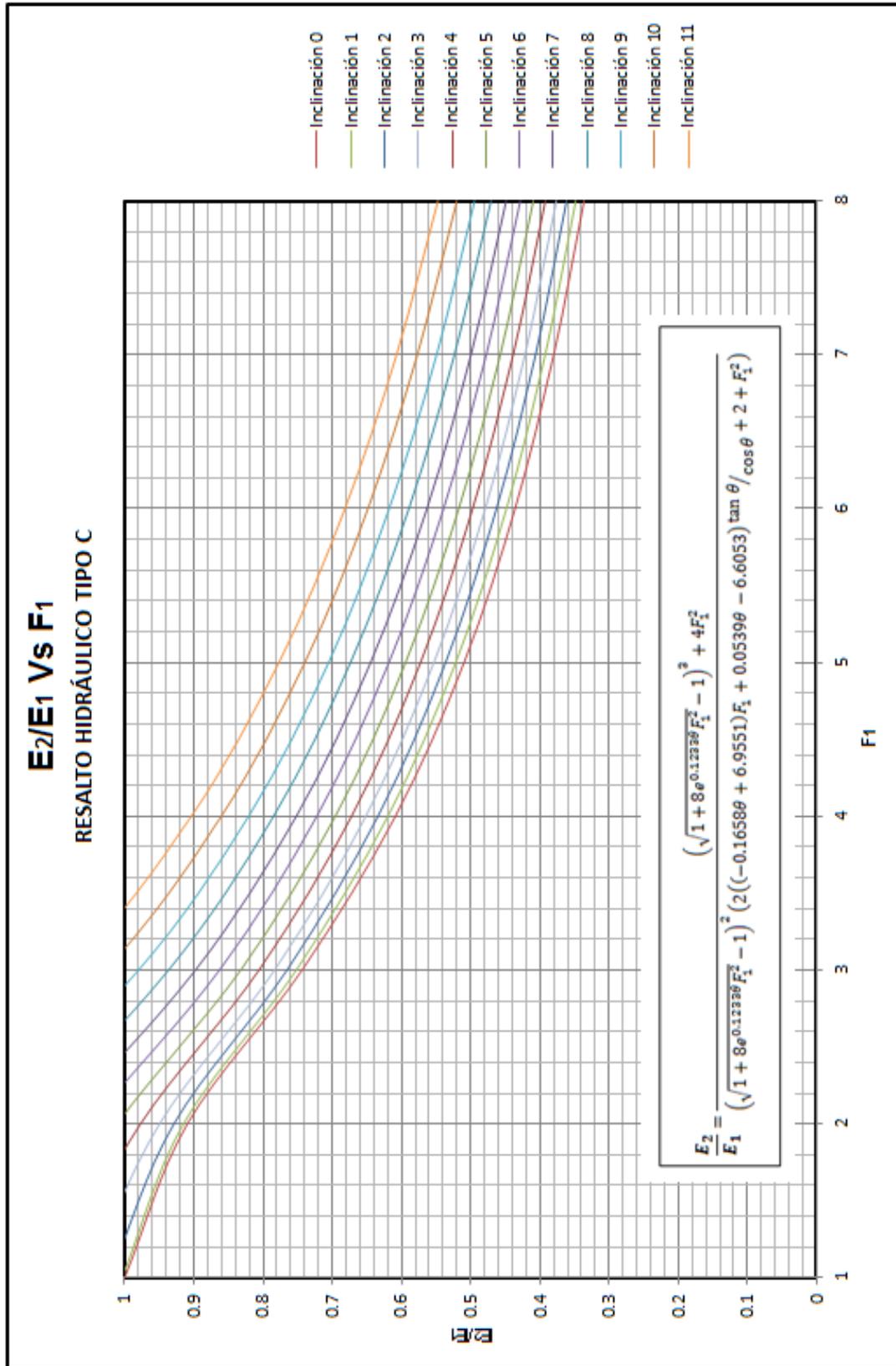
Gráfica F-21 Relación Γ Vs θ para Resalto Tipo C.



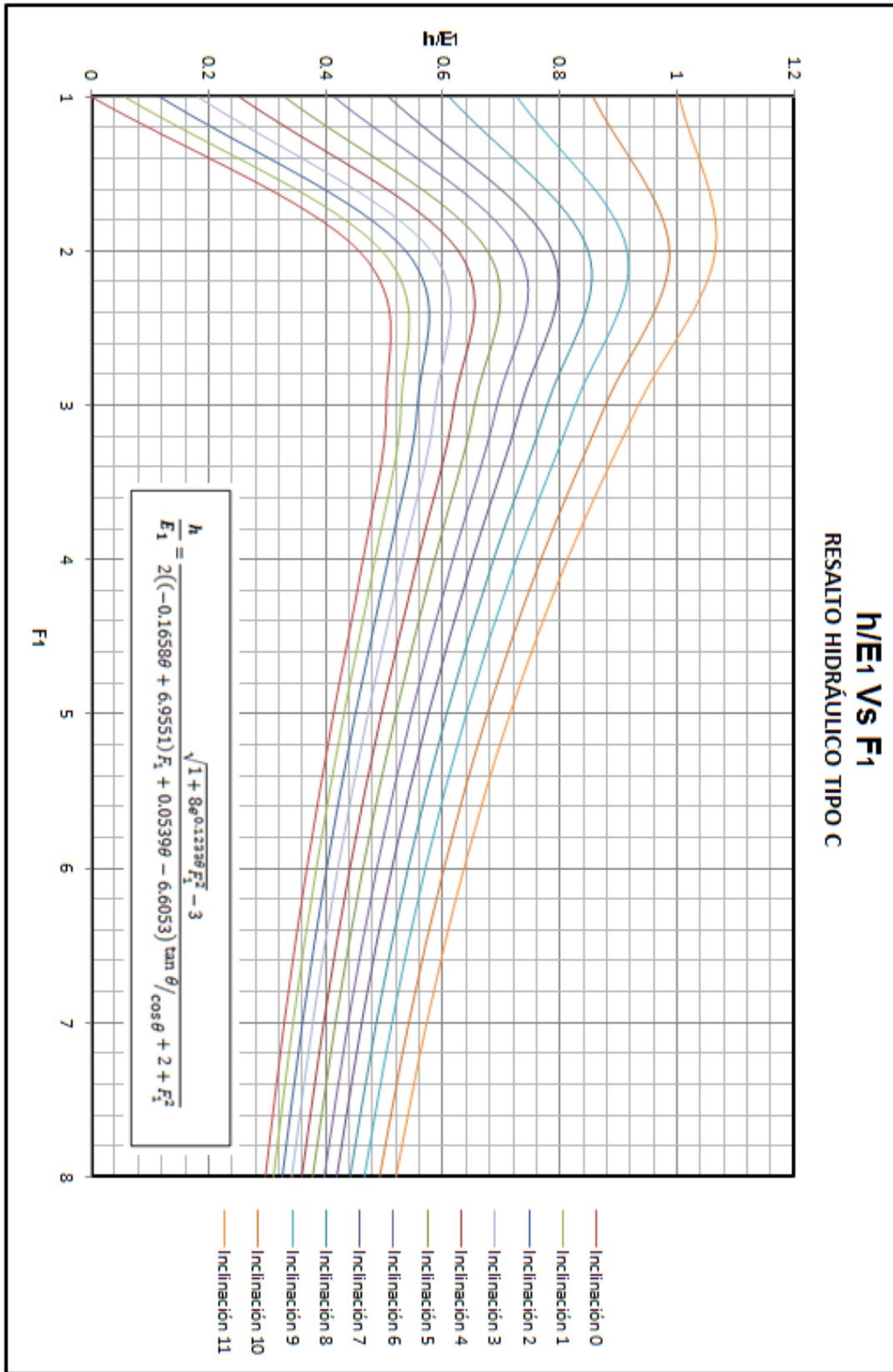
Gráfica F-22 Relación k Vs F1 para Resalto Tipo C.



