

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**BASES Y CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO
HIDRÁULICO DE FORMAS ESPECIALES DE SALTOS EN ESQUÍ
EN PRESAS**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁSTER (MSc.) EN
RECURSOS HÍDRICOS
MENCIÓN DISEÑO DE PROYECTOS HIDRÁULICOS**

JORGE AUGUSTO TOAPAXI ALVAREZ
jorge_toapaxi@hotmail.com

DIRECTOR: MARCO ANTONIO CASTRO DELGADO, Ph.D.
marco.castro@epn.edu.ec

Quito, Agosto 2014

DECLARACIÓN

Yo, Jorge Augusto Toapaxi Álvarez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

**JORGE AUGUSTO TOAPAXI
ÁLVAREZ**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge Augusto Toapaxi Álvarez, bajo mi supervisión.

MARCO CASTRO DELGADO, Ph.D.

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitir la culminación de otra meta en mi vida.

A mi papi y mi mami por apoyarme incondicionalmente en todo momento.

A mis hermanas y hermano, que con sus consejos me fortalecieron en los momentos difíciles.

A mi director de tesis Dr. Marco Castro Delgado, cuya guía y colaboración han permitido cumplir exitosamente cada uno de los objetivos planteados en este estudio.

A la Ing. Ximena Hidalgo e Ing. Nathalia Valencia, por las valiosas observaciones y sugerencias, indispensables para el desarrollo del presente trabajo.

A todos los docentes que conforman la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la EPN, en especial a quienes han participado en mi formación.

A los ingenieros Edwin Casa, Dimitri Dávila y Daniel Hermosa por los estudios previos realizados referente al presente tema de tesis.

A todos los colaboradores que conforman la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la EPN.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente fueron participes de este proyecto, MUCHAS GRACIAS.

Jorge A. Toapaxí A.

DEDICATORIA

Dedicado a mi padre Jorge Toapaxi Villacís y a mi madre Rosa Álvarez Jácome.
Son mi inspiración.

Jorge A. Toapaxí A.

CONTENIDO

<i>DECLARACIÓN</i>	<i>II</i>
<i>CERTIFICACIÓN</i>	<i>III</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>IV</i>
<i>DEDICATORIA</i>	<i>V</i>
<i>CONTENIDO</i>	<i>VI</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	<i>XIII</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	<i>XX</i>
<i>ÍNDICE DE FOTOS</i>	<i>XXVI</i>
<i>SIMBOLOGÍA</i>	<i>XXVIII</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>XXXV</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>XXXVI</i>
<i>PRESENTACIÓN</i>	<i>XXXVII</i>
CAPÍTULO 1	1
ANTECEDENTES	1
1.1. GENERALIDADES: DEFINICIONES Y DESCRIPCIÓN DEL FLUJO HOMOGÉNEO Y DEL FLUJO DE UNA MEZCLA AGUA – AIRE SOBRE EL CIMACIO DE UNA PRESA	1
1.1.1. DEFINICIONES	4
1.1.2. DESCRIPCIÓN DEL FLUJO HOMOGÉNEO Y DEL FLUJO DE UNA MEZCLA AGUA – AIRE SOBRE EL CIMACIO DE UNA PRESA.....	7
1.1.2.1. Flujo Homogéneo sobre el cimacio de una presa:	9
1.1.2.2. Flujo de una Mezcla Agua – Aire sobre el cimacio de una presa:.....	19
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA BASE TEÓRICA SOBRE EL EFECTO DE LA GRAVEDAD, DE LA VISCOSIDAD Y DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL EN EL MOVIMIENTO SUPERCRÍTICO DE UN CANAL DE SECCIÓN	

TRANSVERSAL RECTANGULAR SOBRE UN FONDO LISO CON CURVATURA CÓNCAVA.....	27
1.2.1. EFECTO DE LA GRAVEDAD	28
1.2.2. EFECTO DE LA VISCOSIDAD	31
1.2.3. EFECTO DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL	33
1.2.4. RÉGIMEN DEL FLUJO	34
1.3. DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA CLÁSICA DE EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN Y DEL EFECTO DE LA CURVATURA CÓNCAVA EN FLUJO SUPERCRÍTICO	36
1.3.1. PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN CANALES	37
1.3.2. EFECTO DE LA CURVATURA CÓNCAVA EN FLUJO SUPERCRÍTICO	45
1.4. OBJETIVOS Y RESTRICCIONES DE LA TESIS DE GRADO	50
1.4.1. OBJETIVOS GENERALES	50
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	51
1.4.3. RESTRICCIONES	51
1.5. CONCLUSIONES	52
CAPÍTULO 2.....	55
CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL MOVIMIENTO DEL AGUA SOBRE EL TRAMO FINAL DEL CIMACIO DE UNA PRESA.....	55
2.1. CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO SOBRE EL SALTO EN ESQUÍ, DEL FLUJO DE SALIDA Y DEL IMPACTO EN EL CUENCO AL PIE DE LA PRESA.....	55
2.1.1. INTRODUCCIÓN.....	55
2.1.2. FLUJO DE APROXIMACIÓN AL CUCHARÓN DEL SALTO EN ESQUÍ.....	57
2.1.3. FLUJO SOBRE EL CUCHARÓN DEL SALTO EN ESQUÍ - DESVIACIÓN DEL FLUJO.....	57
2.1.4. FLUJO EN LA SALIDA DE UN SALTO EN ESQUÍ – DESPEGUE DEL FLUJO Y DISPERSIÓN DEL CHORRO.....	58
2.1.4.1. Desintegración de un chorro a superficie libre	60
2.1.5. FLUJO DE IMPACTO EN EL CUENCO AL PIE DE LA PRESA	64

2.2. ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES Y DE PRESIONES EN EL FONDO DEL SALTO EN ESQUÍ Y AL INICIO DEL CHORRO DE SALIDA DESDE EL ESQUÍ.....	67
2.2.1. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES	67
2.2.1.1. Velocidades en el fondo del salto en esquí	67
2.2.1.2. Velocidades al inicio del chorro de salida desde el esquí	71
2.2.2. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES	73
2.2.2.1. Presiones en el fondo del salto en esquí.....	73
2.2.2.2. Presiones al inicio del chorro de salida desde el esquí	82
2.3. DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE SALTOS EN ESQUÍ A SER EXAMINADOS.....	84
2.3.1. SALTO CONVENCIONAL	84
2.3.2. SALTO CON DEFLECTORES	85
2.3.3. SALTO CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES.....	87
2.3.4. SALTO CON ESTRECHAMIENTO LATERAL DE UN SOLO LADO.....	88
2.3.5. SALTO CON UMBRAL DE ALTURA VARIABLE	89
2.4. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MOVIMIENTO – EVALUACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA AL PIE DE PRESA (CUENCOS DE SOCAVACIÓN).....	90
2.4.1. ANÁLISIS EN PERFIL DEL MOVIMIENTO Y DISIPACIÓN DEL CHORRO AL PIE DE PRESA	90
2.4.2. ANÁLISIS EN PLANTA DEL MOVIMIENTO Y DISIPACIÓN DEL CHORRO AL PIE DE PRESA	92
2.5. CONCLUSIONES	94
CAPÍTULO 3.....	97
ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FENÓMENO FÍSICO	97
3.1. BASES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FLUJO REAL EN CONTORNOS CURVOS CÓNCAVOS, INTRODUCCIÓN DE AIRE Y FLUJO DE CONTORNO PARABÓLICO CON INTRODUCCIÓN DE AIRE.	97

3.2. RELACIÓN FUNCIONAL TEÓRICA PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL FLUJO EN EL SALTO EN ESQUÍ – FORMACIÓN DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN.....	98
3.3. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES.....	100
3.4. RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA Y BASES PARA EL ANÁLISIS DE INFORMACIÓN TÉCNICA EXISTENTE.....	101
3.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
CAPÍTULO 4.....	105
SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA.....	105
4.1. ANÁLISIS DE LA LITERATURA TÉCNICA PARA LAS DIFERENTES FORMAS ESPECIALES DEL SALTO EN ESQUÍ	105
4.1.1. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES	105
4.1.2. SALTO CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES.....	112
4.1.3. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE UN SOLO LADO (DEFLECTOR LATERAL).....	127
4.1.4. SALTO EN ESQUÍ CON UMBRAL DE ALTURA VARIABLE	133
4.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA EXISTENTE.....	137
4.2.1. SALTO CON DEFLECTORES	137
4.2.2. SALTO CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES.....	138
4.2.3. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE UN SOLO LADO (DEFLECTOR LATERAL).....	139
4.2.4. SALTO EN ESQUÍ CON UMBRAL DE ALTURA VARIABLE	140
4.3. SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES	145
4.3.1. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES	145
4.3.2. SALTO CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES.....	147
4.3.3. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE UN SOLO LADO (DEFLECTOR LATERAL).....	149
4.3.4. SALTO EN ESQUÍ CON UMBRAL DE ALTURA VARIABLE	150
4.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	151
CAPÍTULO 5.....	154

CRITERIOS Y BASES PARA EL DISEÑO DE UN SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL Y DE FORMAS ESPECIALES	154
5.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FÍSICO.....	155
5.2. EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA AL PIE DE UNA PRESA	156
5.3. RECOPIACIÓN DE CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE SALTOS EN ESQUÍ AL PIE DE PRESA.....	158
5.3.1. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL	158
5.3.1.1. Radio de la Cubeta:.....	158
5.3.1.2. Elevación del salto en esquí:.....	160
5.3.1.3. Ángulo de salida del cucharón:	160
5.3.1.4. Presión en el cucharón:.....	161
5.3.1.5. Ángulo de despegue del chorro:	162
5.3.1.6. Ángulo del labio aguas abajo de la salida del chorro:	164
5.3.1.7. Ángulo expansión transversal del chorro:	165
5.3.1.8. Recomendaciones generales:.....	166
5.3.2. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES (DENTADO)	166
5.3.2.1. Recomendaciones generales:.....	166
5.3.2.2. Ángulos de salida:	170
5.3.2.3. Radio del deflector (R_{def})	171
5.3.2.4. Alto del deflector (Y_{def})	172
5.3.2.5. Largo del deflector	173
5.3.2.6. Ancho del deflector y espaciamiento.....	173
5.3.2.7. Número de deflectores	174
5.3.2.8. Pendiente de las paredes del deflector	176
5.3.2.9. Número de Froude	176
5.3.3. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES	177
5.3.3.1. Recomendaciones generales:.....	177
5.3.3.2. Ángulos de salida:	182
5.3.3.3. Grado de convergencia – (bc/b)	183
5.3.3.4. Longitud de la contracción	184
5.3.3.5. Ángulo de contracción – (θ_c)	185

5.3.3.6. Perfil del flujo.....	185
5.3.3.7. Desempeño de la contracción.....	186
5.3.3.8. Número de Froude	187
5.3.3.9. Presión Máxima	188
5.3.3.10. Radio del fondo del estrechamiento.....	189
5.4. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS BENEFICIOS RESPECTO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA – FORMACIÓN DE LOS CUENCOS DE SOCAVACIÓN AL PIE.....	190
5.4.1. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES (DENTADO)	190
5.4.2. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES.....	191
5.5. CONCLUSIONES	191
CAPÍTULO 6.....	194
GUÍA DE DISEÑO BÁSICO - DIMENSIONAMIENTO DE UN SALTO EN ESQUÍ AL PIE DE PRESA	194
6.1. CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DEL TIPO DEL SALTO EN ESQUÍ.....	194
6.2. PROCEDIMIENTO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SALTO EN ESQUÍ.....	196
6.2.1. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL.....	196
6.2.2. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES (DENTADO)	198
6.2.2.1. Diseño de deflectores rectangulares:.....	198
6.2.2.2. Diseño de deflectores trapezoidales con perfil curvo:.....	200
6.2.2.3. Diseño de deflectores trapezoidales con perfil triangular (González Fariñas, 2004):	202
6.2.3. DISEÑO DE SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE PAREDES.....	204
6.3. EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DE ENERGÍA SEGÚN EL CUENCO DE SOCAVACIÓN – ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROFUNDIDADES, DEL ALCANCE Y DE LA FORMA DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN.....	209
6.3.1. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL.....	209

6.3.1.1. Trayectoria del Chorro:.....	209
6.3.1.2. Profundidad de Socavación:	212
6.3.2. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES (DENTADO) VS. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL.....	228
6.3.2.1. Profundidad de Socavación:	238
6.3.3. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE PAREDES VS. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL.....	240
6.4. DISEÑO DEL CUENCO PREEXCAVADO	241
6.5. CONCLUSIONES	247
CAPÍTULO 7.....	250
HOJA DE CÁLCULO PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE SALTOS EN ESQUÍ Y EJEMPLOS	250
7.1. HOJA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE SALTOS EN ESQUÍ	250
7.1.1. DIAGRAMA DE FLUJO	252
7.1.2. MANUAL DE USO.....	253
7.2. EJEMPLOS DE CÁLCULO.....	257
7.2.1. CÁLCULOS GENERALES	259
7.2.2. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL	267
7.2.3. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES	275
7.2.4. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE PAREDES	291
CAPÍTULO 8.....	297
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	297
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>311</i>
<i>ANEXOS</i>	<i>319</i>
<i>ANEXO 1: HOJA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE SALTOS EN ESQUÍ...</i>	<i>320</i>

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1.

Tabla 1.1: Disipadores de energía en vertederos tipo cimacio.....	3
Tabla 1.2: Variación de presión y coeficiente de descarga sobre vertederos	15
Tabla 1.3: Fórmulas para determinar el coeficiente de fricción C de Chezy	40
Tabla 1.4: Coeficientes de rugosidad utilizados para el cálculo del “C” de Chezy	41
Tabla 1.5: Lista de factores que inciden en el coeficiente de descarga	52

CAPÍTULO 2.

Tabla 2.1: Características hidrodinámicas de vertederos en salto de esquí. Distribución de presiones y de velocidades [P(n) y V(n)] a la salida del chorro	72
--	----

CAPÍTULO 3.

Tabla 3.1: Cantidades y dimensiones presentes en el movimiento de un fluido.....	98
Tabla 3.2: Correlación de parámetros que intervienen en el fenómeno de socavación (profundidad de socavación) con base en datos de laboratorio (modelos) y de campo (prototipos).....	102

CAPÍTULO 4.

Tabla 4.1: Presas con vertederos de salto en esquí con deflectores	105
Tabla 4.2: Características y resultados obtenidos en estudios experimentales de saltos en esquí con deflectores.....	111
Tabla 4.3: Ejemplos de saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes	112
Tabla 4.4: Profundidad de socavación y su ubicación producto del flujo procedente del cucharón con estrechamiento en la presa Xiaowan (China).....	118
Tabla 4.5: Comparación de los calados calculados y medidos a la salida de un salto con estrechamiento	125

Tabla 4.6: Presas con vertederos de salto en esquí con deflector lateral (estrechamiento de un solo lado).....	128
Tabla 4.7: Presa y modelo con vertederos de salto en esquí con umbral de altura variable.....	134
Tabla 4.8: Características hidráulicas y geométricas de varios estudios realizados para saltos en esquí con deflectores	141
Tabla 4.9: Características hidráulicas y geométricas de varios estudios realizados para saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes	142
Tabla 4.10: Características hidráulicas y geométricas de varios estudios realizados para saltos en esquí con estrechamiento lateral de un solo lado.....	143
Tabla 4.11: Características hidráulicas y geométricas de varios estudios de saltos en esquí con umbral de altura variable.....	144
Tabla 4.12: Resumen de las condiciones para el uso de los diferentes tipos de salto en esquí, según la literatura técnica recopilada.....	152

CAPÍTULO 5.

Tabla 5.1: Fórmulas y recomendaciones para definir el radio del salto en esquí	159
Tabla 5.2: Fórmulas y recomendaciones para definir el ángulo de salida del cucharón del salto en esquí.....	160
Tabla 5.3: Definición del ángulo del labio aguas abajo de la salida del salto en esquí.....	164
Tabla 5.4: Cálculo de la presión en el cucharón del salto en esquí.	161
Tabla 5.5: Fórmulas y recomendaciones para definir el ángulo de despegue del chorro	163
Tabla 5.6: Fórmula para determinar el ángulo de expansión transversal del chorro.	165
Tabla 5.7: Recomendaciones generales para el uso de deflectores. Y	167
Tabla 5.8: Geometrías de deflectores (dientes) utilizadas en presas en China.....	169

Tabla 5.9: Geometrías de deflectores trapezoidales (dientes) utilizadas en varias presas	170
Tabla 5.10: Relaciones y recomendaciones para definir el ángulo de salida de los deflectores (dientes)	171
Tabla 5.11: Relaciones entre ancho de los deflectores y espaciamiento	174
Tabla 5.12: Relaciones para determinar la altura de los deflectores.....	172
Tabla 5.13: Radio relativo del deflector (R_{def}/R)	172
Tabla 5.14: Determinación del número de deflectores	175
Tabla 5.15: Recomendaciones para determinar la longitud de los deflectores de un salto en esquí dentado.....	173
Tabla 5.16: Pendiente de las paredes laterales de deflectores trapezoidales..	176
Tabla 5.17: Rango de número de Froude a utilizarse en el diseño de deflectores tipo L-1	176
Tabla 5.18: Recomendaciones generales para el correcto dimensionamiento de saltos en esquí con estrechamiento de paredes	177
Tabla 5.19: Características del salto en esquí con estrechamiento de paredes de varios proyectos	178
Tabla 5.20: Guía para el diseño de saltos en esquí con estrechamiento de paredes	179
Tabla 5.21: Recomendaciones para definir el ángulo de salida del cucharón y del chorro.....	182
Tabla 5.22: Relaciones de convergencia o contracción para el diseño de estrechamiento gradual de paredes en saltos en esquí.	183
Tabla 5.23: Recomendaciones y relaciones para determinar el ángulo de contracción (θ_c)	185
Tabla 5.24: Relaciones para la determinación de la longitud de contracción en un salto en esquí con estrechamiento de paredes	184
Tabla 5.25: Determinación del perfil del flujo en la contracción de un salto en esquí con estrechamiento de paredes	186
Tabla 5.26: Número de Froude en la contracción de un salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes	187

Tabla 5.27: Determinación de la presión máxima en un salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes	188
Tabla 5.28: Ubicación de la presión máxima debida al estrechamiento gradual de paredes	189
Tabla 5.29: Comparación de características del foso de socavación de un salto en esquí convencional y uno con deflectores	191
Tabla 5.30: Comparación de características del foso de socavación de un salto en esquí convencional y uno con estrechamiento	191

CAPÍTULO 6.

Tabla 6.1: Matriz de selección del tipo de salto en esquí	195
Tabla 6.2: Fórmulas para definir el alcance horizontal del chorro procedente del salto en esquí	210
Tabla 6.3: Fórmulas para definir el alcance vertical del chorro procedente del salto en esquí	211
Tabla 6.4: Fórmula para definir el ángulo de impacto del chorro en el cuenco aguas abajo de la presa	212
Tabla 6.5: Fórmulas para determinar la profundidad de socavación producto del impacto del chorro procedente del salto en esquí	213
Tabla 6.6: Número de resistencia de Masa	218
Tabla 6.7: Número de serie de juntas	218
Tabla 6.8: Número de rugosidad de las juntas	219
Tabla 6.9: Número de alteración de las juntas	220
Tabla 6.10: Número de estructura relativa del terreno	221
Tabla 6.11: Coeficientes a y b para determinar el coeficiente de presión dinámica promedio	225
Tabla 6.12: Coeficientes a, b, c y d para determinar el coeficiente de presión dinámica fluctuante para $Y_s/h_{imp} \leq 14$	226
Tabla 6.13: Coeficientes a y b para determinar el coeficiente de presión dinámica fluctuante para $Y_s/h_{imp} > 14$	226
Tabla 6.14: Comparación y variación de la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores	229

Tabla 6.15: Comparación y variación del alcance de la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores	231
Tabla 6.16: Comparación y variación de la superficie de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores.....	233
Tabla 6.17: Comparación y variación de volumen de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores.....	235
Tabla 6.18: Comparación de las formas del foso de socavación para salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores.....	237
Tabla 6.19: Principales características del proyecto Toachi.....	239
Tabla 6.20: Características de presas utilizadas por Azmathullah (2005).....	245
Tabla 6.21: Resumen de criterios de dimensionamiento del cuenco pre-excavado al pie de una presa	246
Tabla 6.22: Clasificación de las formulaciones de socavación según su aplicabilidad	248

CAPÍTULO 7.

Tabla 7.1: Procesos y colores distintivos de la hoja de cálculo.....	253
Tabla 7.2: Características del proyecto en estudio	258
Tabla 7.3: Determinación del radio y ángulo de salida del cucharón convencional.....	259
Tabla 7.4: Determinación de la carga de diseño	260
Tabla 7.5: Calculo del perfil cimacio.....	261
Tabla 7.6: Calculo de la napa superior del flujo sobre el perfil cimacio	262
Tabla 7.7: Determinación del calado sobre el perfil cimacio	263
Tabla 7.8: Calculo del perfil y longitud de la rápida	264
Tabla 7.9: Calculo del perfil y velocidad del flujo en la rápida	265
Tabla 7.10: Chequeo de cavitación en la rápida	266
Tabla 7.11: Cálculo del perfil del cucharón	267
Tabla 7.12: Perfil del flujo en el cucharón	268
Tabla 7.13: Determinación de la presión en el cucharón	269

Tabla 7.14: Cálculo del ángulo de salida del chorro, detalle del labio y ángulo de expansión transversal del chorro	270
Tabla 7.15: Determinación del alcance horizontal del chorro	271
Tabla 7.16: Determinación del alcance vertical del chorro	272
Tabla 7.17: Profundidad de socavación y dimensiones del cuenco pre-excavado	274
Tabla 7.18: Ángulo de salida de los deflectores rectangulares	275
Tabla 7.19: Radio, alto y largo de los deflectores rectangulares	276
Tabla 7.20: Ancho, espaciamiento y distribución de los deflectores	277
Tabla 7.21: Cálculo del ángulo de salida del chorro sobre deflectores rectangulares.....	278
Tabla 7.22: Determinación del alcance horizontal del chorro	278
Tabla 7.23: Determinación del alcance vertical del chorro	279
Tabla 7.24: Profundidad de socavación y dimensiones del cuenco pre-excavado	280
Tabla 7.25: Ángulo de salida de los deflectores trapezoidales.....	281
Tabla 7.26: Radio, alto y largo de los deflectores trapezoidales	282
Tabla 7.27: Ancho y espaciamiento de los deflectores trapezoidales	283
Tabla 7.28: Pendiente de las paredes de los deflectores trapezoidales (VP) y número de Froude máximo (GF)	284
Tabla 7.29: Cálculo del ángulo de salida del chorro sobre deflectores trapezoidales (VP).....	284
Tabla 7.30: Determinación del alcance horizontal del chorro	285
Tabla 7.31: Determinación del alcance vertical del chorro	286
Tabla 7.32: Profundidad de socavación y dimensiones del cuenco pre-excavado	287
Tabla 7.33: Determinación del alcance horizontal del chorro	288
Tabla 7.34: Determinación del alcance vertical del chorro	289
Tabla 7.35: Profundidad de socavación y dimensiones del cuenco pre-excavado	290
Tabla 7.36: Dimensionamiento del estrechamiento según Hangen (2000).....	291
Tabla 7.37: Definición de las coordenadas del inicio y fin de la contracción	292
Tabla 7.38: Chequeo de los resultados obtenidos con Hanen (2000).....	292

Tabla 7.39: Determinación del alcance horizontal del chorro	294
Tabla 7.40: Determinación del alcance vertical del chorro	295
Tabla 7.41: Profundidad de socavación y dimensiones del cuenco pre- excavado	296

CAPÍTULO 8.

Tabla 8.1: Lista de factores que inciden en el coeficiente de descarga	297
Tabla 8.2: Resumen de las condiciones para el uso de los diferentes tipos de salto en esquí, según la literatura técnica recopilada	304
Tabla 8.3: Comparación de las condiciones de socavación entre un salto en esquí convencional y un salto es esquí con deflectores	307
Tabla 8.4: Clasificación de las formulaciones de socavación según su aplicabilidad	309

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1.

Figura 1.1: Tipos de vertederos en presas	2
Figura 1.2: Vertedero tipo cimacio.....	8
Figura 1.3: Flujo sobre la cresta de una vertedero tipo cimacio	10
Figura 1.4: Coeficiente de descarga en vertederos WES en presas altas	12
Figura 1.5: Corrección del coeficiente de descarga por inclinación de la cara aguas arriba del vertedero tipo WES.....	12
Figura 1.6: Presiones negativas en la cresta de un vertedero sin control, cuando $H_e/H_d=1.33$	13
Figura 1.7: Presiones sobre un vertedero tipo cimacio sin control (Formas WES).....	15
Figura 1.8: Coeficiente de descarga un vertedero tipo cimacio provisto de compuertas.....	17
Figura 1.9: Presiones sobre un vertedero tipo cimacio con control	18
Figura 1.10: Desarrollo de la capa límite	20
Figura 1.11: Rugosidad superficial lisa.....	21
Figura 1.12: Rugosidad superficial rugosa	21
Figura 1.13: Desarrollo del flujo autoaerado en vertederos.....	23
Figura 1.14: Conceptos de aire atrapado y aire arrastrado	23
Figura 1.15: Relación entre las concentraciones promedio del aire y de aire en la superficie del vertedero	26
Figura 1.16: Límite de estabilidad para canales hidráulicamente lisos.....	31
Figura 1.17: Regímenes de flujo en canales abiertos	35
Figura 1.18: Energía en el flujo sobre un canal abierto	36
Figura 1.19: Diagrama de Moody	38
Figura 1.20: Ábaco para el cálculo de pérdidas por fricción en rápidas	44
Figura 1.21: Flujo curvilíneo cóncavo	47

CAPÍTULO 2.

Figura 2.1: Partes de un salto en esquí.....	56
Figura 2.2: Trayectoria del chorro de un salto en esquí	58

Figura 2.3: Esquema del patrón de flujo de un salto en esquí	59
Figura 2.4: Aeración de un chorro, proveniente de una boquilla, con descarga a superficie libre.	61
Figura 2.5: Distribución de concentración de aire en una sección de un chorro de salto en esquí.	62
Figura 2.6: Comparación de concentración de aire promedio de una sección transversal entre flujo con $Co=0$ y $Co=0.21$ para Froude =5 y calado inicial = 0.045m (modelo hidráulico).	63
Figura 2.7: Zonas de un chorro de impacto en una superficie plana.	66
Figura 2.8: Distribución de velocidades en cucharón de salto en esquí.	69
Figura 2.9: Coeficiente de curvatura λ , donde $\kappa =1/R$	70
Figura 2.10: Distribución de velocidades y turbulencia inicial en el borde de un deflector.	71
Figura 2.11: Distribución de velocidades de un chorro con descarga a la atmósfera.	72
Figura 2.12: Velocidad máxima relativa $[v_M/ V_0](X)$ obtenida para ensayos en modelo con flujo pre-aerado.	73
Figura 2.13: Diagrama de presiones obtenidas tanto en prototipo como en modelo, para la presa Pine Flat.	74
Figura 2.14: Presiones en el cucharón del salto en esquí.	76
Figura 2.15: Presiones en el cucharón del salto en esquí en función de C_p	77
Figura 2.16: Función de presiones según Lenau & Cassidy (1969).	78
Figura 2.17: Diagrama de presiones teóricas y experimentales en la presa Guri.	79
Figura 2.18: Esquema básico de cucharón de un salto de esquí.	81
Figura 2.19: Fluctuación de presiones a lo largo de un cucharón de salto en esquí.	82
Figura 2.20: Esquema de presiones en el labio de un cucharón de salto en esquí, Presa Guri.	83
Figura 2.21: Presiones al final del cucharón de un salto en esquí.	83
Figura 2.22: Difusión y movimiento del chorro en el cuenco disipador.	91

CAPÍTULO 3.

Figura 3.1: Esquema de los parámetros que intervienen en la formación del cuenco de socavación.....	99
---	----

CAPÍTULO 4.

Figura 4.1: Esquema de la presa Cleveland.	107
Figura 4.2: Presiones en la arista de un deflector de la presa Cleveland.....	107
Figura 4.3: Tipo de deflector y disposición de los mismos en el modelo realizado por Golzari.	108
Figura 4.4: Comparación de ubicación de la profundidad máxima de socavación entre un cucharón convencional con $\phi_c=0^\circ$, $\phi_c=20^\circ$ y cucharón con 5 deflectores ($\phi_c=20^\circ$).....	109
Figura 4.5: Esquema de trampolín y disposición de deflectores utilizados por González (2004).	110
Figura 4.6: Geometría de las configuraciones de deflectores probadas en modelo.....	111
Figura 4.7: Patrón del flujo en modelo y prototipo del chorro en la salida del salto en esquí de la presa Dongjiang	114
Figura 4.8: Tipos de flujo en un salto en esquí con estrechamiento de paredes a)Resalto hidráulico, b)Chorro con bajo grado de dispersión, c)Chorro con suficiente grado de dispersión, d)Flujo forzado.....	115
Figura 4.9: Vista en planta de cuatro tipos de cucharones estudiados para la presa Xiaowan a)Cucharón en forma de lengua, b)Cucharón oblicuo I, c)Cucharón oblicuo II, d)Cucharón con paredes convergentes	116
Figura 4.10: Cuencos de socavación en el proyecto Jinping para un aliviadero tipo túnel con un cucharón oblicuo (arriba) y para un cucharón con estrechamiento (abajo).....	119
Figura 4.12: Variación de la presión en el fondo del cuenco para valores de contracción del cucharón de 0.2, 0.3 y 0.4	121
Figura 4.12: Variación de la presión en el fondo del cuenco para valores de contracción del cucharón de 0.3 y 0.5, y diferentes profundidades del colchón de aguas	122
Figura 4.14: Geometría en planta del estrechamiento modelado para el cálculo hidráulico del flujo.....	123

Figura 4.15: Perfiles del flujo en el eje del cucharón con estrechamiento.....	124
Figura 4.16: Perfiles del flujo en la pared de estrechamiento del cucharón	124
Figura 4.17: Ábaco para el cálculo del calado en la salida de un salto en esquí con estrechamiento lateral de paredes.....	126
Figura 4.18: Vista en perfil (a) y en planta (b) del patrón de flujo a través de un cucharón con deflector lateral.....	129
Figura 4.19: Perfil normalizado de la napa superior producto de un deflector lateral (a) R=20 cm, (b) R=25 cm	129
Figura 4.20: Trayectoria en planta de la napa externa generada por un deflector lateral (a) R=20 cm, (b) R=25 cm.....	130
Figura 4.21: Condición inicial del flujo ahogado en un cucharón con deflector ..	131
Figura 4.22: Alternativas de salto en esquí con umbral de altura variable utilizadas en modelo hidráulico para la presa Chili Bar.	135
Figura 4.23: Patrones de socavación de saltos en esquí con umbral de altura variable.	136
Figura 4.24: Socavación producida por salto en esquí con umbral de altura variable, para $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$	137
Figura 4.25: Comparación de la difusión del chorro (vista en perfil) y de la forma del cuenco de socavación (vista en planta) entre un salto en esquí convencional y uno con estrechamiento gradual de paredes	148
CAPÍTULO 5.	
Figura 5.1: Proceso de socavación en la zona de incidencia del chorro	157
Figura 5.2: Ábaco para determinar la presión máxima en la cubeta (t/m^2) de un salto en esquí convencional	162
Figura 5.3: Ábaco para determinar el ángulo de salida del chorro del salto en esquí convencional (Orlov).....	163
Figura 5.4: Ábaco para determinar el ángulo de salida del chorro del salto en esquí convencional (Quadri et al.).....	164
Figura 5.5: Ábaco para determinar el ángulo del labio aguas abajo de la salida del salto en esquí	165
Figura 5.6: Esquema de deflectores rectangulares	167
Figura 5.7: Esquema guía para definir la geometría de deflectores trapezoidales con perfil curvo.	168

Figura 5.8: Dimensionamiento de trampolín plano con deflectores tipo L-1.....	168
Figura 5.9: Número de dientes en función del ancho del cucharón, utilizados en varios proyectos (Tabla 5.9 y Tabla 5.10).....	170
Figura 5.10: Distribución de deflectores recomendadas por Erpicum et al. (2010).....	175
Figura 5.11: Esquema en planta de un salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes.....	181
Figura 5.12: Perfil del flujo en un salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes.....	181
CAPÍTULO 6.	
Figura 6.1: Características principales de un salto en esquí convencional	196
Figura 6.2: Ábaco para determinar el alcance horizontal del chorro procedente de un salto en esquí convencional	211
Figura 6.3: Ábaco para determinar el factor de resistencia del aire para el cálculo del alcance del chorro procedente de un salto en esquí convencional.....	212
Figura 6.4: Ábaco para determinar la profundidad de socavación (Y_s) producto del chorro procedente de un salto en esquí.....	216
Figura 6.5: Determinación de la relación de espaciamiento de juntas: r	220
Figura 6.6: Umbral de erosión con base en el índice de erosionabilidad y la potencia del chorro	222
Figura 6.7: Difusión de chorro circular con alto grado de turbulencia.....	224
Figura 6.8: Factor de reducción del coeficiente de presión dinámica fluctuante (C'_p)	227
Figura 6.9: Comparación de la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores	228
Figura 6.10: Diferencia en la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores	229
Figura 6.11: Comparación del alcance de la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores	230

Figura 6.12: Diferencia en el alcance de la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores	231
Figura 6.13: Comparación de la superficie de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores	232
Figura 6.14: Diferencia en la superficie de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores	233
Figura 6.15: Comparación de volúmenes de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores	234
Figura 6.16: Diferencia de volumen de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores	235
Figura 6.17: Comparación de: alcance del chorro, profundidad y forma del foso de socavación de salto en esquí convencional y con deflectores (2 disposiciones).....	236
Figura 6.18: Curvas para el diseño de cuencos de disipación de energía	239
Figura 6.19: Dimensiones y parámetros que inciden en el cuenco pre-excavado	241
Figura 6.20: Características del cuenco pre-excavado	243

CAPÍTULO 7.

Figura 7.1: Procedimiento para el cálculo de la socavación aguas abajo de saltos en esquí en presas.....	252
Figura 7.2: Conformación de la hoja "DATOS"	254
Figura 7.3: Ejemplo de celdas especiales para el ingreso de datos.....	255
Figura 7.4: Ejemplo de la sección Cálculos.....	255
Figura 7.5: Ejemplo de la sección Resultados y Gráficos	256
Figura 7.6: Ejemplo de representación gráfica del proyecto (vertederos con salto en esquí).....	257
Figura 7. 7: Representación gráfica del vertedero y del chorro proveniente del salto en esquí	273

ÍNDICE DE FOTOS

CAPÍTULO 1.

Foto 1.1: Medición de presiones en modelo hidráulico del vertedero de la presa “El Realito” (México).....	14
Foto 1.2: Flujo aerado en vertederos (Presa Douglas-E.E.U.U.)	22
Foto 1.3: Daños por cavitación en la superficie del vertedero	25
Foto 1.4: Daños por cavitación en el vertedero de la Presa Höljes - Suecia	25
Foto 1.5: Aerador en modelo hidráulico del vertedero de la presa “Zapotillo” (México).....	27
Foto 1.6: Flujo Inestable en vertedero (Presa Turner - California)	30

CAPÍTULO 2.

Foto 2.1: Salto en esquí Convencional (Presa Ralco - Chile)	84
Foto 2.2: Salto en esquí con deflectores tipo Angostura (Presa Toachi).....	85
Foto 2.3: Salto en esquí con deflectores de sección transversal trapezoidal (Presa Shahryar - Irán).....	86
Foto 2.4: Salto en esquí con deflectores de sección transversal trapezoidal (Presa Toachi).....	86
Foto 2.5: Salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes (Presa Toachi)	87
Foto 2.6: Salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes (Presa Guangzhao - China)	88
Foto 2.7: Salto en esquí con estrechamiento lateral de un solo lado (Presa Contra - Suiza)	88
Foto 2.8: Salto en esquí con umbral de altura variable (Presa Toachi).....	89
Foto 2.9: Resalto ahogado y ondas aguas abajo de la zona de impacto del chorro en el colchón de agua.	92
Foto 2.10: Vórtices de eje vertical en la zona aledaña a la difusión del chorro.	93

CAPÍTULO 4.

Foto 4.1: Vista en perfil del chorro de salida en el modelo del aliviadero del proyecto Jinping	120
Foto 4.2: Salto en esquí con estrechamiento de paredes para la Presa Toachi, $Q=397 \text{ m}^3/\text{s}$ (izquierda), $Q= 605.4 \text{ m}^3/\text{s}$ (derecha).....	127
Foto 4.3: Alternativa de salto en esquí con deflector lateral para la Presa Toachi	133
Foto 4.4: Concentración o expansión del chorro de acuerdo a la repartición de los deflectores en el cucharón.	146
Foto 4.5: Efecto de deflectores para diferentes caudales.	147
Foto 4.6: Comportamiento del chorro de un salto en esquí tipo Angostura y de un salto en esquí con umbral de altura variable.	151

SIMBOLOGÍA

A	Área
A_i	Área del chorro a cierta profundidad medida desde el nivel de agua del cauce aguas abajo de la presa
A_{imp}	Área del chorro en el impacto en el cauce aguas abajo
b	Ancho de espejo de aguas
b_c	Ancho contraído
b_{def}	Ancho del deflector (diente) rectangular
b_{def1,2,3}	Anchos del deflector trapezoidal: entrada, salida parte inferior, salida parte superior, respectivamente
b_s	Ancho del cuenco de socavación en el sentido z
C	Coefficiente de descarga
C'_p	Coefficiente de variación de presiones
C_p	Coefficiente de corrección de presiones
C_o	Concentración inicial de aire en el chorro
C_r	Coefficiente de densidad relativa de la roca
d	Distancia a la superficie libre, perpendicular al fondo del canal
D	Abertura de la compuerta
d_{50,m}	Diámetro medio del material del lecho
d_c	Calado en la salida de la contracción
d_{c1,c2}	Calados de la onda de choque en una contracción
d_k	Calado crítico relativo
d_o	Calado del flujo de aproximación
d_s	Calado a la salida del salto en esquí
e	Separación entre deflectores (dientes)
F	Fuerza

f	Ancho de deflector lateral
F_c	Fuerza centrífuga
F_{c'p}	Factor de reducción del coeficiente de variación de presiones
F_o o Fr_o	Froude del flujo de aproximación
Fr_{máx}	Froude máximo para que no se presente cavitación en deflectores tipo L-1
Fr_s	Froude a la salida del salto en esquí
g	Aceleración de la gravedad
H	Distancia entre la superficie libre del embalse y la superficie libre del cauce aguas abajo
H.E.	Horizonte energético
h₂	Calado aguas abajo del foso de socavación en metros
h_c	Carga sobre la cresta
H_d	Carga de diseño
H_e	Carga de energía sobre la cresta
h_f	Pérdidas por fricción
h_{imp}	Grosor del chorro en el impacto con el colchón de aguas abajo
h_j	Grosor del chorro en un punto de la trayectoria
h_o	Grosor del chorro medido desde la napa inferior hasta la napa superior
h_p	Carga de presión
h_{pd}	Carga de presión dinámica en el cucharón debida a la curvatura del fondo
h_{pdmáx}	Carga de presión dinámica máxima en el cucharón debida a la curvatura del fondo
h_{pmáx}	Carga de presión máxima en el cucharón
h_s	Altura de socavación desde el fondo natural del lecho
H_{sc}	Carga a la superficie del agua en el punto más bajo del cucharón

h_v	Carga de velocidad
$h_{v\text{labio}}$	Carga de velocidad en el labio del cucharón
H_x	Carga total en cada punto x a lo largo del fondo del cucharón
J_a	Alteración de la superficie de la junta
J_n	Número de serie de juntas
J_r	Rugosidad de la pared de la junta
J_s	Número de estructura relativa del terreno
J_x, J_y, J_z	Espaciamiento promedio en la serie de juntas, en sentido x, y y z respectivamente
k	Altura de rugosidad
k	Factor de resistencia del aire (Cap V)
\bar{k}	Constante de vórtice libre
K	Coeficiente relacionado con el ángulo de salida de una contracción
K_b	Número de tamaño de bloque
K_d	Número de resistencia al corte en el contorno de la discontinuidad
K_e	Índice de Erodabilidad
l	Longitud característica (en el número de Reynolds)
L	Ancho del vertedero
L_c	Longitud de la curva del fondo del cucharón
L_d	Longitud de fractura o desintegración del núcleo del chorro
L_{def}	Longitud curva del deflector rectangular
$l_{oc1, oc2}$	Longitudes de la onda de choque en una contracción
L.E.	Línea de energía
L_s	Longitud desde el labio del cucharón hasta el punto donde se presenta la socavación máxima
l_s	Largo del cuenco pre-excavado
L_t	Longitud total del chorro hasta el punto de contacto con el agua

L_{tramp}	Longitud del trampolín de solera plana
L_v	Longitud del vertedero, desde la cresta hasta el labio del cucharón
m	Masa del fluido
Ms	Número de resistencia de masa
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
n	Número de deflectores
p	Presión
P	Alto de la presa
p'	Sumatoria de presión hidrostática y presión centrífuga
p_cmáx	Presión máxima debido a la contracción de paredes
p_{dmáx}	Presión dinámica máxima en el cucharón debida a la curvatura del fondo
p_{máx}	Presión máxima en el cucharón
Δp	Variación de presión
Pot_{jet}	Potencia del chorro por unidad de área
Pot_u	Potencia por unidad de área del umbral de erosión
Pot_{chorro}	Potencia del chorro por unidad de área en el cuenco amortiguador
q	Caudal unitario
Q	Caudal
r	Radio medido desde el centro de curvatura hasta un punto en la sección transversal en el cucharón
R	Radio de curvatura del cucharón
RQD	Designación de la calidad de la roca
r_a	Radio desde el centro de curvatura del cucharón hasta la superficie libre del agua
Rh	Radio Hidráulico
S	Parámetro adimensional de socavación

S_f	Pendiente hidráulica o de fricción
S_o	Pendiente del fondo del canal
T_u	Turbulencia inicial del chorro
ω	Porcentaje de incremento de volumen debido a la entrada de aire
v	Velocidad local
V	Velocidad media del flujo
v_A	Velocidad del flujo en la superficie libre del cucharón
V_{imp}	Velocidad del flujo en el impacto con el colchón de aguas abajo
V_{labio}	Velocidad a la salida del cucharón
v_M	Velocidad local máxima en el eje del chorro
V_o	Velocidad media del flujo de aproximación
w	Altura del cucharón desde el punto más bajo hasta el labio
W	Ancho del fondo del cuenco pre-excavado (USBR)
We	Número de Weber
X	Parámetro adimensional ($X = xR/F_o d_o^2$)
x,y,z	Ejes de coordenadas: horizontal, vertical y ancho, respectivamente
x_m	Distancia horizontal desde el labio hasta el punto donde se presenta la máxima altura del chorro
x_{mín}	Distancia en el eje x donde se presenta el valor de z _{mín}
y	Profundidad hidráulica
Y	Distancia entre el labio del cucharón y el nivel de agua en el embalse
Y_i	Profundidad medida desde el nivel de agua en el cauce aguas abajo a cualquier punto bajo la superficie del agua.
y_{A,B}	Elevaciones respecto al nivel de referencia
Y_{c-c}	Distancia vertical entre la cresta y el punto más bajo del cucharón
Y_{def}	Altura del deflector (diente)

y_i	Altura desde la superficie libre del cauce aguas abajo y el labio del cucharón
Y_{inf}	Posición de la napa superior del chorro respecto al labio del cucharón
y_m	Distancia desde el labio del cucharón hasta el punto más alto del chorro
Y_s	Altura de socavación medida desde la superficie del agua
y_{sup}	Posición de la napa superior del chorro respecto al labio del cucharón
$Z_{mín}$	Distancia mínima del chorro respecto al lado recto del deflector
α	Coefficiente de Coriolis
α'	Ángulo de impacto del chorro aguas abajo
α_p	Factor de corrección de distribución de velocidades en la variación de presiones en un fondo curvo cóncavo
β	Ángulo entre compuerta y cresta de vertedero
δ	Espesor de la capa límite
δ_o	Espesor subcapa límite laminar
ϕ	Ángulo desde el inicio de la curva hasta un punto x a lo largo de la misma
ϕ'	Ángulo medido desde el punto más bajo del cucharón hasta un punto x a lo largo de la curva
ϕ_c	Ángulo de salida del cucharón
ϕ_{def}	Ángulo de salida del deflector
ϕ_T	Ángulo total de deflexión
ϕ_j	Ángulo total de salida del chorro
γ	Peso específico
γ_r	Peso específico de la roca
λ	Coefficiente de curvatura

λ_c	Coeficiente para el diseño de una contracción
θ	Ángulo inclinación del fondo del canal
θ'	Ángulo de salida del chorro
θ''	Ángulo del labio del cucharón medido desde la napa inferior del chorro
θ'_{def}	Ángulo medio de salida del chorro sobre los deflectores (dientes)
θ'_{sup}	Ángulo de salida de la napa superior del chorro
θ_c	Ángulo de contracción
θ_L	Ángulo del labio del cucharón medido desde la horizontal
ψ_i	Ángulo del núcleo del chorro
ψ_j	Ángulo de expansión del chorro
σ	Tensión superficial
ρ	Densidad
ρ_w	Densidad del agua
ρ_s	Densidad del sedimento
ρ_r	Densidad de la roca
μ	Viscosidad dinámica
ν	Viscosidad cinemática

RESUMEN

El salto en esquí utilizado como componente en la disipación de energía en los vertederos de excesos de presas altas, constituye uno de los elementos fundamentales a fin de conseguir la adecuada entrega del caudal en el cauce aguas abajo, de manera económica y segura. Con este antecedente, las diferentes formas de salto en esquí constituyen opciones geométricas importantes, que tienen como objetivos principales: obtener la mayor disipación de energía y conseguir el adecuado direccionamiento en planta y/o perfil del chorro.

La recopilación y análisis de la información representan las bases para establecer los criterios, la metodología y las recomendaciones para el dimensionamiento de saltos en esquí convencional y de formas particulares. La pertinencia de una u otra geometría depende de las características de cada proyecto, principalmente en lo referente a: las características geométricas de la presa, el tipo de material en el sitio de impacto del chorro y la morfología del cauce.

Establecida la metodología de diseño, se propone una hoja de cálculo que permite: dimensionar la estructura, analizar el flujo desde el cimacio del vertedero de excesos hasta el deflector, y estimar la profundidad de socavación aguas abajo del salto en esquí (cuenco de socavación) con base en varias formulaciones propuestas y recomendadas en la literatura técnica. El dimensionamiento de la estructura de disipación y la elección de la profundidad de socavación adecuada también dependen de la experiencia y buen criterio del ingeniero diseñador.

Palabras claves: *presa, vertedero, salto en esquí, formas especiales, socavación, cuenco.*

ABSTRACT

Ski jumps used as energy dissipation devices in high dam spillways area main element to achieve an adequate flow delivery in the downstream channel. With this background, the different types of ski jumps are important geometric options which have as main objectives: to dissipate as much energy as possible and to provide an adequate jet direction in a plan and/or in a profile view.

The compilation and analysis of information represent the basis for establishing the criteria, methodology and recommendations for the design of conventional and special types of ski jumps. The applicability of one or other geometry depends on the characteristics of each project, mainly regarding to: dam geometric characteristics, type of riverbed material at the location of jet impact and riverbed morphology.

Established the design methodology, a spreadsheet is proposed which allows to: measure the structure, analyze the flow from the overflow spillway crest up to the deflector, and to estimate the scour depth downstream of the ski jump (plunge pool) based on several literature proposed and recommended formulations. The measurement of the dissipation structure and the appropriate choice of scour depth also depend on the experience and good criteria of the designer engineer.

Keywords: dam, spillway, ski jump, special types, plunge pool.

PRESENTACIÓN

El presente estudio consiste en la generación de la metodología para el dimensionamiento del salto en esquí convencional y de formas especiales, fundamentado en la recopilación de criterios y experiencias alrededor de este tema.

El trabajo en sus primeros capítulos inicia con la revisión de conceptos que preceden al diseño del salto en esquí, tales como: descripción y caracterización del flujo sobre el cimacio y rápida de una presa, introducción de aire, características hidrodinámicas desde el salto en esquí hasta el impacto en el cuenco. Posteriormente, en las siguientes secciones se definen y describen los tipos de salto en esquí objeto del análisis.

En los siguientes capítulos se recopila, analiza y sintetiza las diferentes experiencias referentes a: diseño de saltos en esquí convencional, diseño de saltos en esquí con formas especiales y análisis de socavación aguas abajo de la presa. Posteriormente, se define los criterios y procedimiento para la selección y diseño de estas estructuras de disipación, se describe la evaluación de la pérdida de energía considerando el cuenco de socavación y se resume las fórmulas y criterios para el diseño del cuenco pre-excavado.

Finalmente, se propone una hoja de cálculo automatizada, desarrollada con base en el estudio realizado, con el fin de disponer de una herramienta versátil para evaluar las diferentes opciones y criterios de varios autores referentes al diseño del salto en esquí y la estimación del cuenco.

CAPÍTULO 1.

ANTECEDENTES

1.1. GENERALIDADES: DEFINICIONES Y DESCRIPCIÓN DEL FLUJO HOMOGÉNEO Y DEL FLUJO DE UNA MEZCLA AGUA – AIRE SOBRE EL CIMACIO DE UNA PRESA

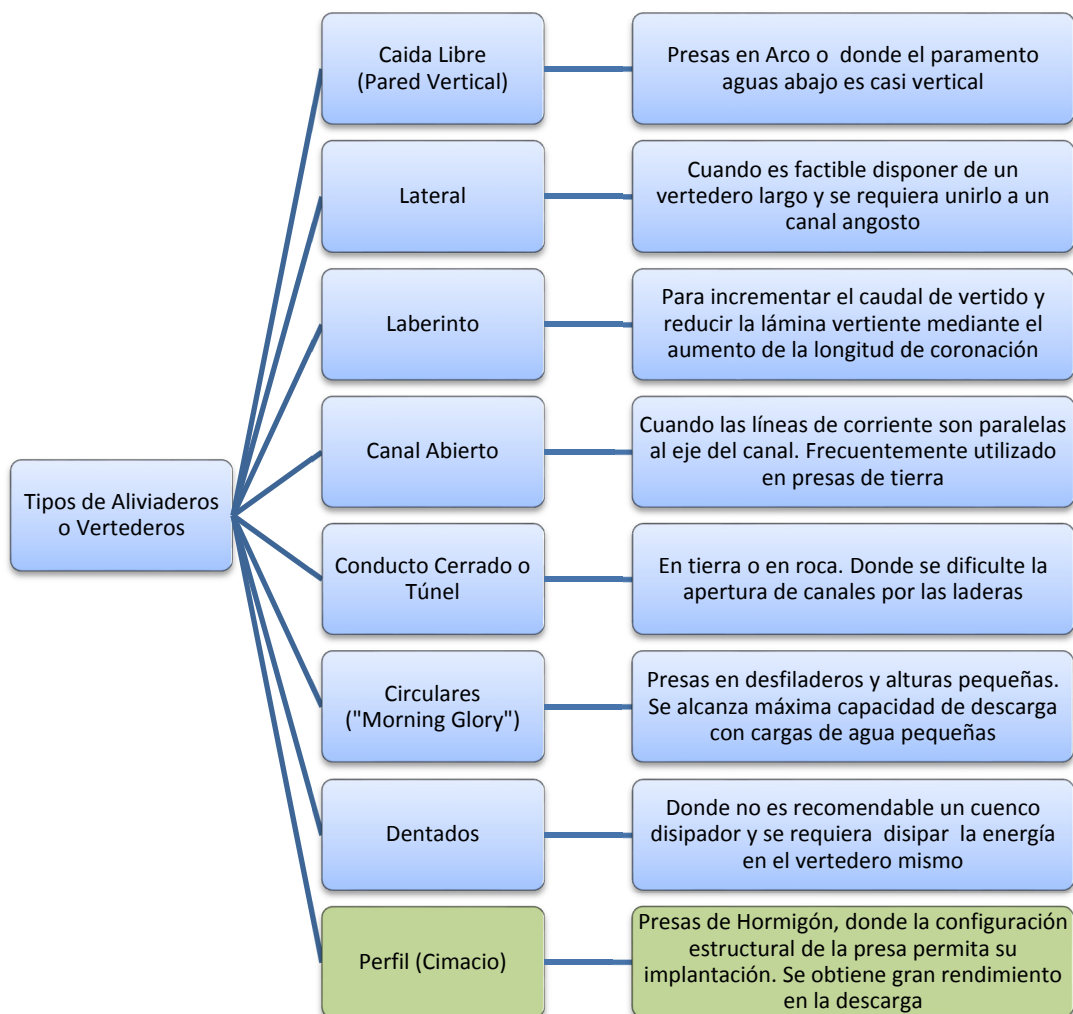
Desde épocas remotas, la disponibilidad de agua ha sido un factor limitante para el desarrollo de la sociedad, donde la búsqueda por satisfacer las necesidades de abastecimiento de agua, control de inundaciones y energía hidroeléctrica ha llevado al hombre a construir estructuras para el aprovechamiento y manejo del recurso hídrico. Las presas construidas alrededor del mundo constituyen soluciones fundamentales para el cumplimiento de este objetivo.

Los vertederos forman parte importante de las presas, ya que permiten controlar de manera segura el desbordamiento de agua en exceso y su encausamiento aguas abajo de la presa. La selección del vertedero dependerá del tipo y seguridad de la presa, hidrología, topografía, geología, y economía del proyecto. La Figura 1.1, muestra algunas recomendaciones para la selección del vertedero.

Dado que las presas y los vertederos cambian las características hidráulicas del flujo de un cauce natural, se pueden presentar problemas de erosión aguas abajo de la estructura, los mismos que deben ser controlados o evitados mediante el uso de disipadores de energía. En la Tabla 1.1, se especifica los tipos de disipadores generalmente utilizados en los vertederos tipo cimacio.




Dada la amplitud de los tipos de vertederos y disipadores de energía, el presente trabajo está enfocado a los disipadores de salto en esquí, utilizados en vertederos tipo cimacio.

Figura 1.1: Tipos de vertederos en presas



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 1.1: Disipadores de energía en vertederos tipo cimacio

		Tipo	Ejemplo
		Disipadores de Energía en Vertederos Cimacio	Escalones en la Rápida
Disipadores con Resalto Hidráulico	Tanque Amortiguador		Presa Sardar Sarovar - India. ² 
	Cubeta Deflectora		Presa Center Hill - Tennessee. ³ 
Salto en Esquí			Presa Aigle - Francia. ⁴ 

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

¹ Wolwedans Dam, South Africa. (2010). Recuperado el 17 de 10 de 2013, de www.chincold.org.cn:http://www.chincold.org.cn/dams/MilestoneProject/webinfo/2010/4/1281577326086123.htm

²Sardar Sarovar Dam 2006, India. (2006). Recuperado el 17 de 10 de 2013, de [en.wikipedia.org:http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sardar_Sarovar_Dam_2006,_India.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sardar_Sarovar_Dam_2006,_India.jpg)

³ Hayward, E. R. (2005). Center Hill Dam. Recuperado el 17 de 10 de 2013, de www.smokindragon.net:http://www.smokindragon.net/centerhilldam.html

⁴Aigle Dam (95 m tall). (2013). Recuperado el 17 de 10 de 2013, de www.skyscrapercity.com:http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1599648&page=11

1.1.1. DEFINICIONES

Para comprender apropiadamente el comportamiento del flujo ante la presencia de una estructura hidráulica, como un vertedero con dissipador de energía tipo salto en esquí, es necesario aclarar los siguientes términos hidráulicos:

- **Capa Límite:**

La capa límite es la zona donde el movimiento del fluido es perturbado por la presencia de la superficie en contacto. Su espesor se extiende desde la superficie en contacto hasta el límite donde la velocidad del fluido alcanza el 99 % de la velocidad de la corriente no perturbada.

- **Compresibilidad:**

Propiedad física de un fluido, que se caracteriza por el cambio significativo en su densidad. En general, los líquidos poseen una compresibilidad baja, por el contrario, los gases son fluidos con alta compresibilidad.

- **Densidad:**

Propiedad física de un fluido que relaciona la masa y su unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

En donde, ρ (kg/m^3) es la densidad, m (kg) es la masa del fluido y V (m^3) es el volumen del fluido.

- **Disipador de Energía:**

Estructura que facilita la disipación de energía cinética de un flujo, generalmente procedente de un vertedero.

- **Flujo Homogéneo:**

Es aquel flujo cuyas propiedades, como por ejemplo: densidad, viscosidad, etc., son independientes de la posición, dicho de otra manera, las propiedades del fluido son las mismas en cualquier punto del volumen de control.

- **Flujo Mezcla Agua – Aire:**

Mezcla resultante de la entrada de aire a una corriente de agua, la misma que consiste tanto de aire rodeado de agua, como de agua rodeada de aire. Su conformación puede darse por la presencia de un flujo con alta velocidad o por la ubicación de aeradores.

- **Flujo Ideal:**

Flujo incompresible desprovisto de viscosidad, es decir, carente de fricción.

- **Flujo Isotrópico:**

Es aquel flujo cuyas propiedades en un punto del volumen de control, son independientes de la dirección.

- **Flujo Newtoniano:**

Se caracteriza por disponer de una relación lineal entre la rapidez de deformación y el esfuerzo cortante. Por ejemplo: agua, aire, aceite.

- **Flujo Rápidamente Variado:**

Se caracteriza por la presencia de un estado de alta turbulencia debido a la variación abrupta de las líneas de corriente en un tramo relativamente corto.

- **Froude:**

Es el número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas gravitacionales, y que permite clasificar al flujo como subcrítico, crítico o supercrítico.

- **Peso Específico:**

Propiedad física de un fluido que relaciona el peso contenido en una unidad de volumen.

$$\gamma = \frac{P}{V} \quad (1.2)$$

En donde, γ (**kg/m³**) es el peso específico, **P (kgf)** es el peso del fluido y **V (m³)** es el volumen del fluido.

- **Presa:**

Estructura construida en el cauce de un río que permite el almacenamiento de agua.

- **Reynolds:** Es el número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas, y que permite clasificar al flujo como laminar o turbulento.

- **Vertedero de Excesos:**

Estructura que permite evacuar el caudal de crecida de un embalse, y generalmente en cuyo pie, se encuentra un dissipador de energía.

- **Viscosidad Cinemática:**

Relación entre la viscosidad dinámica y la densidad de un fluido:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.3)$$

En donde, **v (cm²/seg)** es la viscosidad cinemática, **μ (gr/cm seg)** es la viscosidad dinámica y **ρ (gr/cm³)** es la densidad del fluido.

- **Viscosidad Dinámica o Absoluta:**

Propiedad física de un fluido, que representa la rapidez de deformación del mismo, esto es, la resistencia a fluir. La viscosidad varía con la temperatura y es casi independiente de la presión. Las dimensiones de la viscosidad, en el sistema gravitacional, son FTL^{-2} , esto es, **Kg seg / m²**.

- **Weber:**

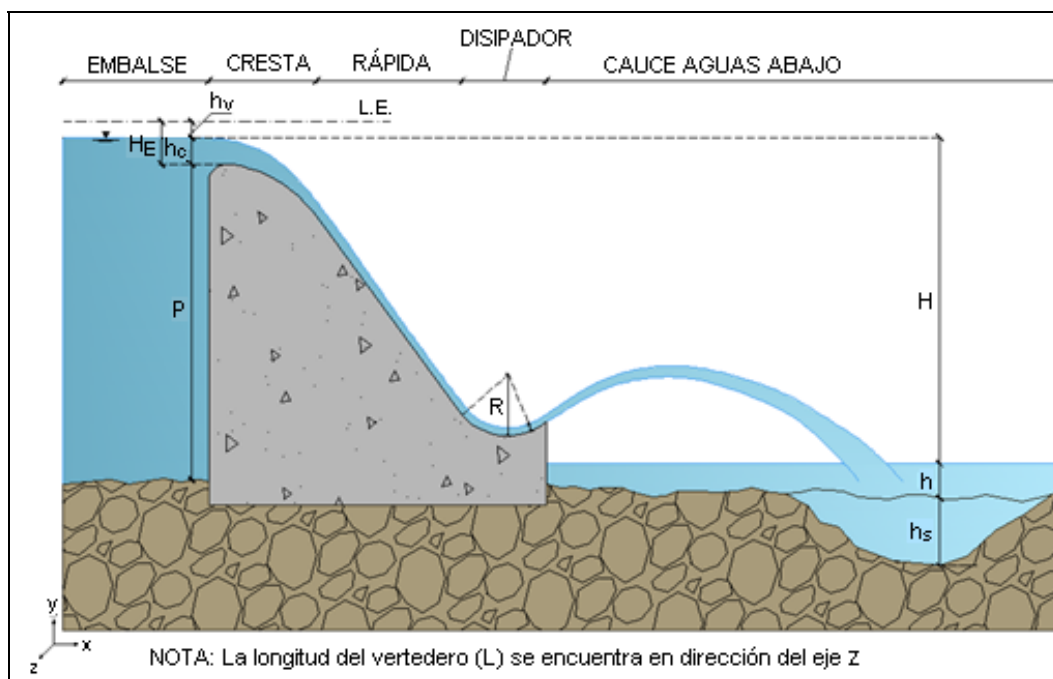
Es el número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas de tensión superficial, cuyo efecto es importante en modelos hidráulicos donde se tiene canales y profundidades de agua pequeños con una superficie de agua curva. Por ejemplo, en el estudio en modelo del flujo sobre la cresta de un vertedero.

1.1.2. DESCRIPCIÓN DEL FLUJO HOMOGÉNEO Y DEL FLUJO DE UNA MEZCLA AGUA – AIRE SOBRE EL CIMACIO DE UNA PRESA

Los vertederos en forma de cimacio o tipo perfil son aquellos cuya forma se adapta a la lámina o napa inferior de agua que se forma en un vertedero de pared delgada. Estos vertederos son usados generalmente en presas altas de hormigón o mampostería, donde: la conformación de la presa permita su implantación, el ancho del cauce sea suficiente para proveer el largo adecuado de la cresta y el lecho susceptible a socavación permita una disipación de energía a costos moderados. Los vertederos de excedencias de perfil son aptos para manejar flujos de grandes crecidas.

Un vertedero tipo cimacio se encuentra compuesto por las siguientes partes: la cresta, la rápida de pendiente pronunciada y un dissipador de energía al pie del mismo. La forma longitudinal del vertedero describe una letra “S” alargada donde su cresta toma la forma de la napa inferior del flujo sobre un vertedero de pared delgada.

Figura 1.2: Vertedero tipo cimacio



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

La configuración del perfil del vertedero debe permitir obtener una máxima eficiencia en la descarga y evitar la separación del flujo aguas abajo del punto más alto la cresta para reducir la posibilidad de cavitación.

Un perfil de la forma de la napa es ideal para la carga de diseño, ya que el flujo siempre se mantiene en contacto con la superficie del vertedero, no se presentan presiones negativas y el coeficiente de descarga alcanza la mayor eficiencia. Una descripción detallada de la variación de las presiones y del coeficiente de descarga sobre el cimacio de una presa se presenta en la sección 1.1.2.1.

Existen varios estudios que han originado diversas propuestas para determinar las coordenadas del perfil del cimacio, tales como: Perfil de Bazin (1888), Perfiles tipo Creager, Fort Collins (1932) y Denver (1936) - U.S. Bureau of Reclamation, formas estándar WES (U.S. Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station), entre otros.

Sobre un vertedero de perfil se presenta un flujo rápidamente variado debido a que las condiciones del flujo cambian considerablemente a su entrada y a su salida. En el tramo desde el embalse (flujo de aproximación) hasta la cresta del vertedero, el flujo es subcrítico. Luego, desde la cresta hasta la estructura de disipación (p.ej. salto en esquí), el tipo de flujo que se presenta es supercrítico.

Considerando la composición del flujo sobre el vertedero, en la primera parte del cimacio se presenta flujo homogéneo, y luego al transitar por la rápida se convierte en una mezcla agua-aire.

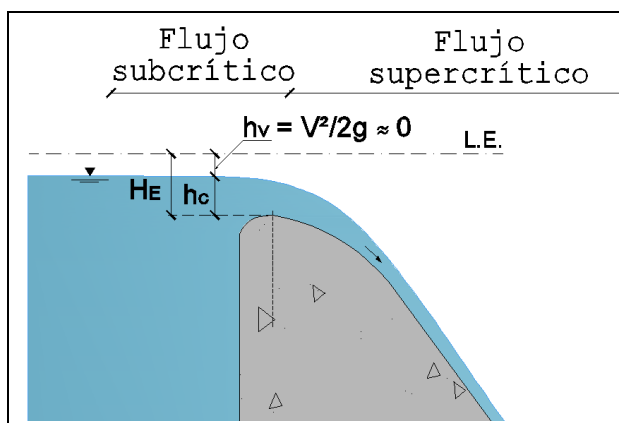
1.1.2.1. Flujo Homogéneo sobre el cimacio de una presa:

Como se mencionó anteriormente, el flujo homogéneo se caracteriza por mantener la misma densidad en cualquier punto del fluido. Esta condición se presenta de manera estricta cuando sobre el cimacio circula un flujo únicamente compuesto de agua, este escenario ocurre desde inicio del perfil hasta el punto de inicio de la autoaeración.

En presas con una altura importante, sobre la cresta del vertedero ocurre un flujo rápidamente variado debido al cambio de régimen subcrítico a supercrítico en un tramo relativamente corto. El régimen subcrítico se presenta en la cercanía al vertedero (flujo de aproximación) y el régimen supercrítico da lugar desde un punto ubicado aguas abajo de la cresta del vertedero, ver Figura 1.3.

El flujo cercano al vertedero se caracteriza por tener una velocidad de aproximación pequeña, lo que para propósitos prácticos permite considerar a la carga de velocidad despreciable.

Figura 1.3: Flujo sobre la cresta de una vertedero tipo cimacio



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tomando en consideración los elementos adicionales que componen un vertedero, el flujo se clasifica en flujo sin control y flujo controlado, este último se lo consigue mediante la ubicación de compuertas que permitan regular el caudal de descarga sobre el cimacio.

- **Vertedero sin Control:**

Considerando un vertido libre sobre el cimacio de una presa (sin control), si la carga es mayor a la de diseño, el flujo tiende a despegarse de la superficie del vertedero y forma una zona de separación del flujo provocando presiones negativas, las mismas que pueden causar vibraciones y deterioro de la obra de excedencias. Por lo contrario, si la carga es menor a la de diseño, la lámina inferior tiende a deprimirse manteniendo el contacto con la superficie, generando presiones positivas y reduciendo el coeficiente de descarga. Por consiguiente, para el cálculo hidráulico sobre vertederos a flujo libre es importante determinar dos variables: el coeficiente de descarga del vertedero (**C**) y las presiones sobre el cimacio.

El coeficiente de descarga (**C**) mide la eficiencia del vertedero para evacuar el agua y forma parte de la ecuación para el cálculo del caudal (Ecuación (1.4)).

$$Q = CLH_e^{3/2} \quad (1.4)$$

En donde: **Q** es el caudal de descarga (m³/s), **C** es el coeficiente de descarga, **L** es la longitud efectiva del vertedero (m), **H_e** es la carga de energía sobre la cresta del vertedero (m).

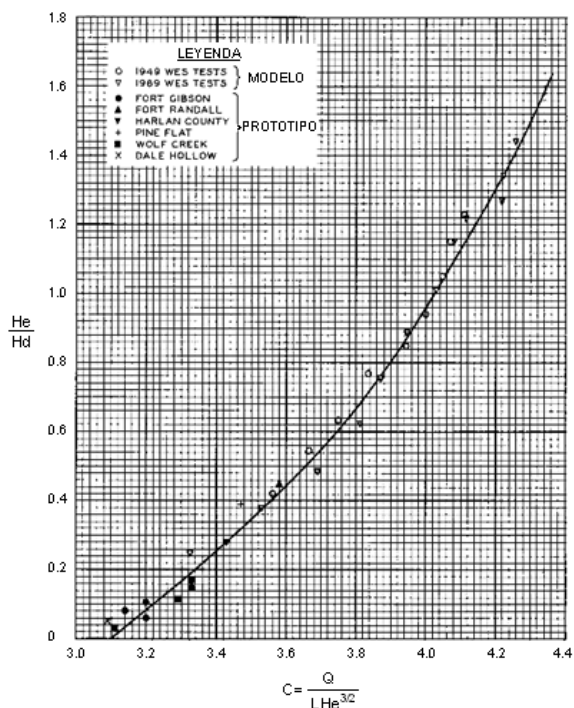
El coeficiente de descarga varía de acuerdo al tipo de cresta seleccionada, por ejemplo, tipo WES, Creager, etc. Para las formas WES, el coeficiente de descarga **C** para la carga de diseño adopta el valor de 2,225 considerando el sistema internacional de unidades o 4.03⁵ según el sistema de unidades inglesas.

Considerando la condición de flujo libre sobre el vertedero, este coeficiente no se ve influenciado por las condiciones de aguas abajo. Por otro lado, cuando el vertedero opera con cargas pequeñas, la fricción incide en la variable **C**, reduciéndola según se muestra en la Figura 1.4; otro factor que puede disminuir el **C** es la inclinación del paramento o cara de aguas arriba del vertedero (3V:1H, 3V:2H y 3V:3H), según datos del Bureau of Reclamation, por lo que el valor de **C** debe ser corregido según la Figura 1.5. En cambio, el **C** aumenta cuando el vertedero opera con cargas mayores a la de diseño, donde el límite de este incremento está definido por la disminución de la presión sobre la cresta y el consecuente riesgo de cavitación; “modelos experimentales indican, sin embargo, que la altura de diseño con seguridad puede ser excedida al menos en un 50%; por encima de esto, pueden desarrollarse fenómenos de cavitación peligrosa”⁶.

⁵Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL. p. 358.

⁶Ippen, A. T. (1950). *Channel transitions and controls*. New York: JOHN WILEY & SONS. p. 496-588.

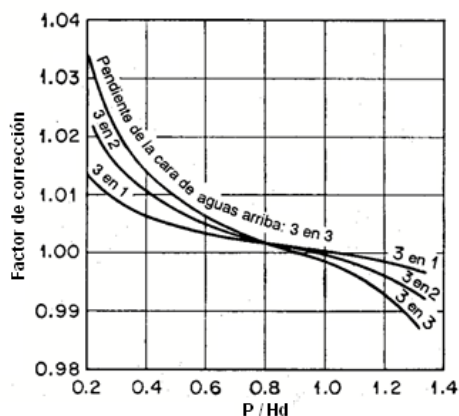
Figura 1.4: Coeficiente de descarga en vertederos WES en presas altas



Fuente: (Waterways Experiment Station, 1988, pág. HDC 111 3)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 1.5: Corrección del coeficiente de descarga por inclinación de la cara aguas arriba del vertedero tipo WES



Fuente: (Chow, 2004, pág. 359)

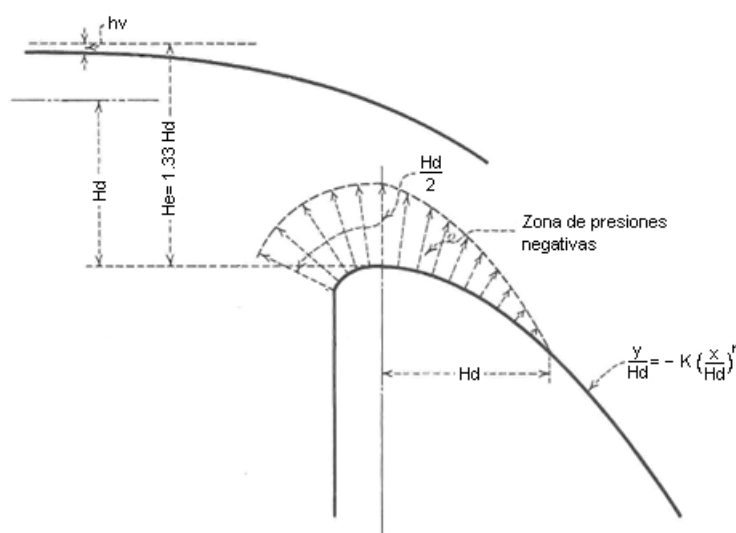
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

En lo que concierne a las presiones sobre el cimacio, el vertedero puede trabajar con varias cargas sobre la cresta, iguales, mayores o menores a la de diseño. Cuando se presenta la carga de diseño (**Hd**) sobre el vertedero, las presiones son muy próximas pero no iguales a

la atmosférica, debido a las variaciones por fricción y por el desarrollo de la capa límite. En cambio, para otras cargas (**He**) diferentes a la de diseño, las presiones son inversamente proporcionales a la relación H_e/H_d , de la siguiente manera:

- Si $H_e/H_d > 1$, las presiones son menores a la presión atmosférica. Para que las presiones negativas puedan tolerarse y no producir cavitación, se recomienda de preferencia que la relación H_e/H_d no exceda el valor de 1.33⁷, Figura 1.6.
- Si $H_e/H_d < 1$, las presiones son mayores a la presión atmosférica.

Figura 1.6: Presiones negativas en la cresta de un vertedero sin control, cuando $H_e/H_d=1.33$.



Fuente: (Bureau of Reclamation, 2007, pág. 452)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

El diseño económico de un vertedero que permita disponer de un vertedero eficiente pero que al mismo tiempo no involucre un deterioro considerable en la superficie del cimacio por cavitación (erosión del hormigón), sugiere el valor de presión mínima de $-4,0 \text{ m}^8$.

⁷U.S. Army Corps of Engineers.(1990)*Hydraulic Design of Spillways*. Washington DC: Department of the Army Headquarters. p. 3-7.

⁸ Sentürk, F. (1994). *Hydraulics of Dams and Reservoirs*. Colorado: Water Resources Publications.p. 99.

La estimación de las presiones que se presentarán sobre el vertedero en prototipo se consigue mediante pruebas de laboratorio utilizando modelos hidráulicos, específicamente instalando piezómetros a lo largo del eje del vertedero y de las paredes laterales como se muestra en la Foto 1.1.

Foto 1.1: Medición de presiones en modelo hidráulico del vertedero de la presa “El Realito” (México)

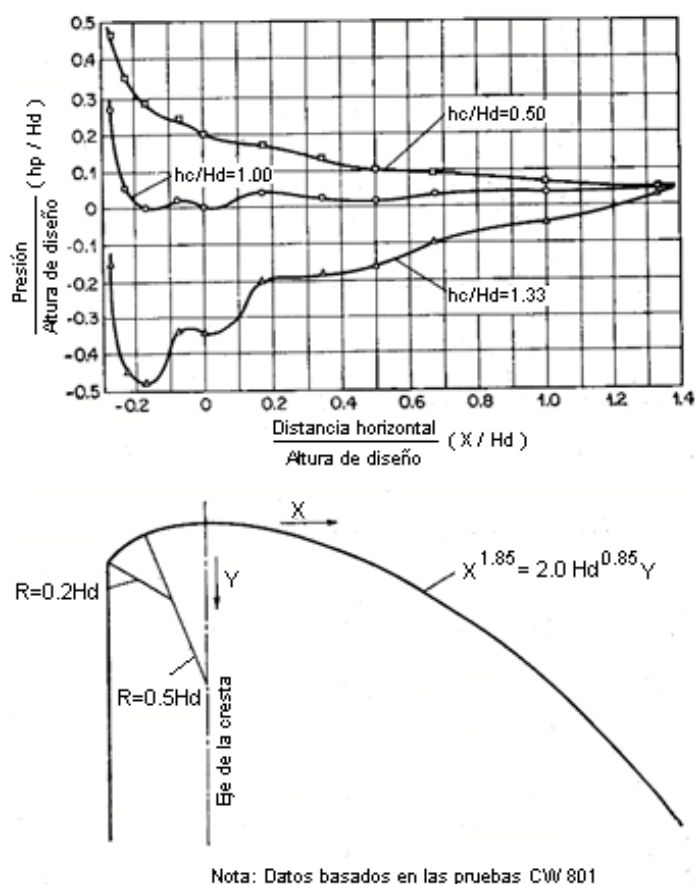


Fuente:(Laboratorio de Hidráulica de la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos (C.P.H) de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E), 2011)

Foto por: Toapaxi A., Jorge.

En la U.S Army Engineers Waterways Experiment Station se ha estudiado el comportamiento del flujo sobre vertederos de cimacio de formas WES sin pilas, en donde se determinó la distribución de presiones en el eje cuando la carga sobre el vertedero (H_e) es menor, igual y mayor que la carga de diseño (H_d). En la Figura 1.7 se puede observar que existe subpresión cuando la carga excede la carga de diseño, principalmente en las proximidades de la cresta del cimacio.

Figura 1.7: Presiones sobre un vertedero tipo cimacio sin control (Formas WES)



Fuente: (Chow, 2004, pág. 370)
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 1.2: Variación de presión y coeficiente de descarga sobre vertederos

Carga sobre el vertedero	Presión en la cresta	Coefficiente de descarga	Limitación
$H_e = H_d$	Casi atmosférica	$C = C_d$	----
$H_e > H_d$	Menor a la atmosférica	$C > C_d$	Subpresión (cavitación)
$H_e < H_d$	Mayor a la atmosférica	$C < C_d$	Eficiencia en el vertido

Fuente: (Chanson H. , 2002, pág. 375)
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Como se ha mostrado en el análisis, las presiones sobre el cimacio y el coeficiente de descarga del vertedero guardan una estrecha relación, lo cual involucra en el diseño la consideración de estos dos parámetros

a la par. La Tabla 1.2 muestra la variación de la presión y el coeficiente de descarga considerando diferentes condiciones de operación del vertedero.

- **Vertedero con Control:**

El flujo sobre el cimacio de una presa puede ser controlado por medio de compuertas, la ubicación de las mismas cambia la dirección de la salida del chorro que vierte sobre la estructura de excedencias, incidiendo en el comportamiento del flujo al modificar el coeficiente de descarga (**C**) y la distribución de presiones sobre el cimacio.

En un vertedero provisto de compuertas se presentan básicamente dos escenarios:

- Cuando las compuertas se encuentran abiertas en su totalidad y estas no condicionan la salida del flujo que vierte por sobre el vertedero, las características del flujo, el (**C**) y la distribución de presiones, son los mismos que para vertederos sin control.
- Cuando las compuertas se encuentran abiertas parcialmente, el flujo sobre el cimacio se comporta como el flujo a través de un orificio, sobre todo cuando la carga de agua es grande y la abertura de la compuerta es pequeña.

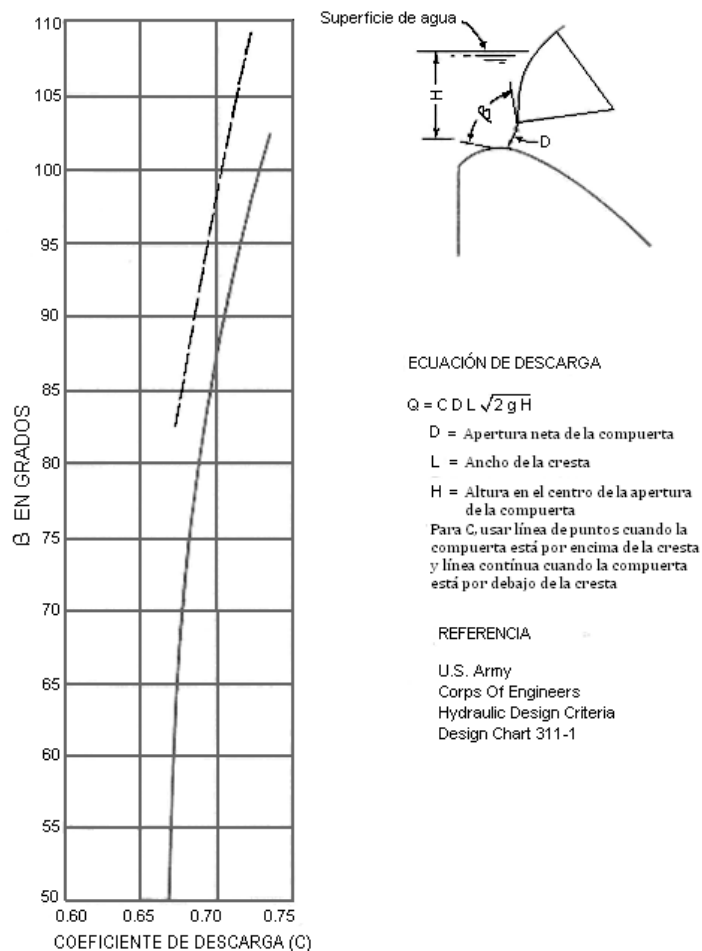
En lo referente al coeficiente de descarga (**C**), este mide la eficiencia en el vertido, incidiendo directamente en el caudal de descarga (Ecuación (1. 5)).

$$Q = CDL\sqrt{2gH} \quad (1. 5)$$

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

El coeficiente de descarga varía de acuerdo al tipo de cresta, la ubicación y tipo de compuerta, pero esencialmente depende de la abertura de la compuerta, específicamente de la variación del ángulo (β) formado por la tangente del labio inferior de la compuerta y la tangente de la cresta; a mayor abertura o ángulo (β), mayor es el coeficiente de descarga (C). En la Figura 1.8 se muestra la variación del coeficiente de descarga en función de la abertura de la compuerta.

Figura 1.8: Coeficiente de descarga un vertedero tipo cimacio provisto de compuertas



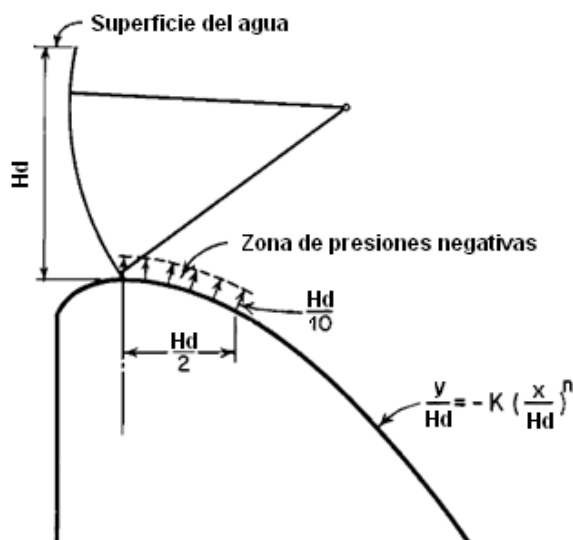
Fuente: (Bureau of Reclamation, 2007, pág. 451)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

En lo que respecta a las presiones sobre el cimacio en un vertedero controlado por compuertas, al actuar el flujo sobre el vertedero como el flujo a través de un orificio, principalmente cuando opera con cargas

grandes y aberturas de compuerta pequeñas, la subpresión se presenta sobre el cimacio aguas abajo de la compuerta, ver Figura 1.9. Para el caso mencionado, considerando que el perfil diseñado es óptimo para la carga máxima, las presiones negativas se encuentran alrededor del 10%⁹ de la carga de diseño (**Hd**),

Figura 1.9: Presiones sobre un vertedero tipo cimacio con control



Fuente: (Bureau of Reclamation, 2007, pág. 452)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Por requerimientos en el diseño estructural, específicamente de estabilidad, puede ser necesario un vertedero más ancho que permita implantar la estructura hidráulica en la presa. Esta necesidad puede ser aprovechada para evitar las presiones negativas en el cimacio, adaptando el perfil a la trayectoria del chorro que sale por un orificio, dicha modificación se proyecta a partir del punto de contacto de la compuerta con el vertedero hacia aguas abajo.

Otra alternativa que permite contrarrestar la aparición de subpresión sobre el cimacio, consiste en eliminar el orificio vertical (compuerta apoyada en plena cresta) y conseguir un orificio inclinado, ubicando el punto de contacto (compuerta y vertedero) aguas abajo de su cresta para orientar el chorro hacia el perfil del vertedero.

⁹ Bureau of Reclamation (2007). *Diseño de Presas Pequeñas*. Madrid: BELLISCO. p. 451.

1.1.2.2. Flujo de una Mezcla Agua – Aire sobre el cimacio de una presa:

En los vertederos tipo cimacio, debido a la pendiente pronunciada aguas abajo de la cresta, el flujo alcanza con rapidez gran velocidad que genera turbulencia y una superficie de agua ondulada, captando gran cantidad de aire y propiciando una mezcla agua – aire la cual difiere del flujo homogéneo.

El flujo de una mezcla agua – aire se encuentra constituido evidentemente por agua procedente del embalse y el aire que ingresa a la masa de agua procedente de la atmósfera. Para definir el ingreso de aire al flujo, es necesario considerar el desarrollo la capa límite y el inicio de la entrada de aire.

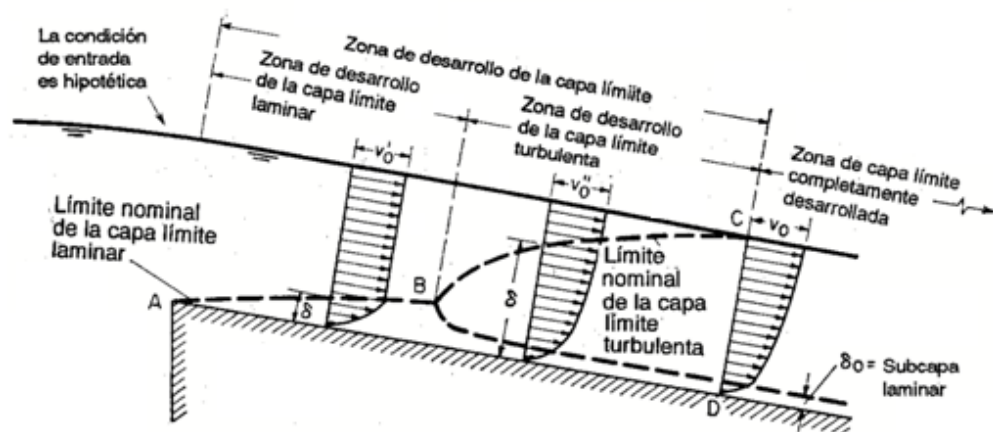
- **Desarrollo de la capa límite:**

En vertederos con control y sin control, la capa limite también llamada capa fronteriza, se origina por la viscosidad del fluido y se desarrolla por el incremento sustancial de la velocidad. El estudio de la formación de ésta capa considera las siguientes hipótesis:

- El flujo a la entrada es laminar y su distribución de velocidades es uniforme.
- En la entrada no existe perturbación en la superficie del fluido ni en su distribución de velocidades.
- El calado de agua en la entrada es constante.

El espesor de la capa límite (δ) se define como la distancia perpendicular desde la superficie en contacto hasta el punto donde la velocidad alcanza el 99% de la velocidad del flujo por fuera de la capa límite. En el desarrollo de la capa limite se distingue una capa laminar y una turbulenta, en las cuales la distribución vertical de velocidades es diferente del resto del fluido, ver Figura 1.10.

Figura 1.10: Desarrollo de la capa límite



Fuente: (Chow, 2004, pág. 190)

La zona de desarrollo de la capa límite laminar inicia en el borde delantero de la cresta de un vertedero y finaliza cuando se origina la zona turbulenta. La distribución de velocidades en esta capa es casi parabólica.

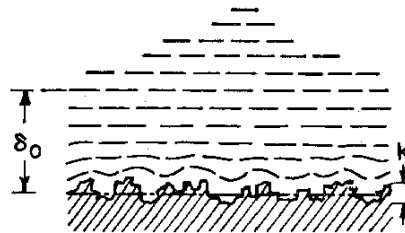
Cuando finaliza la zona laminar se presenta el inicio de la zona turbulenta, a lo largo de la cual ocurre el desarrollo de la capa límite turbulenta, con una distribución de velocidades en la capa casi logarítmica. La capa se desarrolla por completo cuando alcanza la superficie del agua (Point of inception), dando inicio a la autoaeración. A la par del desarrollo de la capa límite turbulenta, si la superficie del canal es relativamente lisa, se desarrolla una segunda capa con flujo estable denominada subcapa límite laminar (δ_0), en cuya superficie ocurre una transición vertical de flujo laminar a turbulento. Aguas abajo del inicio de la autoaeración, la capa límite se encuentra desarrollada por completo y la distribución de velocidades posee un patrón definido.

Adicionalmente, la subcapa límite laminar (δ_0) permite definir la rugosidad superficial. La altura efectiva de las irregularidades de una superficie se conoce como la altura de rugosidad (**k**) y la relación (**k/Rh**) como rugosidad relativa, siendo **Rh** el radio hidráulico de la sección. Se puede especificar rugosidades superficiales

hidráulicamente lisas o hidráulicamente rugosas, las mismas que se describen a continuación:

- Se define una superficie como lisa, cuando la rugosidad no tiene efecto por sobre la subcapa límite laminar.

Figura 1.11: Rugosidad superficial lisa

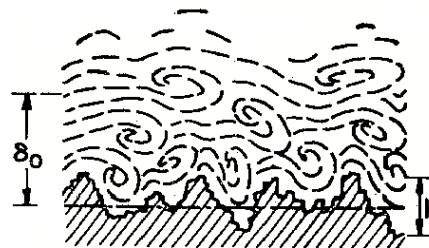


Fuente: (Chow, 2004, pág. 190)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

- Se define una superficie como rugosa, cuando la rugosidad es suficiente para extender sus efectos por fuera de la subcapa laminar. “En canales rugosos, la distribución de velocidades dependerá de la forma y del tamaño de las proyecciones de la rugosidad, y no podrá formarse una subcapa laminar estable”¹⁰

Figura 1.12: Rugosidad superficial rugosa



Fuente: (Chow, 2004, pág. 190)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

- **Flujo Autoaerado:**

La autoaeración es un fenómeno que se presenta en flujos de alta velocidad y pendiente, como en el caso de un vertedero. La apariencia

¹⁰Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL. p. 192.

blanca y espumosa del flujo se debe a la entrada de cantidades considerables de aire (Foto 1.2).