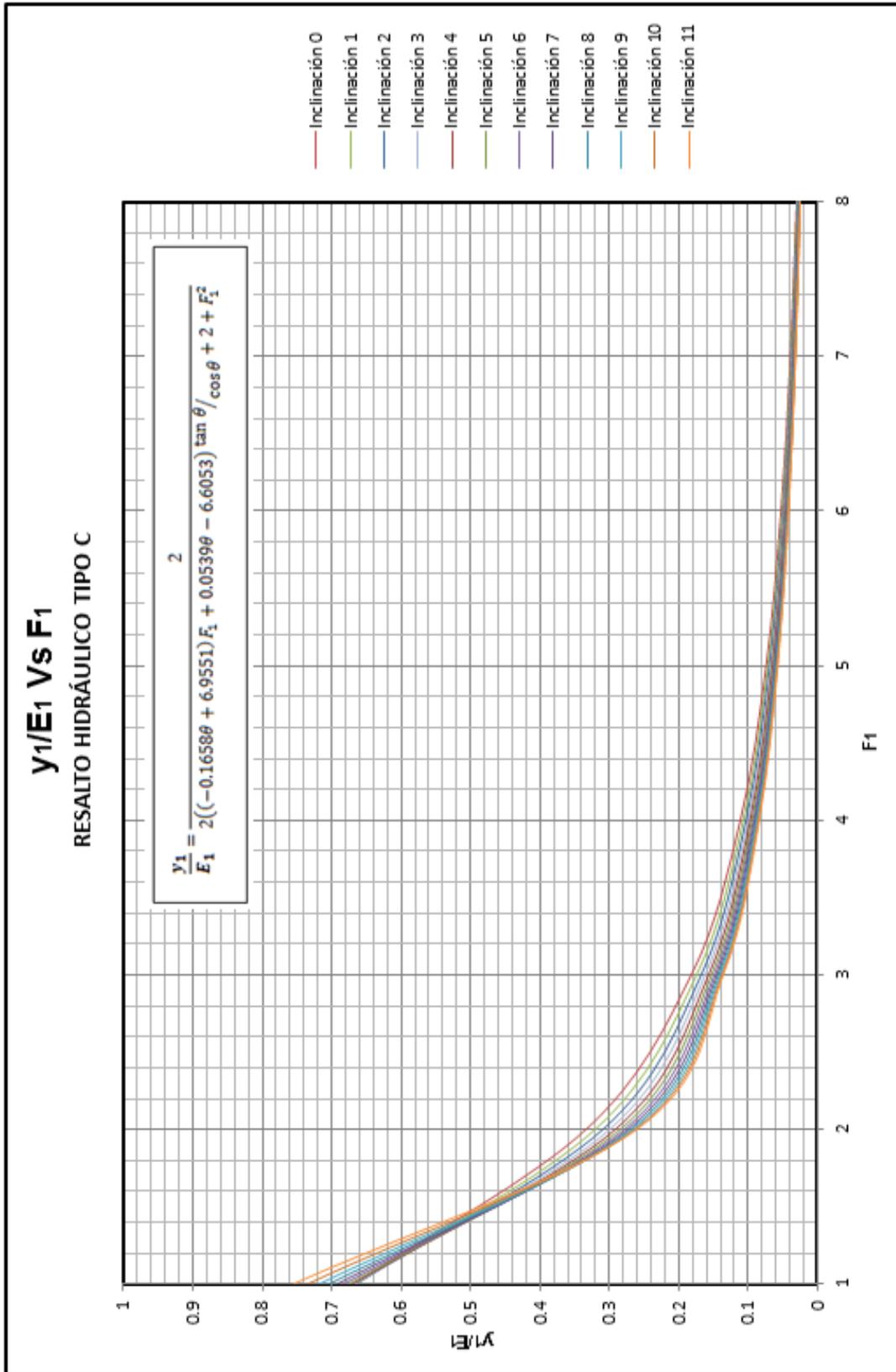
Gráfica F-23 Relación h/y₁ Vs F₁ para Resalto Tipo C.



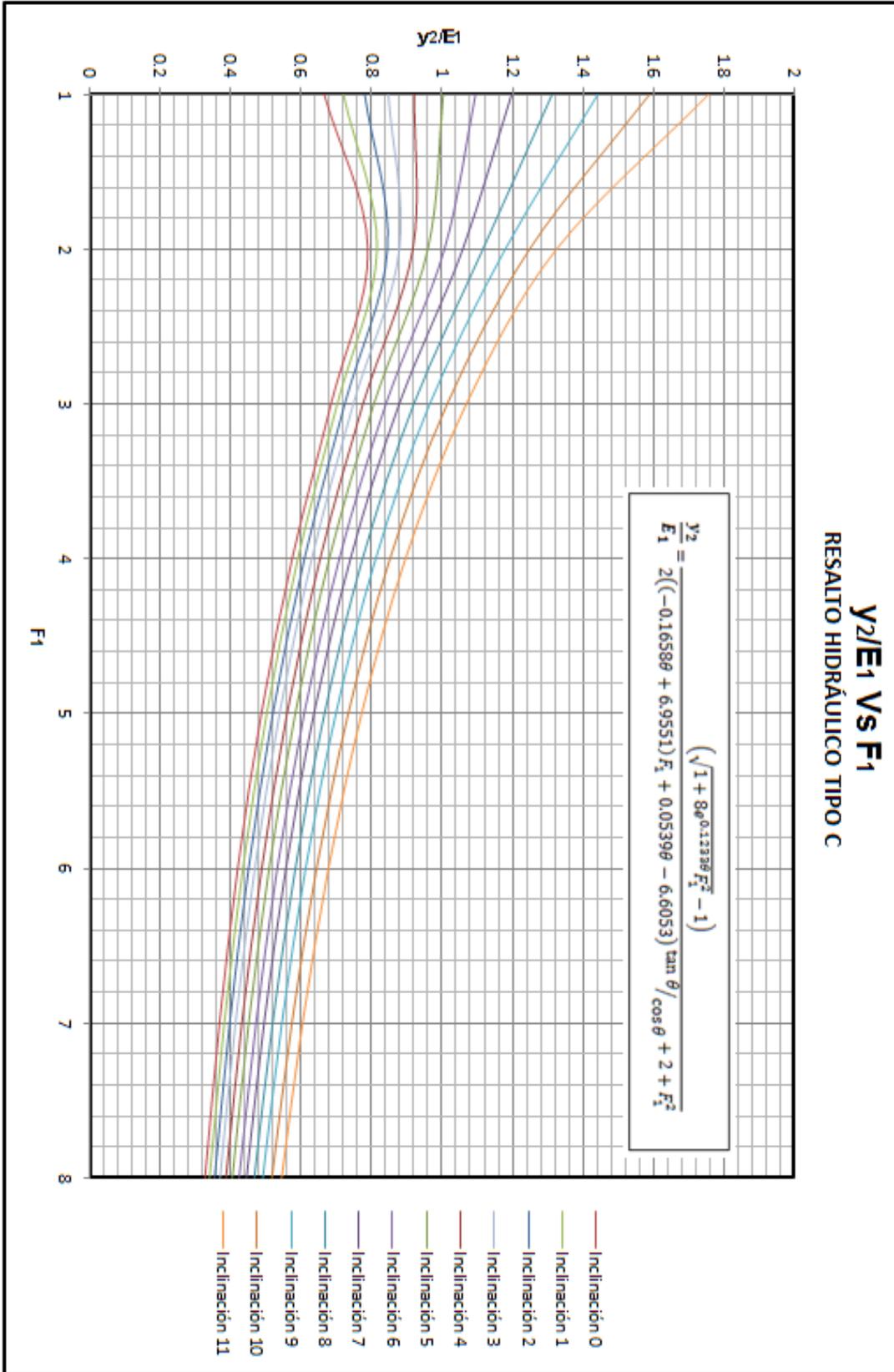
Gráfica F-24 Relación E₂/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo C.