Foto 1.2: Flujo aerado en vertederos (Presa Douglas-E.E.U.U.)



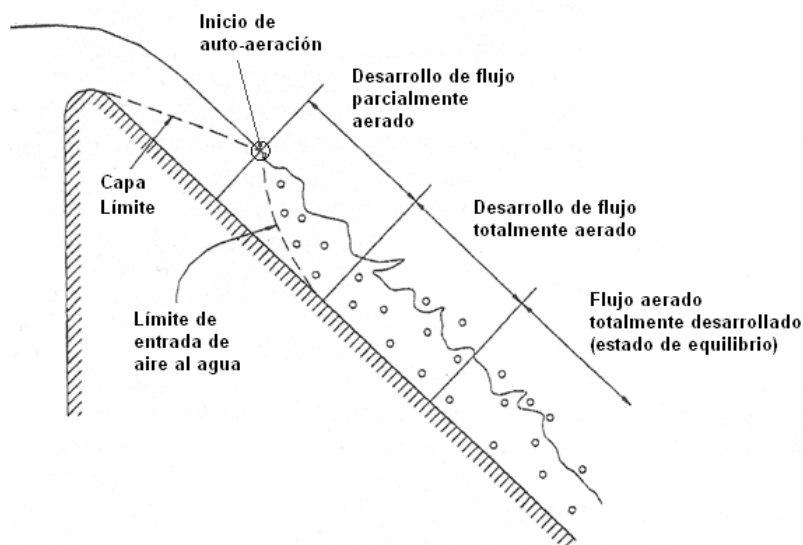
Fuente: (Depew, 2013)

La auto aeración en el flujo inicia en el punto donde la capa límite turbulenta llega a la superficie del agua. Como referencia, el ingreso de aire a la masa de agua ocurre aproximadamente cuando el flujo alcanza una velocidad a partir de 20 pies/s¹¹ o 6 m/s. Cabe señalar que la velocidad depende de varios factores: condiciones de entrada, rugosidad, sección transversal, pendiente y caudal.

El ingreso de aire se incrementa gradualmente hasta un valor máximo dependiendo de la pendiente, cuando las burbujas de aire alcanzan la mayor profundidad se considera que el flujo se encuentra totalmente aerado. El algún punto aguas abajo del inicio de la aeración se alcanzan condiciones uniformes, a partir de lo cual no existen cambios significativos en las características hidráulicas y en el transporte de aire.

¹¹Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL. p. 34.

Figura 1.13: Desarrollo del flujo autoaerado en vertederos



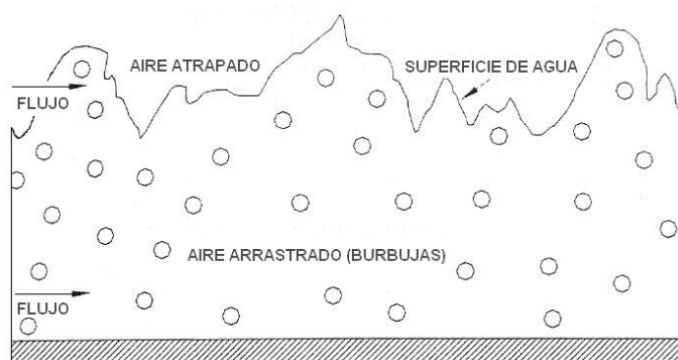
Fuente: (Wilhelms, 2005, pág. 523)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Ehrenberg (1926), Straub y Anderson (1958) diferenciaron en el flujo mezcla agua-aire dos capas: una capa superficial donde el agua es transportada por el aire y una segunda capa donde el aire es transportado por el agua.

Luego, Killen (1968) sugiere que en la capa superficial el aire es atrapado por las irregularidades de la superficie del agua. Además, definió al total de aire transportado por el flujo como la suma de aire atrapado más aire arrastrado.

Figura 1.14: Conceptos de aire atrapado y aire arrastrado



Fuente: (Wilhelms, 2005, pág. 525)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

La importancia de la presencia de aire en el flujo de agua radica en dos aspectos:

- **Aumento en el volumen o la profundidad del flujo:** El ingreso de aire a la masa de agua causa un incremento en su volumen, aumentando el calado y disminuyendo la densidad de la mezcla en comparación con el flujo sin aeración.

El diseño de las paredes del vertedero debe considerar el aumento del volumen de la mezcla para evitar posibles desbordes del flujo y posteriores problemas de erosión.

Douma (1943), estableció una fórmula empírica para determinar el incremento de volumen en el flujo (Ecuación (1. 6)).

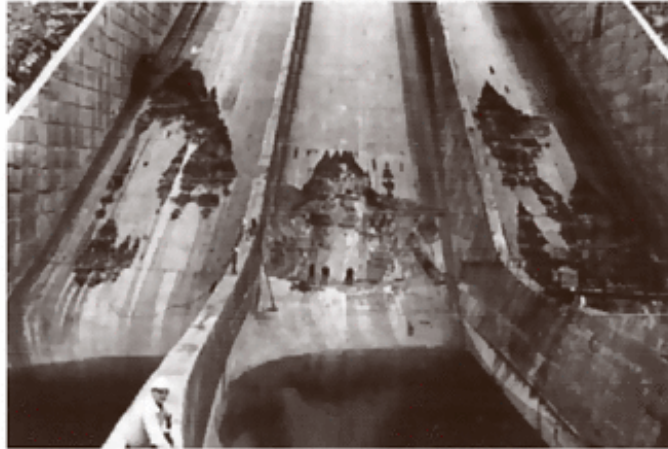
$$u = 10 \left(\frac{0,2V^2}{gRh} - 1 \right)^{1/2} \quad (1. 6)$$

En donde: **u** es el porcentaje de incremento de volumen (%), **V** es la velocidad media del flujo (m/s), **Rh** es el radio hidráulico (m), **g** es la aceleración de la gravedad (m/s²).

- **Reducción de daños por cavitación:** Debido a la velocidad que adquiere el flujo en un vertedero, puede presentarse el fenómeno de cavitación, el mismo que puede reducirse o eliminarse dependiendo de la concentración de aire cercana a la superficie del vertedero.

La cavitación es un fenómeno inducido por la velocidad del flujo, donde la presión desciende hasta el valor de la presión de vapor, resultando en la formación de burbujas de vapor cercanas a la superficie sólida. Cuando las burbujas de vapor colapsan se producen ondas de choque, las cuales ocasionan deterioro en el material que compone la superficie (Foto 1.3 y Foto 1.4).

Foto 1.3: Daños por cavitación en la superficie del vertedero



Fuente: (Tropea, Yarin, & Foss, 2007, pág. 960)

Foto 1.4: Daños por cavitación en el vertedero de la Presa Höljes - Suecia



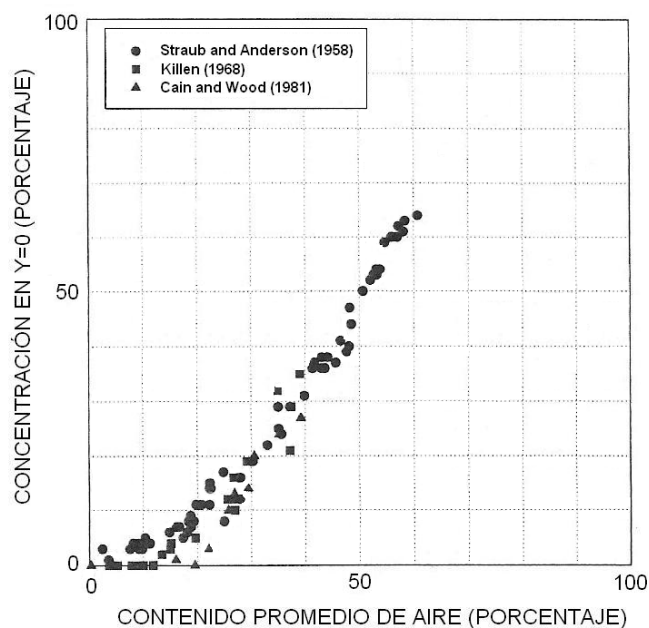
Fuente: (Pettersson, 2012)

Según Flavey (1990), cuando se presentan velocidades de 12 a 20 m/s puede producirse daños por cavitación en la superficie del vertedero. De acuerdo con Khatsuria (2005), ocurre un daño por cavitación cuando la velocidad sobrepasa los 25 m/s.

En general, el daño por cavitación puede ser reducido o eliminado si existe una concentración de aire suficiente cercana a la superficie del vertedero. En la capa donde el aire es arrastrado, la distribución del mismo varía con la profundidad del flujo. Según Peterka (1953), los valores de concentración de aire

en el fondo necesarios para disminuir o eliminar este fenómeno son de 2% y 8%, respectivamente. Para eliminar el efecto de la cavitación, se considera que la concentración promedio de aire arrastrado debe ser mayor al 20% (Figura 1.15), lo que es posible si se dispone de una pendiente mínima de 21 grados¹².

Figura 1.15: Relación entre las concentraciones promedio del aire y de aire en la superficie del vertedero



Fuente: (Wilhelms, 2005, pág. 535)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Adicionalmente, para prevenir daños por cavitación a lo largo de un vertedero, se pueden instalar aeradores que permitan alcanzar la cantidad suficiente de concentración de aire, cuya ubicación y dimensionamiento pueden ser definidos o corroborados por medio de modelos hidráulicos (Foto 1.5).

¹²Wilhelms, S., Gulliver, J. (2005). *Gas transfer, cavitation, and bulking in self-aerated spillway flow*. Journal of Hydraulic Research Vol.43, No. 5. p. 532.

Foto 1.5: Aerador en modelo hidráulico del vertedero de la presa "Zapotillo" (México)



Fuente:(Laboratorio de Hidráulica de la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos (C.P.H) de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E), 2011)

Foto por: Toapaxi A., Jorge.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA BASE TEÓRICA SOBRE EL EFECTO DE LA GRAVEDAD, DE LA VISCOSIDAD Y DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL EN EL MOVIMIENTO SUPERCRÍTICO DE UN CANAL DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR SOBRE UN FONDO LISO CON CURVATURA CÓNCAVA

En general, en la mecánica de fluidos, el estado del flujo a superficie libre en canales se encuentra afectado por la relación de la gravedad, la viscosidad y la tensión superficial con las fuerzas inerciales del flujo.

En el flujo en canales a superficie libre existe una influencia secundaria de la viscosidad y de la tensión superficial, no así la gravedad, que a través del número de Froude, es útil en el diseño de estructuras hidráulicas, así como también en el cambio de flujo supercrítico a subcrítico (Resalto Hidráulico).

1.2.1. EFECTO DE LA GRAVEDAD

La gravedad es el mecanismo principal para que ocurra el flujo a superficie libre, donde éste se encuentra rodeado parcialmente por un contorno sólido.

Numéricamente el efecto gravitacional se representa por el número de Froude, el cual se encuentra definido como la relación entre las fuerzas inerciales representadas por la velocidad, y las fuerzas gravitacionales representadas por la gravedad:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gl}} \quad (1.7)$$

En donde, **Fr** es el número de Froude, **V (m/s)** es la velocidad media del flujo, **g (m/s²)** aceleración de la gravedad, **l (m)** es la longitud característica.

En canales abiertos “**l**” es la profundidad hidráulica “**y**”, definida como:

$$y = \frac{A}{b} \quad (1.8)$$

En donde, **y (m)** es la profundidad hidráulica, **A (m²)** es el área de la sección transversal del flujo y perpendicular al mismo, **b (m)** es el ancho del espejo de aguas.

Si se trata de un flujo a superficie libre en un canal rectangular cuyo ángulo de inclinación es menor a 8 grados, la longitud característica corresponde al calado del flujo (**h**), con lo cual el número de Froude queda definido de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (1.9)$$

En donde, **Fr** es el número de Froude, **V (m/s)** es la velocidad media del flujo, **g (m/s²)** aceleración de la gravedad, **h (m)** es el calado.

Por lo contrario, si la inclinación del canal rectangular tiene una pendiente pronunciada con un ángulo de inclinación (θ) mayor a 8 grados o variable, el número de Froude se calcula con la siguiente formulación:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \frac{\cos \theta}{\alpha} d}} \quad (1. 10)$$

En donde, **Fr** es el número de Froude, **V (m/s)** es la velocidad media del flujo, **g (m/s²)** aceleración de la gravedad, **θ (grados)** es el ángulo de inclinación del canal respecto a la horizontal en la sección de interés, **α** (adimensional) es el coeficiente de coriolis para corrección de la distribución de velocidad ($\alpha=1$, para flujo turbulento), **d (m)** es la distancia a la superficie libre perpendicular al fondo del canal.

A mayor **Fr**, es mayor la reacción inercial de cualquier fuerza; en cambio, cuando disminuye el **Fr**, mayor es el efecto de la fuerza gravitacional. La gravedad permite definir al flujo por medio del número de Froude en: flujo subcrítico, flujo crítico y flujo supercrítico.

El flujo es subcrítico, cuando el número de Froude es menor a la unidad, prevalece la energía potencial, la velocidad y la profundidad es relativamente baja y grande, respectivamente.

El flujo se considera crítico, cuando el número de Froude es igual a la unidad y representa el punto de transición del flujo subcrítico a supercrítico.

El flujo es supercrítico, cuando el número de Froude es mayor a la unidad, prevalece la energía cinética, la velocidad y la profundidad es relativamente alta y baja, respectivamente. Este tipo de flujo se presenta en canales de alta pendiente, por ejemplo, en el flujo sobre la rápida de un vertedero y en la cubeta deflectora de la estructura de disipación tipo salto en esquí.

En modelos hidráulicos de canales o de flujos a superficie libre, considerando que el flujo se encuentra controlado principalmente por los efectos gravitacionales, se debe cumplir que el número de Froude del flujo en el modelo es igual al número de Froude del flujo en el prototipo¹³:

$$Fr_{MODELO} = Fr_{PROTOTIPO}$$

En canales de alta pendiente, dependiendo de la formación de las denominadas ondas de Froude, el flujo también puede clasificarse en función de su estabilidad en: flujo estable (sin ondas de Froude) y flujo inestable (con ondas de Froude), ver Foto 1.6. Dependiendo de la relación ancho/calado y de la rugosidad del canal, en canales hidráulicamente lisos, el límite de la inestabilidad se encuentra aproximadamente alrededor de un número de Froude de 2, ver Figura 1.16.

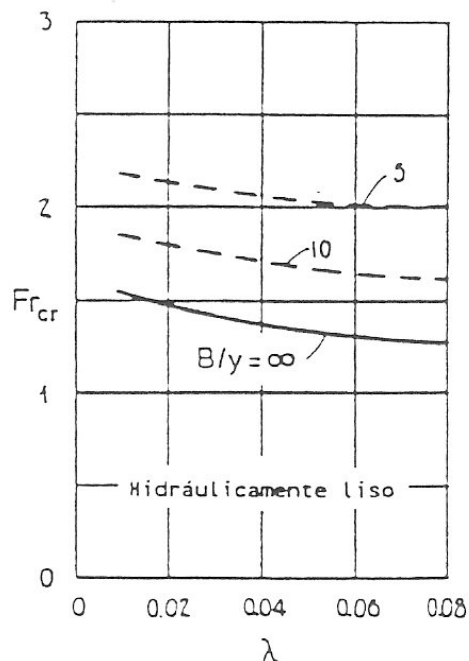
Foto 1.6: Flujo Inestable en vertedero (Presa Turner - California)



Fuente: (Pérez, 2005)

¹³Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL. p. 14.

Figura 1.16: Límite de estabilidad para canales hidráulicamente lisos



Fuente: (Castro, s.f., pág. 278)

1.2.2. EFECTO DE LA VISCOSIDAD

La viscosidad comparada con la inercia (número de Reynolds) permite definir generalmente al flujo como laminar o turbulento.

Laminar, si las fuerzas viscosas son representativas con respecto a las fuerzas inerciales. En este tipo de flujo, las líneas de corriente definen trayectorias suaves.

Turbulento, si las fuerzas viscosas son pequeñas con respecto a las fuerzas inerciales. En este tipo de flujo, las líneas de corriente definen trayectorias irregulares.

Numéricamente el efecto viscoso se representa por el número de Reynolds, el cual se encuentra definido como la relación entre las fuerzas inerciales representadas por la velocidad, y las fuerzas viscosas representadas por la viscosidad cinemática:

$$Re = \frac{Vl}{\nu} \quad (1.11)$$

En donde, **Re** es el número de Reynolds, **V (m/s)** es la velocidad del flujo, **l (m)** es la longitud característica, **v (m²/s)** es la viscosidad cinemática.

Para canales a flujo libre el número de Reynolds (**Re**) se determina con la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{VRh}{\nu} \quad (1. 12)$$

En donde, **Re** es el número de Reynolds, **V (m/s)** es la velocidad del flujo, **Rh (m)** es el radio hidráulico, **v (m²/s)** es la viscosidad cinemática.

En canales lisos, se considera flujo laminar cuando $Re < 500$, y flujo turbulento aproximadamente cuando $Re > 2000$. En el rango de 500 a 2000 ocurre precisamente la transición del flujo¹⁴.

En la práctica, el flujo en canales se considera turbulento. Si se toma en cuenta una velocidad mínima de 0,6 m/s y una viscosidad cinemática de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ($T=20^\circ\text{C}$), los valores de profundidad y ancho del flujo necesariamente deben encontrarse en el orden de los milímetros para que se presente el flujo laminar, lo cual en la práctica en estructuras hidráulicas en prototipo es muy difícil que suceda.

La viscosidad es una propiedad muy importante a considerar en modelos hidráulicos, donde el objetivo es investigar mediante el modelado el comportamiento del flujo en el prototipo. Para representar adecuadamente posibles formaciones de vórtices, zonas de separación de la corriente, y procesos difusivos de los chorros, es necesario definir un **Re_{crítico}**, el cual representa el límite del **Re_{modelo}**, es decir, el **Re** que se presente en las estructuras hidráulicas del modelo debe ser mayor al **Re_{crítico}**:

$$Re_{modelo} > Re_{crítico}$$

¹⁴Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL. p. 10.

1.2.3. EFECTO DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL

“La tensión superficial del agua puede afectar el comportamiento del flujo bajo ciertas circunstancias, pero no juega un papel significativo en la mayor parte de los problemas de canales abiertos que se presentan en ingeniería.”¹⁵

Numéricamente el efecto de la tensión superficial se representa por el número de Weber, el cual se encuentra definido como la relación entre las fuerzas inerciales representadas por la velocidad, y las fuerzas de tensión superficial:

$$We = \frac{\rho V^2 l}{\sigma} \quad (1. 13)$$

En donde, **We** es el número de Weber, ρ (**kg/m³**) es la densidad, **V (m/s)** es la velocidad del flujo, **l (m)** es la longitud característica, σ (**kg/s²**) es la tensión superficial.

La tensión superficial no es predominante en prototipos de estructuras hidráulicas, y se emplea rara vez en problemas a pequeña escala (modelos hidráulicos), donde su efecto es importante. La tensión superficial tiene relevancia en casos en los que sus fuerzas gobiernan el movimiento, por ejemplo, en suelos el movimiento capilar, o en pequeños canales las ondas capilares.

En el estudio en modelos, por ejemplo, el flujo sobre un vertedero, se considera el efecto de la tensión superficial para cargas sobre el vertedero menor a 3cm¹⁶, por arriba de este valor la influencia es despreciable en la curvatura de la superficie libre del agua y por ende en el coeficiente de descarga.

“El efecto relativo de la tensión superficial (**We**) se presenta normalmente combinado con el efecto de la viscosidad (**Re**), de tal modo que se deja

¹⁵Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL. p. 5.

¹⁶Castro, M, Hidalgo, X. (2002). *Análisis experimental del flujo combinado superior e inferior en una compuerta plana*. Ingeniería Hidráulica en México Vol.17, No. 1. p. 83.

de considerar la influencia de la tensión superficial cuando el producto $RE^{0.2}We^{0.6}$ es mayor a 900 (Castro, 1983)¹⁷.

1.2.4. RÉGIMEN DEL FLUJO

Los regímenes de flujo dan lugar como resultado de la relación de la viscosidad y la gravedad, o lo que es lo mismo, del número de Reynolds y el número de Froude. La combinación de los tipos de flujo, determinados por los números mencionados (Re y Fr), producen los siguientes regímenes:

- **Subcrítico - Laminar:**

Cuando el Fr es menor a 1 y el Re se encuentra en el rango laminar.

- **Subcrítico - Turbulento:**

Cuando el Fr es menor a 1 y el Re se encuentra en el rango turbulento.

- **Supercrítico - Laminar:**

Cuando el Fr es mayor a 1 y el Re se encuentra en el rango laminar.

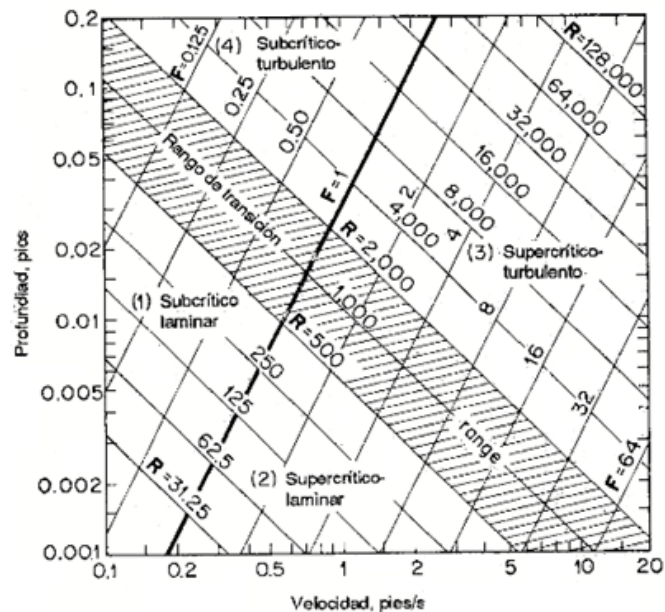
- **Supercrítico - Turbulento:**

Cuando el Fr es mayor a 1 y el Re se encuentra en el rango turbulento.

J. Robertson y Hunter Rouse desarrollaron un ábaco con ejes logarítmicos (Figura 1.17) que relaciona la velocidad y la profundidad del flujo y que permite determinar el régimen de flujo en canales abiertos.

¹⁷Castro, M, Hidalgo, X. (2002). *Análisis experimental del flujo combinado superior e inferior en una compuerta plana*. Ingeniería Hidráulica en México Vol.17, No. 1. p. 83.

Figura 1.17: Regímenes de flujo en canales abiertos



Fuente: (Chow, 2004, pág. 14)

Como ya se mencionó anteriormente en el numeral 1.2.2, el flujo laminar muy difícilmente se presenta en estructuras hidráulicas, por lo cual, los regímenes que contienen esta condición en la práctica tampoco se presentarán en un canal rectangular con curvatura cóncava. En un canal con estas características, por lo general, tanto en el flujo de aproximación (canal alta pendiente), como en el de la propia estructura (canal con curvatura cóncava), existe flujo supercrítico. Por lo tanto, en general, el régimen de flujo que se presenta con mayor frecuencia en canales rectangulares con fondo con curvatura cóncava es el régimen supercrítico – turbulento.

En el régimen supercrítico – turbulento las fuerzas de viscosidad y de tensión superficial son secundarias. En cambio las fuerzas gravitacionales representadas por el número de Froude toman mayor relevancia. Cuando el Fr es mayor a 3^{18} , la acción de la gravedad incide en la resistencia del flujo. Adicionalmente según Iwagaki, en canales con flujos turbulentos, a medida que aumenta el Fr , el coeficiente de fricción es mayor que el valor que se presenta en tuberías.

¹⁸Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL. p. 16

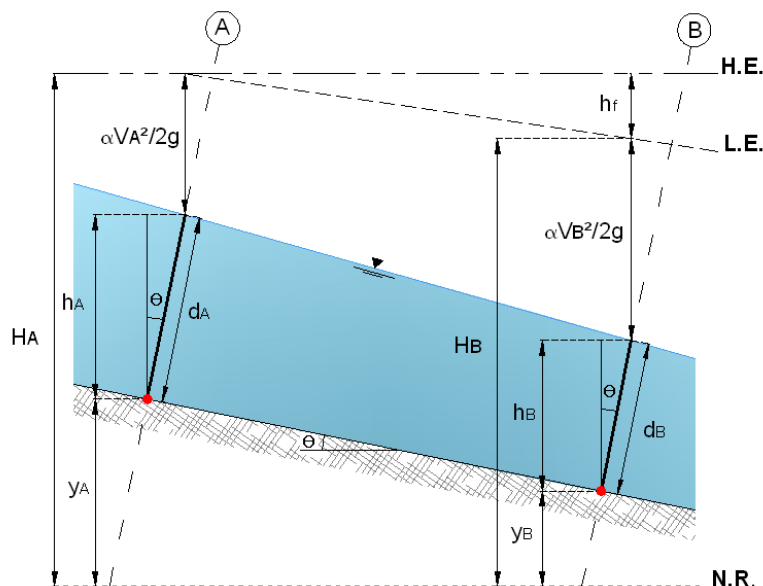
1.3. DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA CLÁSICA DE EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN Y DEL EFECTO DE LA CURVATURA CÓNCAVA EN FLUJO SUPERCRÍTICO

Una de las tres ecuaciones fundamentales en hidráulica es la ecuación de la energía, la cual se basa en el principio de conservación de energía, que indica: “la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”. Considerando en un canal un volumen de control definido por 2 secciones (A y B), (Figura 1.18), y un flujo permanente, unidimensional e incompresible, la ecuación queda definida de la siguiente manera:

$$H_A = H_B + h_f \quad (1.14)$$

En donde, $H_{A,B}$ (m) son las energías totales en las secciones A y B respectivamente, h_f (m) es la pérdida de energía por fricción en el tramo A-B.

Figura 1.18: Energía en el flujo sobre un canal abierto



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tomando en cuenta la Figura 1.18, la ecuación de energía para flujo variado sobre un canal de fondo plano queda definida:

$$y_A + h_A + \alpha \frac{V_A^2}{2g} = y_B + h_B + \alpha \frac{V_B^2}{2g} + h_f \quad (1. 15)$$

En donde, $y_{A,B}$ (m) son las elevaciones sobre el nivel de referencia, $h_{A,B}$ (m) son las cargas de presión, $\alpha V_{A,B}^2/2g$ (m) son las cargas de velocidad (α es el coeficiente de energía cinética o de Coriolis), h_f (m) es la pérdida de energía por fricción en el tramo A-B.

Considerando la pendiente del canal, $h_A = d_A \cos \theta$ y $h_B = d_B \cos \theta$, siendo: $d_{A,B}$ la distancia a la superficie libre perpendicular al fondo del canal, θ el ángulo de inclinación del canal respecto a la horizontal.

En un canal existen pérdidas por fricción y pérdidas localizadas (por cambio de dirección o geometría). En lo concerniente a la fricción, la determinación de sus pérdidas en canales con flujo a superficie libre se trata en la siguiente sección.

1.3.1. PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN CANALES

En la ecuación de la energía para canales de baja pendiente ($\theta < 8^\circ$), en la práctica, la influencia de la inclinación del canal es despreciable en las cargas de presión hidrostática ($h_A = d_A$ y $h_B = d_B$). Por lo contrario, en los canales de alta pendiente, con un ángulo de inclinación mayor a 8 grados, es necesario incluir la influencia de la pendiente ($h_A = d_A \cos \theta$ y $h_B = d_B \cos \theta$). Por lo tanto, para esta condición la ecuación de la energía entre las secciones A y B (Figura 1.18) es:

$$y_A + d_A \cos \theta + \alpha \frac{V_A^2}{2g} = y_B + d_B \cos \theta + \alpha \frac{V_B^2}{2g} + h_f \quad (1. 16)$$

En donde, $y_{A,B}$ (m) son las elevaciones sobre el nivel de referencia, $d_{A,B}$ (m) es la distancia a la superficie libre perpendicular al fondo del canal, θ el ángulo de inclinación del canal respecto a la horizontal, $\alpha V_{A,B}^2/2g$ (m) son las cargas de velocidad (α es el coeficiente de Coriolis), h_f (m) es la pérdida de energía por fricción en el tramo A-B.

La determinación de las pérdidas por fricción h_f en canales se basa en la ecuación de Darcy - Weisbach, propuesta para el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías a presión:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1.17)$$

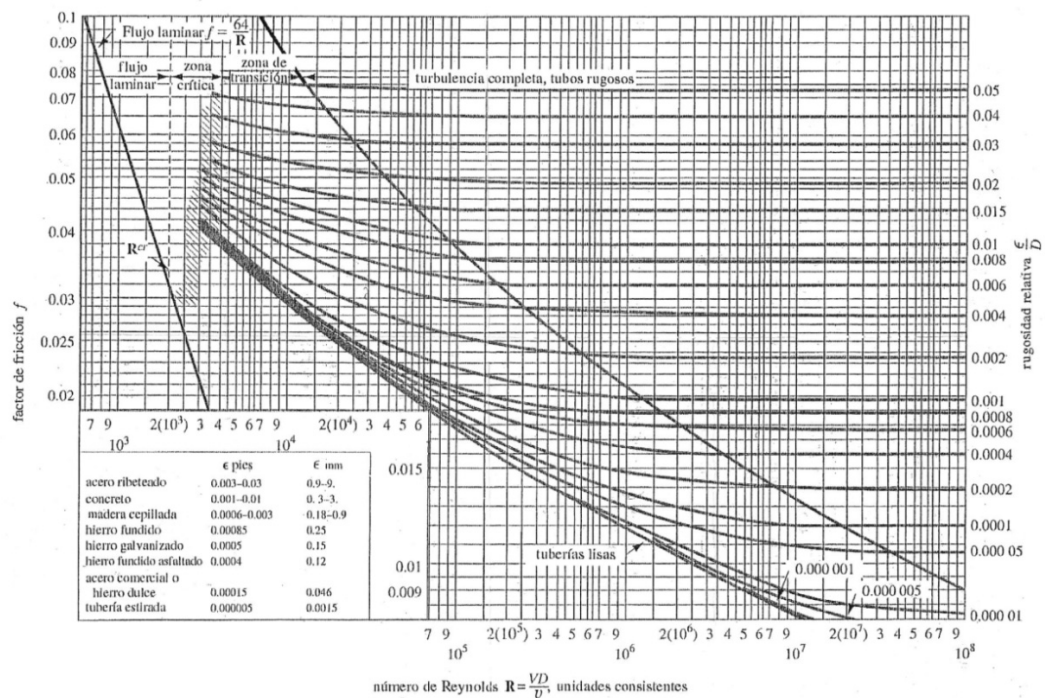
En canales de baja pendiente, considerando $D = 4 Rh$, se tiene:

$$h_f = f \frac{L V^2}{4 Rh 2g} \quad (1.18)$$

En las ecuaciones, h_f (m) es la pérdida por fricción, f (adimensional) es el factor de fricción (f en función de la rugosidad y el Reynolds), L (m) es la longitud de la tubería, D (m) es el diámetro de la tubería, Rh (m) es el radio hidráulico de la sección del canal, V (m/s) es la velocidad media del flujo, g (m/s²) aceleración de la gravedad.

El factor de fricción f de la ecuación de Darcy Weisbach se obtiene por medio del Diagrama Universal de Moody (Figura 1.19).

Figura 1.19: Diagrama de Moody



Fuente: (Potter & Wiggert, 2002, pág. 272)

También se puede obtener f a través de ecuaciones aplicables a flujo turbulento, como la de Colebrook-White, Prandtl-Von Karman o Nikuradse. De igual manera, se puede calcular f relacionándolo con el coeficiente C de Chezy, considerando la relación entre la pérdida de energía y la longitud (pendiente de fricción) $S_f = h_f / L$:

$$h_f = S_f L \quad (1. 19)$$

Igualando las pérdidas con la ecuación de Darcy-Weisbach y despejando la velocidad:

$$S_f L = f \frac{L}{4Rh} \frac{V^2}{2g} \quad (1. 20)$$

$$S_f = \frac{f V^2}{8 Rh g} \quad (1. 21)$$

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{S_f Rh} \quad (1. 22)$$

Por lo tanto C de Chezy en función del factor de fricción f es:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad \text{ó} \quad f = \frac{8g}{C^2} \quad (1. 23)$$

Para la determinación del C de Chezy existen diferentes ecuaciones propuestas por varios autores, aplicables en el sistema internacional de unidades (Tabla 1.3).

Tabla 1.3: Fórmulas para determinar el coeficiente de fricción C de Chezy

Autor	Ecuación	Observaciones
Ganguillet y Kutter	$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{Rh}}}$	Aconsejable en canales naturales, para los que usualmente conduce a resultados satisfactorios. Es compleja y tiene la desventaja de que ocurren cambios grandes en C para cambios pequeños de n. Este coeficiente depende de la rugosidad del canal.
Kutter	$C = \frac{100 \sqrt{Rh}}{m + \sqrt{Rh}}$	Es una simplificación de la de Ganguillet y Kutter, m es un coeficiente de rugosidad.
Bazin	$C = \frac{87}{1 + \frac{N_B}{\sqrt{Rh}}}$	Está basada en una buena cantidad de experimentos y es relativamente sencilla, N _B es un coeficiente de rugosidad.
Kozyeny	$C = 20 \log \frac{A}{T} + N_K$	Es análoga a la de los conductos a presión y fue obtenida con base en los resultados experimentales de von Misses y Bazin. N _K es un coeficiente de rugosidad.
Martínez	$C = 17.7 \log \left(\frac{Rh}{d_m} \right) + 13.6$	Se obtuvo de muchas mediciones en ríos de la exUnión Soviética d _m es el diámetro medio del grano de material en fondo del río en m. Es válida cuando 0.15 ≤ Rh ≤ 2.25 m, 0.00004 ≤ d _m ≤ 0.25 m.
Manning	$C = \frac{Rh^{1/6}}{n}$	Originalmente fue obtenida a partir de siete ecuaciones diferentes basadas en ensayos de Bazin, y posteriormente verificada por observaciones. Es una de las más utilizadas por su sencillez. n es el mismo coeficiente que utilizó Ganguillet y Kutter.
Pavlovski	$C = \frac{Rh^z}{n}$	Considera que el exponente en la ecuación de Manning no es constante sino que varía con la forma del canal y la rugosidad, como sigue: z = 1.5(n) ^{0.5} , para Rh < 1 m, y z = 1.3(n) ^{0.5} para Rh > 1 m. EL valor de n es el mismo que el de Manning.

Fuente: (Sotelo, Hidráulica de Canales, 2002, pág. 83)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Los valores de coeficientes de rugosidad para el cálculo del C de Chezy se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1.4: Coeficientes de rugosidad utilizados para el cálculo del “C” de Chezy

1. Conductos cerrados parcialmente llenos	Ganguillet y Kutter n	Kutter m	Bazin N_B	Kozeny N_K
Fierro fundido nuevo.	0.012	0.20	0.06	
Fierro fundido usado.		0.25	0.12	
Fierro colado.	0.012	0.20		
Barro vitrificado nuevo.		0.25		
Barro vitrificado usado.	0.017	0.30 a 0.35		
Tubos de alcantarillado.	0.017 a 0.020	0.30 a 0.35		
Túneles de concreto pulido.	0.011 a 0.013	0.20 a 0.25	0.22	
2. Canales abiertos	Ganguillet y Kutter n	Kutter m	Bazin N_B	Kozeny N_K
Madera cepillada.	0.010	0.15 a 0.20	0.06	
Madera de acabado rugoso.		0.30 a 0.35		
Mampostería de ladrillo bien acabada.	0.013	0.25	0.16	70 a 76
Cemento pulido.		0.20 a 0.25	0.10 a 0.16	84 a 90
Concreto pulido.	0.012	0.20	0.11 a 0.22	
Concreto rugoso.	0.017	0.65	0.45	58 a 62
Piedra brasa bien acabada.	0.017	0.65	0.46	60 a 70
En tierra, arroyos y ríos.	0.025	1.75	1.4 a 1.6	
En tierra con material grueso y plantas.	0.035	2.0 a 2.5	1.75	
Con cantos rodados.	0.04 a 0.5	3.5 a 5.0	hasta 3.5	
Con gran rugosidad de fondo y maleza tupida.	hasta 0.9			
Roca acomodada.				36 a 50
Roca a volteo.				28 a 36
Grava { gruesa (10 a 15 cm).				32 a 38
{ media (5 a 10 cm).				38 a 42
{ fina (2 a 3 cm).				42 a 46
Cantos rodados (15 a 20 cm).				28 a 32

Fuente: (Sotelo, Hidráulica de Canales, 2002, pág. 84)

Otra fórmula y muy utilizada para la determinación de las pérdidas por fricción h_f en canales se basa en la ecuación de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (1.24)$$

$$S_f = \left(\frac{V n}{R h^{2/3}} \right)^2 \quad (1.25)$$

Considerando $S_f = h_f / L$, e igualando las pendientes de fricción y despejando las pérdidas por fricción:

$$h_f = \left(\frac{V n}{R h^{2/3}} \right)^2 L \quad (1.26)$$

En donde, h_f (m) es la pérdida por fricción, V (m/s) es la velocidad media del flujo, n (s/m^{1/3}) es el coeficiente de rugosidad de Manning, L (m) es la longitud del canal, R_h (m) es el radio hidráulico de la sección del canal.

El coeficiente rugosidad de Manning “n” varía según el tipo de material que conforma el canal. En general, para canales de hormigón el coeficiente se encuentra en el rango de 0.013 a 0.017, siendo el valor más bajo para hormigón nuevo y el más alto para hormigón viejo.

En canales de alta pendiente (flujo supercrítico), es decir, donde el ángulo de inclinación del canal θ es mayor a 8 grados, como por ejemplo en rápidas. Para el cálculo aproximado de las pérdidas por fricción, la U.S. Bureau of Reclamation ha propuesto una fórmula utilizando la ecuación de Manning y considerando las siguientes hipótesis:

- El radio hidráulico es igual al calado ($R_h = d$). Esta suposición hace que la formulación sea más aplicable a canales anchos y de poca profundidad.

Con base en la ecuación de continuidad:

$$A = \frac{Q}{V} \quad (1. 27)$$

$$b d = \frac{q b}{V} \quad (1. 28)$$

$$d = R_h = \frac{q}{V} \quad (1. 29)$$

- La energía cinética aumenta proporcionalmente a la longitud del canal.

$$\frac{h_v}{x} = constante \quad (1. 30)$$

Utilizando la fórmula de Manning,

$$S_f = \left(\frac{V n}{R h^{2/3}} \right)^2 \quad (1.31)$$

La velocidad media del flujo,

$$h_v = \frac{V^2}{2g} \rightarrow V = \sqrt{2gh_v} \quad (1.32)$$

Las pérdidas por fricción,

$$S_f = \frac{dh_f}{dx} \rightarrow h_f = \int_0^L s dx \quad (1.33)$$

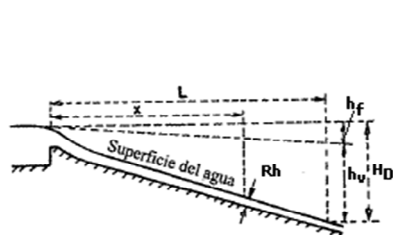
Reemplazando e Integrando, la ecuación para el cálculo aproximado de pérdidas por fricción en canales de alta pendiente (rápidas) es:

$$h_f = \frac{3 n^2 L (2gh_v)^{5/3}}{8 q^{4/3}} \quad (1.34)$$

En donde, h_f (**m**) es la pérdida por fricción, n (**s/m^{1/3}**) es el coeficiente de rugosidad de Manning, L (**m**) es la proyección en la horizontal de la longitud del canal, g (**m/s²**) es la aceleración de la gravedad, h_v (**m**) es la carga de velocidad al final del canal, q (**m²/s**) es el caudal por unidad de ancho del canal.

Para la determinación de h_f es necesario realizar un proceso de iteración. Inicialmente se asume el valor de h_v como la diferencia de niveles de la superficie libre del agua en el tramo que comprende la longitud L , es decir, para el primer cálculo se considera $h_f = 0$. Luego, con la primera h_f calculada, se recalcula h_f , donde $h_v = \text{Diferencia de niveles} - h_f$ calculado. El proceso se repite hasta que converge el valor de las pérdidas de fricción. Adicionalmente, si no se desea utilizar la fórmula, en un proceso similar de iteración se puede obtener h_f gráficamente, utilizando el ábaco (Figura 1.20) propuesto por la U.S. Bureau of Reclamation.

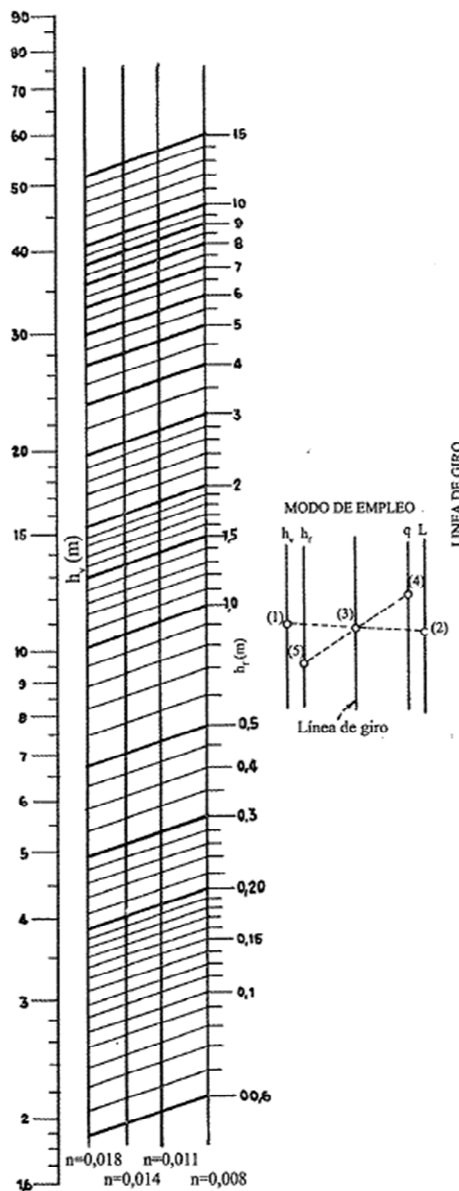
Figura 1.20: Ábaco para el cálculo de pérdidas por fricción en rápidas



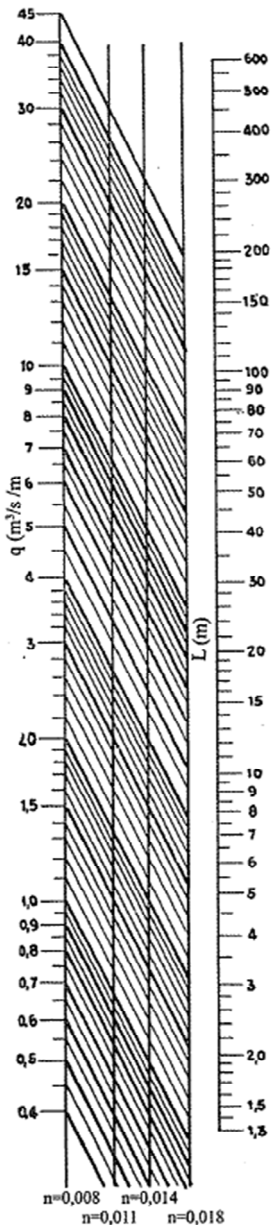
$$h_f = \int_0^L \frac{V^2 n^2}{R_h^{4/3}} dx$$

donde $V = \sqrt{2g h_V}$
 Suponiendo que el radio hidráulico es
 $R_h = \frac{q}{V}$ (para cauces anchos y poco profundos) y que
 $\frac{h_V}{x} =$ Constante (cuando el perfil de la superficie es aproximadamente una línea recta y la relación h/h_V (relativamente pequeña)

$$h_f \approx \frac{3L(2g h_V)^{5/3}}{8q^{4/3} - \frac{1}{n^2}}$$



Procedimiento:
 Para el primer ensayo se supone $h_V = H_0$.
 Entrar en el diagrama asumiendo el valor de h_V (punto (1)) y L (punto (2)) y determinar el punto de la línea de giro (punto (3)).
 Extender una línea a través del punto de giro y dando valor a q asumiendo la escala n (punto (4)) para el valor de h_V correspondiente en la escala n (punto (5)).
 Restar el valor de h , determinado en el primer ensayo de H_0 , para obtener un nuevo valor de h_V . Repetir el procedimiento de ensayo.



Fuente: (Bureau of Reclamation, 2007, pág. 691)

En la práctica, en lo respecta a la pertinencia de la consideración de las pérdidas por fricción, “para rápidas menores de 9 m de longitud, la fricción en la rápida puede ser despreciable”¹⁹. Por lo tanto, estas al no ser relevantes no se toman cuenta en la ecuación de la energía.

1.3.2. EFECTO DE LA CURVATURA CÓNCAVA EN FLUJO SUPERCRÍTICO

El flujo en un canal con curva vertical se comporta de manera diferente que en un canal rectilíneo, las líneas de corriente presentan una curvatura considerable que cambia la distribución de velocidades y de presiones a lo largo de la curvatura cóncava, como consecuencia de la acción de la fuerza centrífuga que actúa hacia el exterior de la curva.