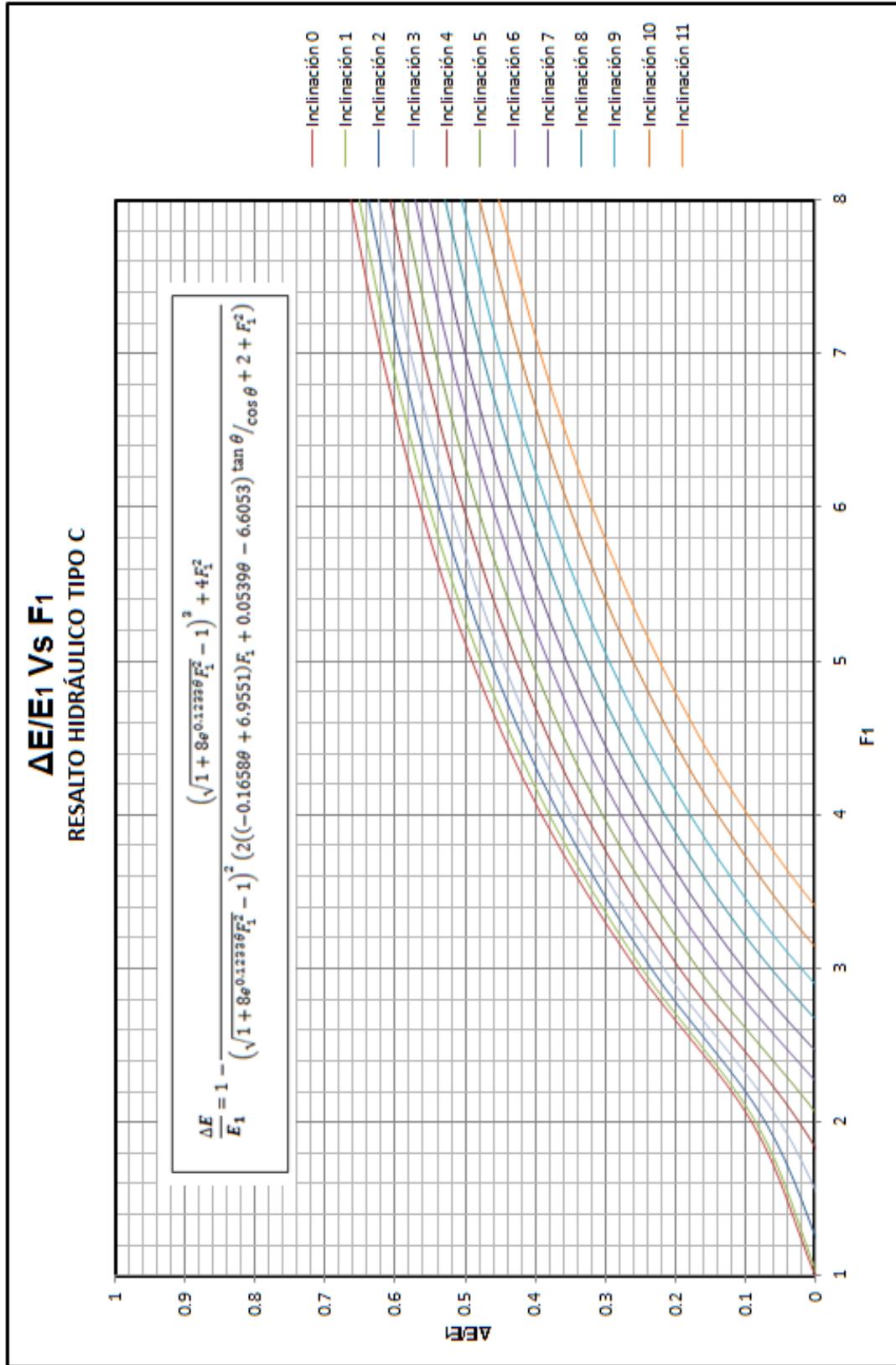
Gráfica F-25 Relación h/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo C.



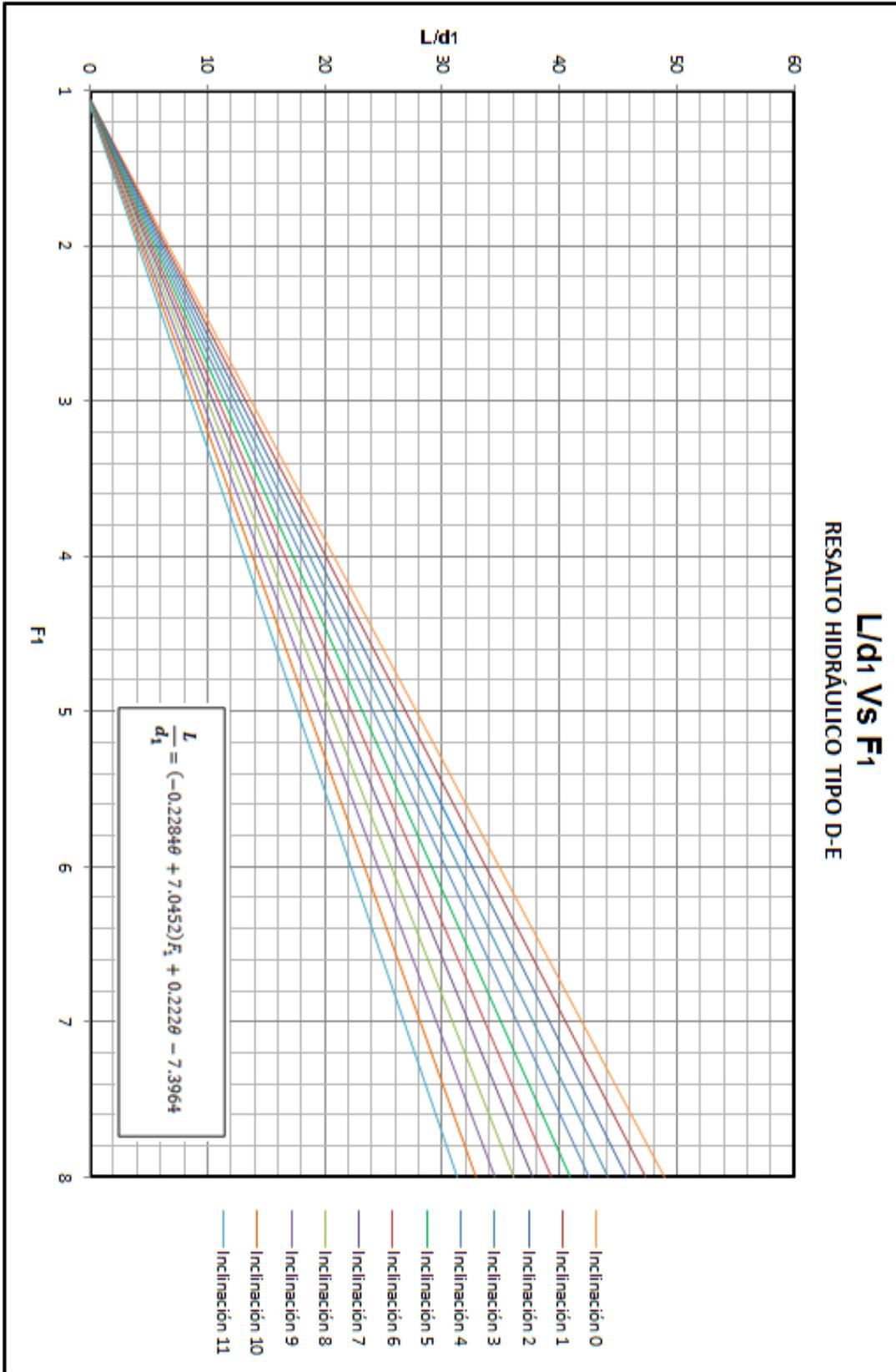
Gráfica F-26 Relación y₁/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo C.