Un ejemplo de fondo curvo cóncavo es el dissipador tipo salto en esquí, donde se presenta un flujo supercrítico y que se caracteriza por la presencia de un flujo rápidamente variado que puede provocar turbulencia. En este tipo de flujo existe un cambio abrupto de las líneas de corriente y de las características del flujo en un tramo de canal relativamente corto. Los coeficientes de distribución de velocidad son mucho mayores que la unidad, y la distribución de presiones no puede considerarse hidrostática ya que el cambio brusco de la profundidad provoca curvaturas y divergencias en las líneas de corriente.

En el flujo rápidamente variado (FRV), tomando en cuenta la distancia que recorre el agua, la pendiente de fricción (S_f) difiere de la pendiente del fondo del canal (S_o); y los parámetros hidráulicos como el calado de agua (y) y la velocidad (V), varían a lo largo del canal:

$$\frac{\partial V}{\partial x} \neq 0 \quad \frac{\partial y}{\partial x} \neq 0 \quad S_f \neq S_o \quad (1. 35), (1. 36), (1. 37)$$

En lo que respecta al perfil del flujo en el FRV, este puede ser continuo como en el cucharón del salto en esquí y en la cresta de un vertedero tipo cimacio, o puede ser discontinuo como en el caso del resalto hidráulico.

¹⁹Palomino B., J. (2003). Diseño hidráulico de una rápida para el proyecto : construcción del canal principal de Fortaleza, distrito Congas, provincia Ocos, Región Ancash. Lima - Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. p. 10

En lo referente a la turbulencia, su intensidad aumenta a medida que el flujo se desacelera (cucharón salto en esquí o resalto hidráulico), y disminuye a medida que el flujo se acelera (cimacio de una presa).

Varios autores respecto a las pérdidas por fricción en el FRV exponen lo siguiente:

“En el FRV los cambios en la configuración del flujo tienen lugar en un tramo muy corto, por lo que la fricción con el fondo es despreciable.”²⁰

“El FRV ocurre en un tramo corto, por lo que la fuerza de fricción es pequeña y puede ser despreciada.”²¹

“Las pérdidas de energía en este tipo de flujo están comúnmente asociadas con expansiones rápidas de flujo, en cambio, las que son debidas a la fricción son despreciables.”²²

Es decir, en la práctica, en el FRV en canales con curvaturas cóncavas debido a la condición del flujo y a la longitud relativamente pequeña del canal, el efecto de la fricción y por consiguiente de sus pérdidas es despreciable.

El efecto de la curvatura en el flujo supercrítico origina el desarrollo de la aceleración centrífuga, la misma que incide en la distribución de presiones. En flujo curvilíneo cóncavo la variación de la presión será positiva ya que la componente de la aceleración centrífuga estará en dirección de la gravedad, por lo contrario, en flujo curvilíneo convexo la variación de presión será negativa debido a que la componente de aceleración centrífuga es contraria a la gravedad.

²⁰Dingman, S. L. (2009). Fluvial Hydraulics. New York: Oxford University Press. p.349

²¹Mohan Das, M. (2008). Open Channel Flow. New Delhi: Prentice-Hall. p. 220

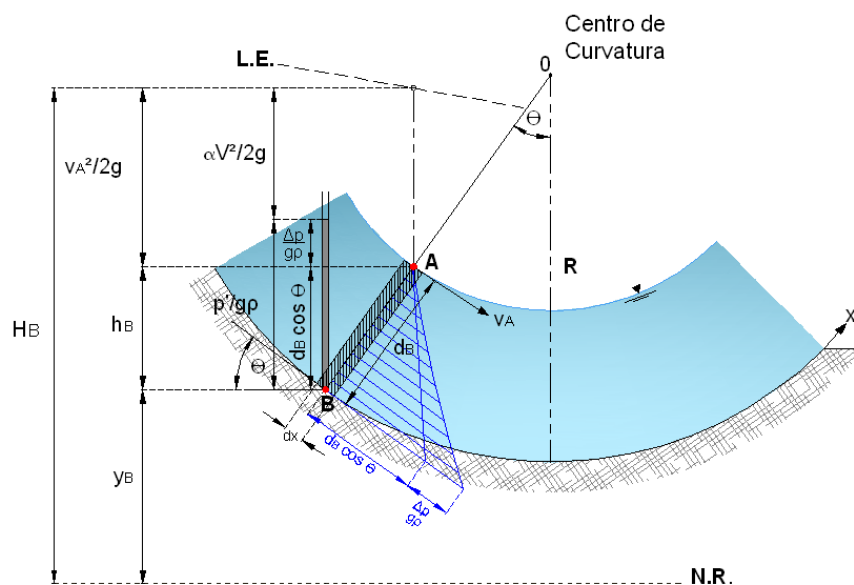
²² Bridge, J., & Demicco, R. (2008). Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits. New York: Cambridge University Press. p. 135.

Dicho esto, en flujo curvilíneo (Figura 1.21), la ecuación de la energía en una sección, tomando en cuenta la variación de la presión debido a la fuerza centrífuga ($\Delta p/g\rho$), se define de la siguiente manera:

$$H = y + \frac{p'}{g\rho} + \frac{v^2}{2g} = y + \left(d \cos \theta \pm \frac{\Delta p}{g\rho} \right) + \frac{v^2}{2g} \quad (1.38)$$

En donde, y (m) elevación sobre el nivel de referencia, $p'/g\rho$ representa la suma de las presiones hidrostáticas y centrífugas, v (m/s) es la velocidad local del flujo, d (m) es la distancia a la superficie libre perpendicular al fondo del canal, θ el ángulo de inclinación del canal respecto a la horizontal, ρ (kg/m³) es la densidad, g (m/s²) aceleración de la gravedad.

Figura 1.21: Flujo curvilíneo cóncavo



Fuente: (Sotelo, Hidráulica de Canales, 2002, pág. 20)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Para el punto A (Figura 1.21), la variación de la presión ($\Delta p/g\rho = 0$) y la velocidad local $v = v_A$, por lo que la carga de velocidad en A y la carga de velocidad en cada punto de la sección, son respectivamente:

$$\frac{v_A^2}{2g} = H - (y_B + h_B) \quad (1.39)$$

$$\frac{v^2}{2g} = H - (y_B + h_B) \pm \frac{\Delta p}{g\rho} \quad (1.40)$$

Igualando las dos ecuaciones y despejando $(\Delta p/g\rho)$, se tiene que:

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{v_A^2}{2g} \pm \frac{\Delta p}{g\rho} \quad (1.41)$$

$$\pm \frac{\Delta p}{g\rho} = \left(\frac{v^2}{v_A^2} - 1 \right) \frac{v_A^2}{2g} \quad (1.42)$$

Por lo tanto, se concluye que la variación de presiones en una sección del flujo sobre superficies curvas depende de la velocidad en la superficie, como de la distribución de las velocidades en la sección.

Según Sotelo (2002), en la práctica se utiliza el valor medio de la velocidad en la sección y dado que estas expresiones están en función de las velocidades locales, se hace necesario el uso de un factor de corrección (α_p) a la carga hidrostática que tome en cuenta su distribución real. Por lo que el factor de corrección de presión está dado por la expresión:

$$\alpha_p = 1 \pm \frac{1}{Qd \cos \theta} \iint_A \frac{\Delta p}{g\rho} v dA \quad (1.43)$$

Con lo que, la ecuación de la energía para flujos curvilíneos queda definida, de la siguiente manera:

$$H = y + \alpha_p d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (1.44)$$

En donde, y (**m**) elevación sobre el nivel de referencia, d (**m**) es la distancia a la superficie libre perpendicular al fondo del canal, θ el ángulo de inclinación del canal respecto a la horizontal, α_p es el coeficiente de corrección de presiones, V (**m/s**) es la velocidad media del flujo, α es el

coeficiente de energía cinética o de Coriolis, g (m/s^2) aceleración de la gravedad.

Como se puede observar en la Figura 1.21, el piezómetro indica que la variación de presión ($\Delta p/g\rho$) en fondo cóncavo se encuentra sobre el nivel de la superficie del agua por lo que $\alpha_p > 1$, a lo contrario que sucedería en un fondo convexo. Por lo tanto, para flujo curvilíneo: $\alpha_p d \cos \theta$ y $\alpha V^2/2g$, no corresponden a la carga en el fondo ni la distancia entre la superficie libre y la línea de corriente, respectivamente.

Existen varios métodos para la determinación de la distribución de presiones en flujo rápidamente variado, entre los que se tiene: el método de la red de flujo, correlaciones con resultados en modelos y prototipos. Cuando no se tiene información sobre la forma que adquieren las líneas de corriente, se puede utilizar la forma del fondo como indicación de la curvatura de las mismas²³. En este caso, para aplicaciones prácticas, se asume que la distribución de velocidades en una sección es uniforme, es decir, se utiliza la velocidad media del flujo como una aproximación lo suficientemente precisa.

Aplicando la segunda Ley de Newton a una masa de agua de grosor dx (Ver Figura 1.21), un ancho unitario e inclinación θ , se tiene que la fuerza centrífuga es:

$$F_c = m \times a_c = m \frac{V^2}{R} = \rho d dx \frac{V^2}{R} \quad (1.45)$$

El peso del agua en dirección normal al flujo es:

$$F_m = d dx \rho g \cos \theta \quad (1.46)$$

Por lo que la fuerza total en el sentido normal al flujo es:

$$F = d dx \rho g \cos \theta + \rho d dx \frac{V^2}{R} \quad (1.47)$$

²³Chanson, H. (2002). *Hidráulica de Flujo en Canales Abiertos*. Bogotá: McGRAW HILL. p.29

Además, la presión es está dada por $p = F/A$, donde el área es $(1 \times dx)$, entonces:

$$p' = \frac{F}{dx} = d \rho g \cos \theta + \rho d \frac{V^2}{R} \quad (1.48)$$

Finalmente, la carga de presión en fondos curvos cóncavos es:

$$\frac{p'}{\rho g} = d \cos \theta + d \frac{V^2}{gR} \quad (1.49)$$

En donde, $d \cos \theta$ corresponde a la carga de presión hidrostática (d (m) distancia a la superficie libre perpendicular al fondo del canal y θ ángulo de inclinación del canal respecto a la horizontal), dV^2/gR es la variación de presión debido a la fuerza centrífuga ($\Delta p/g\rho$) (ρ (kg/m^3) es la densidad, V (m/s) es la velocidad media del flujo, g (m/s^2) aceleración de la gravedad, R (m) es el radio de curvatura).

Es importante señalar que cuando un canal alcanza velocidades altas, la entrada de aire reduce la densidad del flujo, por lo que esto se debe considerar para determinar de manera más real las presiones que se presentan en el fondo.

Finalmente, la variación de las presiones en un fondo curvo adquiere mayor importancia cuanto mayor es la velocidad del flujo y menor el radio de curvatura. Para el caso de flujo supercrítico, estos efectos son mucho más apreciables que para flujo subcrítico, y por ello es importante evitar que el radio de curvatura sea muy pequeño para así disminuir los efectos de la fuerza centrífuga sobre el fondo del canal.

1.4. OBJETIVOS Y RESTRICCIONES DE LA TESIS DE GRADO

1.4.1. OBJETIVOS GENERALES

- Proporcionar un documento didáctico para el diseño adecuado de la estructura de disipación tipo salto en esquí, recopilando dentro del estudio la mayor cantidad de información posible referente al tema.

- Realizar un aporte mediante este estudio a la asignatura de Diseño Hidráulico de la Maestría en Recursos Hídricos de la Escuela Politécnica Nacional, proporcionando una hoja de cálculo referente al dimensionamiento de los tipos o variantes de las estructuras de salto en esquí en presas.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar, analizar y sintetizar los resultados de los estudios teóricos y experimentales obtenidos en los diseños de este tipo de estructuras.
- Caracterizar el flujo sobre el salto en esquí y el impacto sobre el cuenco al pie de presa.
- Analizar mediante el análisis dimensional las relaciones funcionales que intervienen en la disipación de energía por medio del flujo en salto en esquí.
- Proporcionar una guía o manual de diseño para los alumnos de la Maestría en Recursos Hídricos y para estudios de consultoría, que permita la correcta selección y dimensionamiento de saltos en esquí en presas.

1.4.3. RESTRICCIONES

Para el desarrollo de este estudio se ha considerado las siguientes limitaciones:

- El estudio se constituye con base en la información existente recopilada de diseños de salto en esquí y fórmulas aplicadas para el cálculo de socavación aguas abajo de la presa.
- Dada la amplitud de los tipos de vertederos y disipadores de energía, el presente trabajo está enfocado a los disipadores de salto en esquí, utilizados en vertederos tipo cimacio.

- El desarrollo del presente análisis toma en cuenta únicamente vertederos de presas de altura importante, en donde la velocidad de aproximación es insignificante, pudiendo desprejarse la carga de velocidad ($V^2/2g$) en la carga de energía (H_e). “Pruebas en modelos sobre vertederos han demostrado que el efecto en la velocidad de aproximación es insignificante cuando la altura (P) del vertedero es mayor que 1.33 la carga de diseño ($H_d=H_e$)”²⁴.
- Tomando en cuenta la presencia del salto en esquí como estructura de disipación, se considerará flujo de caída libre sobre el vertedero, es decir, no se verá afectado por las condiciones aguas abajo del vertedero.

1.5. CONCLUSIONES

Respecto a la descripción del flujo sobre el cimacio de una presa:

- Los factores que inciden en el coeficiente de descarga (C) en vertederos tipo cimacio se resume en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5: Lista de factores que inciden en el coeficiente de descarga

Factores	Variación
Forma o Tipo de cresta	Creager, WES, entre otros
Carga sobre el vertedero	Igual, mayor o menor a la carga de diseño
Inclinación de la cara aguas arriba del vertedero	Vertical, inclinada (3V:1H, 3V:2H y 3V:3H)
Presiones	Cero, sobrepresión o subpresión atmosférica

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- La mezcla agua – aire sobre el cimacio de un vertedero en una presa incide en: el aumento en el volumen del flujo, lo cual debe ser considerado dentro del diseño de la altura de los muros laterales del vertedero (bordo libre); y la reducción de los efectos de la cavitación sobre la superficie de la estructura de excesos.

²⁴Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL. p. 358.

Referente al efecto de la gravedad, la viscosidad y de la tensión superficial en el movimiento supercrítico de un canal de sección transversal rectangular con curvatura cóncava:

- En general, en el flujo a superficie libre existe una influencia secundaria de la viscosidad y de la tensión superficial, no así la gravedad, que a través del número de Froude, es útil en el diseño de estructuras hidráulicas.
- La gravedad permite el movimiento del agua en canales con flujo a superficie libre, y clasifica al flujo en subcrítico, crítico y supercrítico. En el flujo es supercrítico, cuando el número de Froude es mayor a la unidad, prevalece la energía cinética, la velocidad y la profundidad es relativamente alta y baja, respectivamente. Este tipo de flujo se presenta en canales de alta pendiente, por ejemplo, en el flujo sobre la rápida de un vertedero y en la cubeta deflectora de la estructura de disipación tipo salto en esquí.
- La viscosidad permite definir generalmente al flujo como laminar o turbulento. En estructuras hidráulicas es difícil que se presente el flujo laminar, por lo que el flujo en el salto en esquí se considera turbulento. La viscosidad adquiere importancia en modelos hidráulicos, donde el objetivo es identificar posibles formaciones de vórtices o zonas de separación de la corriente.
- La tensión superficial no es predominante en prototipos, pero tiene relevancia en casos en los que sus fuerzas gobiernan el movimiento, por ejemplo, en el estudio en modelo del flujo sobre un vertedero, se considera el efecto de la tensión superficial para cargas sobre el vertedero menor a 3 cm, por arriba de este valor la influencia es despreciable en la curvatura de la superficie libre del agua y por ende en el coeficiente de descarga.
- El régimen de flujo que se presenta en canales rectangulares con fondo con curvatura cóncava es el régimen supercrítico – turbulento.

Referente a la descripción de la alternativa clásica de evaluación de las pérdidas de energía por fricción y del efecto de la curvatura cóncava en flujo supercrítico:

- En flujo a superficie libre existen pérdidas por fricción y pérdidas localizadas, donde las pérdidas por fricción pueden ser despreciadas cuando la longitud del canal es menor a 9 m.
- Sobre un fondo curvo cóncavo (salto en esquí) debido a la curvatura importante de las líneas de corriente en un tramo de canal relativamente corto, se presenta flujo supercrítico rápidamente variado, por lo que, el efecto de la fricción y por consiguiente de sus pérdidas es despreciable.
- El fondo curvo cóncavo en el flujo supercrítico hace posible la presencia de la aceleración centrífuga que causa un aumento en la presión. La variación de la presión en un fondo curvo adquiere mayor importancia cuanto mayor es la velocidad del flujo y menor el radio de curvatura. Para el caso de flujo supercrítico, estos efectos son mucho más apreciables que para flujo subcrítico.

CAPÍTULO 2.

CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL MOVIMIENTO DEL AGUA SOBRE EL TRAMO FINAL DEL CIMACIO DE UNA PRESA

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO SOBRE EL SALTO EN ESQUÍ, DEL FLUJO DE SALIDA Y DEL IMPACTO EN EL CUENCO AL PIE DE LA PRESA

2.1.1. INTRODUCCIÓN

El salto en esquí es un disipador de energía que involucra el efecto de la dispersión de un chorro de agua en el aire, permitiendo disipar una parte significativa de la energía hidrodinámica del flujo proveniente del vertedero de excesos de una presa o aliviaderos, teniendo como objetivo incrementar la distancia entre la estructura y el sitio de impacto del chorro para evitar socavaciones peligrosas al pie del cimacio vertedor.

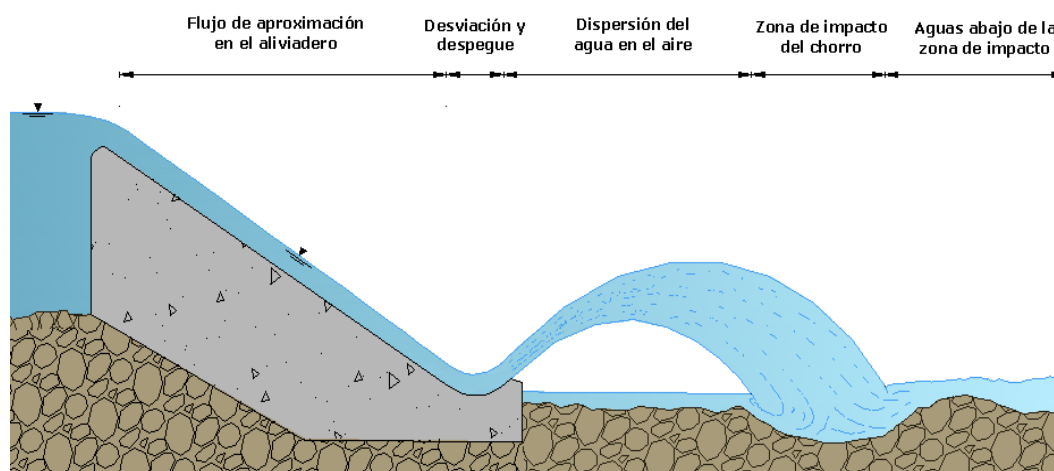
Este tipo de disipador es recomendable cuando el lecho del canal aguas abajo está compuesto por un estrato de roca firme²⁵, es decir, cuando la socavación causada por el chorro no ponga en peligro la presa y sus estructuras accesorias.

Según Vischer & Hager (1995), en el salto en esquí debe considerarse las siguientes partes:

- a) Flujo de aproximación en el aliviadero
- b) Desviación y despegue del flujo
- c) Dispersión del agua en el aire
- d) Zona de impacto del chorro
- e) Aguas abajo del impacto del chorro

²⁵Elevatorski, E. A. (1959). *Hydraulic Energy Dissipators*. New York, EEUU: McGRAW - HILL. p.178.

Figura 2.1: Partes de un salto en esquí



Fuente: (Vischer & Hager, Energy Dissipators, 1995, pág. 112)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Entre las principales ventajas del salto en esquí se encuentran:

- Su simplicidad en el diseño, construcción, mantenimiento, e independencia de fluctuaciones en el nivel aguas abajo de la estructura.
- Cuando la roca de cimentación es lo suficientemente dura, es una alternativa económica de disipación de energía.
- En un valle estrecho, la casa de máquinas de una planta hidroeléctrica puede ser colocada bajo el cucharón de salto en esquí de una presa tipo cimacio.
- El agua se proyecta a una distancia suficiente para que la socavación producida en el lecho aguas abajo no sea un peligro para la presa.

Por el contrario, las principales desventajas del salto en esquí son:

- Cuando el material de cimentación no es lo suficientemente duro, la vibración que produce la descarga del salto en esquí, puede causar asentamientos importantes y por ende fallas en la estructura.
- La desintegración del chorro puede causar problemas a la casa de máquinas, paredes, etc., especialmente en climas fríos ya que las

gotas pueden transformarse en partículas de hielo las cuales al caer con gran energía producen daños importantes en las estructuras mencionadas.

2.1.2. FLUJO DE APROXIMACIÓN AL CUCHARÓN DEL SALTO EN ESQUÍ

El agua que vierte sobre la cresta de un vertedero tipo cimacio es transportado aguas abajo a través de la rápida, la que se caracteriza por tener una pendiente pronunciada. En estas condiciones, existe un incremento sustancial de la velocidad lo que da lugar a que el flujo adquiera la condición de supercrítico – turbulento.

Como ya se trató en el numeral 1.1.2.2, cuando la capa turbulenta se desarrolla completamente, el flujo deja de estar compuesto solamente de agua para pasar a ser una mezcla agua- aire. Esta composición del flujo genera un aumento del calado y una disminución de la densidad del mismo, por lo que debe ser considerada en el diseño de la estructura disipadora ubicada al pie de la rápida.

2.1.3. FLUJO SOBRE EL CUCHARÓN DEL SALTO EN ESQUÍ - DESVIACIÓN DEL FLUJO

El cucharón del salto en esquí, no constituye como tal un disipador de energía, pero es parte fundamental del sistema de disipación de energía.²⁶ La poca disipación de energía que se produce es debido a la fricción del flujo con el cucharón, la cual no es significativa, por lo que el objetivo principal del cucharón del salto en esquí es la redirección adecuada del flujo que permita al chorro, proveniente del cimacio vertedero, disipar el exceso de energía.

Para Vischer & Hager (1995), un diseño inadecuado del cucharón puede generar problemas como una insuficiente disipación de energía en la dispersión del chorro, impacto del chorro fuera del cauce y falla estructural

²⁶U.S. Army Corps of Engineers . (1990). *Engineering and Design - Hydraulic Design of Spillways*. EEUU: U.S. Army Corps of Engineers. p. 7-9.

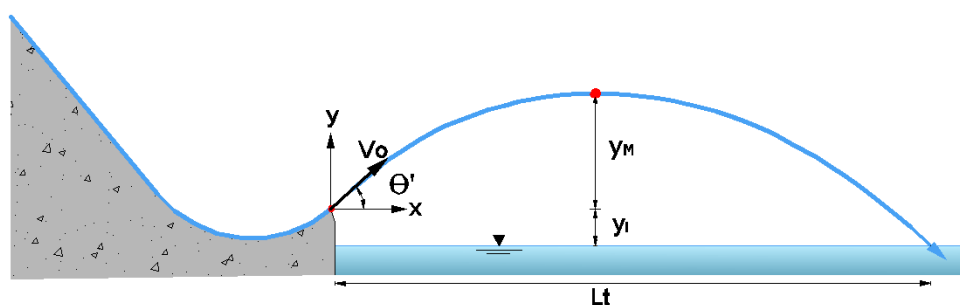
del cucharón debido a la carga de presión. Es por ello que se debe tomar en consideración lo expuesto en el numeral 1.3.2.

El flujo sobre el cucharón del salto en esquí, es un ejemplo claro de flujo curvilíneo cóncavo, es decir, sus líneas de corriente son pronunciadas lo que lo caracteriza como un flujo rápidamente variado. Además, dadas las condiciones del flujo de aproximación, el flujo sobre el cucharón del salto en esquí es un flujo supercrítico-turbulento, que por lo general en prototipos es una mezcla agua-aire.

2.1.4. FLUJO EN LA SALIDA DE UN SALTO EN ESQUÍ – DESPEGUE DEL FLUJO Y DISPERSIÓN DEL CHORRO

El chorro proveniente del salto en esquí tiene un comportamiento similar al de un proyectil, es decir su movimiento es debido a la inercia del mismo y a la fuerza gravitatoria. Por lo que, el perfil de la trayectoria del chorro proveniente del salto en esquí, depende de la velocidad del flujo de aproximación y el ángulo de salida del chorro; para velocidades de flujo mayores a 20m/s ²⁷, la resistencia del aire reduce el alcance del chorro, por lo que el uso de la teoría de la parábola pasa a ser un método simplificado ya que no toma en cuenta la reducción de la densidad del flujo debido a la entrada de aire, ni la desintegración del chorro.

Figura 2.2: Trayectoria del chorro de un salto en esquí



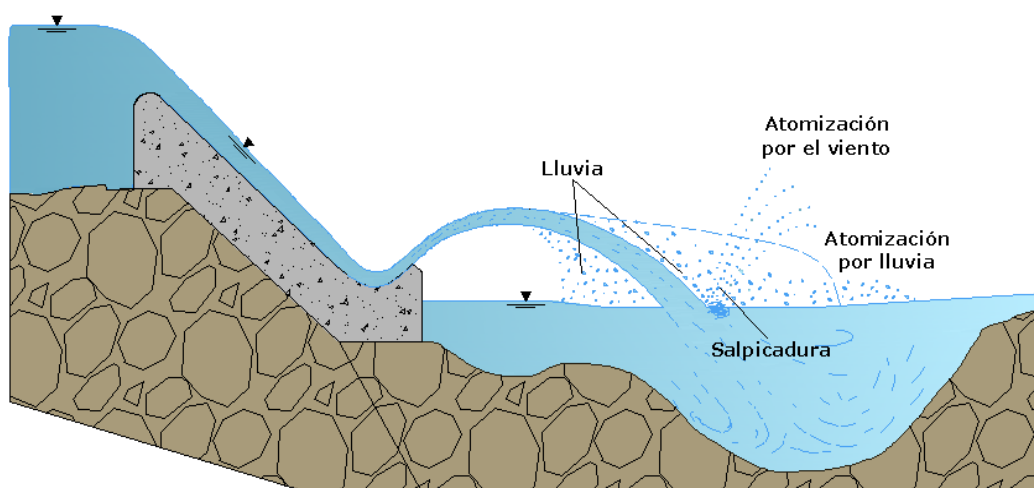
Fuente: (Vischer & Hager, Energy Dissipators, 1995, pág. 137)
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

²⁷Khatsuria, R. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. New York: Marcel Dekker. p. 453

El flujo proveniente del salto en esquí es extremadamente turbulento durante su trayectoria hasta la zona de impacto. La turbulencia existente en el chorro permite la entrada de un gran volumen de aire, logrando que se disipe una parte de la energía convirtiendo parte de este flujo en spray. Así en la zona de dispersión del chorro proveniente del salto en esquí se pueden distinguir cuatro regiones del flujo²⁸:

1. Salpicadura de gotas
2. Lluvia
3. Atomización por la lluvia
4. Atomización por el viento

Figura 2.3: Esquema del patrón de flujo de un salto en esquí



Fuente: (Vischer & Hager, Energy Dissipators, 1995, pág. 138)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

La estabilidad del chorro se ve afectada por el efecto de la resistencia del aire, dependiendo de si la corriente de aire fluye en el sentido del flujo o si éste es en sentido contrario al flujo. El flujo de aire que corre en sentido del flujo estabiliza el chorro, y al contrario, si el flujo del aire tiene sentido contrario al flujo del agua, el chorro se desestabiliza.

²⁸ (Zai-Chao-1987, citado por Vischer, D. L., & Hager, W. H. (1995). *Energy Dissipators*. Rotterdam: A. A. Balkema. p. 138.)

La entrada de aire en el chorro produce la desintegración del chorro afectando a la trayectoria del mismo, haciendo que ésta sea menor a la que se esperaría en cálculo en donde no se considera el efecto del aire. Para Kawakami (1973)²⁹, el efecto de la resistencia del aire es importante para flujos con velocidades de 40 m/s, ya que puede reducir en un 30% el alcance del mismo. Para flujos con velocidades menores a 20 m/s el efecto de la resistencia del aire es mucho menor a la mencionada.

Para comprender el efecto de la entrada de aire en un chorro de un salto en esquí, es importante conocer el mecanismo de desintegración del chorro debido a la entrada de aire.

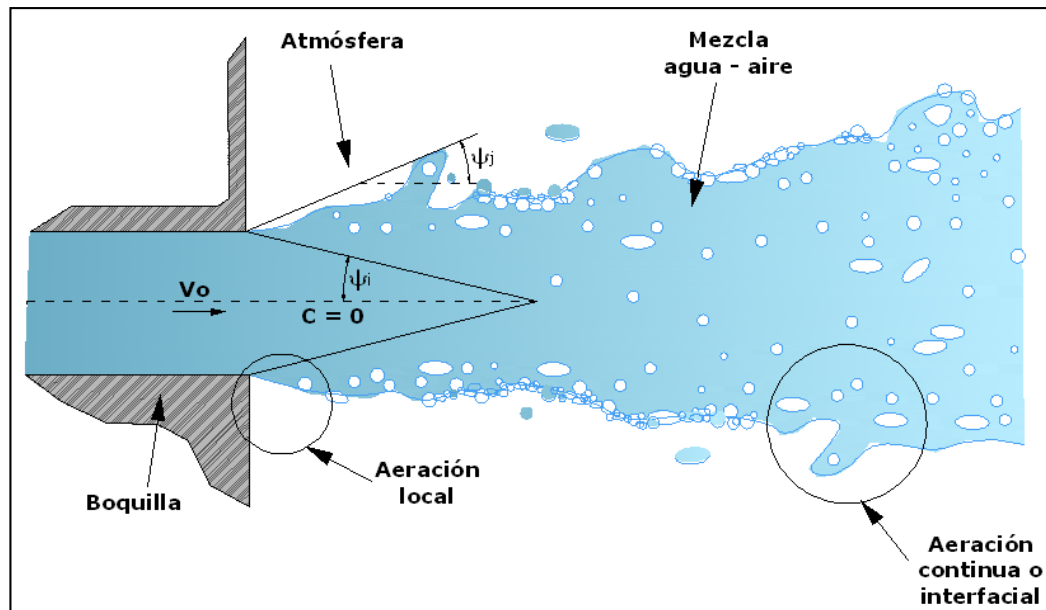
2.1.4.1. Desintegración de un chorro a superficie libre

La desintegración de un chorro de agua a superficie libre comienza con la entrada de aire al flujo debido a la turbulencia del mismo, de donde resulta una mezcla agua-aire que consiste tanto de bolsas de aire dentro del agua como de gotas de agua rodeadas de aire. Para Vischer & Hager (1995), la dispersión del chorro depende principalmente del grado inicial de turbulencia del chorro y en una pequeña parte a la presencia del aire circundante. Éstos se desintegran en el sentido del flujo y expanden transversalmente, resultando en chorros de menor densidad.

Para entender el mecanismo de desintegración de chorros de alta velocidad, se puede considerar el chorro proveniente de una boquilla. En este caso la concentración de aire inicial en el chorro (**Co**) es 0 (flujo sin aeración), y presenta dos tipos de aeración luego de la descarga del chorro: aeración local y aeración continua o interfacial como se muestra en la Figura 2.4.

²⁹Azmathullah, H., Ghani, A., & Azazi, N. (2009). ANIFS - Based approach to predicting scour location of spillway. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management* , 399-407.p 401.

Figura 2.4: Aeración de un chorro, proveniente de una boquilla, con descarga a superficie libre



Fuente: (Chanson H. , 2004, pág. 5)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

El chorro proveniente de una boquilla es transparente y compacto en la cercanía a ésta, conforme aumenta la distancia, el chorro se desintegra gradualmente desde la periferia hacia el centro del chorro hasta que finalmente el núcleo del chorro ($C=0$) desaparece. Conforme esto sucede el chorro se convierte en una mezcla agua-aire aumentando su grosor.

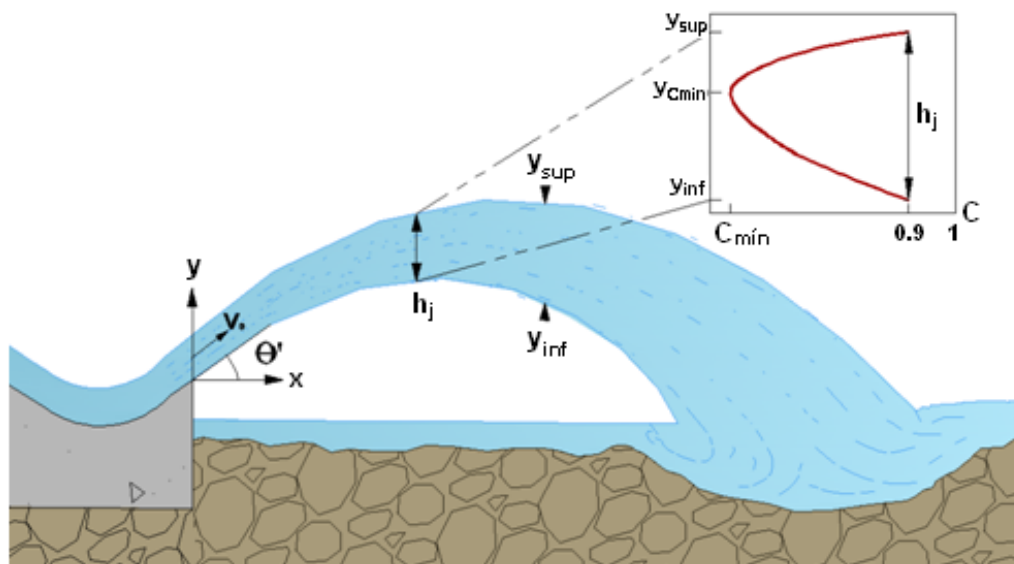
Dentro del chorro se toma en consideración dos ángulos que caracterizan la desintegración: ángulo del núcleo del chorro (ψ_i) y ángulo de expansión del chorro (ψ_j) (Figura 2.4). El ángulo del núcleo del chorro define el límite del mismo, en tanto que el ángulo de expansión describe la superficie del chorro en donde la concentración de aire tiene un valor estándar de $C=0.90$ ³⁰. Según Schmocker, Pfister, Hager, & Minor (2008), para flujos turbulentos, los ángulos no se ven afectados por el número de Froude del flujo de aproximación.

³⁰Vischer and Hager (1998), citado por Schmocker, L., Pfister, M., Hager, W., & Minor, H.-E. (2008). Aeration Characteristics of Ski Jump Jets. *Journal of Hydraulic Engineering - ASCE* , 90-97.

Para el caso de flujos pre-aerados estos ángulos son mayores que para flujos sin aeración, es decir, el núcleo del chorro se desintegra en una menor distancia, el grosor del chorro y la concentración de aire son mayores principalmente en la napa superior del chorro, y el alcance del chorro es menor debido al incremento en la turbulencia y a la disipación de energía.

Según el estudio *Aeration Characteristics of Ski Jump Jets* (Schmocker, et. al., 2008), la concentración de aire no es simétrica al eje central del chorro, es decir, la concentración mínima de aire (**C_{mín}**) se presenta en algún punto sobre el eje central del chorro, y aumenta conforme el chorro alcanza su distancia máxima, ver Figura 2.5. La concentración mínima de aire para chorros pre-aerados se encuentra bajo el eje central del chorro, y al contrario si el chorro no es pre-aerado éste valor se encuentra sobre el eje central del chorro.

Figura 2.5: Distribución de concentración de aire en una sección de un chorro de salto en esquí



Fuente: (Schmocker, et. al., 2008, pág. 91)

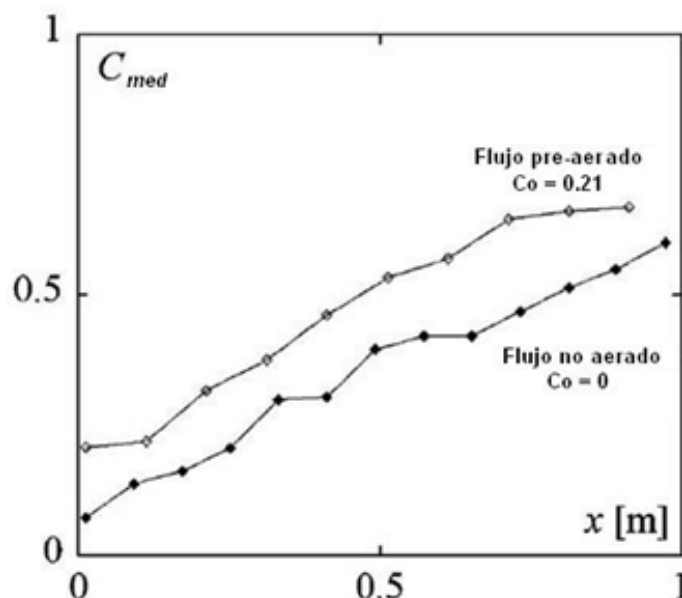
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

En el chorro del salto en esquí, las napas superior e inferior se comportan de diferente forma, ya que mientras las gotas de la napa superior

regresan en algún punto al chorro, las gotas provenientes de la napa inferior caen en el lecho o canal.

Como se puede observar en la Figura 2.6, la concentración de aire promedio (C_{med}), tanto en chorros no aerados y pre-aerados, tiene una variación lineal que comienza en el despegue del chorro y conforme se aleja esta variación tiende a ser asintótica. Cabe señalar que la concentración de aire media, a la salida del chorro, es diferente de cero debido a aeración local que se presenta en el despegue.

Figura 2.6: Comparación de concentración de aire promedio de una sección transversal entre flujo con $Co=0$ y $Co=0.21$ para Froude =5 y calado inicial = 0.045m (modelo hidráulico)



Fuente: (Schmocker, et. al., 2008, pág. 94)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Para un chorro en salto en esquí, Schmocker, et. al.(2008) resuelven que:

- Para prototipos en donde el flujo de aproximación tiene valores de Froude mayores a 5, la concentración de aire promedio en el impacto del chorro es siempre mayor al 50%.
- Para ángulos de salida del salto en esquí pequeños, la entrada de aire se reduce considerablemente. Por lo que el ángulo de

despegue del chorro es la variable de diseño relevante para influenciar el proceso de desintegración del chorro.

- La concentración mínima de aire en flujos pre-aerados es alta, y es por ello que un chorro de salto en esquí típico difícilmente tendrá un núcleo en donde la concentración de aire sea 0 y por ende, serán chorros considerablemente aerados en la zona de impacto.

En cuanto a los disipadores en salto en esquí, lo que interesa es estimular el proceso de desintegración del chorro, para así lograr una mayor disipación de energía, por lo que se debe considerar que:

- La sección transversal del chorro no sea compacta.
- La turbulencia puede ser incrementada mediante un aumento en la rugosidad del cucharón. Es importante mencionar que la turbulencia no puede ser modificada en la rápida debido a que se pueden producir daños por cavitación
- La transición del flujo entre la rápida y la rampa de despegue del chorro debe ser abrupta.
- La dispersión del chorro debe incrementarse al ingresar aire, logrando así una mezcla agua-aire.

2.1.5. FLUJO DE IMPACTO EN EL CUENCO AL PIE DE LA PRESA

El flujo proveniente de un salto en esquí posee gran cantidad de energía cinética, razón por la cual el chorro turbulento puede causar erosión en el cauce aguas abajo. Además, se debe considerar que estos chorros de alta velocidad tienen un alto contenido de aire debido al proceso de difusión del chorro en la trayectoria del mismo.

El chorro de mezcla agua-aire, en algún punto choca con el flujo en el cuenco al pie de la presa, en donde una cantidad importante de la energía hidráulica es disipada. En la zona de impacto, el chorro causa que una

gran cantidad de sedimento se mantenga en suspensión, para luego que el chorro cese, depositarse en el fondo.

El asentamiento del sedimento oculta la verdadera profundidad socavada por el chorro, es por ello que Pagliara, et. al. (2004) hacen distinción entre una socavación estática y una socavación dinámica, las que se ven afectadas por el ángulo de impacto del chorro. Es decir, a mayor ángulo de impacto mayor es la diferencia entre los dos tipos de socavación. Es importante señalar que en prototipos solo se puede estimar la socavación en condiciones estáticas, en otras palabras, solo cuando ha cesado una crecida.

La difusión del chorro en el cuenco de disipación depende de la velocidad del chorro (condiciones de salida del cucharón) y de la turbulencia en el impacto (distancia recorrida desde la salida del cucharón). A mayor turbulencia en el impacto, más rápida es la desintegración del núcleo del chorro en el colchón de aguas.

Ervin & Flavey (1987), establecen que la deformación del chorro está gobernada por el grado inicial de turbulencia, causando un aumento en los límites del chorro y disminuyendo el grado de compactación del núcleo del mismo. A la vez, estos cambios definen la zona de impacto, que será afectada por fluctuaciones de presiones generadas por el chorro en el cuenco. En el caso del salto en esquí, el núcleo se encuentra aerado (reducción de la tensión superficial), existe menor compactación del chorro y una mayor desintegración del mismo. La turbulencia inicial (**Tu**) del chorro en la salida del salto en esquí se encuentra en el rango de 3-5%³¹ y 4-8%³².

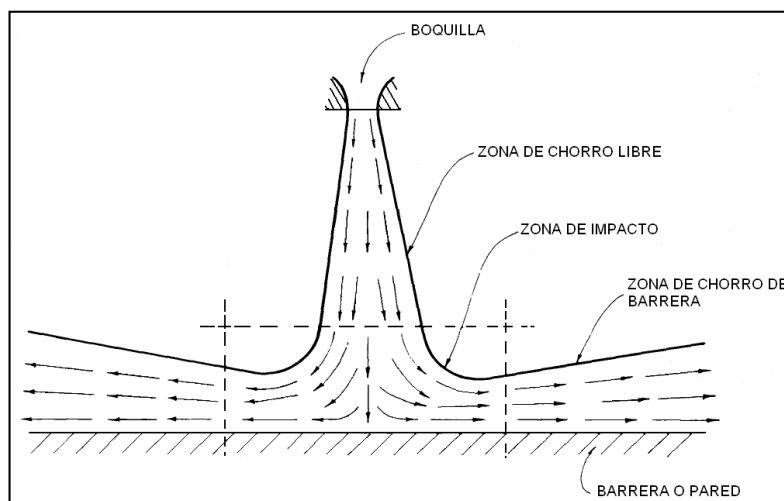
Dado que las características físicas del chorro varían a lo largo de su trayectoria, George (1980) distingue tres zonas en un chorro de impacto

³¹Bollaert, E., & Sheiss, A. (2005). Physically Based Model for Evaluation of Rock Scour due to High Velocity Jet Impact. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* , 1-13.p.3.

³²Manso, P. (2006). *Influence of pool geometry and induced flow patterns on rock scour by high velocity plunging jets*. Thèse N°3430. Suiza: École Polytechnique Fédérale de Lausanne. p.77.

(Figura 2.7): zona de chorro libre, zona de impacto y chorro de barrera (que sigue un patrón similar al fondo).

Figura 2.7: Zonas de un chorro de impacto en una superficie plana



Fuente: (George, 1980, pág. 4)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

La mayor incidencia que causa un chorro se encuentra en la zona de impacto cercana a la frontera, en donde el impacto del chorro es transmitido a la masa rocosa a través de las fluctuaciones de las presiones hidrodinámicas. La zona de impacto está directamente relacionada con la socavación, al ser ésta la que causa que las variaciones en la presiones entren en las juntas del fondo y rompan la masa rocosa.

La máxima presión de impacto ocurre en el centro de impacto del chorro y disminuye según se aleja del centro; ésta presión es mayor cuando el ángulo de entrada del flujo es 90° ³³ y disminuye si el ángulo es menor.

El flujo cortante en el cuenco depende tanto de la turbulencia del chorro en el impacto, la profundidad de agua del colchón y la geometría del cuenco de socavación.

³³Kerman, J., Fathi, H., Lashkarara, B., & Haghighipour, S. (2011). Dynamic Pressure of Flip Bucket Jets. *World applied Sciences Journal* 12 (9) , 1448-1454. p.1453

2.2. ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES Y DE PRESIONES EN EL FONDO DEL SALTO EN ESQUÍ Y AL INICIO DEL CHORRO DE SALIDA DESDE EL ESQUÍ

El flujo sobre un cucharón de salto en esquí, como ya se mencionó en el numeral 1.3.2, es un flujo curvilíneo donde el efecto de la fuerza centrífuga modifica la distribución de velocidades y presiones en cada sección. Adicionalmente, Sotelo & Valdez (2004) señalan que el flujo curvilíneo debe considerarse como flujo irrotacional, el cual puede ser analizado por medio de una red de flujo, soluciones analíticas o puede considerarse también la teoría del vórtice libre. Es por ello que a continuación se trata sobre la distribución de velocidades y presiones, tanto sobre el cucharón como a la salida de éste.