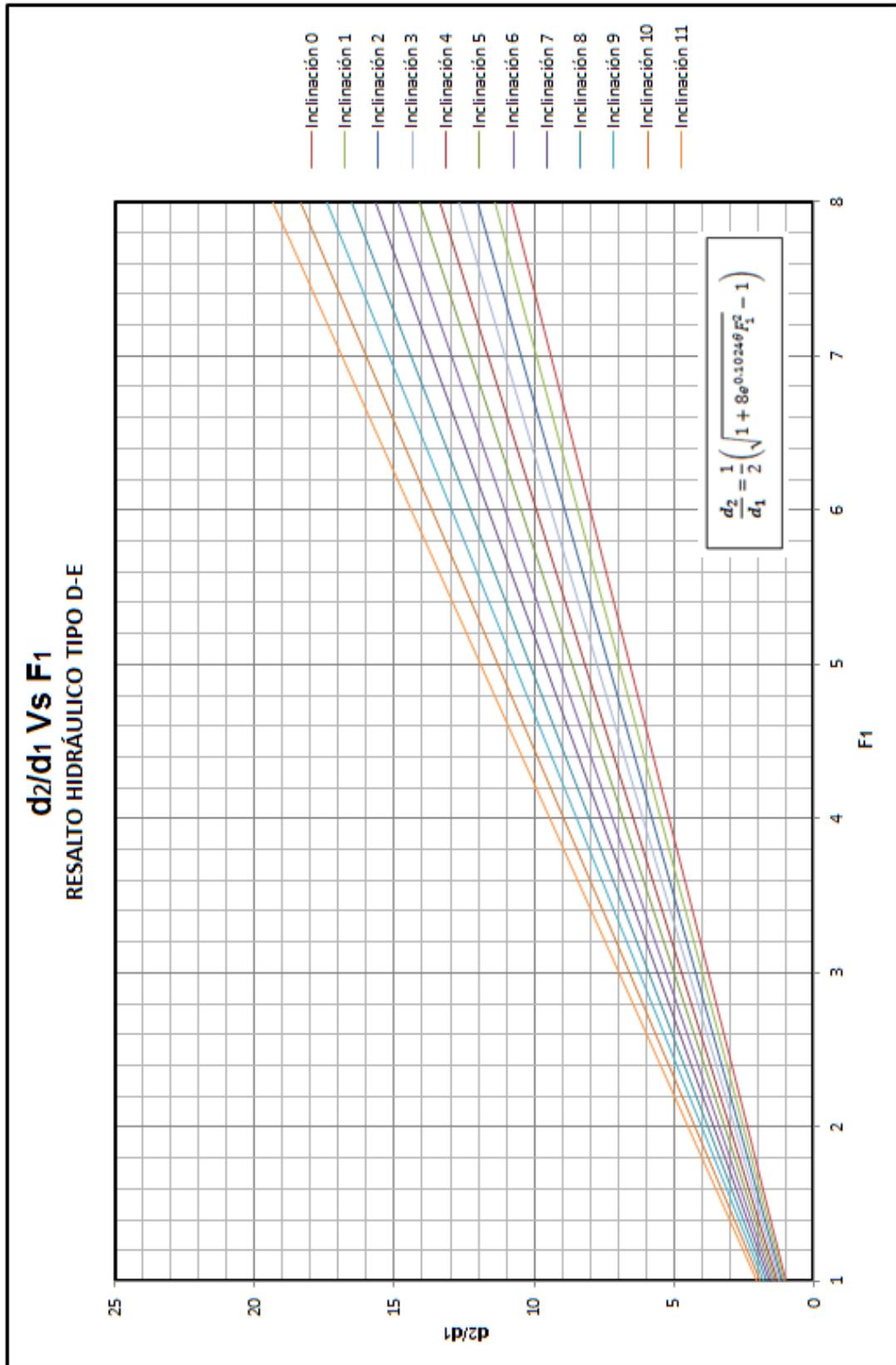
Gráfica F-27 Relación y₂/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo C.



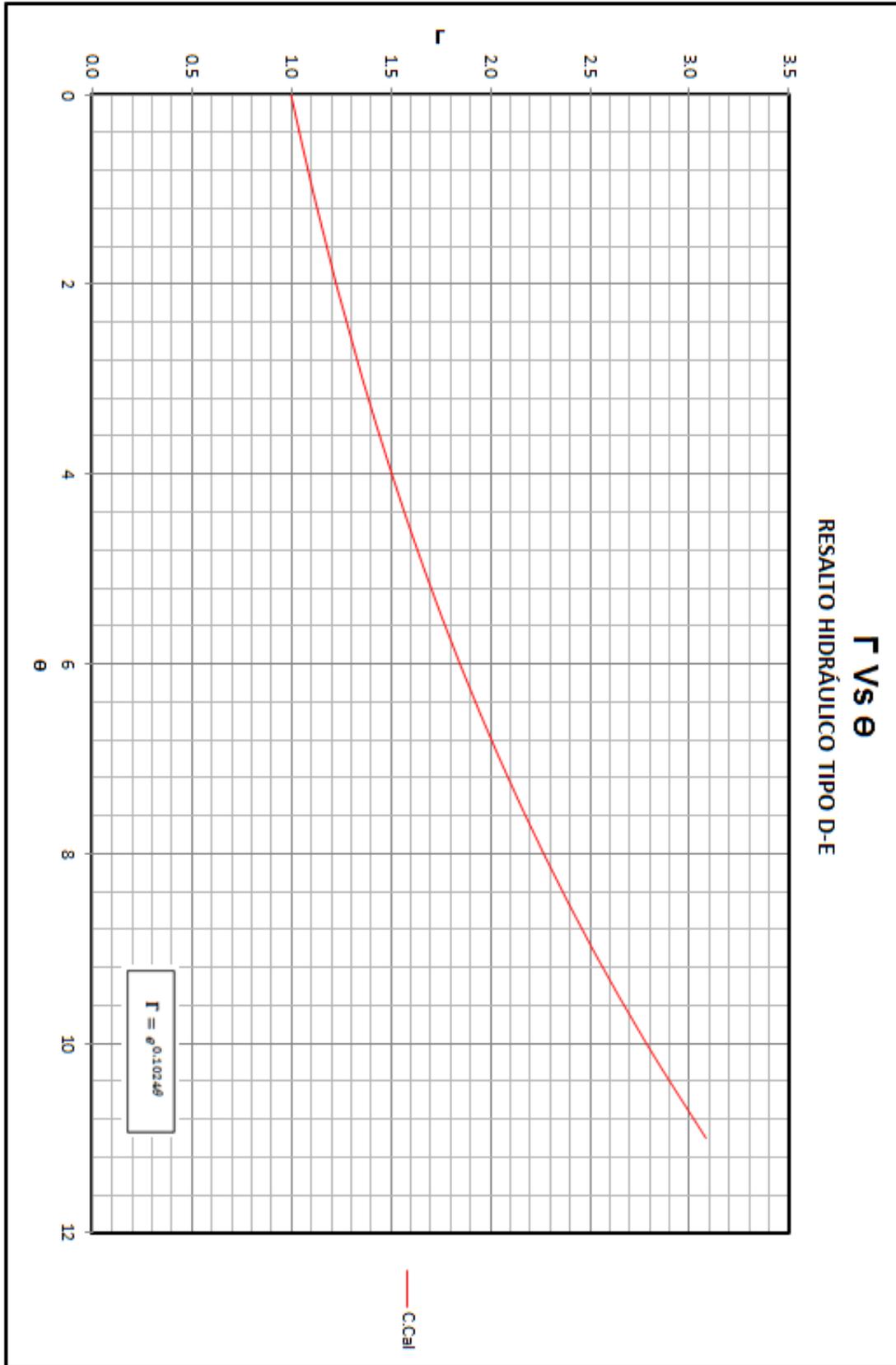
Gráfica F-28 Relación ΔE/E1 Vs F1 para Resalto Tipo C.