2.2.1. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES

2.2.1.1. Velocidades en el fondo del salto en esquí

Cuando sobre un flujo actúan solamente fuerzas de gravedad y de presión, el flujo es irrotacional, donde la energía permanece constante a lo largo de una misma línea de corriente. Si además, a esta característica se le suma la curvatura que toman las líneas de corriente debido a un fondo curvo, entonces se puede tratar al flujo en base a la teoría del vórtice libre.

Es por ello que Bollaffet (1961)³⁴ asume que en un cucharón de un salto en esquí, la distribución de velocidades sigue la teoría del vórtice libre, la misma que está limitada a fluidos ideales (fluidos incomprensibles y no viscosos). La principal característica de esta teoría es que las líneas de corriente del flujo son concéntricas al fondo.

³⁴Khatsuria, R. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. New York: Marcel Dekker. p. 449. y Vischer, D. L., & Hager, W. H. (1995). *Energy Dissipators*. Rotterdam: A. A. Balkema. p. 120.

Según Sotelo & Valdez (2004), en flujo con fondo curvo, en cada punto de la línea de corriente se cumple que:

$$\frac{dv}{v} = -\frac{dr}{r} \quad (2.1)$$

Donde, \mathbf{v} (m/s) es la velocidad local del flujo, \mathbf{r} (m) es el radio hasta el punto en cuestión.

Luego, al integrar por separación de variables se tiene que:

$$\begin{aligned} \int \frac{dv}{v} &= -\int \frac{dr}{r} \\ \ln v &= -\ln r + \tilde{k} \\ \ln v &= \ln \frac{\tilde{k}}{r} \\ v &= \frac{\tilde{k}}{r} \end{aligned} \quad (2.2)$$

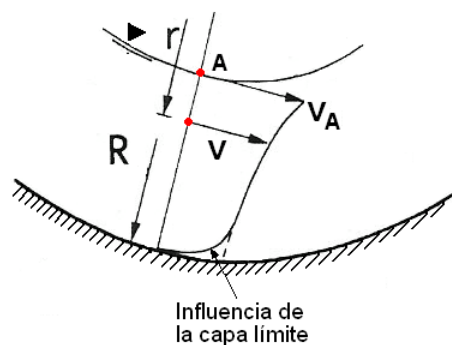
Siendo la ecuación (2. 2), la ley del vórtice libre o irrotacional, donde \tilde{k} es constante para todas las líneas de corriente en una sección transversal. Además, se puede observar que la velocidad (\mathbf{v}) es inversamente proporcional al radio (\mathbf{r}), es decir, a mayor distancia del origen de curvatura menor es la velocidad.

Así, la distribución de velocidades en el cucharón de un salto en esquí, satisface la ecuación:

$$\begin{aligned} \tilde{k} &= v \times r = v_A \times r_A \\ v \times r &= v_A(R - d) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Donde, \mathbf{v} (m/s) es la velocidad local del flujo, \mathbf{v}_A (m/s) es la velocidad en la superficie, \mathbf{r} (m) es el radio hasta el punto en cuestión, \mathbf{r}_A (m) radio hasta la superficie del agua, \mathbf{d} (m) es la distancia a la superficie libre perpendicular al fondo del canal, \mathbf{R} es el radio al fondo del canal.

Figura 2.8: Distribución de velocidades en cucharón de salto en esquí



Fuente: (Vischer & Hager, Energy Dissipators, 1995, pág. 121)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Dado que en la práctica se utiliza la velocidad media de la sección, Sotelo & Valdez (2004), proponen un coeficiente de corrección aplicado a la velocidad en la superficie (v_A), llamado coeficiente de curvatura (λ). Tanto la velocidad media y el coeficiente de curvatura se deducen a continuación.

- La velocidad media en una sección perpendicular al fondo, partiendo de relacionar el área de la distribución de velocidades y el calado, es:

$$V = \frac{A}{d}$$

$$V = \frac{1}{d} \int_{r_A}^R v \, dr \quad (2.4)$$

Reemplazando la ecuación (2.3):

$$V = \frac{v_A r_A}{d} \int_{r_A}^R \frac{1}{r} \, dr$$

$$V = \frac{v_A r_A}{d} [\ln r]_{r_A}^R$$

$$V = \frac{v_A r_A}{d} \ln \left(\frac{R}{r_A} \right) \quad (2.5)$$

Además,

$$\ln \left(\frac{R}{r_A} \right) = -\ln \left(\frac{r_A}{R} \right) \text{ y } r_A = (R - d) \quad (2.6)$$

Entonces, reemplazando en la ecuación (2. 5):

$$V = -\frac{v_A(R-d)}{d} \ln\left(\frac{R-d}{R}\right)$$

$$V = v_A \left(1 - \frac{R}{d}\right) \ln\left(1 - \frac{d}{R}\right) \quad (2. 7)$$

- En donde, el coeficiente de curvatura (λ) es:

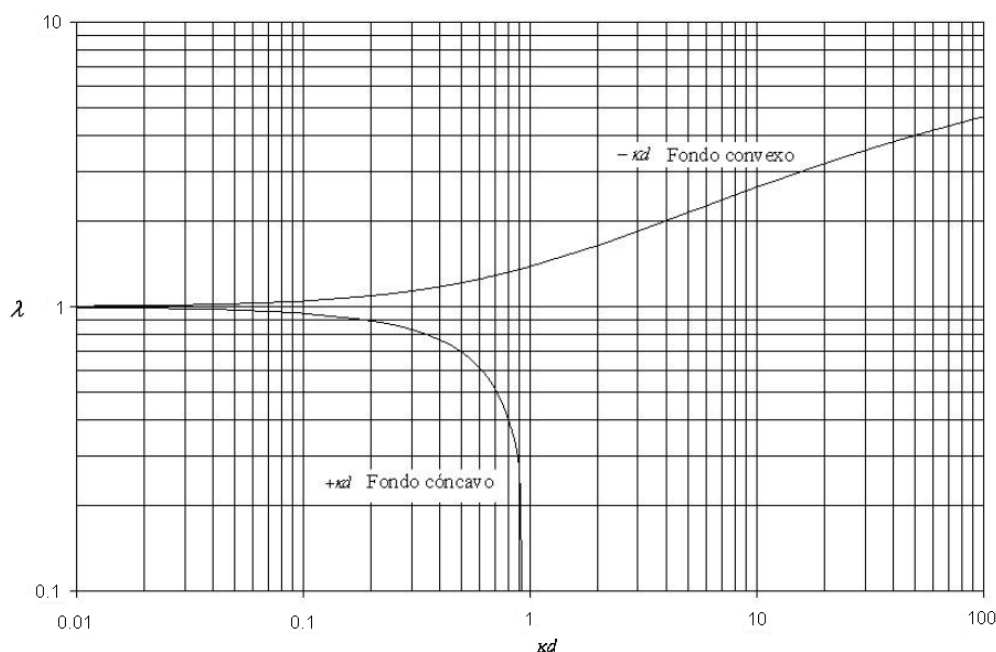
$$\lambda = \left(1 - \frac{R}{d}\right) \ln\left(1 - \frac{d}{R}\right) \quad (2. 8)$$

Por lo tanto, la velocidad media en términos de la velocidad en la superficie está determinada por:

$$V = \lambda v_A \quad (2. 9)$$

Donde, λ se obtiene de la Figura 2.9.

Figura 2.9: Coeficiente de curvatura λ , donde $\kappa = 1/R$ ³⁵



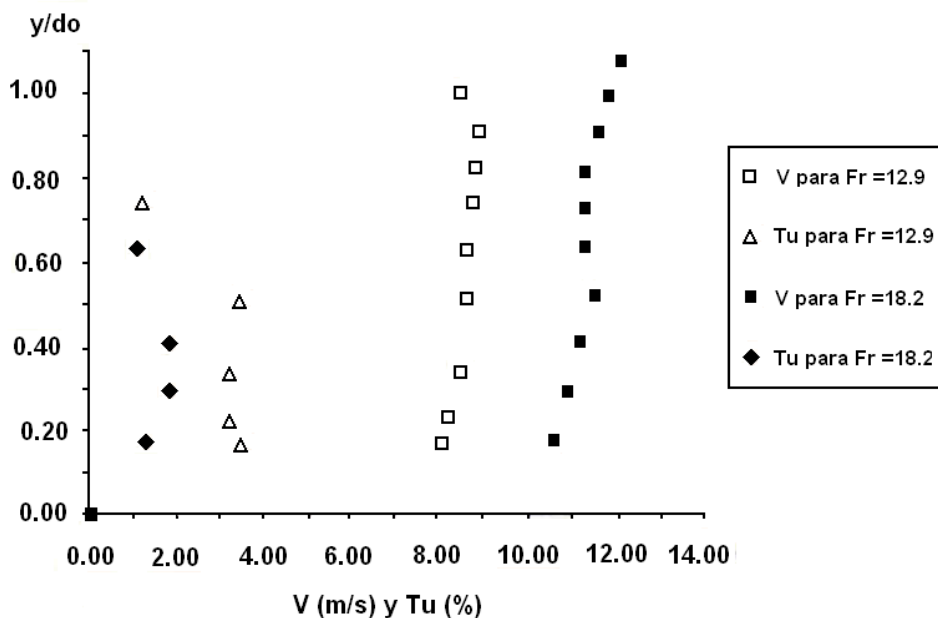
Fuente: (Sotelo & Valdez, 2004, pág. 217)

³⁵Sotelo Ávila, G., & Valdez Izaguirre, I. I. (2004). Régimen crítico en canales rectangulares de fondo curvo y sus aplicaciones. *Ingeniería. Investigación y Tecnología.*, V (3), 213-226. p.217

2.2.1.2. Velocidades al inicio del chorro de salida desde el esquí

En experimentos a una escala de 1:15 para la presa Clyde, Chanson (1993) obtuvo para flujos no aerados: la distribución de velocidades, la variación de esta distribución y la turbulencia inicial (T_u), al final de un deflector, ver la Figura 2.10. En la figura se puede observar que el perfil de velocidades para los dos casos ($Fr=12.9$ y $Fr=18.2$), toma una forma casi uniforme.

Figura 2.10: Distribución de velocidades y turbulencia inicial en el borde de un deflector



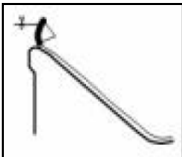
V (Velocidad a la salida del deflector), Tu (Turbulencia Inicial), Fr (número de Froude), do (calado), y (distancia perpendicular a la superficie libre medida desde el borde del deflector)

Fuente: (Chanson H. , 1993, pág. 373)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

De acuerdo con Manso (2006) y Manso, Bollaert, & Schleiss (2008), en la salida de un salto de esquí la distribución de velocidad no es precisamente la de un flujo turbulento, tiende a ser uniforme, ver Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Características hidrodinámicas de vertederos en salto de esquí. Distribución de presiones y de velocidades [$P(n)$ y $V(n)$] a la salida del chorro

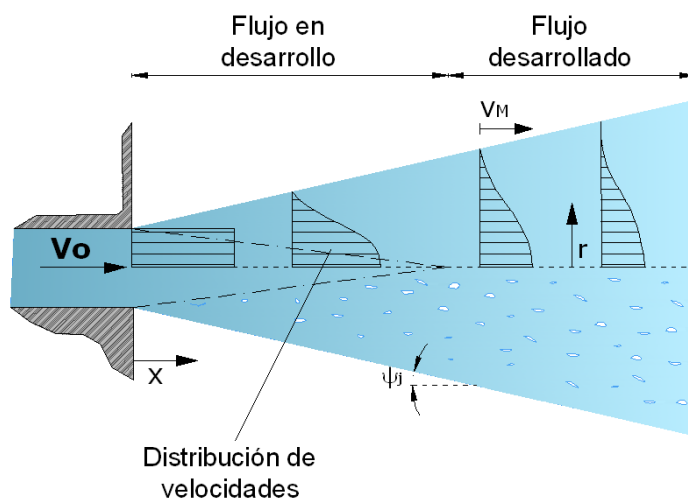
Esquema	Tipo de chorro	Tipo de toma	Desarrollo de la capa límite	Estructura de Salida	Hidrodinámica
	Trayectoria	Vertedero tipo WES (con o sin control)	Totalmente o parcialmente desarrollada	Salto en esquí (cucharón plano)	$P(n)$ cóncava $V(n)$ logarítmica deformada tendiendo a uniforme
	Aeración	Ángulo de napa inferior	Ángulo de napa superior	Intensidad de turbulencia Tu (%)	Factor de energía cinética (-)
	Núcleo parcialmente o totalmente aerado	Tan (labio)	Aprox. Tan (labio) con corrección eventual	4-8% Tomar 4% para velocidades altas	Tiende hacia 1 para velocidades altas

Fuente: (Manso, 2006, pág. 26)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Cuando un chorro es descargado a la atmósfera, Whittaker & Schieiss (1984) y Cid Solé (2011), establecen que la velocidad del chorro disminuye transversalmente a medida que se aleja del eje, presentándose la velocidad máxima en el eje del chorro, como se puede observar en la Figura 2.11. Según George (1980), el perfil de velocidades en la zona donde el flujo de un chorro se ha desarrollado, toma una forma similar a una distribución de Gauss.

Figura 2.11: Distribución de velocidades de un chorro con descarga a la atmósfera

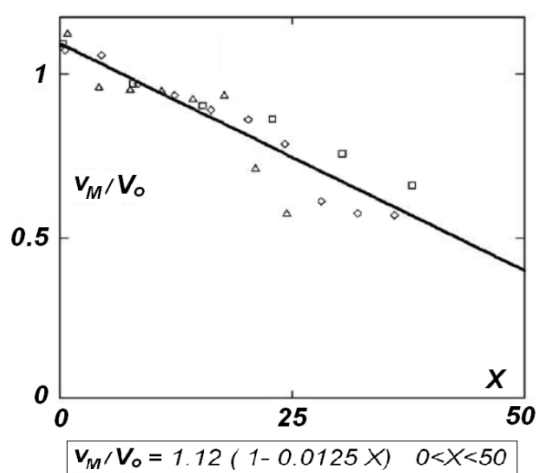


Fuente: (Vischer & Hager, Energy Dissipators, 1995, pág. 129)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Como es de esperar, en el sentido longitudinal, la velocidad disminuye conforme se aleja del punto de descarga. La variación de las velocidades en el eje de un chorro pre-aerado, a lo largo de su trayectoria, como se puede observar en los resultados obtenidos en modelos (Figura 2.12), tiene una tendencia lineal con pendiente negativa, lo que significa que ésta disminuye proporcionalmente a la distancia medida desde la descarga.

Figura 2.12: Velocidad máxima relativa $[v_M/V_o](X)$ obtenida para ensayos en modelo con flujo pre-aerado



Fuente: (Schmocker, et. al., 2008, pág. 94)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

En la Figura 2.12, X es un parámetro adimensional dado por la relación:

$$X = \frac{x R}{F_o d_o} \quad (2.10)$$

Donde, x (m) es la distancia medida desde la salida hasta el punto en cuestión, R (m) es el radio de curvatura del cucharón, F_o es el número de Froude del flujo de aproximación, y d_o (m) es el calado del flujo de aproximación.

2.2.2. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES

2.2.2.1. Presiones en el fondo del salto en esquí

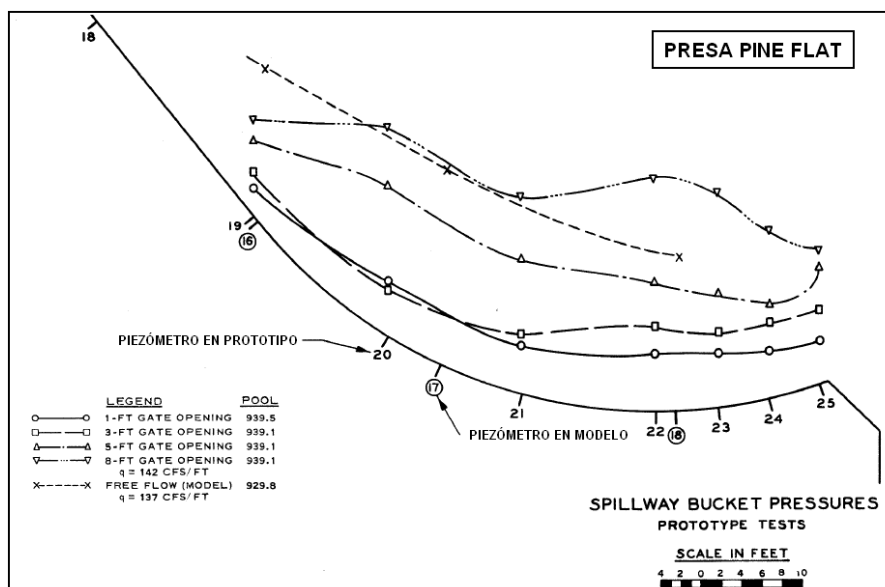
En lo que respecta a la distribución de presiones en el fondo de un cucharón de salto en esquí, Khatsuria (2005) menciona la existencia de varias teorías para su determinación, siendo estas:

- Sumatoria de la presión centrífuga y de la presión hidrostática. (Numeral 1.3.2)
- Aplicación de la teoría del vórtice libre.
- Soluciones analíticas complejas basadas en modelación matemática del flujo en el cucharón tratándolo como irrotacional e incompresible.
- Correlación entre modelos y prototipos.

A continuación se presenta un resumen cronológico de las diferentes teorías utilizadas.

En 1959, la U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station realizó pruebas en modelo y prototipo de la cresta y cucharón de la presa Pine Flat, dando como resultado una buena aproximación en las presiones como indica la Figura 2.13.

Figura 2.13: Diagrama de presiones obtenidas tanto en prototipo como en modelo, para la presa Pine Flat



Fuente: (U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1959, pág. Plate 5)

En 1961, Balloffet³⁶ establece una relación para obtener la presión máxima en el cucharón:

$$hp_{M\acute{a}x} = d + \frac{V^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{R-d}{R} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

Donde, **V (m/s)** es la velocidad media de aproximación, **hp_{Máx} (m.c.a.)** es la carga de presión máxima en el cucharón, **d (m)** es la distancia a la superficie libre perpendicular al fondo del canal, **R** es el radio al fondo del canal.

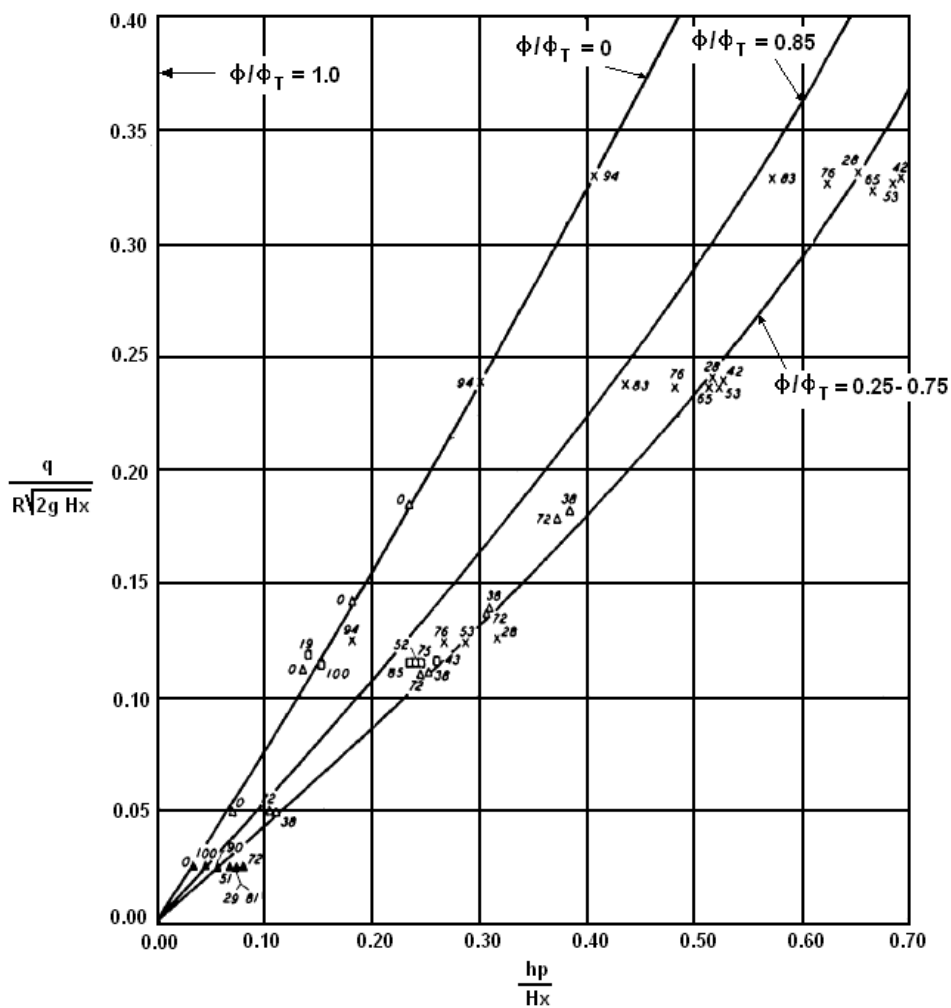
En 1962, la WES obtuvo la Figura 2.14 aplicando una aproximación teórica (la fuerza centrífuga y la analogía del vórtice libre), válida para presas relativamente altas y cucharones no sumergidos. La WES, establece que las presiones del fondo de un cucharón de salto en esquí varían a lo largo de la curva y además son influenciadas por el radio de curvatura (**R**), la carga total en cada punto (**H_x**) y el caudal unitario (**q**), es decir:

$$\frac{hp}{H_x} = f \left(\frac{q}{R \sqrt{2g H_x}}, \frac{\phi}{\phi_T} \right) \quad (2.12)$$

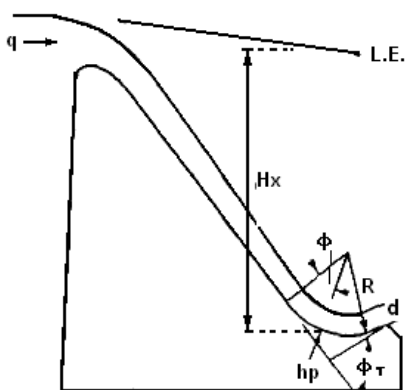
Donde, (**ϕ/ϕ_T**) es la posición relativa a lo largo de la curva (punto en cuestión), (**ϕ**) es el ángulo desde el inicio de la curva hasta el punto, (**ϕ_T**) es el ángulo total de deflexión.

³⁶Khatsuria, R. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. New York: Marcel Dekker. p. 449.

Figura 2.14: Presiones en el cucharón del salto en esquí



DIAGRAMA



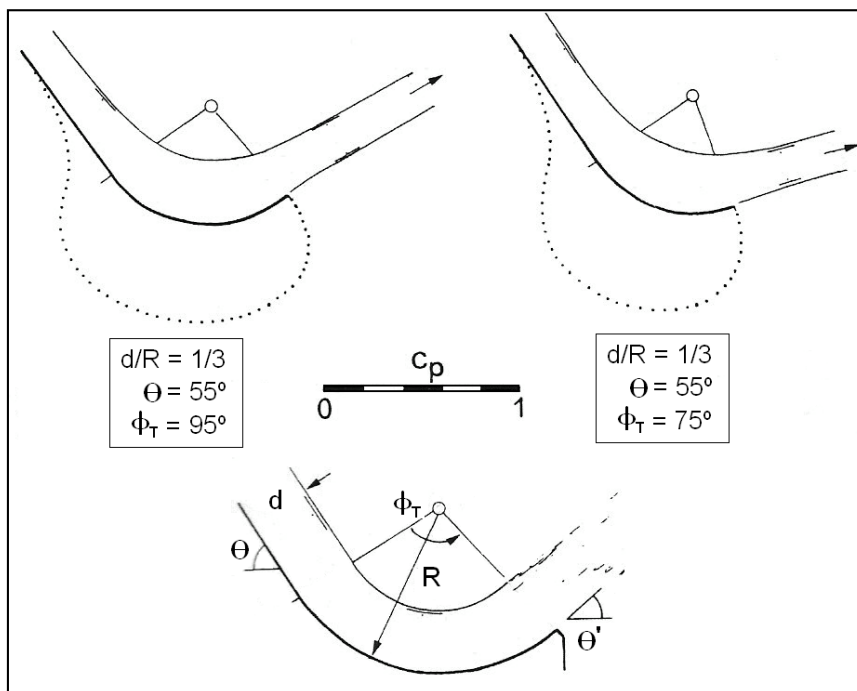
- LEYENDA**
- △ PINE FLAT MODEL
 - × HARTWELL MODEL
 - ▲ PINE FLAT PROTOTYPE
 - ◻ ES 801 (TOE CURVE)

HIGH OVERFLOW DAMS
 ENERGY DISSIPATORS
 FLIP BUCKET AND TOE CURVE PRESSURES
 HYDRAULIC DESIGN CHART 112-7

Fuente: (Waterways Experiment Station, 1988, pág. HDC 112 7)
 Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Chen & Yu (1965)³⁷, modificaron el método del flujo potencial, omitiendo el efecto de la gravedad y utilizando el método de la red de flujo, para obtener la distribución de presiones. Los resultados obtenidos para casos particulares, se pueden observar en la Figura 2.15.

Figura 2.15: Presiones en el cucharón del salto en esquí en función de C_p



Fuente: (Vischer & Hager, *Energy Dissipators*, 1995, pág. 121)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

En 1969, Lenau & Cassidy, establecen que el efecto de la viscosidad es despreciable³⁸ y asumen que el flujo es irrotacional e incompresible. El método obtenido por estos autores se basa en las siguientes relaciones:

$$\frac{R C_p}{2d} \text{ y } \frac{L_c}{d} < 9$$

Donde, C_p ($p_x/\gamma Y_{c-c}$) es el coeficiente de presión adimensional, p_x (kg/m^2) es la presión en un punto x de la curva, γ (kg/m^3) es el peso específico, Y_{c-c} (m) es la distancia desde la cresta del vertedero hasta el punto más bajo del cucharón, d (m) es la distancia a la superficie libre perpendicular al

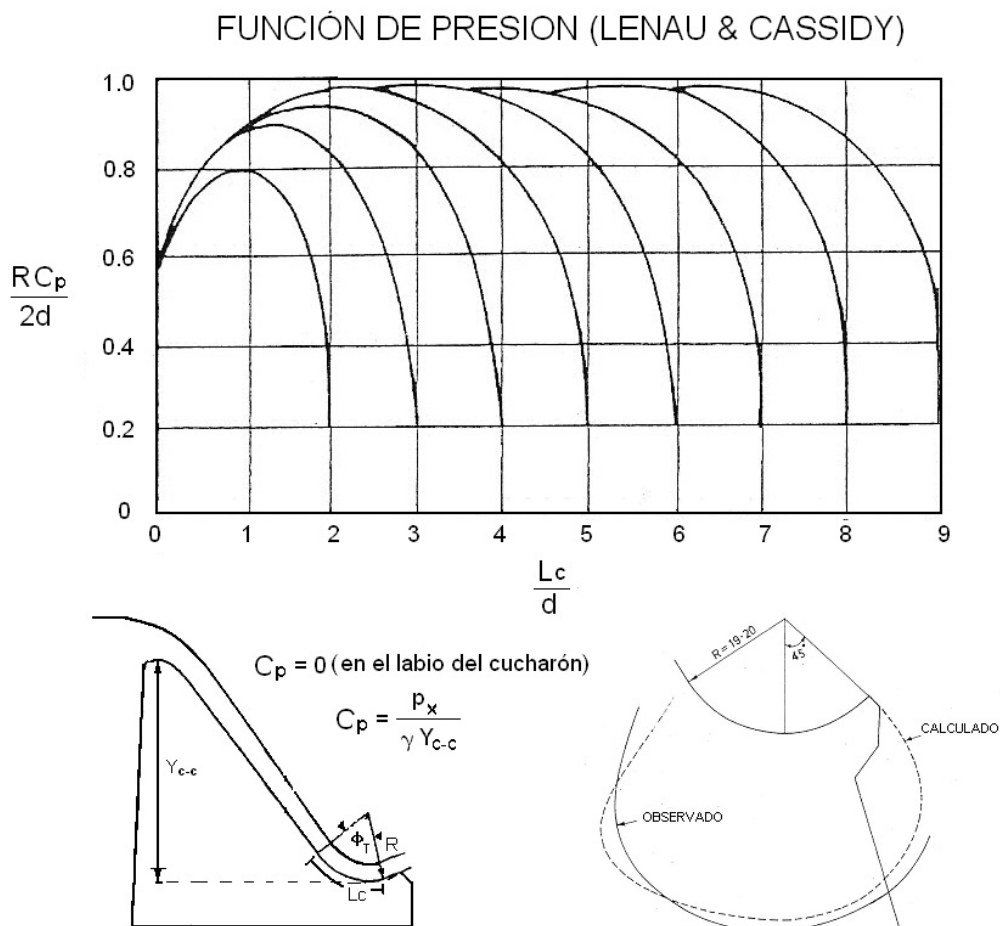
³⁷Vischer, D. L., & Hager, W. H. (1995). *Energy Dissipators*. Rotterdam: A. A. Balkema. p. 121

³⁸Vischer, D. L., & Hager, W. H. (1995). *Energy Dissipators*. Rotterdam: A. A. Balkema. p. 122

fondo en el canal de aproximación, R es el radio al fondo del canal, L_c (m) es la longitud de la curva.

Más tarde, Prasad (1984) amplió la relación L_c/d hasta 32.

Figura 2.16: Función de presiones según Lenau & Cassidy (1969)



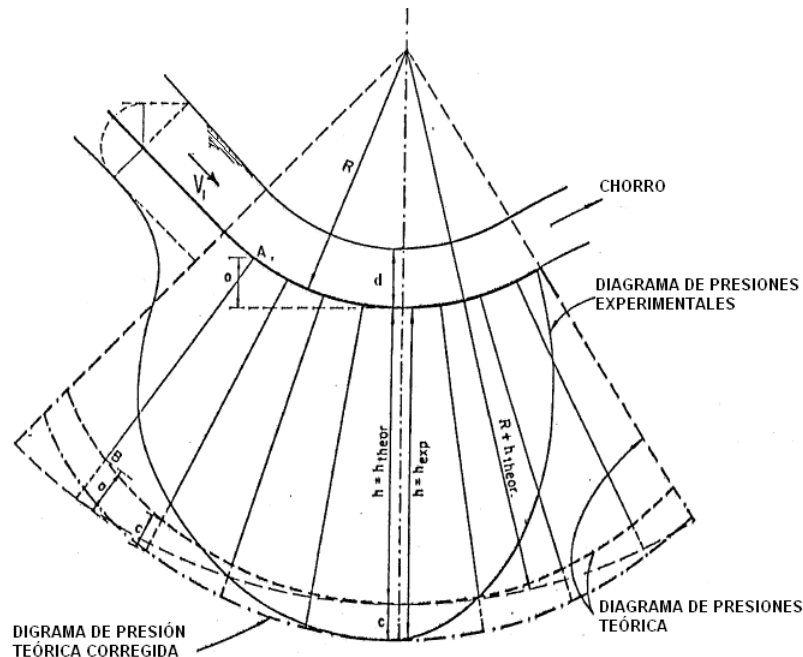
Fuente: (Khatsuria, 2005, pág. 450)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

En 1972, Ripken & Dahlin, en un estudio basado en modelos para la presa Guri, concluyen que la ecuación establecida por Bollaffet coincide solo con la presión máxima obtenida en modelos. Con los resultados obtenidos (Figura 2.17), demuestran que la distribución teórica no puede suceder en la realidad ya que existen pendientes abruptas en la distribución de presiones obtenidas en el modelo. Estas pendientes tanto en la entrada como a la salida del cucharón son debidas a las transiciones que tiene el

flujo en las dos partes: de una rápida con pendiente continua, al cucharón; y del flujo en el cucharón, a flujo en descarga libre, respectivamente.

Figura 2.17: Diagrama de presiones teóricas y experimentales en la presa Guri



Fuente: (Ripken & Dahlin, 1972)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

En 1988, Shuguang & Zhengxiang utilizan la teoría del flujo potencial incluyendo el efecto de la gravedad, y obtienen un error de 5% entre las presiones teóricas y experimentales. Los autores concluyen que al despreciar el efecto de la gravedad, cuando el Froude es pequeño, las presiones son subestimadas; por lo que los métodos que desprecian el efecto de la gravedad quedan limitados para flujos con números de Froude elevados y por ende a presas altas.

Según Vischer & Hager (1995), utilizando la ecuación de Bernoulli obtiene la máxima carga de presión:

$$\frac{p_{M\acute{a}x}}{\rho g} = d + \frac{p_{dM\acute{a}x}}{\rho g} \quad (2.13)$$

Donde, $p_{m\acute{a}x}/\rho g$ (m) es la carga de presi3n m\acute{a}xima, ρ (gr/cm³) es la densidad del fluido, g (m/s²) es la aceleraci3n de la gravedad, d (m) es la distancia a la superficie libre perpendicular al fondo del canal, $p_{d\ m\acute{a}x}/\rho g$ (m) es la carga de presi3n din\´amica m\acute{a}xima. \xc9sta \xc9ltima, expresada en funci3n del n\xfcmero de Froude, $F_o=[q/(gd^3)^{1/2}]$, es:

$$\frac{hp_{dm\acute{a}x}}{d} = 1.03 \frac{d}{R} F_o^2 \quad (2.14)$$

Donde, $hp_{dm\acute{a}x}/d = p_{dm\acute{a}x}/\rho gd$ es la carga de presi3n din\´amica adimensional, F_o es el n\xfcmero de Froude de aproximaci3n y el valor 1.03³⁹ es un coeficiente de correcci3n.

Seg\xfcn Juon & Hager (2000), la carga de presi3n din\´amica te3rica (hp_{dT}), basada en la teor\xeda de flujo potencial con l\xedneas de corriente conc3ntricas, es:

$$\frac{hp_{dT}}{d} = \left(\frac{d}{R}\right) F_o^2 \quad (2.15)$$

Donde, $[(d/R)^{1/2}F_o]$ es el n\xfcmero de curva de aproximaci3n, F_o es el n\xfcmero de Froude de aproximaci3n, d (m) es la distancia a la superficie libre perpendicular al fondo del canal, R es el radio al fondo del canal. (Heller, Hager, & Minor, 2005), establecen que la ecuaci3n (2.15) es aplicable solo cuando $[(d/R)(40^\circ/\phi_T)] < 0.20$.

Khatsuria (2005), propone una ecuaci3n alternativa a la de Balloffet para la obtenci3n de la distribuci3n de carga de presiones en el cuchar3n:

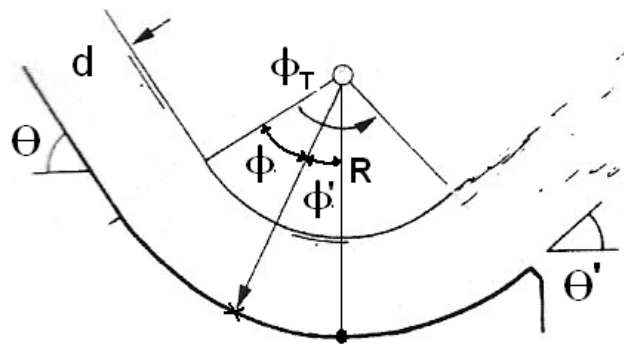
$$hp_x = H_x - (H_x - d\cos\phi') \left(\frac{R-d}{R}\right)^2 \quad (2.16)$$

Donde, hp_x (m) es la carga de presi3n en cada punto a lo largo de la curva, H_x (m) es la carga desde el reservorio hasta cada punto en el cuchar3n, ϕ' (°) es el \xc1ngulo desde el punto m\acute{a}s bajo del cuchar3n hasta cada punto x

³⁹Vischer, D. L., & Hager, W. H. (1995). *Energy Dissipators*. Rotterdam: A. A. Balkema. p. 120

(Figura 2.18), d (m) es la distancia a la superficie libre perpendicular al fondo en el canal de aproximación, R es el radio al fondo del canal.

Figura 2.18: Esquema básico de cucharón de un salto de esquí



Fuente: (Vischer & Hager, Energy Dissipators, 1995, pág. 121)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Finalmente, dados los resultados en la Figura 2.16, Khatsuria (2005) concluye que el mejor método analítico para obtener la distribución de presiones en un cucharón de salto en esquí, es el presentado por Lenau & Cassidy (1969).

Por otro lado, en el salto en esquí existe variación de las presiones en el cucharón, las cuales dependen del número de Froude. Vatandoust, Khsrowjerdi, Reza, & Manshoury (2012), en un estudio en modelos de salto en esquí, determinaron un coeficiente de variación de presiones ($C'p$) en varios puntos del fondo de un cucharón, para varios números de Froude. Este coeficiente ($C'p$) está definido de la siguiente manera:

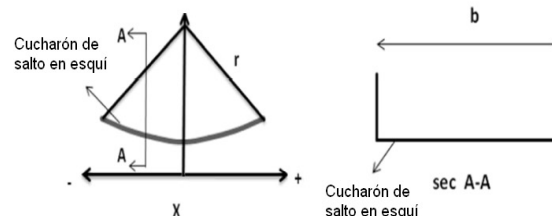
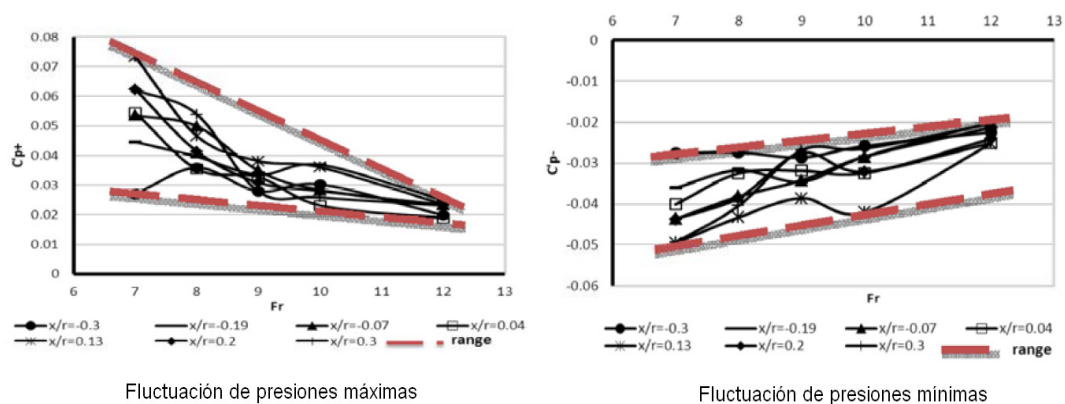
$$C'p_{\pm} = \frac{\pm \Delta p}{\alpha \left[\frac{V_o^2}{2g} \right]} \quad (2.17)$$

Donde, $\pm \Delta p$ es la variación de presión que toma el valor negativo para la presión mínima en cada punto ($-\Delta p = p_{\text{mín}} - p_{\text{med}}$) y el valor positivo para la presión máxima en cada punto ($+\Delta p = p_{\text{máx}} - p_{\text{med}}$), p_{med} es la presión media medida en cada punto, V_o (m/s) es la velocidad del flujo de

aproximación, $g(m/s^2)$ es la aceleración de la gravedad, α es el coeficiente de Coriolis.

De los resultados obtenidos, los autores concluyen que a mayor número de Froude, las variaciones de presión a lo largo de la curva son menores. En la Figura 2.19, se presenta las variaciones del coeficiente (C_p) respecto al número de Froude, para varios puntos en la curva.

Figura 2.19: Fluctuación de presiones a lo largo de un cucharón de salto en esquí



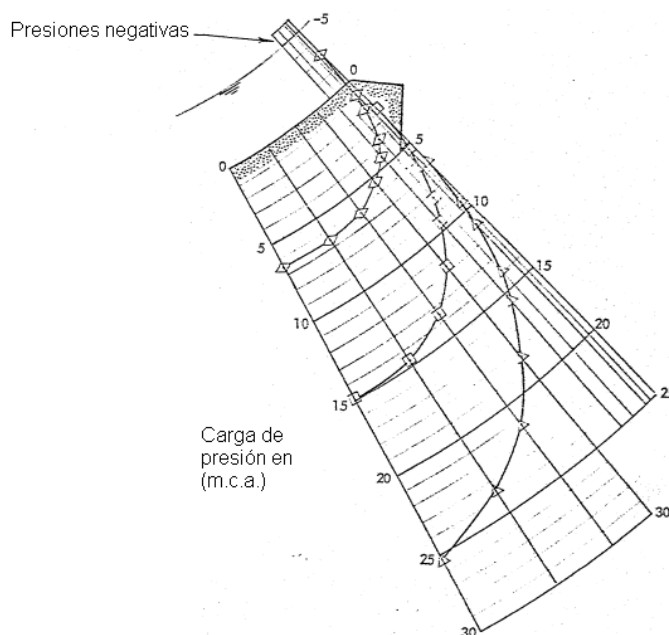
Fuente: (Vatandoust, et. al., 2012, págs. 400-401)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

2.2.2.2. Presiones al inicio del chorro de salida desde el esquí

En lo que respecta a las presiones en la salida del chorro, Ripken & Dahlin (1972) demuestran que en el labio de un cucharón de salto en esquí, la línea de corriente inferior, no asume necesariamente la curvatura del labio. Es por ello que en la salida del chorro pueden presentarse problemas de remolinos con la consecuente cavitación como se puede observar en la Figura 2.20.

Figura 2.20: Esquema de presiones en el labio de un cucharón de salto en esquí, Presa Guri

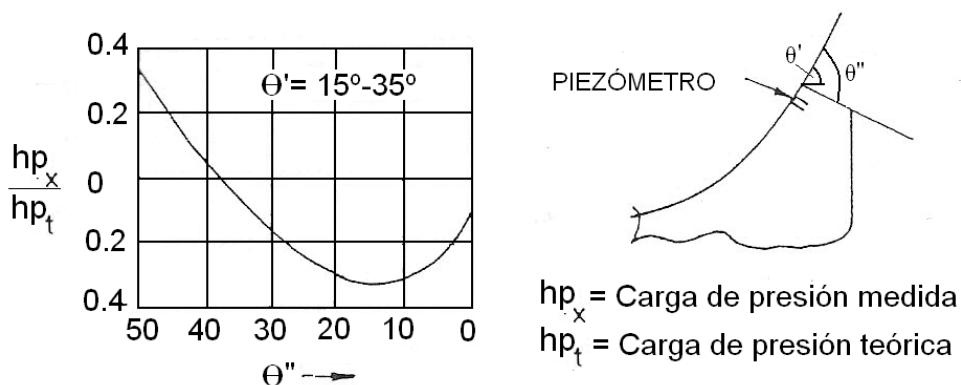


Fuente: (Ripken & Dahlin, 1972)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Khatsuria (2005), establece que las presiones en el labio pueden verse afectadas por el ángulo de inclinación del labio a la salida del chorro (θ'') (Figura 2.21). Además, para los ángulos de diseño de salida de salto en esquí recomendados (15° - 35°), menciona que (θ'') no debe ser menor a los 40° .

Figura 2.21: Presiones al final del cucharón de un salto en esquí



Fuente: (Khatsuria, 2005, pág. 452)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

2.3. DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE SALTOS EN ESQUÍ A SER EXAMINADOS

En general, debido a las condiciones particulares de cada proyecto, los disipadores de energía y en específico el disipador tipo salto en esquí constituye uno de los principales elementos a ser examinados en modelos hidráulicos. Las características de las diferentes alternativas de saltos en esquí resultan convenientes considerando la necesidad en cada proyecto, en lo referente a la disipación de energía, alcance y dirección del chorro. Para estos fines existen algunas variantes geométricas que se describen en los siguientes numerales.

2.3.1. SALTO CONVENCIONAL

El salto en esquí convencional es el más común de este tipo de disipadores y se encuentra definido básicamente por un canal rectangular de fondo longitudinal cóncavo (cuchara) definido por un radio de curvatura. La salida de esta estructura terminal puede ser horizontal o puede disponer de una inclinación en contrapendiente (ángulo de salida), ver Foto 2.1.

Foto 2.1: Salto en esquí Convencional (Presa Ralco - Chile)

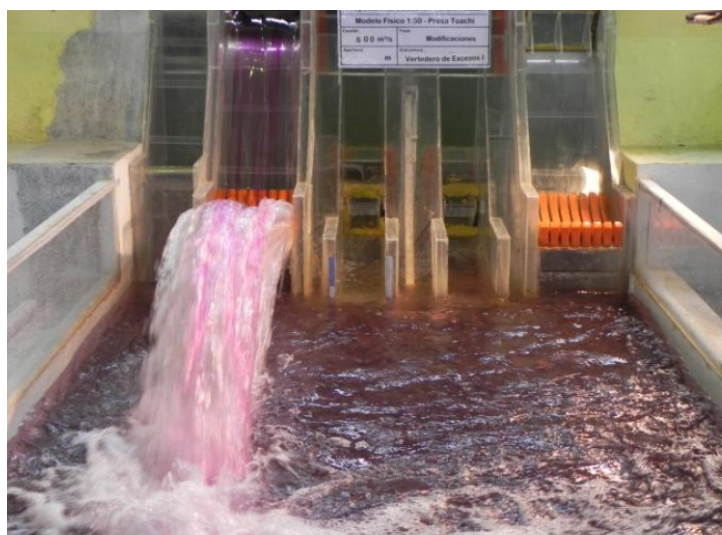


Fuente: (Uribe, s.f.)