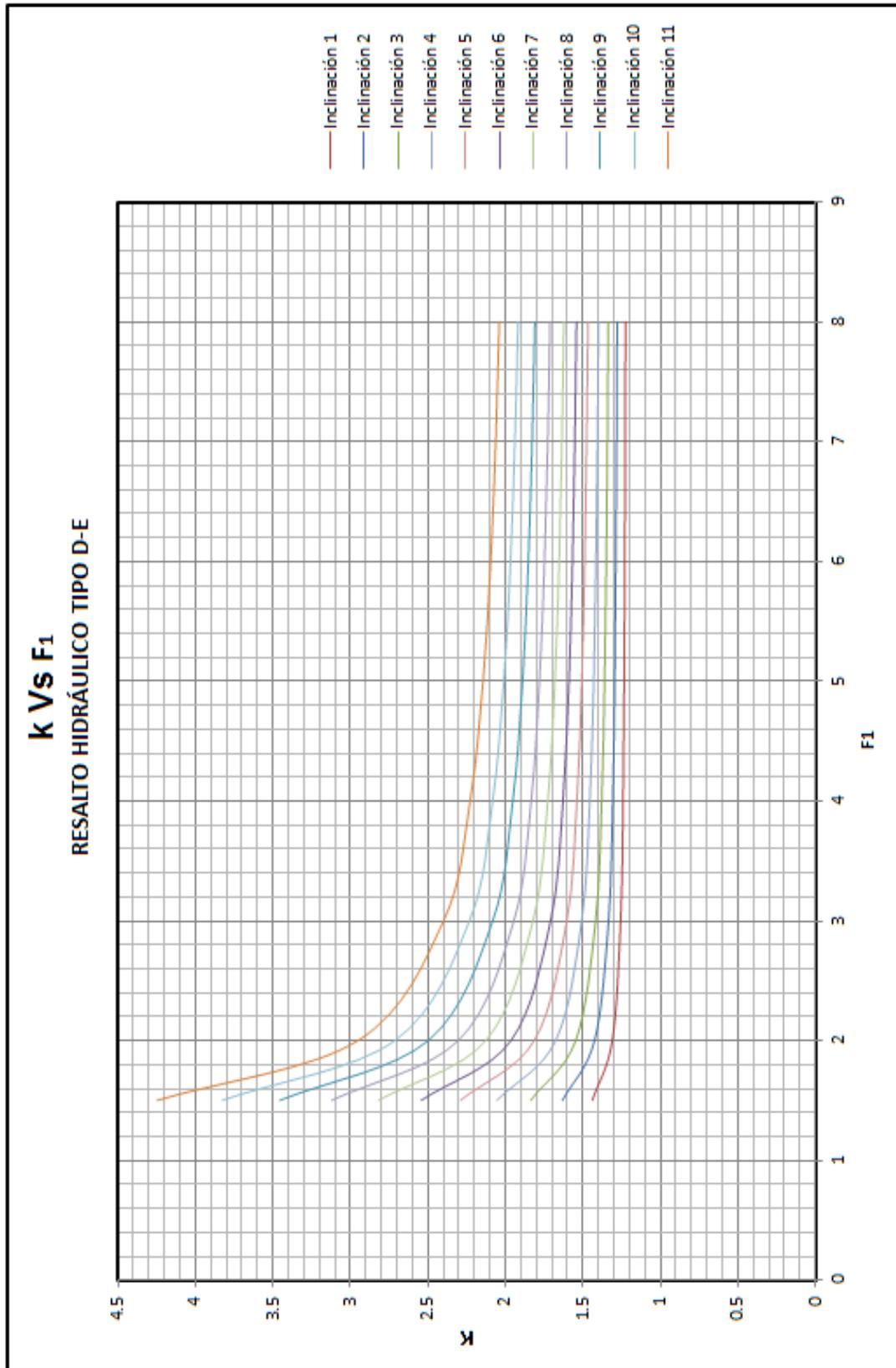
Gráfica F-29 Relación L/d₁ Vs F₁ para Resalto Tipo D-E