2.3.2. SALTO CON DEFLECTORES

El salto con deflectores tipo angostura, obedece su nombre al diseño efectuado por U.S.B.R (1946) para una “cuchara” sumergida en la presa Angostura (Dakota - EEUU). Este tipo de salto en esquí dispone de deflectores con un radio de curvatura menor al del salto en esquí y un ángulo de salida mayor que el de la cuchara. Los deflectores se encuentran ubicados a lo ancho de la cuchara y separados a cierta distancia, lo que permite disponer de ranuras en el sentido del flujo para separar el chorro, logrando que el agua circule por sobre los deflectores y entre ellos por sobre la cuchara, ver Foto 2.2.

Foto 2.2: Salto en esquí con deflectores tipo Angostura (Presa Toachi)



Fuente: (Casa, 2012, pág. 60)

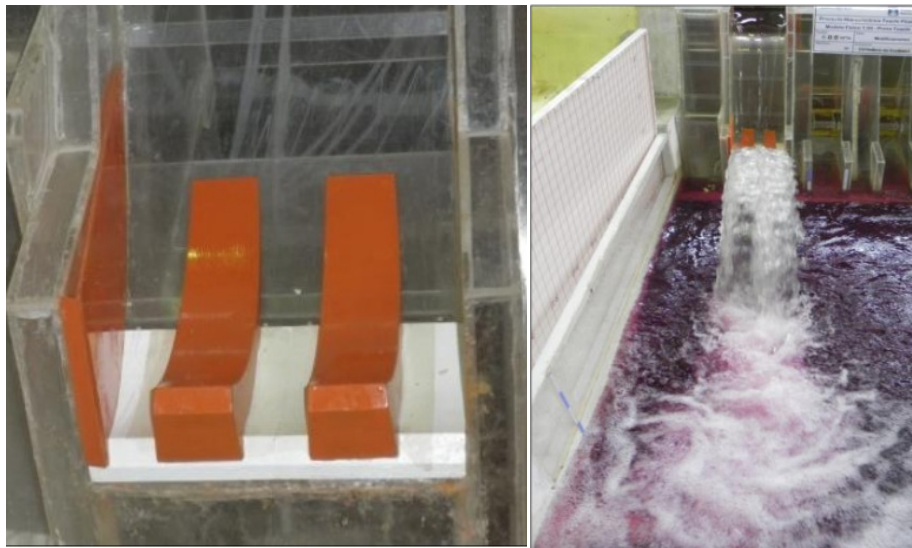
El salto en esquí también puede disponer de deflectores de sección transversal trapezoidal, cuyo objetivo es el mismo que los deflectores con sección transversal rectangular, aerear el flujo y disipar energía. Del mismo modo, los deflectores se encuentran ubicados a lo ancho de la cuchara y separados a cierta distancia para conseguir la separación del chorro de agua, como se puede observar en las Foto 2.3 y Foto 2.4.

Foto 2.3: Salto en esquí con deflectores de sección transversal trapezoidal (Presa Shahryar - Irán)



Fuente: (Martinerie, et. al., 2007, págs. 2-10)

Foto 2.4: Salto en esquí con deflectores de sección transversal trapezoidal (Presa Toachi)

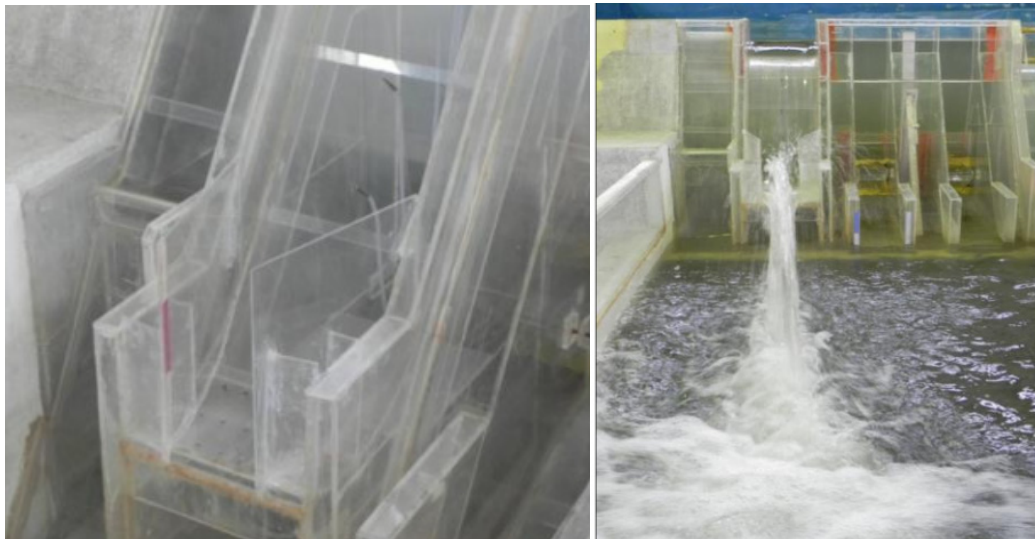


Fuente: (Casa, 2012, págs. 67-141)

2.3.3. SALTO CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES

El salto con estrechamiento gradual de paredes comprende de dos paredes laterales rectas, convergentes en sentido del flujo, cuyo objetivo principal consiste en elevar el calado de agua en la salida del salto en esquí para propiciar una mayor desintegración del chorro en la atmósfera con respecto al convencional (Foto 2.5 y Foto 2.6). Adicionalmente, con esta geometría se logra configurar un foso de socavación alargado en el sentido del flujo.

Foto 2.5: Salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes (Presa Toachi)



Fuente: (Casa, 2012, págs. 62-137)

Foto 2.6: Salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes (Presa Guangzhao - China)



Fuente: (Guo J. , 2006, pág. 7)

2.3.4. SALTO CON ESTRECHAMIENTO LATERAL DE UN SOLO LADO

El salto con estrechamiento lateral de un solo lado se caracteriza por disponer de un deflector lateral en el salto de esquí convencional que permite orientar o direccionar el chorro aguas abajo hacia el centro del cauce, ver Foto 2.7.

Foto 2.7: Salto en esquí con estrechamiento lateral de un solo lado (Presa Contra - Suiza)

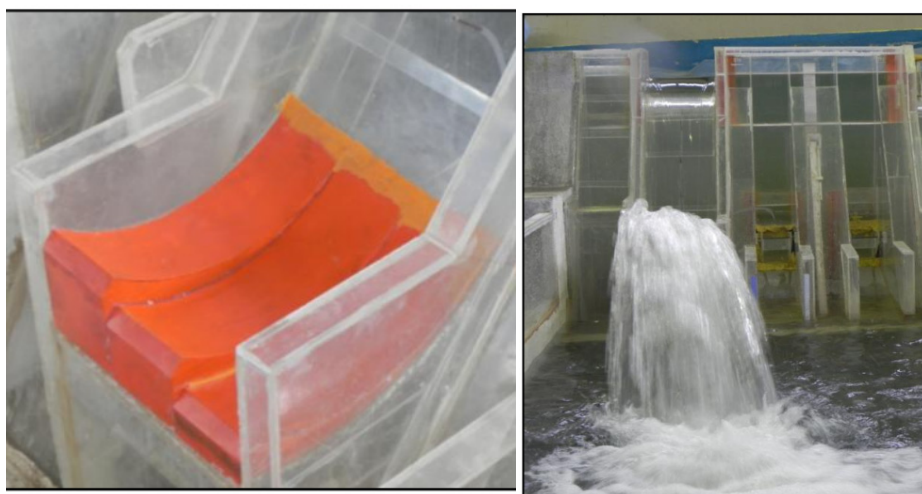


Fuente: (GFC Collection, 2013)

2.3.5. SALTO CON UMBRAL DE ALTURA VARIABLE

El salto con umbral de altura variable consiste en un salto en esquí dispuesto de deflectores que se adaptan en todo el ancho de la cuchara, donde cada deflector posee un radio de curvatura distinto que provoca que la salida del esquí tenga altura y ángulo de lanzamiento diferente. Este tipo de salto tiene como objetivo separar el chorro y lograr una mejor aeración del mismo, ver Foto 2.8.

Foto 2.8: Salto en esquí con umbral de altura variable (Presa Toachi)



Fuente: (Casa, 2012, págs. 64-139)

Normalmente los tipos de salto en esquí que disponen de un estrechamiento brusco en curva buscan una mejor dirección del chorro hacia el centro del cauce, pero a la vez son menos eficientes que los saltos en esquí con: deflectores tipo angostura, paredes de estrechamiento gradual o umbral de altura variable, cuyo objetivo principal es conseguir una mejor disipación de energía mediante la desintegración del chorro. Combinaciones de estos tipos de salto en esquí podrían ser considerados dentro de un proyecto en particular, donde la modelación física se convierte en una herramienta de análisis insustituible.

2.4. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MOVIMIENTO – EVALUACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA AL PIE DE PRESA (CUENCOS DE SOCAVACIÓN)

La disipación de energía al pie de presa del flujo procedente del salto en esquí tiene que ver directamente con el impacto del chorro en el colchón de agua y el movimiento del flujo en el cuenco amortiguador, donde los diferentes tipos de movimientos se encuentran ligados a la conformación del foso socavado.

Las características del flujo en el cuenco disipador de energía dependen principalmente de: el ángulo de entrada del chorro al cuenco (ángulo de incidencia), el caudal unitario del chorro, la geometría del chorro (espesor) y el material del lecho.

Generalmente, el chorro que sale del salto en esquí define una trayectoria parabólica, geoméricamente el chorro tiende a ensancharse y a disminuir tanto su espesor y ángulo de incidencia como su caudal unitario. Estas cualidades del flujo hacen que chorro interactúe de mejor manera con el aire y con el colchón de aguas, con el fin de alcanzar la disipación de energía y una profundidad del foso adecuadas.

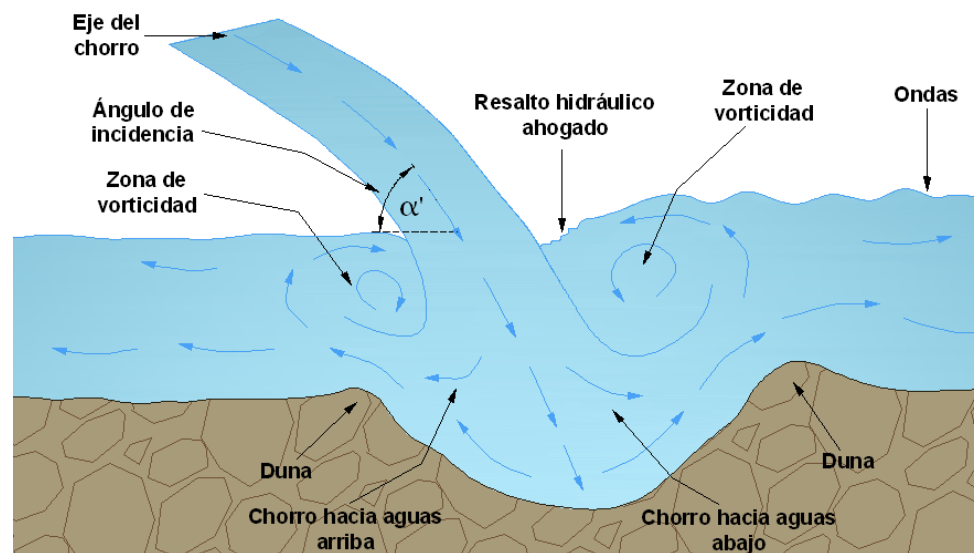
En los siguientes numerales se analiza y describe, en perfil y en planta, el movimiento del chorro y su disipación al interior del cuenco amortiguador.

2.4.1. ANÁLISIS EN PERFIL DEL MOVIMIENTO Y DISIPACIÓN DEL CHORRO AL PIE DE PRESA

El chorro que ingresa al colchón de agua toma contacto con el lecho del cuenco, donde se divide en dos chorros o flujos con una distribución de caudales que depende del ángulo de incidencia. Como se muestra en la Figura 2.22, las direcciones de los chorros generados son opuestas y siguen el fondo del lecho o contorno del foso, una hacia aguas abajo del sitio de impacto y otra hacia aguas arriba en dirección de la presa.

En el caso del salto en esquí, el ángulo de incidencia es menor a 90 grados, lo que provoca que el chorro no se divida en una misma proporción, existe un mayor flujo (caudal) hacia aguas abajo en comparación con el flujo que se produce hacia aguas arriba, generándose los efectos de succión aguas arriba y de turbulencia aguas abajo del sitio de impacto del chorro, y provocando que el calado aguas abajo sea un tanto mayor al calado de aguas arriba.

Figura 2.22: Difusión y movimiento del chorro en el cuenco disipador.



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

El cambio de régimen supercrítico a subcrítico (resalto hidráulico) da lugar en el colchón de agua, específicamente, producto del chorro que fluye hacia aguas abajo, el mismo que se divide nuevamente en dos flujos que emergen hacia la superficie: uno que sigue hacia aguas abajo del límite del foso (duna), provocando ondas en la superficie del agua; y el otro que fluye hacia aguas arriba, generando un resalto hidráulico ahogado y una zona de vorticidad (vórtice de eje horizontal) en el área inmediata al sitio de impacto (Foto 2.9).

En lo referente al chorro o flujo que circula hacia aguas arriba de la zona de impacto, este se divide de igual manera en 2 flujos: uno que genera un vórtice de eje horizontal inmediatamente aguas arriba de la zona de

impacto, y otro que circula en dirección al pie de la presa. Durante el proceso de socavación del foso, en el límite del mismo, se forma una duna, la misma que desaparece cuando el impacto del chorro se traslada hacia la presa en el tramo final de una crecida (disminución de caudal).

Foto 2.9: Resalto ahogado y ondas aguas abajo de la zona de impacto del chorro en el colchón de agua.



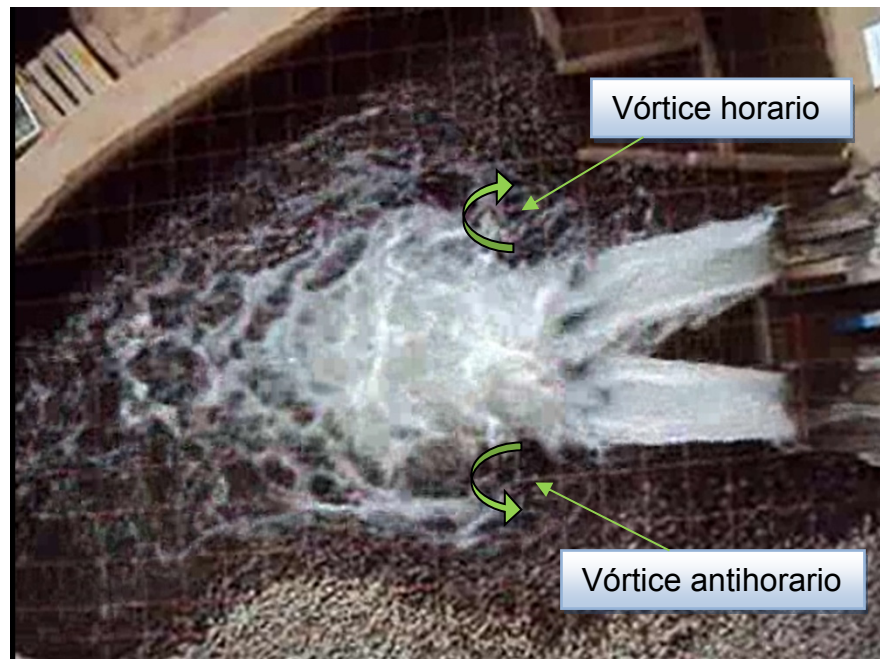
Fuente: (Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA) - Modelo Físico Proyecto Hidroeléctrico Manduriacu, 2012)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

2.4.2. ANÁLISIS EN PLANTA DEL MOVIMIENTO Y DISIPACIÓN DEL CHORRO AL PIE DE PRESA

Describiendo al flujo en planta, principalmente el chorro se esparce hacia aguas abajo del sitio de impacto, generándose el resalto ahogado y las ondulaciones en la superficie. Cercana a la zona con superficie de agua ondulada, en el lado derecho e izquierdo de la dirección del flujo, se producen dos vórtices de eje vertical en sentidos horario y antihorario respectivamente, lo mismos que no son lo suficientemente considerables en cuanto a velocidad como para producir socavación en un lecho no cohesivo, como se indica en la Foto 2.10.

Foto 2.10: Vórtices de eje vertical en la zona aledaña a la difusión del chorro.



Fuente:(Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA) - Modelo Físico Proyecto Hidroeléctrico Manduriacu, 2012)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Por lo general, la conformación de la duna alrededor del foso de socavación se caracteriza por acumular mayor cantidad de material en la misma dirección al eje de incidencia del chorro, y una menor cantidad de material granular y por ende una menor aparición de la duna del lado de las márgenes laterales del foso. Esta particular acumulación se debe a que la velocidad máxima del chorro se encuentra en el eje del mismo (Ver numeral 2.2.1.2), lo que provoca un mayor arrastre transportando el material no cohesivo más lejos. El foso de socavación por acción del chorro alcanza la estabilidad cuando la energía del mismo no es suficiente para desplazar el material del fondo del foso.

2.5. CONCLUSIONES

Respecto a la caracterización del flujo sobre el salto en esquí, del flujo de salida y del impacto en el cuenco al pie de la presa:

- La correcta disipación de energía contenida en flujos de vertederos de presas altas depende de las condiciones del flujo en todo su trayecto. En el caso particular de saltos en esquí, el flujo en la rápida tiene altas velocidades y una importante concentración de aire, ocasionando que el flujo en la salida del cucharón tenga un grado de turbulencia entre 4 % y 8 %. Este grado de turbulencia junto con la concentración de aire afectan a la trayectoria del chorro, disminuyendo su alcance hasta en un 30% y permitiendo, además, una mayor y más rápida disipación de la energía en la zona de impacto.

Referente a la distribución de velocidades y de presiones en el fondo del salto en esquí y al inicio del chorro de salida desde el esquí:

- Debido a que las líneas de corriente del flujo sobre el cucharón del salto en esquí tienen curvatura, la distribución de velocidades es diferente a la que se presenta en un canal con pendiente continua, adquiriendo una forma logarítmica deformada con tendencia uniforme, en donde el mayor valor de velocidad se presenta en la superficie.
- La distribución de velocidades en vertical a la salida del salto en esquí también tiende a ser uniforme. Aguas abajo, en el chorro a descarga libre, se presenta una distribución de velocidades cuyo valor máximo se encuentra en el eje, disminuyendo con tendencia Gaussiana conforme se aleja del mismo. De manera similar, en el sentido longitudinal, la velocidad disminuye a medida que se aleja del punto de descarga.

- El perfil de las presiones a lo largo del cucharón de un salto en esquí puede ser determinado mediante varios métodos teóricos, de los cuales, el propuesto por Lenau & Cassidy es el que brinda una buena aproximación, sin embargo, las mediciones en modelos gobiernan cualquier otro método, ya que estos aparte de dar una distribución de presiones similar a la real, ayudan a detectar posibles particularidades que se puedan presentar en los prototipos.
- La presión a la salida del salto en esquí depende del ángulo de inclinación del labio medido desde la horizontal, el mismo que no debe ser menor a 40 grados para no generar presiones negativas.

Referente a los tipos de saltos en esquí a ser examinados:

- Las geometrías de los diferentes tipos de salto en esquí dependen esencialmente de los objetivos a conseguir dentro de la disipación de energía (erosión del lecho) y la dirección del chorro, los mismos que dependen de las características propias de cada proyecto, como por ejemplo: la disposición de las obras (orientación de los vertederos), altura de la presa, material del lecho y geología de las laderas en el sitio de impacto, y morfología del cauce aguas abajo de la presa.
- Dentro de los tipos de saltos en esquí, los que disponen de deflectores tipo angostura, con paredes de estrechamiento gradual y los que poseen un umbral de altura variable, tienen como principal objetivo mejorar la disipación de energía con respecto al salto convencional mediante la introducción de aire en el chorro. Por otro lado, el salto en esquí que dispone de un estrechamiento brusco en curva, busca esencialmente mejorar el salto en esquí convencional, direccionando el chorro por lo general hacia el centro del cauce. Posterior al adecuado estudio en modelo físico, geometrías innovadoras distintas a las enunciadas pueden ser consideradas en el diseño de un proyecto.

Respecto a los parámetros característicos de los diferentes tipos de movimiento – evaluación de la disipación de energía al pie de presa (cuencos de socavación):

- El movimiento del flujo y la disipación de energía en el colchón de agua, ubicado aguas abajo de la presa, depende principalmente de: el caudal unitario, turbulencia, la geometría del chorro, el ángulo de incidencia del chorro (ángulo de entrada al cuenco), el material del lecho y la formación del foso de socavación.
- En un análisis en perfil, del movimiento y disipación del flujo en el cuenco, se puede identificar que el chorro se divide al impactar con el lecho en 2 corrientes de direcciones contrarias, luego, cada una de ellas se divide en 2 corrientes más, una que se aleja del chorro principal y otra que se dirige hacia el mismo, esta última responsable de originar zonas de vorticidad. Adicionalmente, se puede identificar la presencia de un resalto ahogado cerca al impacto del chorro y una zona de ondas superficiales aguas abajo del foso.
- En un análisis en planta, del movimiento y disipación del chorro en colchón de agua, por lo general, se puede presentar recirculación del flujo en las zonas laterales aledañas al impacto del chorro que originan vórtices de eje vertical. En cuanto al material procedente del foso de socavación, originado por el impacto del chorro, la mayor cantidad de material se encuentra aguas abajo del foso, en la dirección del eje central del chorro.

CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FENÓMENO FÍSICO

3.1. BASES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FLUJO REAL EN CONTORNOS CURVOS CÓNCAVOS, INTRODUCCIÓN DE AIRE Y FLUJO DE CONTORNO PARABÓLICO CON INTRODUCCIÓN DE AIRE.

El análisis dimensional constituye la base de los modelos a escala reducida, facilita estudiar los fenómenos en los que se encuentran inmersas las magnitudes físicas como variables independientes y permite detectar incongruencias de las unidades empleadas en cálculos ingenieriles.

La aplicación del teorema de Vasch y Buckingham o teorema “ π ”, tiene como objetivos, facilitar el análisis de un fenómeno físico y minimizar el número de ensayos requeridos para investigar el comportamiento de un fenómeno.

El teorema “ π ”, se aplica en un problema físico para cambiar un conjunto de parámetros dimensionales por otro más simplificado de características adimensionales. La obtención de estos últimos se consigue mediante una relación adecuada de los primeros.

En el movimiento de fluidos se presentan las siguientes cantidades fundamentales con sus respectivas dimensiones (Tabla 3.1):

Tabla 3.1: Cantidades y dimensiones presentes en el movimiento de un fluido

CANTIDAD	DIMENSIÓN
Longitud	L
Tiempo	T
Masa	M
Fuerza	MLT^{-2}
Velocidad	LT^{-1}
Aceleración	LT^{-2}
Área	L^2
Caudal	L^3T^{-1}
Presión	$ML^{-1}T^{-2}$
Gravedad	LT^{-2}
Densidad	ML^{-3}
Peso Específico	$ML^{-2}T^{-2}$
Viscosidad dinámica	$ML^{-1}T^{-1}$
Viscosidad cinemática	L^2T^{-1}
Tensión superficial	LT^{-2}

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

De variables enlistadas, las unidades básicas son las correspondientes a la longitud, tiempo y masa, las demás se derivan de estas tres, y en conjunto se utilizan para demostrar equivalencias y obtener formulaciones.

3.2. RELACIÓN FUNCIONAL TEÓRICA PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL FLUJO EN EL SALTO EN ESQUÍ – FORMACIÓN DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN

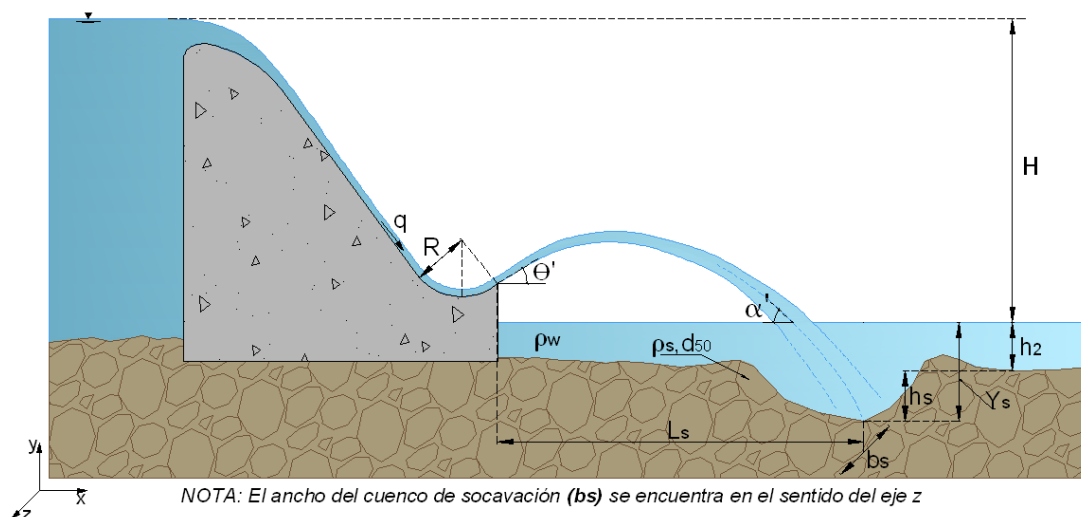
En la conformación del cuenco de socavación aguas abajo de la presa (profundidad de socavación, (Y_s en m), generado por el impacto del chorro procedente de la estructura de disipación tipo salto en esquí, interviene los siguientes parámetros: el caudal unitario próximo al salto en esquí (q en $m^3/s/m$), la carga total medida como la diferencia de niveles entre el embalse y aguas abajo del foso (H en m), el radio de curvatura de la cuchara del salto en esquí (R en m), el ángulo del labio del salto en esquí (θ' en radianes), el calado aguas abajo del foso (h_2 en m), el tamaño característico del material del lecho (d_{50} en m), la distancia a la máxima profundidad de socavación

medida desde el pie de la presa (L_s en m), ancho de socavación (b_s en m), la aceleración de la gravedad (g en m/s^2), la densidad del agua (ρ_w en t/m^3) y la densidad del sedimento (ρ_s en t/m^3). Por lo tanto, la relación funcional teórica queda definida de la siguiente manera:

$$Y_s = f(q, H, R, \theta', h_2, d_{50}, L_s, b_s, g, \rho_w, \rho_s) \quad (3.1)$$

Los parámetros que conforman la relación funcional se muestran en la Figura 3.1:

Figura 3.1: Esquema de los parámetros que intervienen en la formación del cuenco de socavación



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

En general, las características geométricas del cuenco de socavación como la profundidad de socavación, la distancia desde el pie de la presa a la profundidad máxima de socavación y el ancho del foso (Y_s , L_s , b_s), dependen de los parámetros descritos (q , H , R , θ' , h_2 , d_{50} , g , ρ_w , ρ_s), esto es:

$$Y_s = f(q, H, R, \theta', h_2, d_{50}, g, \rho_w, \rho_s) \quad (3.2)$$

$$L_s = f(q, H, R, \theta', h_2, d_{50}, g, \rho_w, \rho_s) \quad (3.3)$$

$$b_s = f(q, H, R, \theta', h_2, d_{50}, g, \rho_w, \rho_s) \quad (3.4)$$

3.3. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES

Aplicando el teorema de Buckingham o teorema π , se obtiene las relaciones funcionales adimensionales, en el presente estudio, los parámetros adimensionales para el análisis del foso de socavación se encuentran relacionados principalmente con el calado aguas abajo del foso de socavación (h_2). Estas relaciones adimensionales se señalan a continuación:

$$\frac{Y_s}{h_2} = f \left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2}, \frac{R}{h_2}, \frac{d_{50}}{h_2}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \theta' \right) \quad (3.5)$$

$$\frac{L_s}{h_2} = f \left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2}, \frac{R}{h_2}, \frac{d_{50}}{h_2}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \theta' \right) \quad (3.6)$$

$$\frac{b_s}{h_2} = f \left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2}, \frac{R}{h_2}, \frac{d_{50}}{h_2}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \theta' \right) \quad (3.7)$$

El primer parámetro ($q/(g h_2^3)^{1/2}$), establece la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales (Número de Froude). El caudal es uno de los parámetros que tiene influencia directa con el cuenco de socavación, es decir, es directamente proporcional, esto es, a mayor caudal unitario, mayor es profundidad de socavación.

El segundo parámetro (H/h_2), compara la carga total respecto al calado aguas abajo del foso, cualitativamente, cuanto mayor es el valor de esta relación, mayor será las dimensiones del foso de socavación.

El tercer parámetro (R/h_2), relaciona el radio de la cuchara del salto en esquí con el calado aguas abajo del foso, cualitativamente, a mayor valor del radio de curvatura, menor profundidad de socavación.

El cuarto parámetro (d_{50}/h_2), establece la relación entre el diámetro característico del material del lecho y la profundidad de aguas abajo del foso, cualitativamente, mientras mayor sea el diámetro del material, mayor será la resistencia del lecho a la potencia del chorro y por consiguiente se esperaría una menor socavación.

El quinto parámetro (ρ_w/ρ_s), compara la densidad del agua respecto a la densidad del material del lecho. Esta relación, por lo general, se mantiene constante, por esta razón no es uno de los parámetros más influyentes que intervienen en el fenómeno.

Y el sexto parámetro (θ'), es la medida del ángulo de salida del salto en esquí que incide directamente en la ubicación y geometría del foso de socavación, cualitativamente, a mayor ángulo de salida, mayor es la profundidad de socavación.

3.4. RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA Y BASES PARA EL ANÁLISIS DE INFORMACIÓN TÉCNICA EXISTENTE

Con el fin de estudiar adecuadamente y optimizar el análisis de la información existente referente al flujo en el salto en esquí y su incidencia en la formación del cuenco de socavación, es necesario el escogimiento selectivo de los parámetros de mayor incidencia en el fenómeno físico, comparando la importancia de una fuerza o parámetro respecto a otro, despreciando el efecto de las fuerzas menores, y asumiendo que el fenómeno se encuentra gobernado por los parámetros de mayor relevancia.

Chandan Kumar y P. Sreeja (2012) mediante análisis de datos de laboratorio y de campo, determinaron valores de correlación de los parámetros que intervienen en el fenómeno de socavación, obteniendo las cantidades que se muestran en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2: Correlación de parámetros que intervienen en el fenómeno de socavación (profundidad de socavación) con base en datos de laboratorio (modelos) y de campo (prototipos)

PARÁMETRO	VALORES DE CORRELACIÓN	
	PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN (ds)	
	MODELOS	PROTOTIPOS
Caudal unitario, q	0.6529	0.6242
Carga total, H	0.2421	0.5318
Diámetro del material, d_{50}	0.1654	---
Radio de curvatura, R	0.1563	---
Profundidad agua abajo, h_2	0.1417	---
Ángulo de salida, θ'	0.0946	---

Fuente: (Kumar & Sreeja, 2012, pág. 99)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Con base en los valores de la tabla anterior, se determina que de los seis parámetros, los tres que más influyen en la profundidad de socavación son: el caudal unitario (q), la carga total (H) y el diámetro del material (d_{50}). Por lo tanto, las relaciones adimensionales relevantes en el proceso son:

$$\frac{Y_s}{h_2} = f \left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2}, \frac{d_{50}}{h_2} \right) \quad (3.8)$$

Este estudio se fundamenta en la información bibliográfica recopilada, por consiguiente, en las mediciones realizadas y datos obtenidos (presentados) en los diferentes estudios, donde el d_{50} por lo general no se presenta en las mediciones en campo. Por lo expuesto anteriormente y evaluando los parámetros de mayor incidencia en el fenómeno de socavación, para el análisis de la información técnica existe se consideran las siguientes relaciones:

$$\frac{Y_s}{h_2} = f \left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2} \right) \quad (3.9)$$

3.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La relación funcional para el proceso de socavación aguas abajo del salto en esquí, contempla los siguientes parámetros: caudal unitario, carga total, radio de curvatura de la cuchara, ángulo del labio del salto en esquí, calado aguas abajo del foso, tamaño característico del material del lecho, distancia a la máxima profundidad de socavación, ancho de socavación, aceleración de la gravedad, densidad del agua y la densidad del sedimento.

$$Y_s = f(q, H, R, \theta', h_2, d_{50}, g, \rho_w, \rho_s) \quad (3. 2)$$

- Las relación adimensional para la profundidad de socavación aguas abajo del salto en esquí, principalmente, relaciona los parámetros con la profundidad del colchón de agua.

$$\frac{Y_s}{h_2} = f\left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2}, \frac{R}{h_2}, \frac{d_{50}}{h_2}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \theta'\right) \quad (3. 5)$$

- Las relación adimensional restringida para la profundidad de socavación aguas abajo del salto en esquí, involucra básicamente el caudal unitario (número de Froude), la carga y el diámetro característico del material del lecho:

$$\frac{Y_s}{h_2} = f\left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2}, \frac{d_{50}}{h_2}\right) \quad (3. 8)$$

- Para el análisis de la información técnica existe se considera el número de Froude y la carga respecto a la profundidad del colchón:

$$\frac{Y_s}{h_2} = f\left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2}\right) \quad (3. 9)$$

- Dentro del análisis de información es importante considerar las particularidades de cada proyecto, las fórmulas obtenidas en base a datos de laboratorio generalmente representan el fenómeno particular que puede estar limitado a rangos de carga o caudal. Por tal motivo, se recomienda al momento de utilizar una formulación, establecer los rangos de aplicabilidad en función de las condiciones en las cuales fueron obtenidas.

CAPÍTULO 4.

SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA

4.1. ANÁLISIS DE LA LITERATURA TÉCNICA PARA LAS DIFERENTES FORMAS ESPECIALES DEL SALTO EN ESQUÍ

4.1.1. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES



El salto en esquí con deflectores o dientes, ha sido usado en varias presas alrededor del mundo, además, se han realizado varias investigaciones en modelos al fin de comprender de mejor manera los beneficios y comportamiento hidráulico de este tipo de salto en esquí. A continuación en la Tabla 4.1 se indican varios ejemplos de presas que usan este tipo especial de disipador.

Tabla 4.1: Presas con vertederos de salto en esquí con deflectores

Año	País	Presa
1954	Canadá	Presa Cleveland ⁴⁰ 
1954	República Checa	Presa Slapy ⁴¹ 

⁴⁰Leigh, H. (09 de 2008). *Cleveland Dam*. Recuperado el 11 de 2013, de [www.panoramio.com: http://www.panoramio.com/photo/13985256](http://www.panoramio.com/photo/13985256)

⁴¹induktorium. (2012). *Slapy Dam*. Recuperado el 11 de 2013, de [www.panoramio.com: http://www.panoramio.com/photo/65908938](http://www.panoramio.com/photo/65908938)

1963	República Checa	Presa Orlik ⁴² 
2005	Irán	Presa Sharhryar ⁴³ 

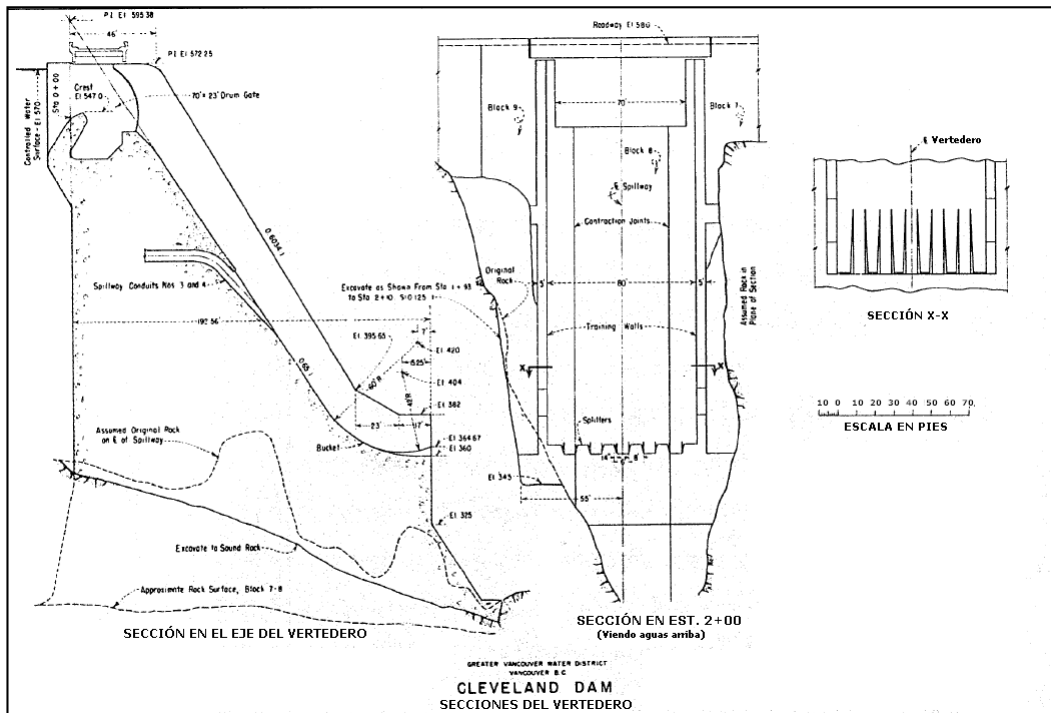
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

En 1954, la Bureau of Reclamation de Estados Unidos, realizó estudios hidráulicos complementarios para la presa Cleveland (Canadá). El modelo se realizó en una escala 1:60. Se hicieron ensayos para caudales de 142, 425, 708 y 1217 m³/s, y realizaron una comparación entre un cucharón convencional recto y uno con 6 deflectores dispuestos como se puede observar en la Figura 4.1. Además, realizaron la medición de presión en uno de los deflectores para detectar posibles presiones sub-atmosféricas, ver Figura 4.2.

⁴² *Orlik Dam.* (s.f.). Recuperado el 11 de 2013, de www.en-tv-adams.wz.cz: http://www.en-tv-adams.wz.cz/orlik_dam.html

⁴³ *ShahryarDam.* (s.f.). Recuperado el 11 de 2013, de www.tablieh.com: <http://www.tablieh.com/pages/dams/shahriar/index.html>

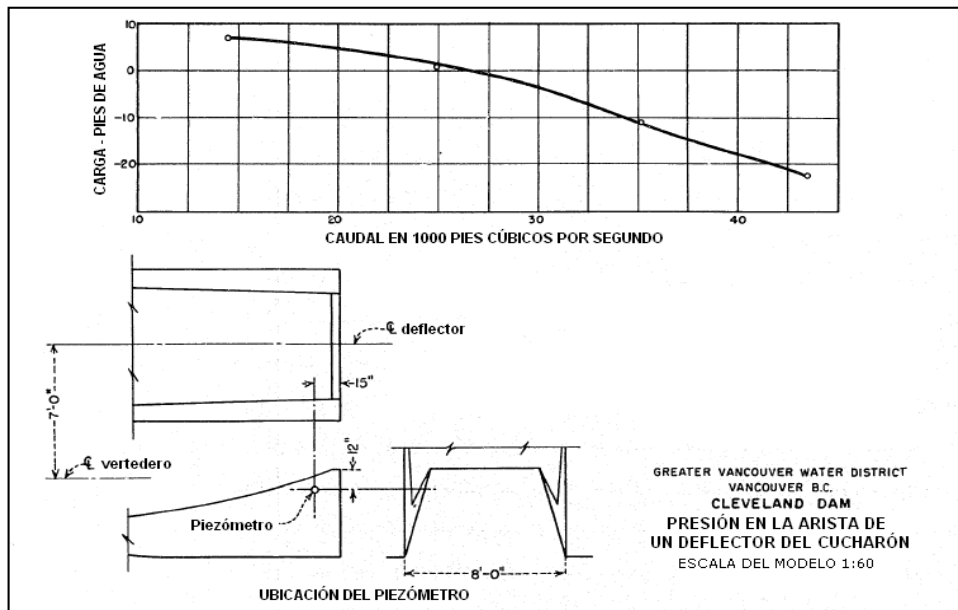
Figura 4.1: Esquema de la presa Cleveland



Fuente: (United States Department of de Interior Bureau of Reclamation, 1953)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 4.2: Presiones en la arista de un deflector de la presa Cleveland

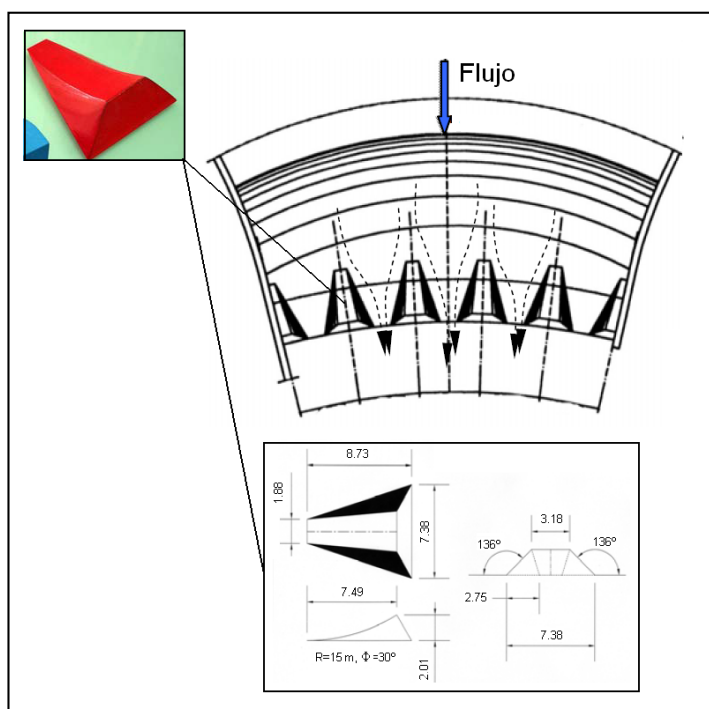


Fuente: (United States Department of de Interior Bureau of Reclamation, 1953)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge

En la última década, entre las investigaciones en modelos de salto en esquí con deflectores, está el realizado por Golzari (2004), en el cual compara el comportamiento de un salto en esquí convencional y salto en esquí con dientes trapezoidales. El experimento fue realizado en un modelo a escala 1:50 de una presa gran altura, ubicada en cauce estrecho y profundo. El material de lecho utilizado fue de un $d_{50} = 12\text{mm}$, se utilizaron varios caudales unitarios, y se realizaron tres diferentes escenarios: salto en esquí convencional con un ángulo de salida (ϕ_c) de 0° , salto en esquí convencional con $\phi_c = 20^\circ$, y un salto en esquí con deflectores con $\phi_c = 20^\circ$. El tipo de deflector utilizado y su disposición en el modelo se muestran en la Figura 4.3.

Figura 4.3: Tipo de deflector y disposición de los mismos en el modelo realizado por Golzari

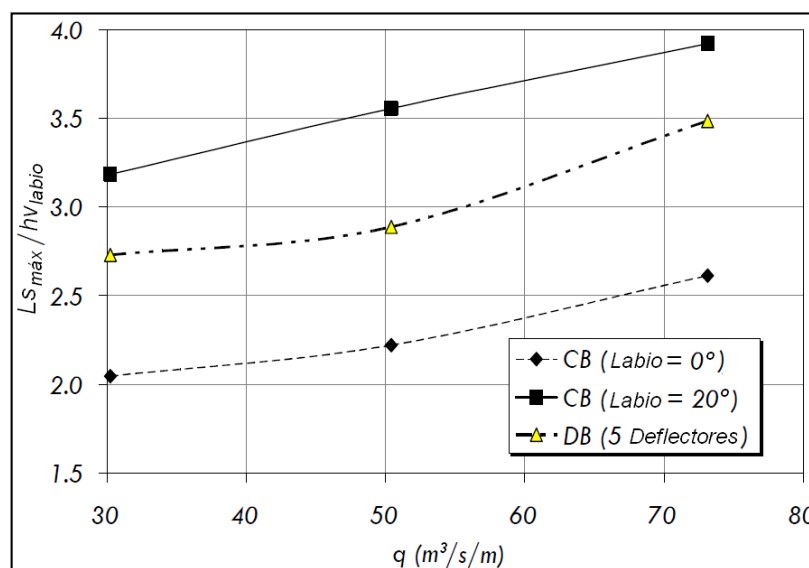


Fuente: (Golzari, 2004, pág. 372)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Del análisis de los resultados de laboratorio el autor establece una relación adimensional para la determinación del alcance máximo (L_s) en función del caudal unitario y de la carga de velocidad en el labio del cucharón ($h v_{\text{labio}}$), comparando las tres configuraciones, ver Figura 4.4.