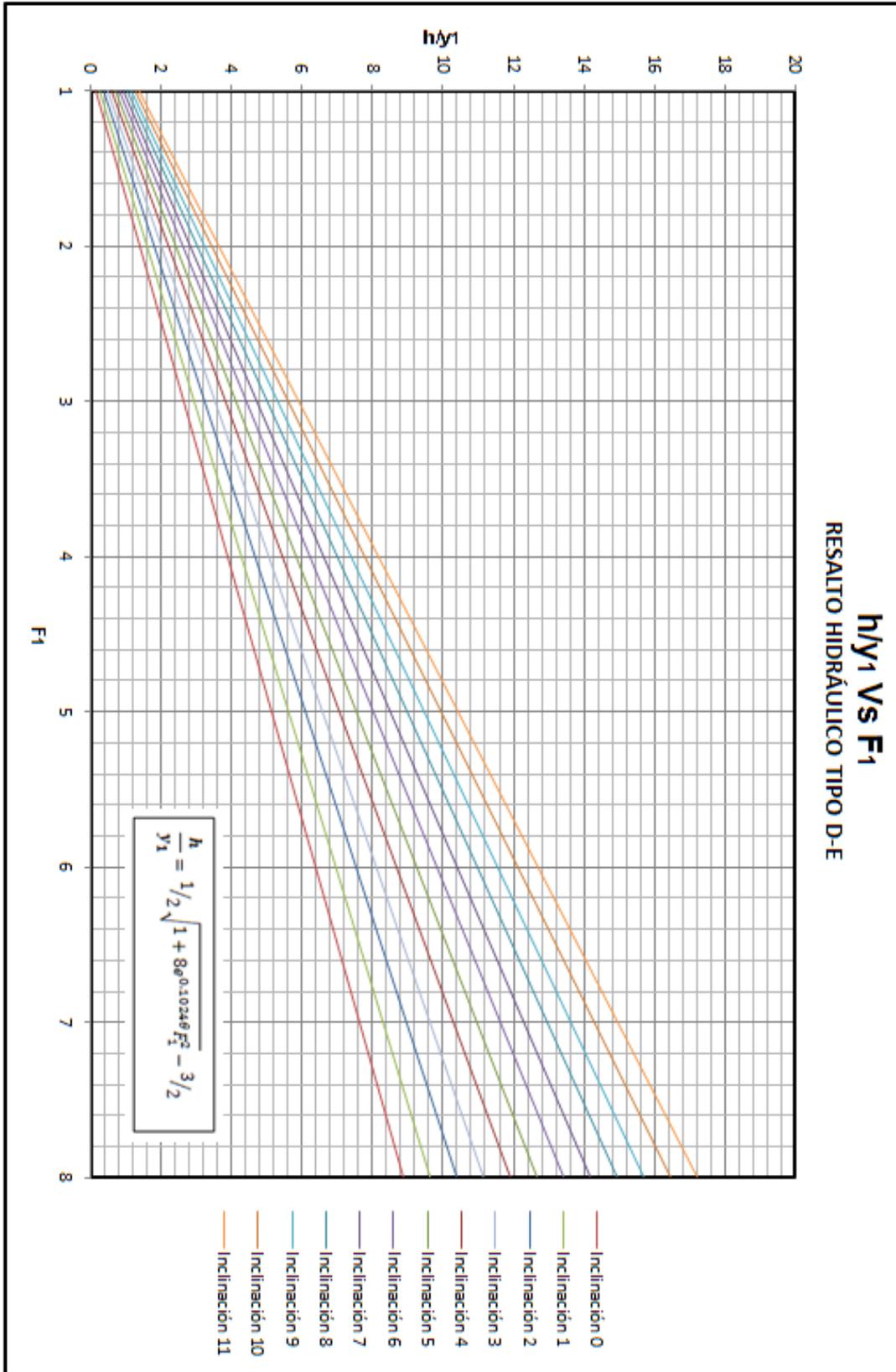
Gráfica F-30 Relación d₂/d₁ Vs F₁ para Resalto Tipo D-E.



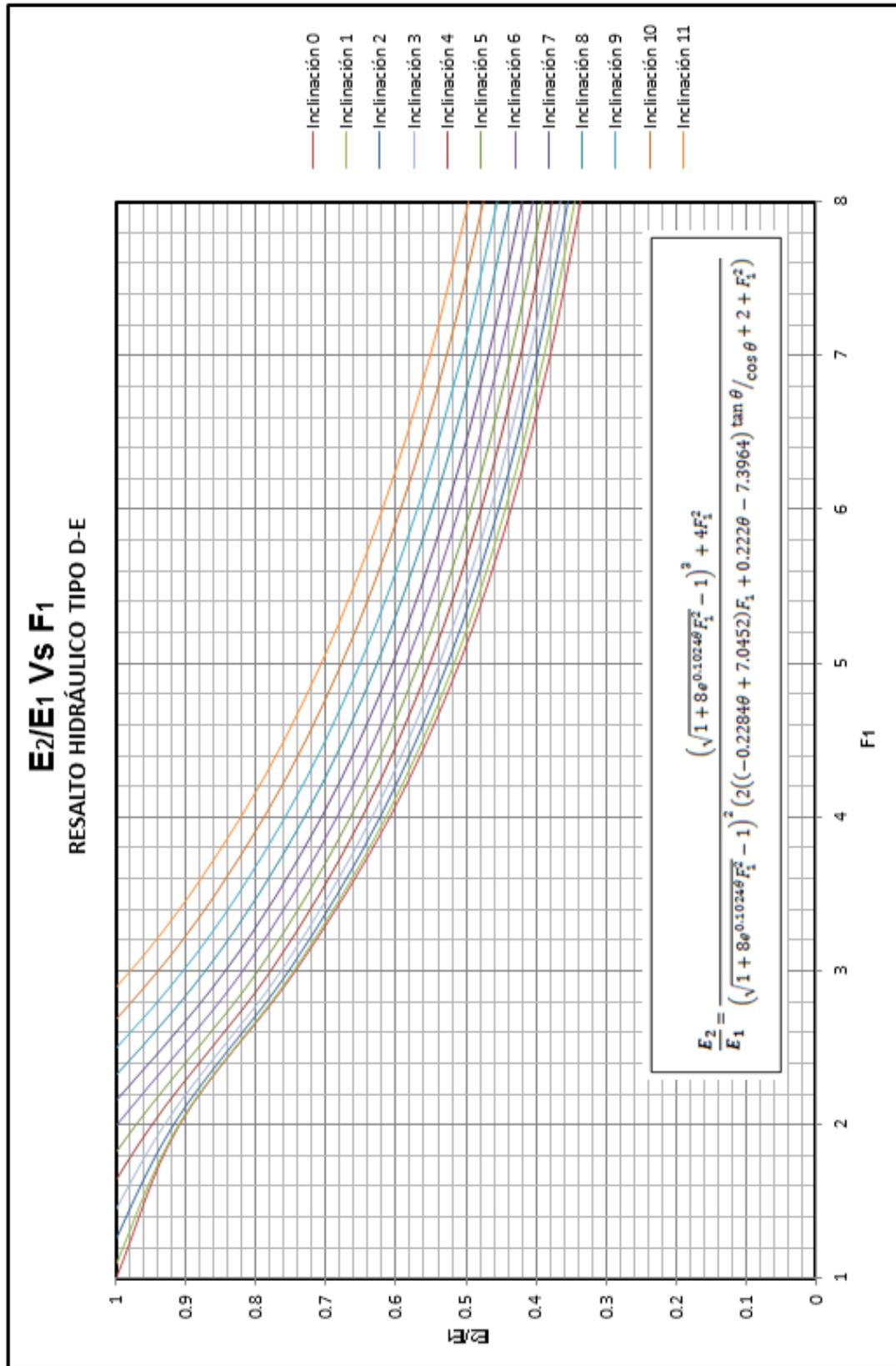
Gráfica F-31 Relación Γ Vs θ para Resalto Tipo D-E.



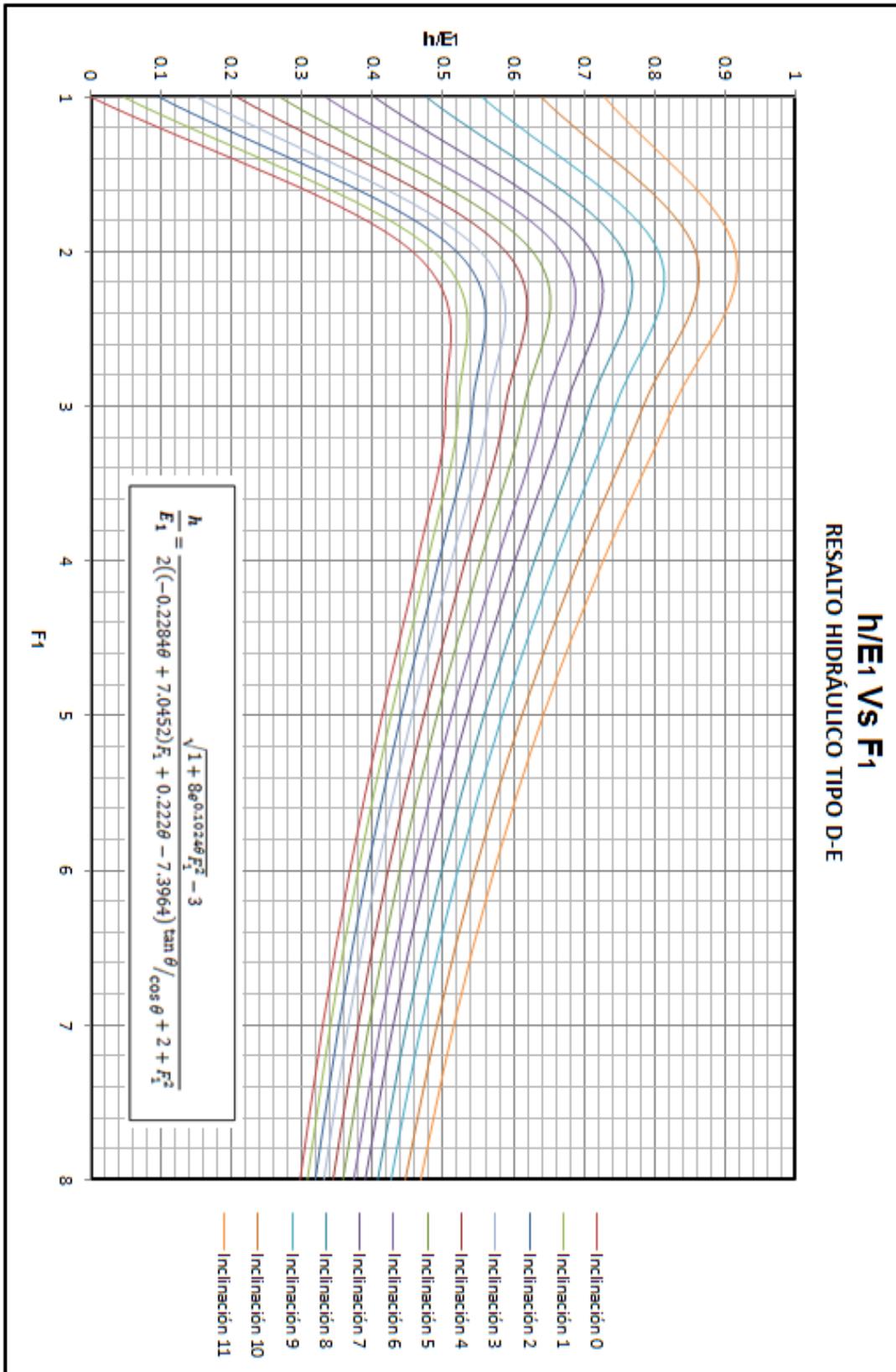
Gráfica F-32 Relación k Vs F1 para Resalto Tipo D-E.



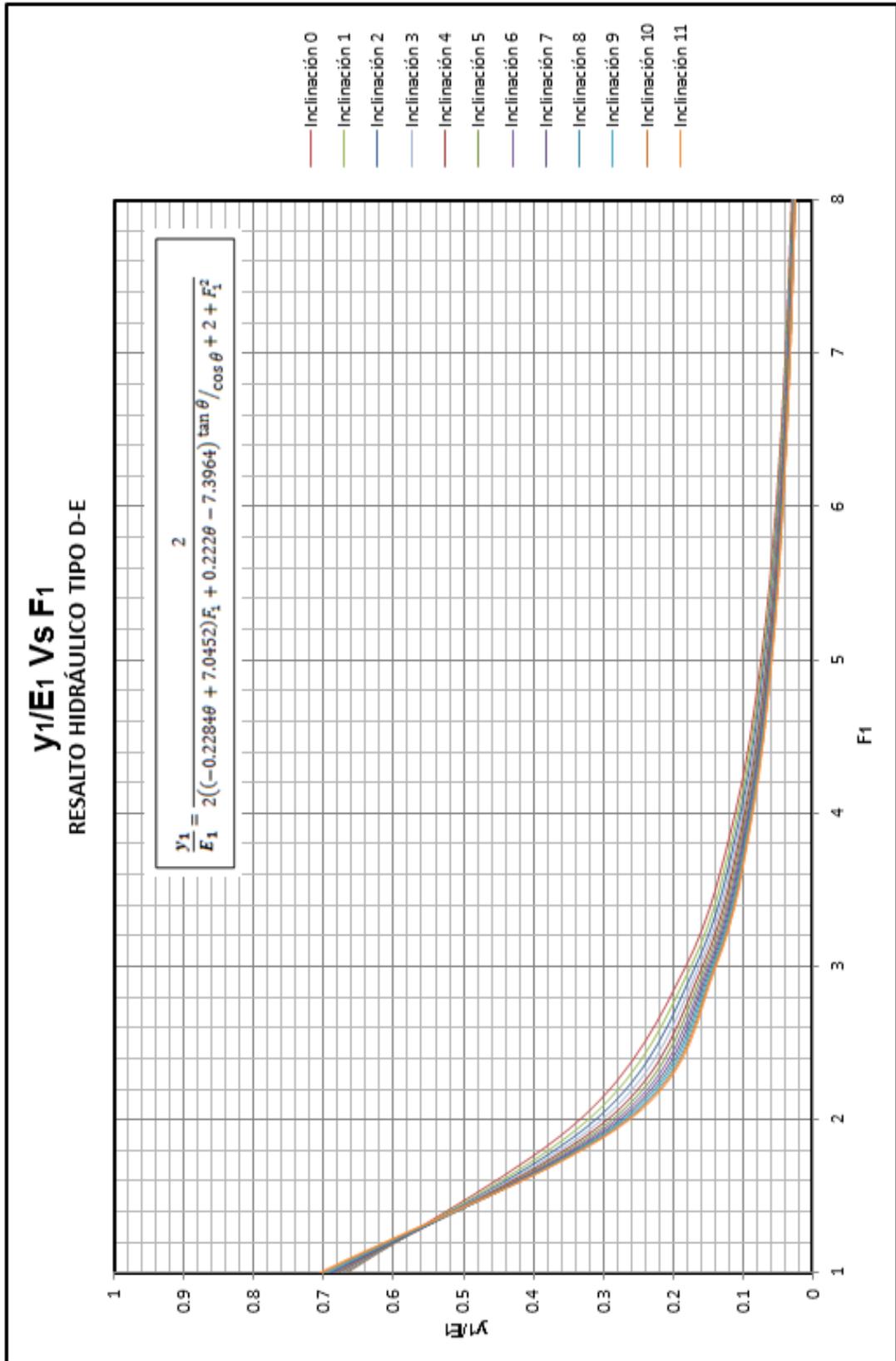
Gráfica F-33 Relación h/y₁ Vs F₁ para Resalto Tipo D-E.