Figura 4.4: Comparación de ubicación de la profundidad máxima de socavación entre un cucharón convencional con $\phi_c=0^\circ$, $\phi_c=20^\circ$ y cucharón con 5 deflectores ($\phi_c=20^\circ$)



Fuente: (Golzari, 2004, pág. 374)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

González Fariñas (2004), basándose en una investigación de laboratorio estableció el diseño de un trampolín tipo con deflectores tomando en cuenta un parámetro adimensional de socavación (**S**):

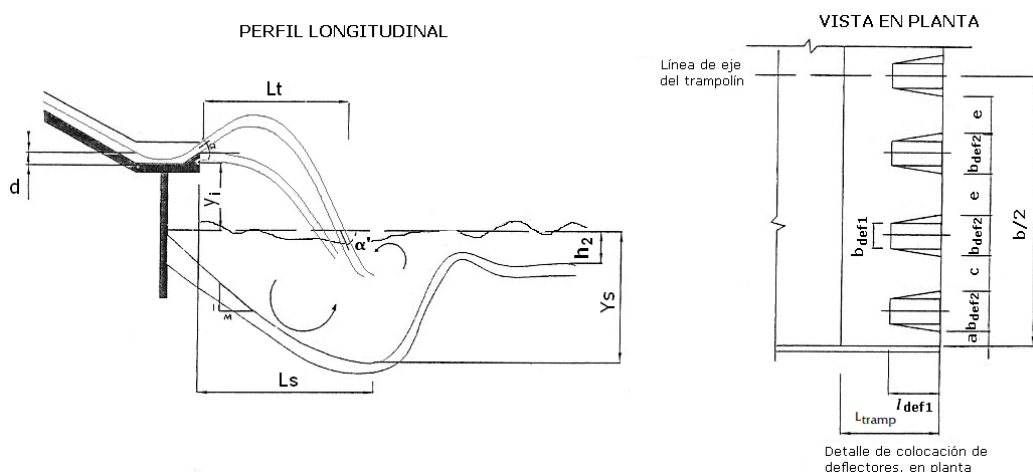
$$S = \frac{y_i + Y_s}{L_s} \quad (4.1)$$

En donde, y_i (m) es la distancia vertical entre el calado aguas abajo y el labio del cucharón, Y_s (m) es la profundidad de socavación máxima medida desde la superficie de agua del cauce aguas abajo, L_s (m) es la distancia en x desde el labio hasta donde se presenta la profundidad máxima de socavación.

El estudio consistió en la determinación del perfil de socavación y comportamiento del chorro, utilizando varios caudales, alturas de caída y calados en el cauce para diferentes alternativas. La determinación del trampolín óptimo toma en consideración aquella combinación entre Y_s y L_s donde el talud aguas arriba del cono de socavación sea el más alejado del pie de la presa. Entre las variantes utilizadas por González Fariñas

(2004) está la solera plana horizontal con y sin deflectores de diferentes dimensiones y características, trampolines de solera con pendiente adversa de 10° y 15° y trampolín de fondo circular con ángulo de salida de 10°. En la Figura 4.5 se puede observar un esquema y ejemplo de disposición de los deflectores utilizados en la investigación:

Figura 4.5: Esquema de trampolín y disposición de deflectores utilizados por González (2004)



Fuente: (González Fariñas, 2004, pág. 339)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Adicionalmente, González Fariñas (2004) establece una relación en función del número de Froude para que no se produzca cavitación en los deflectores, la cual está dada por la ecuación (4. 2).

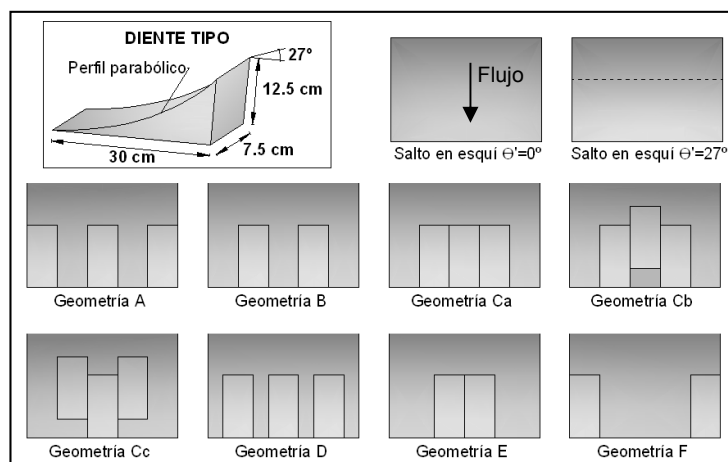
$$F_{m\acute{a}x} = \frac{V^2}{gd} = \frac{2.94(d + 10)}{d} \quad (4. 2)$$

En donde, **d(m)** es la calado en el cucharón, **F_{máx}(-)** es el número de Froude máximo. Cuando **F < F_{máx}**, no ocurre cavitación en los deflectores recomendados por el autor.

Erpicum, Archambeau, Dewals, & Piroton (2010), realizaron una investigación en un modelo a escala de un vertedero Creager con el objetivo de determinar el efecto de los deflectores en el cuenco de socavación. Los autores utilizaron varias disposiciones y número de

dientes de la misma forma (Figura 4.6), con varios caudales y compararon la forma y profundidad de socavación obtenidas en cada caso (Tabla 4.2).

Figura 4.6: Geometría de las configuraciones de deflectores probadas en modelo.



Fuente: (Ercicum et. al., 2010, pág. 108)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 4.2: Características y resultados obtenidos en estudios experimentales de saltos en esquí con deflectores

Configuraciones		Flujo q m ² /s	Características del cuenco de socavación							
Nº de ensayo	Geometría de deflectores		Volumen m ³	Superficie m ²	h _s máx m	l _s m	b _s m	Forma	Localización de h _s máx m	Localización de impacto mín. m
1	No	0.156	0.277	1.75	0.376	1.90	1.10	oval	1.16	0.25
2	A		0.322	1.94	0.429	1.90	1.25	oval	1.16	0.25
			0.336	1.91	0.430	2.00	1.25	oval	1.27	0.25
3	B		0.217	1.53	0.335	1.85	1.15	oval	0.83	0.25
4	Ca		0.129	1.13	0.294	1.15	1.10	redonda	0.91	0.25
5	Cb		0.114	1.08	0.285	1.10	1.15	redonda	0.86	0.20
6	Cc		0.129	1.25	0.301	1.40	1.10	oval/redonda	0.80	0.20
7	D		0.158	1.47	0.295	1.90	0.95	oval	0.83	0.25
8	E		0.184	1.31	0.335	1.30	1.15	redonda	0.98	0.25
9	F	0.391	2.18	0.472*	1.95	1.50	oval	1.37	0.15	
10	Full	0.156	0.263	1.85	0.445*	1.85	1.30	rectangular	1.40	0.40
11		0.140	0.145	1.38	0.333	1.50	1.10	rectangular	1.16	0.25
12		0.052	0.031	0.55	0.163	0.90	0.60	rectangular	0.74	0.12
13	Ca	0.140	0.064	0.78	0.222	0.95	0.95	2 óvalos	0.74	0.20
14		0.052	0.015	0.40	0.107	0.60	0.70	3 óvalos	0.52	0.15

Fuente: (Ercicum et. al., 2010, pág. 109)



Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Con base en la información recopilada y descrita en este numeral sobre saltos en esquí con deflectores, se puede decir que el uso de este tipo de salto en esquí tiene muchas variaciones en cuanto a disposición, forma y número de deflectores, donde la elección de la configuración de los mismos dependerá de las condiciones tanto del proyecto como del cauce en el que se implante la estructura. Además se puede decir que en los últimos años la tendencia en este tipo de salto en esquí es el uso de deflectores o dientes trapezoidales.

4.1.2. SALTO CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES




En lo referente a vertederos de excedencias en presas que disponen de estructuras de disipación tipo salto en esquí, dispuesto de un cucharón con paredes convergentes, en la Tabla 4.3 se muestra algunos ejemplos de estas soluciones alrededor del mundo.

Tabla 4.3: Ejemplos de saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes

Año	País	Presas
1951	Portugal	Presa Castello do Bode ⁴⁴ 
1970	China	Presa Longyang ⁴⁵ 

⁴⁴Gago, O. (2005). *Barragem Castelo Bode*. Recuperado el 11 de 2013, de en.wikipedia.org: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Barragem_Castelo_Bode.JPG

⁴⁵ *Vista del aliviadero de la presa Longyang*. (2013). Recuperado el 12 de 2013, de www.khl.com.cn: <http://www.khl.com.cn/skhlgc/jsyy/webinfo/2013/06/1368581876357013.htm>

1990	China	Presas Dongjiang ⁴⁶	
2008	China	Presas Guangzhao ⁴⁷	
2008	China	Presas Shuibuya ⁴⁸	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

De la revisión de la información técnica referente a la disipación de energía utilizando este tipo de salto en esquí, se encuentra que existe mayor investigación en los países orientales, como China. En los siguientes párrafos se resume algunos de los avances o estudios respecto al tema.

Esta forma especial de salto en esquí ha sido ampliamente aplicada en más de 10 proyectos en China. Este disipador se aplicó por primera vez en este país, en el salto en esquí del vertedero del proyecto Dongjiang a inicios de 1990, para un caudal unitario de $600 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. En el año 1992, mediante observaciones, se evidenció una buena relación entre el modelo y el prototipo (Figura 4.7) en lo referente a las características del chorro y

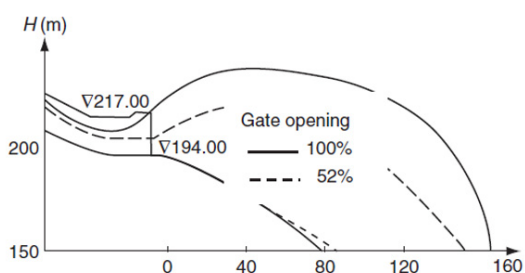
⁴⁶ Dong Jiang Slit-Bucket. (2005). Recuperado el 12 de 2013, de [jpkc.ncwu.edu.cn: http://jpkc.ncwu.edu.cn/slx/2/sltk/1302.jpg](http://jpkc.ncwu.edu.cn/slx/2/sltk/1302.jpg)

⁴⁷ Guangzhao Dam in Guizhou, China. (2008). Recuperado el 11 de 2013, de [en.wikipedia.org: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Guangzhao_Dam.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Guangzhao_Dam.jpg)

⁴⁸ Huo, G. (2011). Shuibuya Dam. Recuperado el 12 de 2013, de [www.skyscrapercity.com: http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1527044&page=3](http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1527044&page=3)

la socavación del lecho, aunque el caudal de descarga hasta ese momento no alcanzó su caudal de diseño. La geometría de la contracción quedó definida con un ancho de 10 m en la entrada del estrechamiento y un ancho de 2.5 m en la salida del salto en esquí, determinando un valor de contracción bc/b de 0.25.

Figura 4.7: Patrón del flujo en modelo y prototipo del chorro en la salida del salto en esquí de la presa Dongjiang



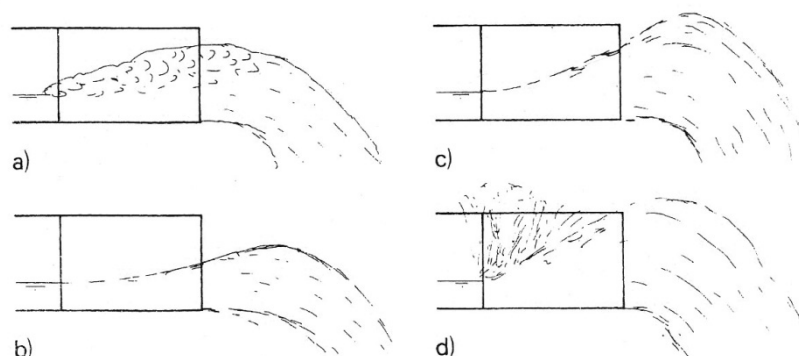
Fuente: (Guo J. , 2012, pág. 487)

Vischer y Hager (1995), en su literatura, presentaron cuatro tipos de flujo que puede ocurrir a lo largo del salto en esquí con estrechamiento de paredes (Figura 4.8):

- Resalto Hidráulico
- Chorro con bajo grado de dispersión
- Chorro con suficiente grado de dispersión
- Flujo forzado

Las características de los posibles tipos de flujo mencionados, dependen esencialmente de 3 factores: el número de froude de aproximación al estrechamiento ($F_o=V_o/(gd_o)^{1/2}$), el grado de convergencia (bc/b) y el ángulo de contracción (θ_c).

Figura 4.8: Tipos de flujo en un salto en esquí con estrechamiento de paredes a) Resalto hidráulico, b) Chorro con bajo grado de dispersión, c) Chorro con suficiente grado de dispersión, d) Flujo forzado



Fuente: (Vischer & Hager, 1995, pág. 118)

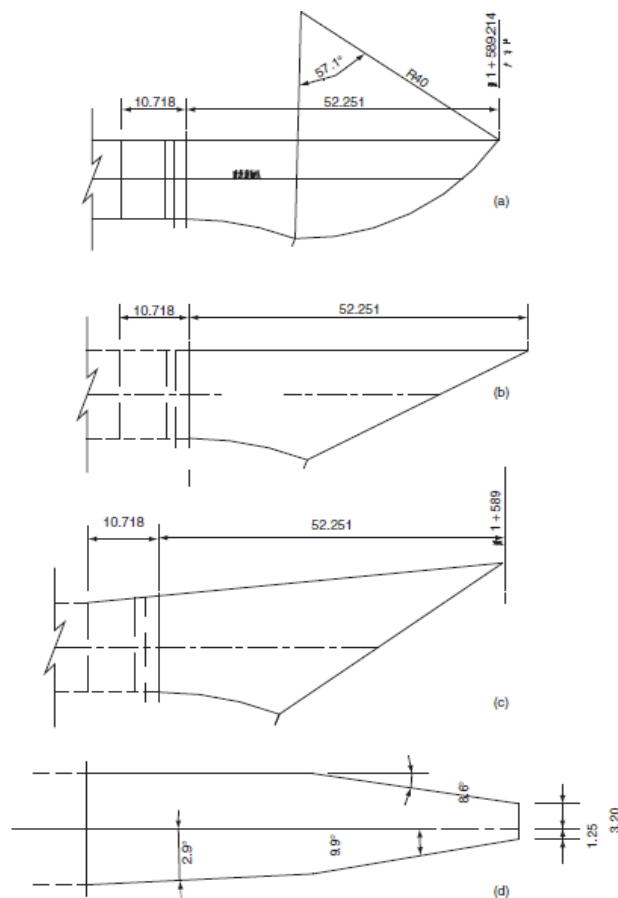
En lo referente a la distribución de presión en el cucharón, esta resulta aproximadamente de la suma de los efectos debido a la curvatura del fondo y al estrechamiento de las paredes. La presión máxima promedio en este tipo de salto en esquí ($P_{\text{máx}}/\gamma$), en función de la carga de energía en la aproximación (H_0), es igual a $(0.3 \text{ a } 0.5)H_0$.

En los últimos años, este tipo de salto en esquí también ha sido utilizado en varios aliviaderos tipo túnel en presas en China. Estas presas tienen características similares, alrededor de 300 metros de altura de la presa, capacidad de descarga de cada túnel de más de $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ y la altura de la descarga se encuentra a más de 200 metros.

Uno de estos casos es el proyecto Xiaowan (2010), el mismo que dispone de una presa en arco, una carga máxima de 292 m, un caudal en el túnel de descarga de $3535 \text{ m}^3/\text{s}$, cuya ubicación se encuentra en la margen izquierda. El cauce del río es estrecho, y la ladera de la margen derecha, aguas abajo de la zona de disipación, no dispone de una roca lo suficientemente resistente contra la erosión, por lo tanto, la socavación del lecho y la erosión de las márgenes fueron fenómenos importantes a considerar en el diseño de la estructura de disipación.

En el proyecto Xiaowan se estudiaron cuatro tipos de cubetas de lanzamiento (Figura 4.9): la primera, con una geometría en planta de un cucharón en forma de lengua, donde los resultados evidenciaron erosión de la margen derecha con una máxima profundidad de socavación de 15.6 m, y flujos de recirculación hacia la margen izquierda con una velocidad de 14 m/s; la segunda y tercera geometría de la cubeta de lanzamiento disponen de una salida oblicua en planta, en estos casos los resultados mejoraron, pero aún se presentó problemas de erosión cerca de la margen derecha; la cuarta geometría consiste en un estrechamiento de las paredes del cucharón, donde, luego de las modelaciones y su optimización, esta alternativa fue la seleccionada.

Figura 4.9: Vista en planta de cuatro tipos de cucharones estudiados para la presa Xiaowan a)Cucharón en forma de lengua, b)Cucharón oblicuo I, c)Cucharón oblicuo II, d)Cucharón con paredes convergentes



Fuente: (Guo J. , 2012, pág. 488)

En general, en la geometría seleccionada (estrechamiento con paredes laterales convergentes), la modelación física (escala 1:45) mostró: una buena dispersión del chorro a lo largo del cauce aguas abajo de la descarga, la erosión del lecho y las márgenes presentó una reducción considerable en comparación con las otras alternativas ensayadas. La configuración final del diseño quedó definida de la siguiente manera:

- El ancho se reduce de 14.0 m a 4.45 m, definiendo un valor de relación de contracción (relación de anchos) igual a 0.3178, y donde el eje del túnel difiere con el eje central de salida del cucharón contraído. La pared del lado izquierdo se encuentra a 3.2 m del eje del túnel y la pared del lado derecho a 1.25 m.
- Del lado derecho se consideran 2 secciones de contracción: la primera, tiene una longitud de 27.25 m de largo con un ángulo de contracción en planta de 2.9 grados; y la segunda, tiene de largo 25.0 m con un ángulo de contracción de 9.9 grados.
- Del lado izquierdo se presenta una sola contracción de 25.0 m de largo y un ángulo de 8.6 grados.

Adicionalmente, de las pruebas en modelo físico de la salida con estrechamiento (alternativa seleccionada), identificaron y obtuvieron los siguientes resultados:

- Elevación repentina del flujo en el tramo de contracción, producto del estrechamiento.
- Dispersión del chorro en sentido longitudinal en un rango de 200 m que alcanza ligeramente a la orilla izquierda y no genera recirculación, ver Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Profundidad de socavación y su ubicación producto del flujo procedente del cucharón con estrechamiento en la presa Xiaowan (China)

			MÁXIMA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN			
MODO DE OPERACIÓN	COTA RESERVORIO	COTA AGUAS ABAJO	ABSCISA	DISTANCIA DESDE EL EJE	COTA	PROFUNDIDAD (m)
Inicio de operación	1236,50	998,92	0+325	5 m a la derecha	972,30	7,7
Inicio de operación	1236,50	1000,60	0+330	5 m a la izquierda	972,80	7,2
Inicio de operación	1236,50	1002,69	0+310	5 m a la izquierda	973,80	6,8
Caudal de diseño	1238,30	1012,73	0+340	5 m a la izquierda	979,30	0,7
Caudal de chequeo	1242,51	1016,70	NO SOCAVA			

Fuente: (Guo J. , 2012, pág. 489)

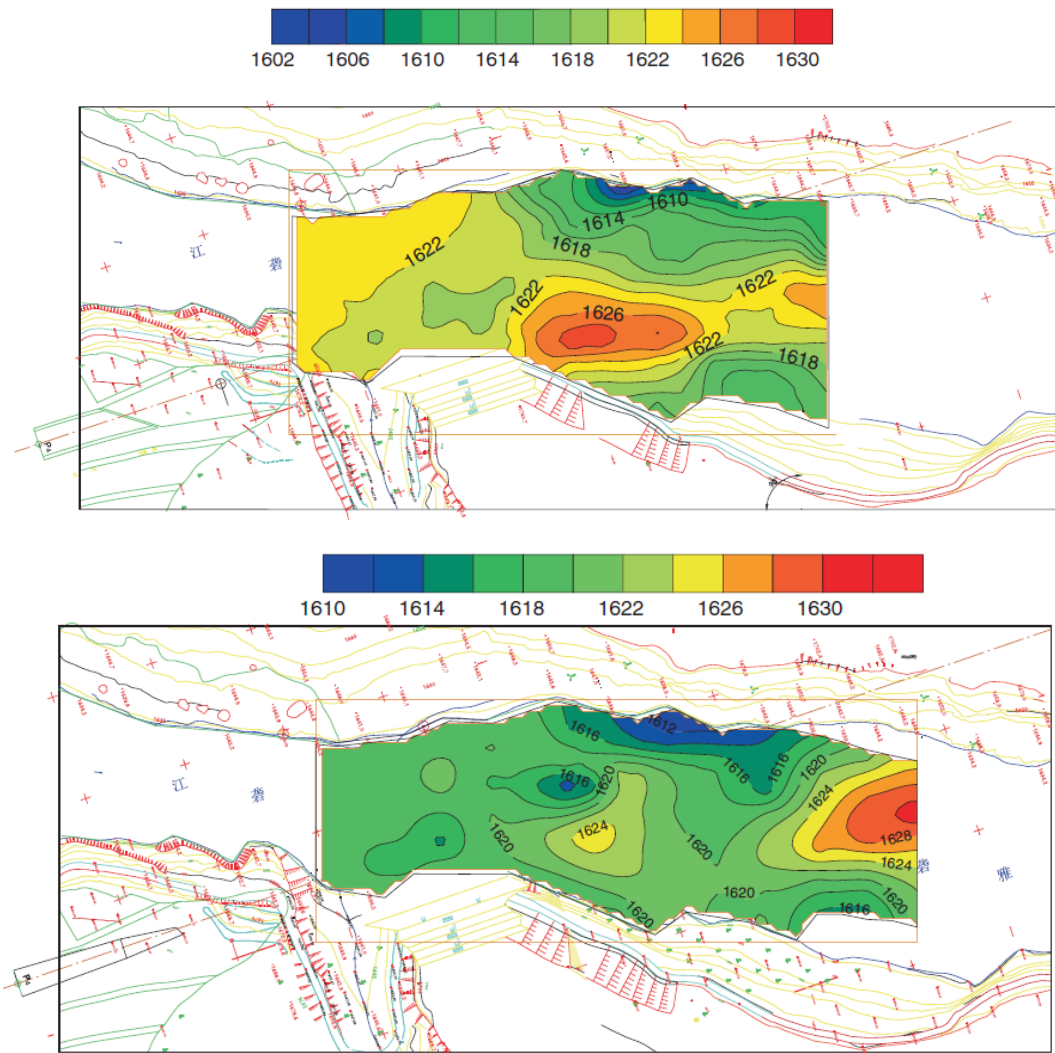
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

- Velocidad máxima del flujo a lo largo de la margen derecha es menor a 8 m/s, lo que indica una reducción de 40% respecto a la alternativa original (cucharón en forma de lengua).
- Profundidad máxima de socavación de aproximadamente 8 m, en condiciones más desfavorables, es decir, considerando una cota baja del nivel aguas abajo.
- En la mayoría de escenarios, las velocidades del flujo a lo largo de ambas márgenes son menores de 5 m/s, reduciendo en gran medida el trabajo de protección de las mismas.

Estudios en modelo físico similares se han realizado para el vertedero tipo túnel en el proyecto Xiluodu (2005) y para el aliviadero tipo túnel Jinping (2003), ambos proyectos en China. En estos estudios (modelo escala 1:30), se han obtenido resultados que indican una reducción importante del foso de socavación al utilizar un cucharón con paredes convergentes a cambio de un cucharón oblicuo. La Figura 4.10 muestra la configuración de los fosos de socavación obtenidas para las alternativas mencionadas

para el vertedero en túnel Jinping, considerando que en el reservorio el nivel del agua se encuentra en la cota de diseño, con lo cual, la profundidad de socavación alcanza los 6.3 m ($H=278$ m, $Q=3535$ m³/s). El patrón de flujo para el salto con estrechamiento se muestra en la Foto 4.1.

Figura 4.10: Cuencos de socavación en el proyecto Jinping para un aliviadero tipo túnel con un cucharón oblicuo (arriba) y para un cucharón con estrechamiento (abajo)



Fuente: (Guo J. , 2012, pág. 490)

Foto 4.1: Vista en perfil del chorro de salida en el modelo del aliviadero del proyecto Jinping



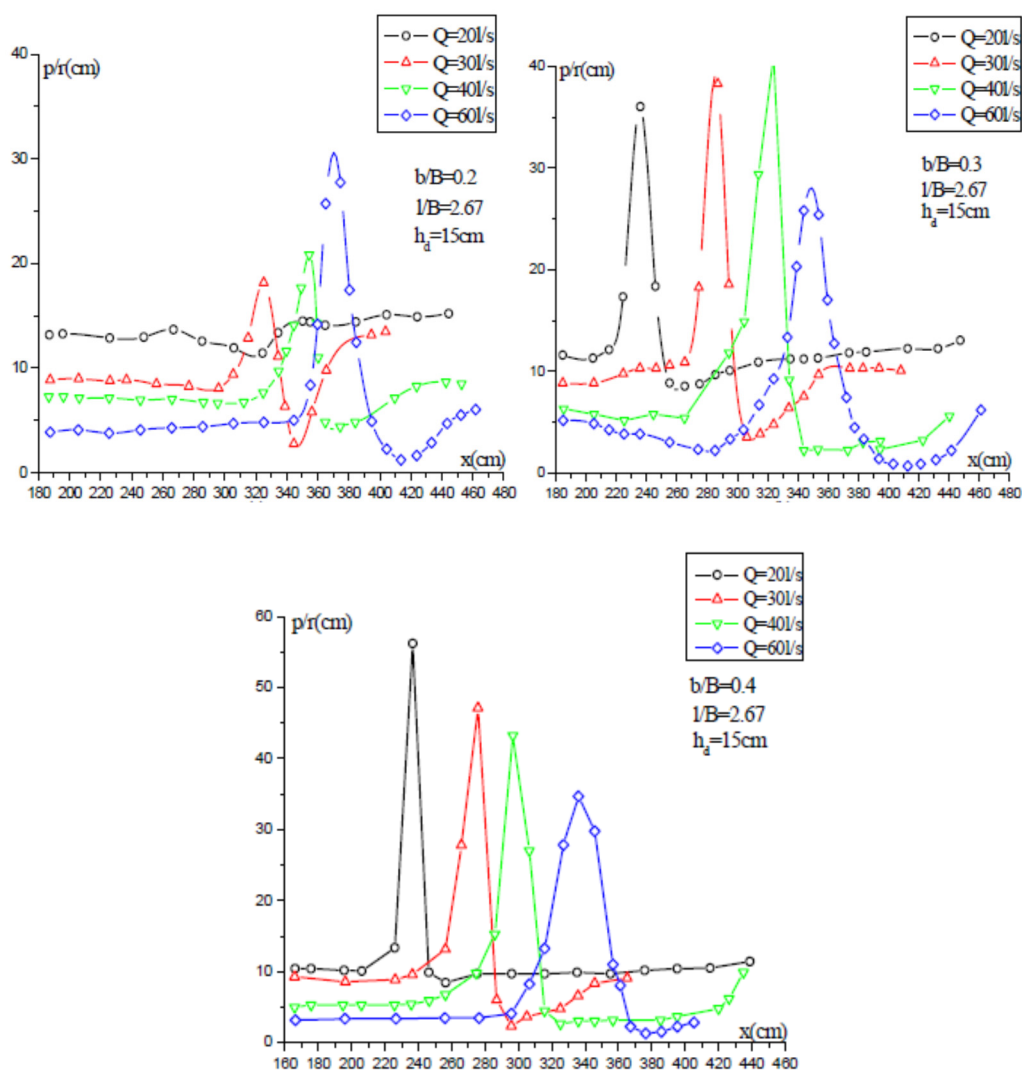
Fuente: (Guo J. , 2012, pág. 490)

En el año 2006, en lo que referente a la fluctuación de la presión en el fondo del lecho del colchón de aguas (acción del chorro-disipación), WuWen-ping, ZHANG Xiao-hong, ZHANG Hai-long y TIAN Jia-ning, en el Instituto de Ingeniería de Recursos Hídricos e Hidroelectricidad de la Universidad de Tecnología Xi'an, realizaron un estudio experimental considerando diferentes relaciones de contracción y compararon un salto en esquí convencional con uno con estrechamiento gradual de paredes.

En el estudio se consideró 4 tipos de cucharones, con relaciones de contracción de 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5, para caudales de 20 l/s, 30 l/s, 40 l/s, 50 l/s y 60 l/s.

La presión generada en el fondo del cuenco, debido al choque del chorro, se encuentra influenciada por las condiciones de entrada del flujo al colchón (profundidad del agua en el cuenco) y por la forma del cucharón del salto en esquí. La Figura 4.11 muestra la variación de la presión en el fondo del lecho para 3 valores de contracción (0.2, 0.3, 0.4), considerando un mismo valor de profundidad del colchón de agua.

Figura 4.11: Variación de la presión en el fondo del cuenco para valores de contracción del cucharón de 0.2, 0.3 y 0.4



Fuente: (Wen-ping, Zhang, Zhang, & Tian, 2006, pág. 512)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Del análisis de los gráficos de la variación de presión en el cuenco considerando varias contracciones y varios caudales, se observa:

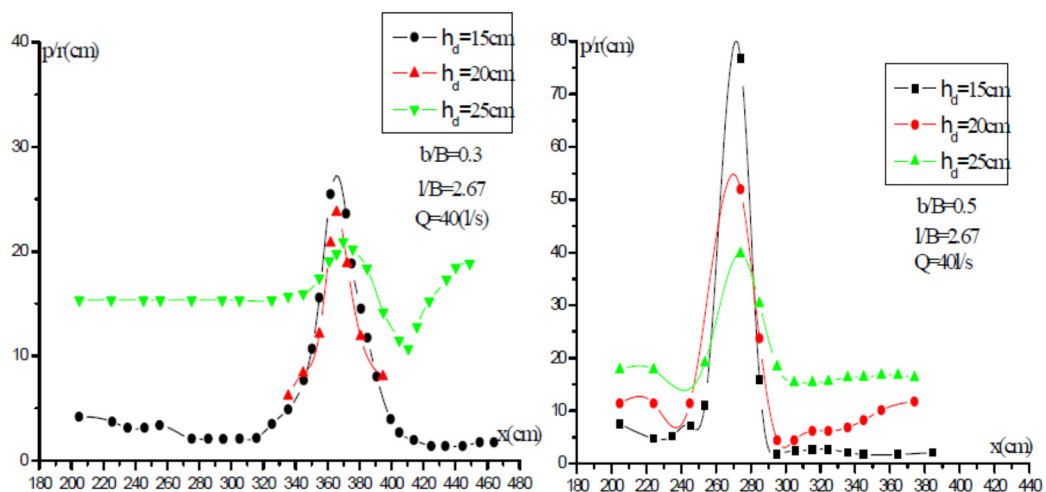
- En general, para un rango de caudales de vertido, a una mayor contracción del flujo ($b_c/b=0.2$), la presión en el fondo del colchón es menor. Por lo contrario, para una menor contracción ($b_c/b=0.4$), la presión en el fondo del colchón es mayor. En casi todas las mediciones se observa un pico, evidenciando una distribución no uniforme de presiones. Excepto, para el menor caudal y la mayor

contracción, en donde la distribución es uniforme, debido a una buena difusión del chorro (menor presión por unidad de área).

- Para un mismo caudal y una misma profundidad del colchón, a menor contracción, mayor valor del pico de presión en el fondo del cuenco, esto sucede debido a la que el chorro es más compacto y no existe la suficiente aeración.

De la misma manera, la Figura 4.12 muestra la variación de la presión en el fondo del lecho para 2 valores de contracción (0.3 y 0.5), considerando diferentes valores de profundidad del colchón de agua (15 cm, 20 cm y 25 cm).

Figura 4.12: Variación de la presión en el fondo del cuenco para valores de contracción del cucharón de 0.3 y 0.5, y diferentes profundidades del colchón de aguas



Fuente: (Wen-ping, Zhang, Zhang, & Tian, 2006, pág. 513)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Del análisis de la Figura 4.12, se observa que:

- En general, a mayor profundidad del colchón, menor valor del pico de presión, y por ende, mejor distribución de presiones.
- Para una mayor contracción ($bc/b=0.3$), el rango de variación de los picos de presión para varias profundidades del colchón, es

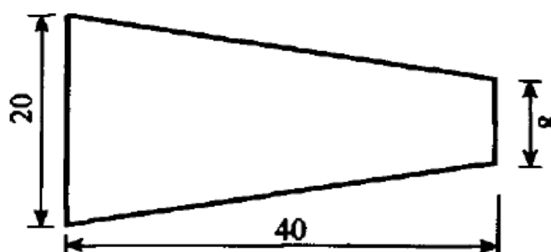
menor en un 25% en comparación con una contracción menor ($bc/b=0.5$).

Comparando el salto en esquí convencional con el de estrechamiento de paredes, la presión máxima en el cuenco aguas abajo obtenida con un cucharón con estrechamiento, es 3 veces menor⁴⁹ a la obtenida en un cucharón convencional del mismo ancho.

En el año 2012, HanShou-du, Liu Han-sheng y Ni Han-gen, para la determinación de las características hidráulicas del flujo a lo largo de un salto en esquí con estrechamiento, realizó cálculos teóricos y pruebas en modelo, en donde para este último consideró lo siguiente:

- Un estrechamiento de 20 cm a 8 cm, es decir, una valor de convergencia $bc/b = 0.4$, en un largo de 40 cm, ver Figura 4.13.

Figura 4.13: Geometría en planta del estrechamiento modelado para el cálculo hidráulico del flujo



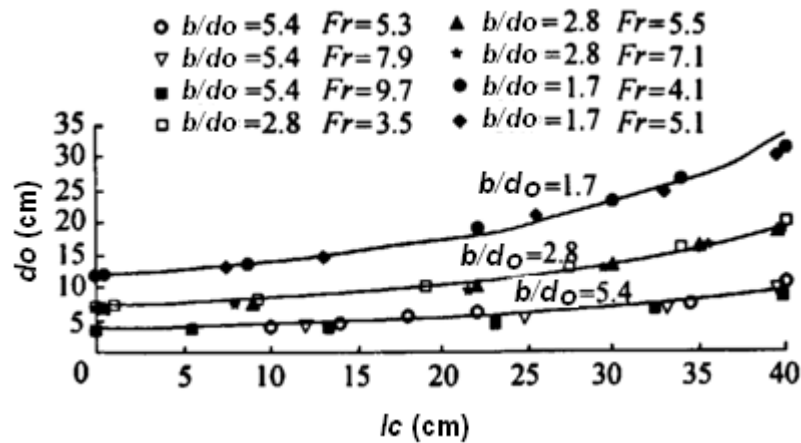
Fuente: (Shou-du, et. al., 2012, pág. 54)

- Relación de aspecto (ancho/calado) en la entrada: $1.7 \leq b/d_o \leq 5.4$.
- Número de Froude en la entrada (F_o): $3.5 \leq F_o \leq 9.7$.
- Velocidad en la entrada (V_o): $2.96 \text{ m/s} \leq V_o \leq 5.8 \text{ m/s}$.
- Caudal de descarga en el modelo (Q) hasta 130 l/s.

⁴⁹Wu Wen-ping, ZHANG Xiao-hong, ZHANG Hai-long, TIAN Jia-ning (2006). *Shock action of the jet flow from slit-type buckets on the bottom of the trough*. China: Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics (CCSH). p. 514.

En las Figura 4.14 y Figura 4.15 se muestran los perfiles flujo en el eje del cucharón y en la pared del estrechamiento, medidos para varias relaciones de aspecto (b/d_o) y con distintos números de Froude (Fr).

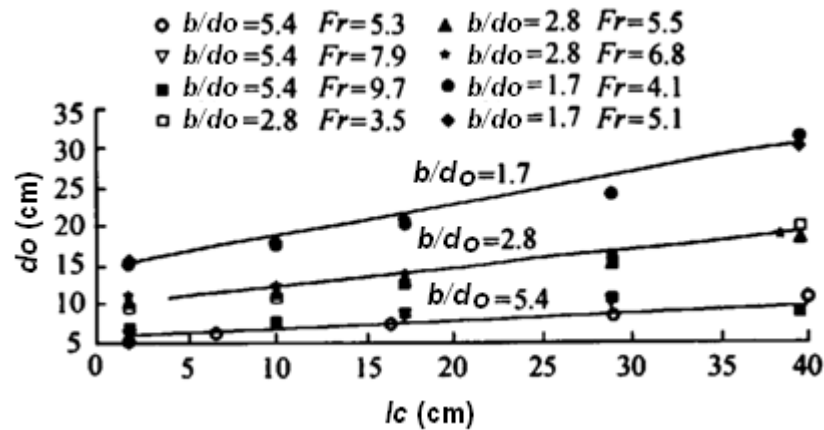
Figura 4.14: Perfiles del flujo en el eje del cucharón con estrechamiento



Fuente: (Shou-du, et. al., 2012, pág. 55)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 4.15: Perfiles del flujo en la pared de estrechamiento del cucharón



Fuente: (Shou-du, et. al., 2012, pág. 55)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Para el cálculo del número de Froude (Fr_c) y el calado al final del estrechamiento (h_c), Han Shou-du et al. (2012), presentaron dos relaciones: una entre los anchos (b , b_c) y otra entre los calados (d_o , d_c)

de la contracción, ambas con sus correspondientes números de Froude (Fr_0 , Fr_c). Así:

$$\frac{b_c}{b} = \frac{\sqrt{\frac{(2+Fr_c^2)^3}{Fr_c^2}}}{\sqrt{\frac{(2+Fr_0^2)^3}{Fr_0^2}}} \quad (4.3)$$

Considerando que la energía específica se mantiene constante en la transición, se tiene:

$$\frac{d_0}{d_c} = \frac{Fr_c^2 + 2}{Fr_0^2 + 2} \quad (4.4)$$

Al comparar los valores calculados de la profundidad al final de la contracción (dc_{cal}) con los valores de calados medidos en modelos (dc_{med}), obtuvieron la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Comparación de los calados calculados y medidos a la salida de un salto con estrechamiento

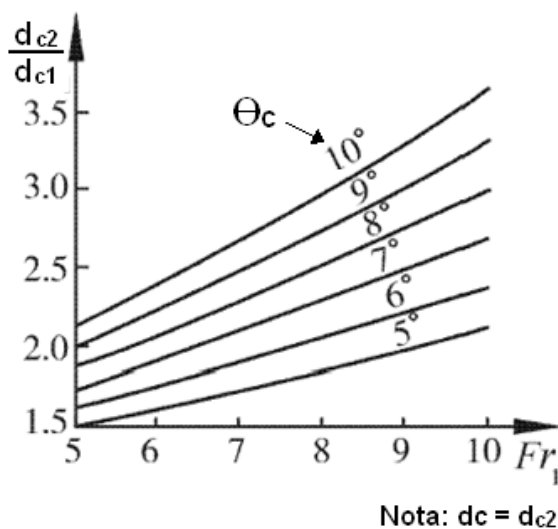
EN LA APROXIMACIÓN		CALADO EN LA SALIDA		ERROR
Ancho/calado	Froude	Calculado	Medido	%
b/do	Fro	dc _{cal} (cm)	dc _{med} (cm)	
5,4	5,3	9,81	10,70	8,3
5,4	7,9	9,46	9,47	0,1
5,4	9,7	9,37	8,81	-6,4
2,8	3,5	21,80	20,10	-8,5
2,8	5,5	18,80	18,80	0,0
2,8	7,1	18,40	18,90	2,6
1,7	4,1	33,10	31,40	-5,4
1,7	5,1	31,30	30,20	-3,6

Fuente: (Shou-du, et. al., 2012, pág. 55)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Otra forma de obtener el calado (dc) es gráficamente, mediante la utilización del ábaco mostrado en la Figura 4.16.

Figura 4.16: Ábaco para el cálculo del calado en la salida de un salto en esquí con estrechamiento lateral de paredes



Fuente: (Hangen, 2000, pág. 211)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

En el año 2012, en la Escuela Politécnica Nacional (Laboratorio del CIERHI), para la presa Toachi (Proyecto Hidroeléctrico Toachi – Pilatón), se modeló la alternativa de salto en esquí con estrechamiento de paredes laterales, para la geometría descrita a continuación:

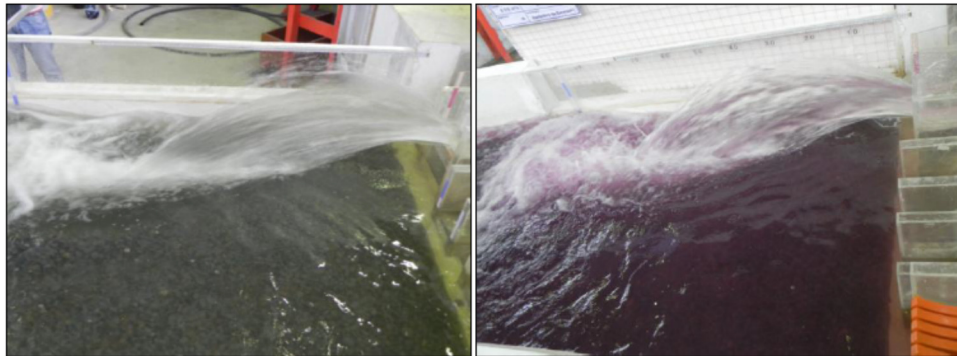
- Ángulo de contracción de 13.79 grados
- Ángulo de salida igual a 12 grados
- El ancho de la contracción se reduce 0.28 m a 0.14 m
- Largo de la contracción de 0.28 m
- Caudal en prototipo de 397.0 m³/s y 605.45 m³/s.
- Escala en modelo físico: 1:50

En la Foto 4.2, se muestra el patrón de flujo del chorro para un caudal de 397 m³/s y 605.4 m³/s.

En este análisis, la alternativa de estrechamiento gradual no resultó la más indicada debido a que otras alternativas ensayadas presentaron

mejores resultados en lo referente a la conformación y ubicación del foso de socavación, por tal motivo, no fue elegida para el diseño final de la presa.

Foto 4.2: Salto en esquí con estrechamiento de paredes para la Presa Toachi, $Q=397 \text{ m}^3/\text{s}$ (izquierda), $Q= 605.4 \text{ m}^3/\text{s}$ (derecha)



Fuente: (Casa, 2012, pág. 146)

4.1.3. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE UN SOLO LADO (DEFLECTOR LATERAL)

La forma o tipo de los deflectores laterales a considerar al final de un vertedero, depende de la pendiente y ancho de la rápida del aliviadero. El salto en esquí con estrechamiento de un solo lado o con un deflector lateral ha sido usado en vertederos estrechos, con el objetivo de desviar el flujo a la ubicación deseada en el colchón aguas abajo de la presa. A continuación en la Tabla 4.6 se indican varios ejemplos de presas que usan este tipo.

Tabla 4.6: Presas con vertederos de salto en esquí con deflector lateral (estrechamiento de un solo lado).

Año	País	Presa
1965	Suiza	Presa Contra / Verzasca ⁵⁰ 
2012	Ecuador	Presa Toachi Pilatón (Modelo-Alternativa) ⁵¹ 

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

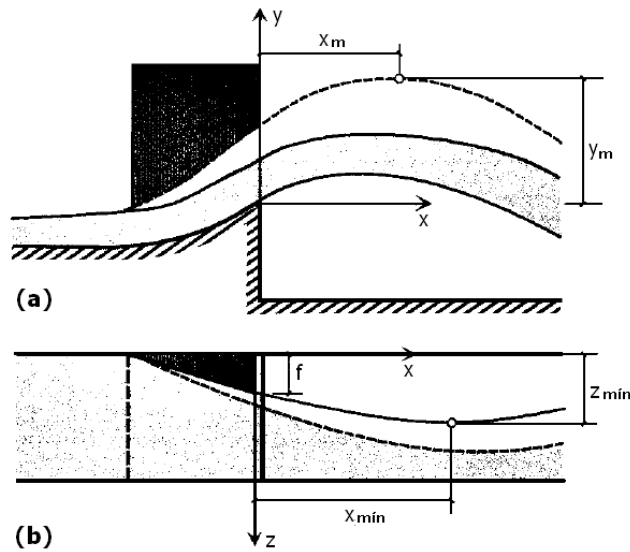
En el año 2000, Hager y Juon, estudiaron la influencia del salto en esquí con deflector lateral (Froude= 3, 5 y 7) comparándolo con el salto en esquí convencional.

La presencia de un deflector lateral en el salto en esquí permite distinguir 2 zonas: una donde circula el flujo principal y otra donde existe una expansión del flujo generada por la onda de choque, como se puede observar en la Figura 4.17.

⁵⁰Mervine, E. (2011). *Verzasca Dam 3. Switzerland, June 2010*. Recuperado el 12 de 2013, de blogs.agu.org: <http://blogs.agu.org/georneys/2011/07/05/a-swiss-fold/>

⁵¹Dávila, D. (2013). *Estudio experimental sobre el alcance y la dirección del chorro a la salida de los vertederos de excesos de la presa Toachi, proyecto Toachi Pilatón*. Quito: Universidad Central del Ecuador.p 58.