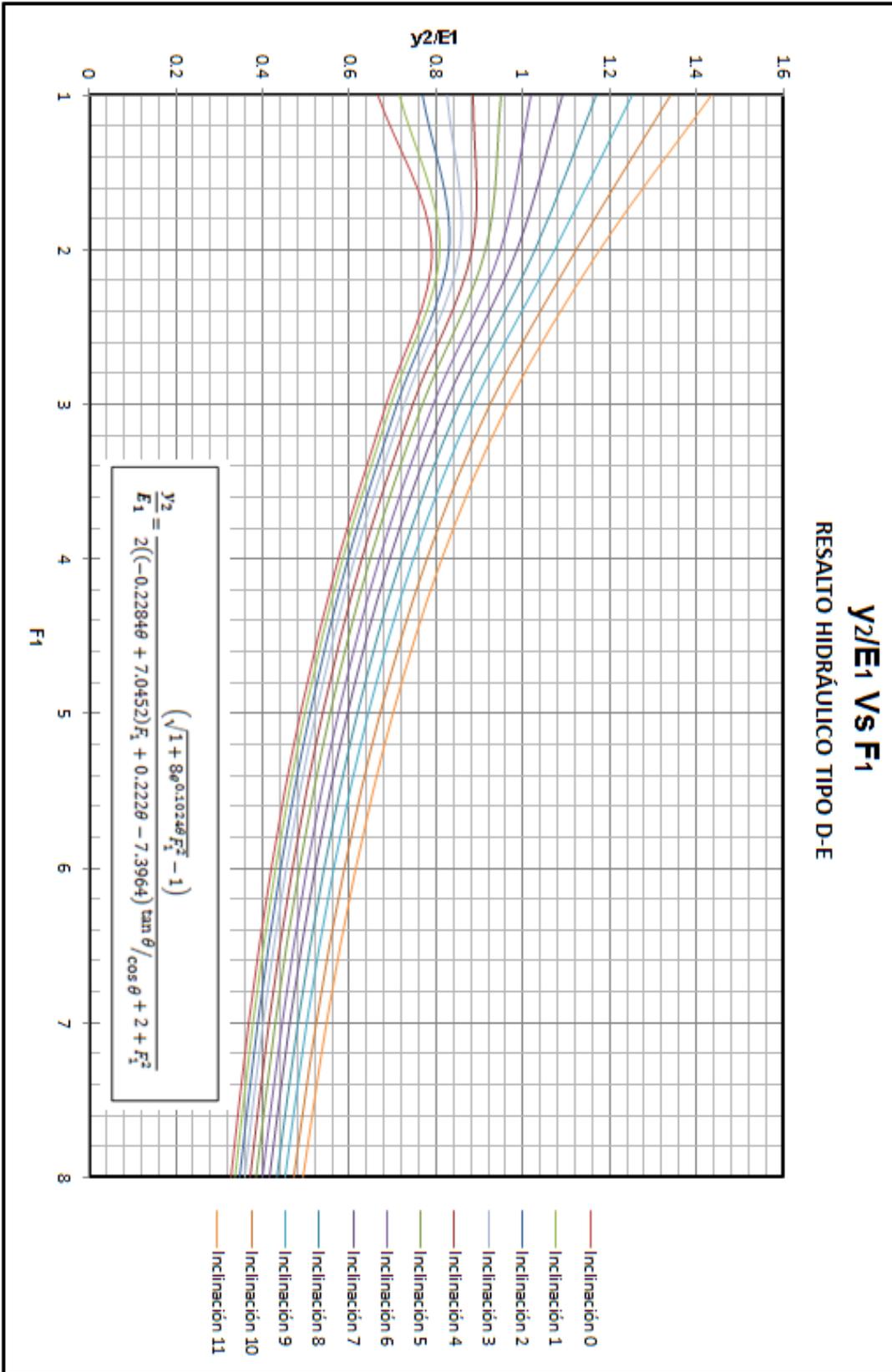
Gráfica F-34 Relación E₂/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo D-E.



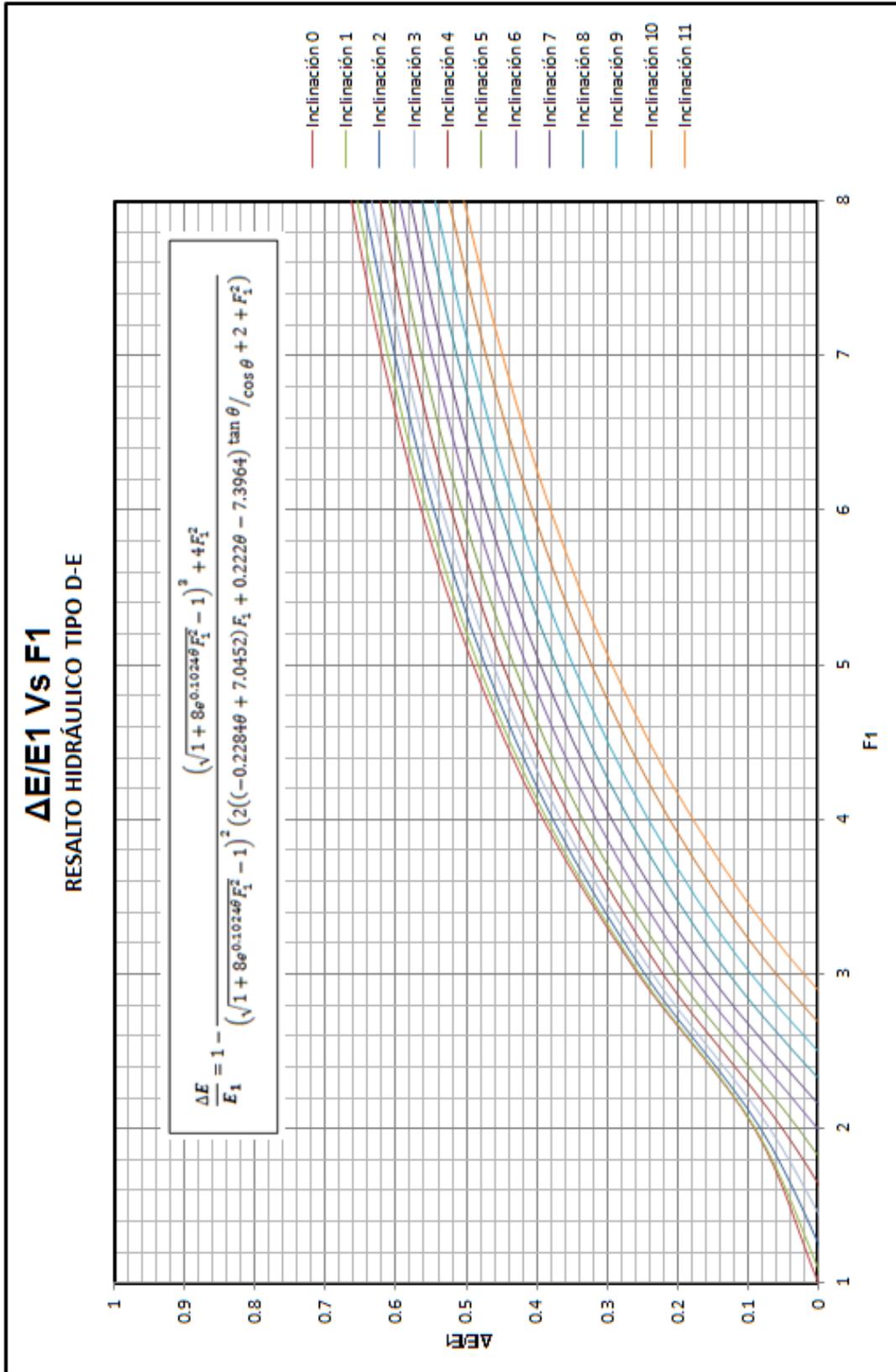
Gráfica F-35 Relación h/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo D-E.



Gráfica F-36 Relación y₁/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo D-E.



Gráfica F-37 Relación y₂/E₁ Vs F₁ para Resalto Tipo D-E.



Gráfica F-38 Relación ΔE/E1 Vs F1 para Resalto Tipo D-E.