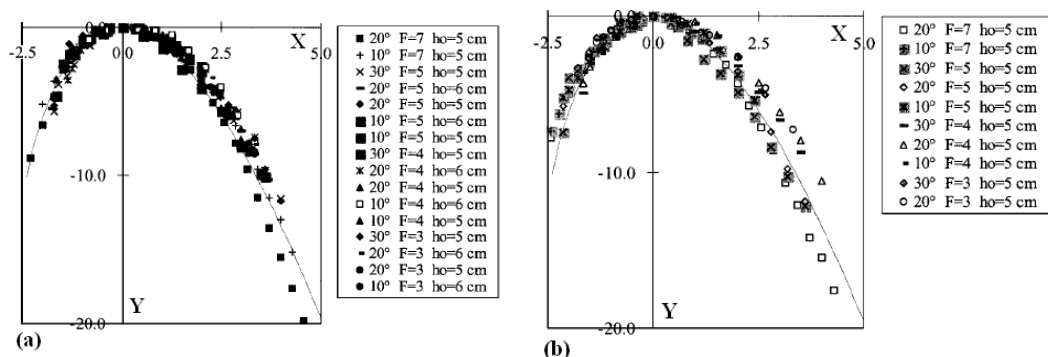
Figura 4.17: Vista en perfil (a) y en planta (b) del patrón de flujo a través de un cucharón con deflector lateral



Fuente: (Hager & Juon, 2000, pág. 843)
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Los mismos autores también presentaron un ábaco normalizado para la definición del perfil de la napa superior, producto de la onda de choque originada por la presencia de un deflector lateral (Figura 4.18), obtenido para relaciones d_0/R entre 0.20 y 0.25, y números de Froude que varían de 3 a 7. En el ábaco, X , Y , corresponden a los valores normalizados de las coordenadas del perfil.

Figura 4.18: Perfil normalizado de la napa superior producto de un deflector lateral (a) $R=20$ cm, (b) $R=25$ cm



Fuente: (Hager & Juon, 2000, pág. 843)

Las coordenadas del punto del alcance máximo del chorro (x_m , y_m) dependen exclusivamente del número de Froude de aproximación. Las fórmulas de X_m , y_m , X y Y , se presentan a continuación:

$$x_m = 0.05Fr_o^3 d_o \quad (4.5)$$

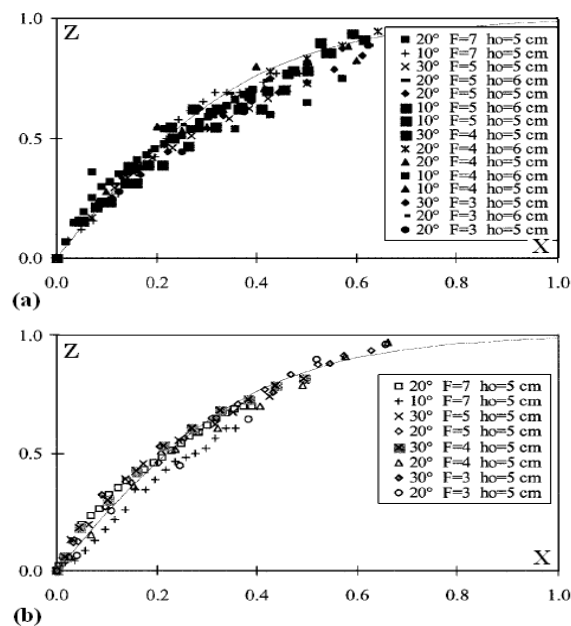
$$y_m = 0.45Fr_o^2 d_o \sin \theta c^{3/4} \quad (4.6)$$

$$X = \frac{x}{d_o Fr_o} \quad (4.7)$$

$$Y = \frac{y - y_m}{d_o \sin \theta c^{3/8}} \quad (4.8)$$

De manera similar, para esta forma especial se generó un gráfico normalizado que permite determinar la trayectoria en planta del flujo del lado del deflector (Figura 4.19), obtenido para relaciones d_o/R entre 0.20 y 0.25, y números de Froude que varían de 3 a 7. En el ábaco, X y Z son números adimensionales que corresponden a los valores normalizados.

Figura 4.19: Trayectoria en planta de la napa externa generada por un deflector lateral (a) $R=20$ cm, (b) $R=25$ cm



Fuente: (Hager & Juon, 2000, pág. 843)

La coordenada donde se presenta el mínimo espesor del chorro en planta (x_{min} y z_{min}) depende del calado y principalmente del número de Froude en la aproximación al deflector. Adicionalmente, el valor de z_{min} también es influenciado significativamente por el ángulo del deflector lateral (θ_c). Las fórmulas de x_{min} , z_{min} , X y Z , se presentan a continuación:

$$x_{min} = 4Fr_o^2 d_o \sin \theta_c^{0.25} \quad (4.9)$$

$$z_{min} = 5Fr_o^2 d_o \sin \theta_c^2 \quad (4.10)$$

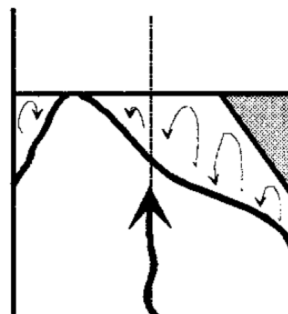
$$X = \frac{x}{x_{min}} \quad (4.11)$$

$$Z = \frac{z - f}{z_{min} - f} \quad (4.12)$$

$$Z = \tanh X^{2.5} \quad (4.13)$$

En lo que respecta a la posible condición de ahogamiento del flujo en el cucharón con deflector lateral, los mismos autores (Hager y Juon - 2000) proporcionaron criterios respecto al estrangulamiento o ahogamiento del flujo (Resalto Hidráulico), generado por la presencia de la recirculación del flujo y de la onda de choque producto del deflector, ver Figura 4.20. La presencia de la condición señalada se define en función del número de Froude en la aproximación al deflector F_{roi} (Froude de aproximación incipiente), el mismo que es función del ángulo del deflector lateral (θ_c) y de la altura del cucharón relativa a la profundidad de flujo ($W=w/d_o$).

Figura 4.20: Condición inicial del flujo ahogado en un cucharón con deflector



Fuente: (Hager & Juon, 2000, pág. 844)

Para ángulos de deflector menor o igual a 30 grados, el número de Froude de aproximación incipiente queda definido por la siguiente ecuación:

$$Fr_{oi} = 1 + \left(\frac{9}{4}W\right)^{5/4} + \frac{5}{4}\theta_c^2 \quad (4.14)$$

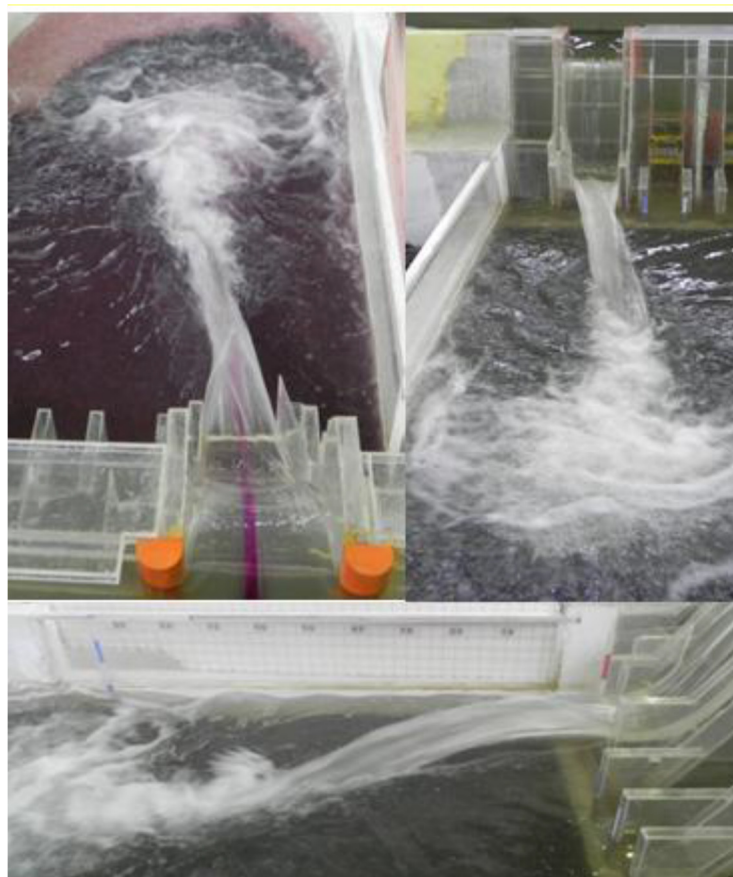
Si se considera que W es generalmente 1, para los ángulos del deflector de 10 y 30 grados, el número de Froude de aproximación incipiente (Fr_{oi}) es 3.8 y 4.1, respectivamente. Por otro lado, para valores grandes de W , el efecto del ángulo del deflector es relativamente pequeño.

En el año 2012, en la Escuela Politécnica Nacional (laboratorio del CIERHI), para la presa Toachi (proyecto hidroeléctrico Toachi – Pilatón), se modeló la alternativa de salto en esquí con estrechamiento de un solo lado (deflector lateral), considerando la geometría descrita a continuación:

- Ángulo de contracción lateral (deflector) de 13.4 grados.
- Ancho del deflector igual 0.07 m.
- Largo del deflector de 0.28 m.
- Radio de curvatura del cucharón igual a 0.28 m.
- Ángulo de salida igual a 12 grados.
- El ancho de la contracción se reduce 0.28 m a 0.21 m.
- Caudal en prototipo de 397.0 m³/s, 605.45 m³/s, y un caudal unitario en la aproximación de 27.4 m³/s/m y 41.8 m³/s/m, respectivamente.
- Escala en modelo físico: 1:50.

En la Foto 4.3, se muestra el patrón de flujo del chorro para la alternativa ensayada de salto en esquí con deflector de un solo lado en la Presa Toachi.

Foto 4.3: Alternativa de salto en esquí con deflector lateral para la Presa Toachi




Fuente: (Dávila, 2013, pág. 99)

En este análisis, la alternativa con estrechamiento de un solo lado no resultó la más indicada debido a que evidenció la mayor profundidad de socavación respecto a otras alternativas, por tal motivo, no fue elegida para el diseño final de la presa.

4.1.4. SALTO EN ESQUÍ CON UMBRAL DE ALTURA VARIABLE

El uso de saltos en esquí con umbral de altura variable no ha sido hasta el momento de amplia aplicación. Este tipo de saltos en esquí se ha utilizado en muy pocos casos ya que han sido probados como alternativas de disipación para casos muy puntuales, dando resultados no lo suficientemente satisfactorios en comparación a otro tipo de saltos en esquí especiales. A continuación se presenta ejemplos del uso de este tipo de saltos en esquí.

Tabla 4.7: Presa y modelo con vertederos de salto en esquí con umbral de altura variable

Año	País	Presa
1965	Estados Unidos	Presa Chili Bar ⁵² 
2012	Ecuador	Presa Toachi Pilatón (Modelo-Alternativa) ⁵³ 

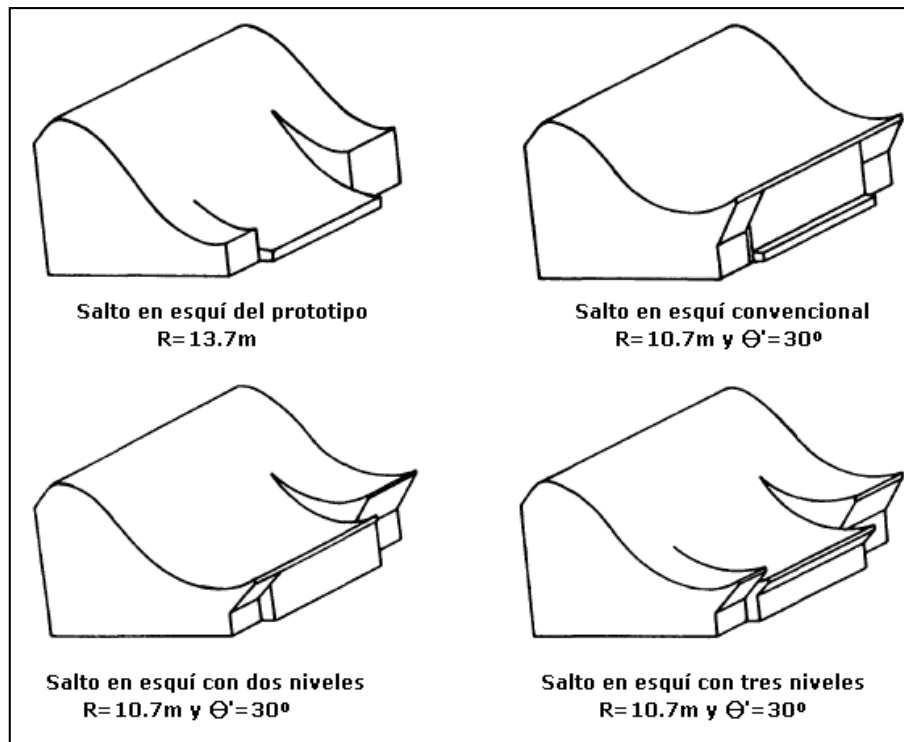
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Dodge & Mefford (1990), realizaron un estudio hidráulico en modelo de la presa Chili Bar con el objetivo de establecer una modificación de la configuración de salto en esquí existente, debido a problemas de erosión en el dissipador de energía en el prototipo. En el estudio se probaron tres modificaciones: la primera consistía en un cucharón completo, la segunda en un cucharón con 2 niveles y la tercera en un cucharón con 3 niveles, todas con un radio de 10.7 m. y con un ángulo de salida de 30°, como se muestra en la Figura 4.21.

⁵²Pacific Gas & Electric Company (PG&E). (2013). *Chili Bar Dam*. Recuperado el 12 de 2013, de <http://www.waterboards.ca.gov>: http://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/water_quality_cert/chilibar_ferc_2155.shtml

⁵³Dávila, D. (2013). *Estudio experimental sobre el alcance y la dirección del chorro a la salida de los vertederos de excesos de la presa Toachi, proyecto Toachi Pilatón*. Quito: Universidad Central del Ecuador.p 61.

Figura 4.21: Alternativas de salto en esquí con umbral de altura variable utilizadas en modelo hidráulico para la presa Chili Bar

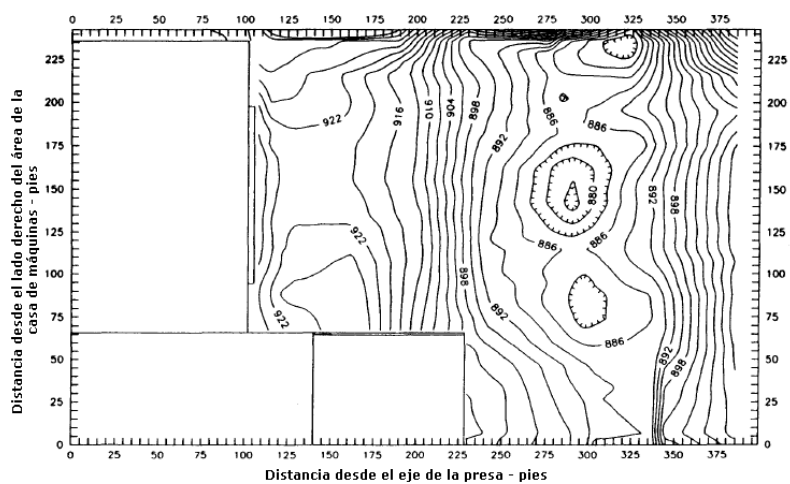


Fuente: (Dodge & Mefford, 1990, pág. 21)

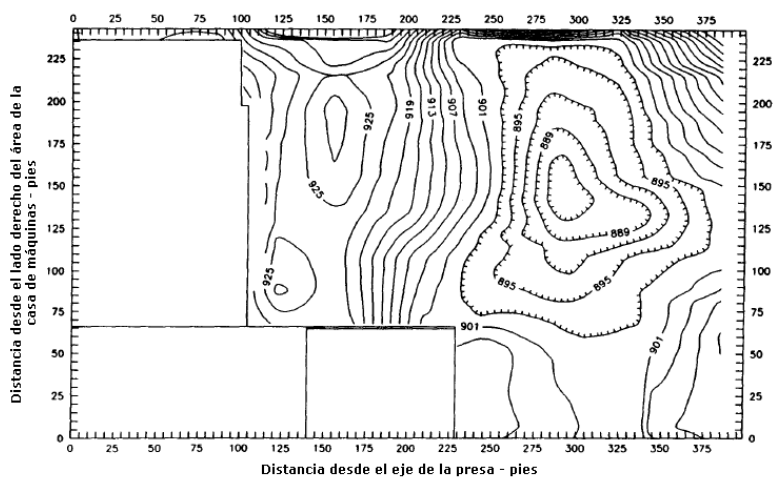
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

En lo que respecta a las alternativas, los autores evaluaron los patrones de socavación (Figura 4.22) para caudales que oscilan entre el 10% y 100% de la máxima crecida probable (7079.2 m³/s) y realizaron mediciones de presiones tanto en la cresta del vertedero como en el cucharón.

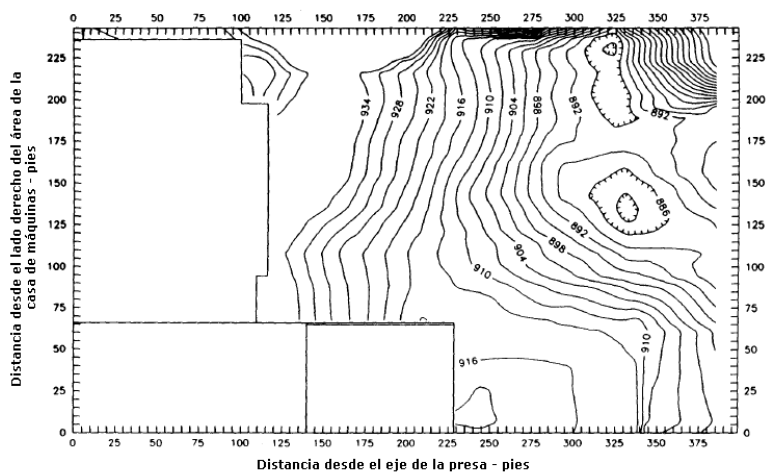
Figura 4.22: Patrones de socavación de saltos en esquí con umbral de altura variable



SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL - CONFIGURACIÓN DEL LECHO PARA $0.5Q_{MÁX}$



SALTO EN ESQUÍ CON 2 NIVELES - CONFIGURACIÓN DEL LECHO PARA $0.5Q_{MÁX}$

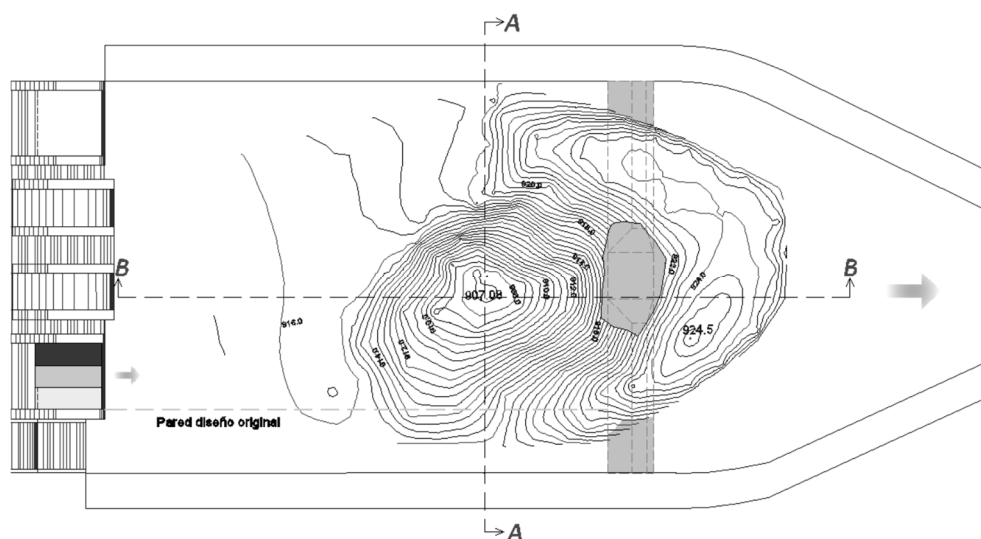


SALTO EN ESQUÍ CON 3 NIVELES - CONFIGURACIÓN DEL LECHO PARA $0.5Q_{MÁX}$

Fuente: (Dodge & Mefford, 1990, págs. 23-26-29)

En los años 2012 - 2013, en el modelo realizado para la presa Toachi – Pilatón⁵⁴ y⁵⁵, se analiza el comportamiento del chorro para varias alternativas de disipación, entre las cuales se encuentra el salto en esquí con el uso de tres deflectores a diferentes niveles que abracan el ancho del cucharón del salto en esquí, de los cuales, cada uno tiene un radio de curvatura y ángulo de salida diferente, Figura 4.23. Además, se realiza el análisis de la socavación producida por el salto en esquí de umbral de altura variable y de las otras alternativas planteadas en el estudio.

Figura 4.23: Socavación producida por salto en esquí con umbral de altura variable, para $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$



Fuente: (Casa, 2012, pág. 90)

4.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA EXISTENTE

4.2.1. SALTO CON DEFLECTORES

Con base en la información disponible de estudios en modelos y presas construidas con saltos en esquí con deflectores, se presenta en la Tabla

⁵⁴Dávila, D. (2013). *Estudio experimental sobre el alcance y la dirección del chorro a la salida de los vertederos de excesos de la presa Toachi, proyecto Toachi Pilatón*. Quito: Universidad Central del Ecuador.

⁵⁵Casa, E. (2012). *Tesis de grado: Estudio en modelo del cuenco de socavación al pie de los vertederos de excesos en la presa Toachi, Proyecto Hidroeléctrico Toachi - Pilatón*. Quito: Universidad Central del Ecuador.

4.8 un resumen de las características hidráulicas y geométricas de cada proyecto y/o modelo.

Como ya se mencionó anteriormente (*Numeral 4.1.1*), en la última década se han realizado modelos en laboratorio que buscan aplicar de manera eficiente el salto en esquí con deflectores o también conocido como salto en esquí dentado. En la Tabla 4.8, se puede observar que el rango de caudales máximos en prototipo, en los que se ha utilizado este tipo de salto en esquí, es amplio ya que varían desde los 1200 m³/s hasta los 12400 m³/s. La altura de las presas oscila entre 60 y 135 m, ésta última correspondiente a la presa Shahryar en Irán. El ancho de cada uno de los vertederos se encuentra en el rango de 14 a 47 m. En cuanto al tamaño de material utilizado en modelos el diámetro del mismo oscila entre 14 y 22 mm. En lo que respecta a los deflectores se tiene las siguientes características:

- El radio de curvatura de los deflectores varía muy poco ya que se encuentran entre 10 y 15 m.
- En cuanto a la cantidad de deflectores la variación es amplia ya que se tiene vertederos con 2 deflectores hasta vertederos con 18 deflectores, siendo más común el uso de pocos deflectores.
- El uso de los deflectores tanto rectangulares como trapeziales se encuentran en la misma proporción.
- El ángulo de salida de los deflectores se encuentra entre 10° y 37°.

4.2.2. SALTO CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES

En lo referente a la información relacionada con estudios del salto en esquí con estrechamiento, en la Tabla 4.9 se presenta un resumen de las características y condiciones de diferentes proyectos en los que se ha estudiado esta alternativa.

En la Tabla 4.9 se puede observar que se ha ensayado o aplicado esta solución tanto en vertederos tipo cimacio como en vertederos tipo túnel. El rango de caudales máximos de descarga en prototipo se encuentra entre

3000 m³/s (Presa Dong Jiang) y 28000 m³/s (Presa Shuibuya), variando el caudal por unidad de ancho al inicio de la contracción desde 150 m³/s/m hasta 350 m³/s/m, respectivamente. En lo referente a la altura de la presa, el intervalo donde se aplicó esta solución se encuentra entre 157 m (Presa Dong Jiang) hasta 305 m (Presa Jimping). En lo que respecta a las dimensiones o geometría del estrechamiento se identifica las siguientes características:

- La relación de contracción (ancho menor / ancho mayor) varía de 0.2 a 0.4. En caso de doble contracción, el grado de convergencia de la primera contracción se encuentra entre 0.75 y 0.93.
- La relación de aspecto de la contracción (largo / ancho mayor) varía desde 1.1 hasta 2.0, no obstante, las relaciones más registradas se encuentran entre 1.5 y 1.8.
- Los valores del ángulo de contracción varían en el intervalo de 2.9 a 18.7 grados, presentándose la mayor cantidad de datos en el rango de 8.6 a 13.5 grados.

4.2.3. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE UN SOLO LADO (DEFLECTOR LATERAL)

El deflector lateral no ha tenido gran aplicación en el dissipador tipo salto en esquí en presas, en ciertos estudios ha sido considerada como alternativa dentro del análisis, sin embargo, otras formas de salto en esquí han proporcionado mejores resultados. La información técnica disponible referente a este tema, se resume en la Tabla 4.10. En lo que concierne a las dimensiones o geometría de los deflectores analizados, se identifica las siguientes características:

- El ángulo del deflector varía en un rango de 10 hasta 37 grados.
- La relación de contracción se encuentra en el intervalo de 0.52 a 0.93.

- La relación de aspecto de la contracción (largo deflector / ancho total del salto en esquí) varía de 0.54 a 1.07.

4.2.4. SALTO EN ESQUÍ CON UMBRAL DE ALTURA VARIABLE

El salto en esquí con umbral de altura variable no ha sido utilizado con amplitud. En la Tabla 4.11 se presenta una recopilación de información en el que constan la presa Chili Bar cuya altura no supera los 37 metros y dos estudios en modelo que han planteado este tipo de salto en esquí como alternativa de disipación de energía.

Debido a que la información disponible es mínima y muy particular de cada proyecto, no se puede establecer una tendencia en cuanto a las características hidráulicas y geométricas del salto en esquí con umbral de altura variable. En la sección 4.1.4, se describe las características del proyecto y de los modelos planteados con este tipo de salto en esquí.

Tabla 4.8: Características hidráulicas y geométricas de varios estudios realizados para saltos en esquí con deflectores

	Año	Nombre Proyecto/ Autor	País	Tipo	Tipo de vertedero	Escala	Q (m ³ /s)		P (m)	N° vertederos	Ancho vertedero (m)	q (m ³ /s . m)	Radio (m)		N° de deflectores	Forma de deflector	Ángulo salida (φ _c)	Diámetro material (m)		Objetivo de estudio
							Q _{máx Prot}	Q ₁₀₀					Cucharón	Deflector				d ₅₀	d ₉₀	
SALTOS EN ESQUÍ CON DEFLECTORES	1954	Presa Cleveland	Canadá	P/M	Cimacio	1:60	Q _{máx Prot}	1217	60	1	24	50.71	18.3	12.8	6	Trapezoidal	-	-	-	Beneficios de salto en esquí y presiones en deflectores
	1954	Presa Slapy	República Checa	P	Cimacio	-	-	-	60	4	21	-	-	-	4 x c/v	Rectangular	-	-	-	-
	1963	Presa Orlik	República Checa	P	Cimacio	-	Q ₁₀₀	2184	82	1	45	48.5	-	-	18	Rectangular	-	-	-	-
	2004	Golzari, F	Irán	P/M	Cimacio	1:50	Q _{prot}	1404	86	1	47	30.2	-	15	5	Trapezoidal	0° 20°	d ₅₀	0.012	Comparar alcance y socavación: convencional y con deflectores
								2344												
								3399												
	2004	González, J	España	M	-	-	Q _{mod}	0.006	-	1	-	-	-	-	varía	Trapezoidal de sección triangular	0° 10° 15°	d ₉₀	0.016	Establece deflector tipo en función parámetro S de socavación
								0.122				-							0.019	
2005	Presa Sharhryar	Irán	P/M	Cimacio	1:65	Q _{máx Prot}	12385	135	3	34	121.4	-	-	2 x c/v	Trapezoidal	-	-	-	Determinar efecto de deflectores en la trayectoria del jet	
2010	Epicum et al.	Bélgica	M	Cimacio (Creager)	1:60 1:100	Q _{mod}	0.020	0.96	1	0.384	0.052	-	-	2 y 3	Rectangular	0° 27°	d	0.014	Estudio sobre el efecto de los deflectores y su disposición en el foso de socavación	
							0.060				0.156							0.022		
2012	Presa Toachi	Ecuador	P/M	Cimacio	1:50	Q _{máx Prot}	1200	60	2	14	42.9	14	10	2 x c/v	Rectangular	12° 37°	d ₅₀	0.020	Características de alcance y socavación del chorro	

Donde:

- P y/o M:** Información- Prototipo (P) o Modelo (M)
- P:** Altura de la presa (m)
- q:** Caudal unitario en la aproximación al cucharón (m)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 4.9: Características hidráulicas y geométricas de varios estudios realizados para saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes

	Año	Nombre Proyecto/ Autor	País	Tipo	Tipo de vertedero	Escala	Q (m ³ /s)		P (m)	N° vertederos	q (m ³ /s . m)	Ancho			Longitud		Ángulo contracción $\theta_c(^{\circ})$	Objetivo de estudio/ Observaciones
												b (m)	bc (m)	bc/b	lc (m)	lc/b		
SALTOS EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES	1986	Presa Laxiwa	China	M	Túnel	-			250			7	2.5	0.36	10.5	1.5	12.1	Estrechamiento lineal
												5	2	0.40	8.5	1.7	10.0	
	1992	Presa Longyang	China	P	Cimacio	-			175	2		10	3	0.30	15.5	1.6	12.7	
	1992	Presa Dong Jiang	China	P	Cimacio	-	Q _{máx} Prot	3000	157	2	150	10	7.5	0.75	15.0	1.5	4.8	Doble contracción simétrica
												7.5	2.5	0.33	15.0	2.0	9.5	
	2005	Presa Xiluodu	China	P	Túnel				285.5									
	2008	Presa Guangzhao	China	P	Cimacio	-	Q _{máx} Prot	9857	200.5	3	205	16	4.5	0.28	17.0	1.1	18.7	
	2008	Presa Shuibuya	China	M	Cimacio	1:100	Q _{máx} Prot	28000	233	5	350	16	3.2	0.20	26.7	1.7	13.5	
	2010	Presa Xiaowan	China	P	Túnel	-	Q _{máx} Prot	3535	292	1	235.67	15	14.0	0.93	27.3	1.8	2.9	Contracción asimétrica: lado derecho doble contracción (2.9° y 9.9°), lado izq una sola contracción (8.6°)
											14	4.5	0.32	25.0	1.8	9.9 8.6		
2012	Presa Toachi Pilatón	Ecuador	M	Cimacio	1:50	Q _{máx} Prot	1200	60	2	42.9	14	7	0.50	14.5	1.0	13.4	Alternativa de disipación de energía	
2015*	Presa Jinping	China	P/M	Túnel	1:30	Q _{máx} Prot	3535	305										

Donde:

- P y/o M:** Información - Prototipo (P) o Modelo (M)
P: Altura de la presa (m)
q : Caudal unitario en la aproximación al estrechamiento (m)
b : Ancho en la entrada a la transición (m)
bc : Ancho al final del estrechamiento - ancho contraído (m)
bc/b : Grado de contracción
lc : Longitud de la contracción (m)
lc/b : Relación de aspecto

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 4.10: Características hidráulicas y geométricas de varios estudios realizados para saltos en esquí con estrechamiento lateral de un solo lado

	Año	Nombre Proyecto/ Autor	País	Tipo	Tipo de vertedero	Escala	Q (m ³ /s)		P (m)	N° vertederos	q (m ³ /s . m)	Ancho			Longitud		Radio cucharón (m)	Ángulo del deflector θc(°)	Deflector		Objetivo de estudio/ Observaciones
							Q _{1000 Prot}	Q _{máx Prot}				b (m)	bc (m)	bc/b	lc (m)	lc/b			Ancho f (m)	Altura (m)	
							Q	varía				-	-	-	0.50	0.40			0.80	0.27	
SALTOS EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO LATERAL DE UN SOLO LADO	1965	Presa Contra/ Verzasca	Suiza	P	Cimacio	-	Q _{1000 Prot}	2600	220.0	12	18.06	12	6.20	0.52	7.7	0.6	10.6	36.9°	5.8	4.50	--
	1980	Presa Randenigala	Sri Lanka	M	Cimacio	1:72	Q _{máx Prot}	8100	94.0	3	180	15	14	0.93	16.0	1.07	30.0	3.6°	1.0	6.5	Alternativa de disipación de energía
	2000	Juon, R., Hager, W.	Suiza	M	-	-	Q	varía	-	-	-	0.50	0.40	0.80	0.27	0.54	0.20	20°	0.1	0.35	Estudio general del efecto de deflectores laterales en cucharones - Rango de Fr: 3-7
	2012	Presa Toachi Pilatón	Ecuador	M	Cimacio	1:50	Q _{máx Prot}	1200	60.0	2	42.9	14.0	10.5	0.75	14.5	1.04	14.0	13.4°	3.5	14.5	Alternativa de disipación de energía

Donde:

- P y/o M:** Información - Prototipo (P), Modelo (M)
P: Altura de la presa (m)
q: Caudal unitario en la aproximación al estrechamiento (m)
b: Ancho antes del deflector (m)
bc: Ancho al final del estrechamiento - ancho contraído (m)
bc/b: Grado de contracción
lc: Longitud del deflector (m)
lc/b: Relación de aspecto

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 4.11: Características hidráulicas y geométricas de varios estudios de saltos en esquí con umbral de altura variable

	Año	Nombre Proyecto/ Autor	País	Tipo	Tipo de vertedero	Escala	Q (m³/s)		P (m)	Nº vertederos	Ancho vertedero (m)	q (m³/s . m)	Nº de niveles	Nivel 1				Nivel 2				Nivel 3				Objetivo de estudio/ Observaciones
							Q _{máx} Prot	7079						b1 (m)	R1 (m)	Elev (msnm)	φ _c (°)	b2 (m)	R2 (m)	Elev (msnm)	φ _c (°)	b3 (m)	R3 (m)	Elev (msnm)	φ _c (°)	
SALTOS EN ESQUÍ CON UMBRAL DE ALTURA VARIABLE	1965	Presa Chili Bar	Estados unidos	P	Cimacio	-	Q _{máx} Prot	7079	36.6	1	51.8	136.6	3	13.0	13.7	289.6	0°	30.5	13.7	283.5	0°	8.4	13.7	286.5	0°	Prototipo que presenta pequeños daños de erosión en la estructura de disipación
	1990	Presa Chili Bar Modificada	Estados unidos	M/P	Cimacio	1:45	Q _{máx} Prot	7079	36.6	1	51.8	136.6	3	13.0	10.7	290.4	30°	30.5	10.7	284.3	30°	8.4	10.7	287.3	30°	Alternativa de disipación de energía
													2	13.0	10.7	290.4	30°	38.9	10.7	287.3	30°	-	-	-	-	Alternativa de disipación de energía
	2012	Presa Toachi Pilatón	Ecuador	M	Cimacio	1:50	Q _{máx} Prot	1200	60.0	2	14.0	42.9	3	4.7	11.7	935.3	24.7°	4.7	10.0	936.9	36.4°	4.7	10.6	938.5	39.4°	Alternativa de disipación de energía

Donde:

- P y/o M:** Información - Prototipo (P), Modelo (M)
- P:** Altura de la presa (m)
- q:** Caudal unitario en la aproximación al cucharón (m)
- Nivel 1, 2, 3:** Niveles numerados de margen izquierda a derecha con vista hacia aguas abajo.
- b1,2,3:** Ancho de correspondiente a cada desnivel (m)
- R1,2,3:** Radio del cucharón correspondiente a cada desnivel (m)
- Elev:** Elevación en m.s.n.m. de cada desnivel
- φ_c:** Ángulo de salida del labio del cucharón
- *** Inicio de construcción del proyecto

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

4.3. SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

4.3.1. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES

Los resultados obtenidos en los diferentes estudios realizados en saltos en esquí con deflectores se pueden sintetizar de acuerdo con:

- **Influencia del uso de deflectores:** Los estudios realizados por la U.S. Bureau of Reclamation (1953) y Golzari (2004) comparan un salto en esquí convencional con uno con deflectores. En los dos casos se establece que el salto en esquí con deflectores disminuye la profundidad de socavación máxima. Golzari (2004) establece que en el caso particular de un salto en esquí con 5 deflectores se disminuye la socavación máxima en un 40% y el volumen por unidad de área en 49% respecto a un salto en esquí con ángulo de salida de 20° ; y al compararlo con un salto en esquí con $\theta'=0^\circ$, la ubicación de la profundidad máxima es aproximadamente 1.5 mayor cuando se usa deflectores.
- **Disposición de deflectores:** De acuerdo con el estudio realizado por Erpicum et al.(2010), y con base en la Tabla 4.2 y Figura 4.3 se puede decir que en general todas las configuraciones que tienen deflectores a los extremos son las que producen mayor superficie y mayor profundidad de socavación, pero la configuración F (2 deflectores, 1 en cada extremo) es la que produce una mayor profundidad de socavación y menor distancia al foso de socavación, por lo tanto, es la disposición menos favorable. Las configuraciones que producen menor socavación se encuentran entre las opciones con deflectores centrados (B, Ca, Cb, Cc, D y E), siendo Cb (3 deflectores centrales, el intermedio desplazado) la que abarca una menor superficie de socavación; y comparando el número de deflectores centrados, los de mayor eficiencia en cuanto a profundidad de socavación, son los que ocupan $3/5$ del ancho del cucharón (3 deflectores). Finalmente,

dependiendo de si los deflectores se encuentran a los extremos o centrados, el chorro se concentrará o expandirá, respectivamente, ver Foto 4.4.

Foto 4.4: Concentración o expansión del chorro de acuerdo a la repartición de los deflectores en el cucharón

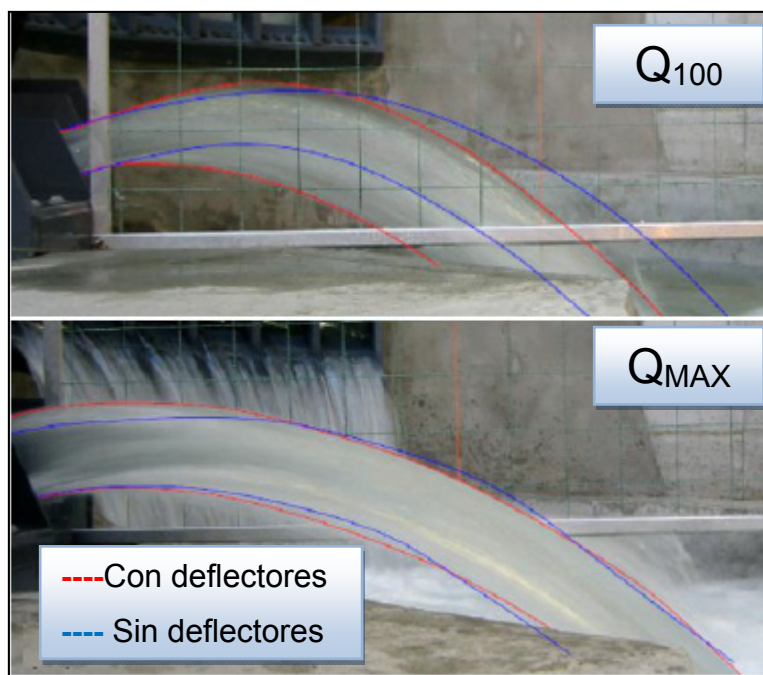


Fuente: (Huilca Tapia, 2013, pág. 195)y (Dávila, 2013, pág. 153)

- **Forma de deflectores:** La forma transversal de los deflectores constituye un aspecto importante a considerar en su protección contra la cavitación, como en el caso de la presa Cleveland, donde los deflectores de forma rectangular causaron presiones sub-atmosféricas que generaron problemas de cavitación (Figura 4.2), por lo que es conveniente que la forma transversal de los deflectores sea trapezoidal. En cuanto a la forma longitudinal de los deflectores, González Fariñas (2004) en su estudio establece que de entre todas las formas ensayadas, la forma que brinda mejores resultados en cuanto a su parámetro de socavación (**S**) y a la simplicidad de construcción, son los deflectores trapezoidales con una sección longitudinal triangular, los cuales son más adecuados para trampolines de solera plana horizontal.
- **Variación de caudales vs. uso de deflectores:** En lo que respecta a la efectividad de los deflectores, en un estudio realizado para la presa Shahryar, Martinerie et. al. (2007), establecen que la efectividad de los deflectores en cuanto a la trayectoria del chorro es mayor para

caudales de crecida bajos, y por lo contrario para caudales de crecida extremos la efectividad del deflector disminuye, ver Foto 4.5. Lo anterior se debe a la disminución de la velocidad a la salida del chorro, siendo de 22% para un período de retorno de 100 años y un 3% para una crecida extrema con período de retorno mayor a 10000 años.

Foto 4.5: Efecto de deflectores para diferentes caudales



Fuente: (Martinerie, et. al., 2007, pág. 9)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

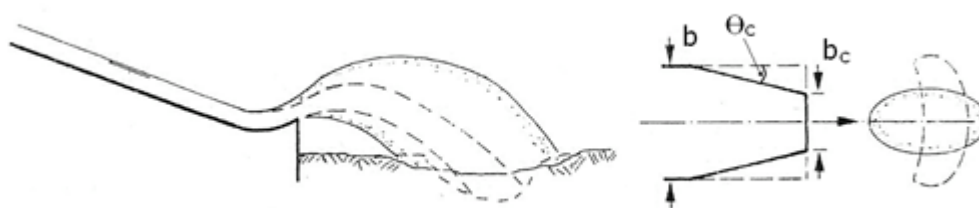
4.3.2. SALTO CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES

En síntesis, de los resultados obtenidos de los estudios en saltos con estrechamiento gradual de paredes, se tiene:

- **Influencia del uso de la contracción:** Con el cucharón con estrechamiento se puede obtener una difusión y aeración adecuadas debido a que las partículas del chorro tienen diferentes direcciones, comparadas con el salto convencional. Mientras que en un salto en esquí convencional los ángulos de despegue de la napa superior e inferior son aproximadamente iguales, en un salto con estrechamiento

gradual de paredes, los valores de los ángulos de las napas pueden variar en un rango de -10 a 45 grados, mejorando así la difusión del chorro y reduciendo la acción del impacto. En lo referente al foso de socavación para el salto en esquí con estrechamiento, el mismo es alargado (en planta), a diferencia del salto convencional donde el cuenco de socavación es más ancho que largo (Figura 4.24). La erosión del lecho puede reducirse entre $1/3$ a $2/3$ en comparación con un salto en esquí normal ($\theta' = 30$ grados).

Figura 4.24: Comparación de la difusión del chorro (vista en perfil) y de la forma del cuenco de socavación (vista en planta) entre un salto en esquí convencional y uno con estrechamiento gradual de paredes



Fuente: (Vischer & Hager, 1995, pág. 118)
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

- **Número de Froude:** Vischer y Hager (1995), para el correcto funcionamiento hidráulico de este tipo de disipador, recomienda que el número de Froude en la aproximación al estrechamiento (Fro) se encuentre en el rango de 4 hasta 10. De igual manera, estudios sistemáticos en modelos físicos a escala reducida han llevado a comprender las características hidráulicas de este tipo de salto en esquí, evidenciando que el número de Froude en el flujo de aproximación al estrechamiento debe ser mayor que 3.5. Por otro lado, Han Shou-du et al. (2012), en su estudio en pruebas en modelo, consideraron una variación de Froude de 3.5 a 9.7.
- **Grado de contracción o convergencia:** De acuerdo a los autores Vischer y Hager (1995), para que el flujo en el estrechamiento genere

un chorro con suficiente grado de dispersión, recomiendan que el parámetro (bc/b) varíe de 0.25 hasta 0.16. Por otro lado, en los estudios para la presa Dongjiang, se estableció un grado de contracción adecuado de 0.25. Adicionalmente, de acuerdo al estudio de WuWen-ping et al. (2006), consideraron la variación del parámetro de 0.2 a 0.5, evidenciándose una menor pico de presión en el fondo del lecho cuando el grado de contracción es 0.2, y una mejor distribución de presión para un valor de 0.3.

- **Perfil del flujo en la contracción:** En el estudio realizado por Han Shou-du et al. (2012), para el cálculo del perfil del flujo en el cucharón y la trayectoria del chorro, se encontró una buena aproximación entre la metodología teórica y los resultados en modelo. Adicionalmente, se determinó que el número de Froude no incide significativamente en el perfil de la superficie del agua en el cucharón, siempre y cuando se mantenga la misma relación de aspecto (ancho/profundidad del flujo) al inicio del estrechamiento.

4.3.3. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE UN SOLO LADO (DEFLECTOR LATERAL)

Hager y Juon (2000) respecto al deflector lateral, señalan que éste constituye un elemento de diseño sencillo cuyo principal objetivo es desviar el flujo sin riesgo de incurrir en problemas de cavitación y donde el valor del ángulo del deflector es una dimensión importante en el diseño, en el que es necesario considerar:

- La geometría de la onda de choque en planta y en corte.
- La altura máxima de la onda de choque.
- La contracción máxima del chorro.
- La presencia del resalto.

La principal desventaja del salto en esquí con deflector de un solo lado es la posibilidad de que el flujo se ahogue en el cucharón, condición que debe ser cuidadosamente chequeada. De igual manera, deben ser considerados los riesgos debido a la socavación aguas abajo del cucharón y la posibilidad de una excesiva dispersión del chorro, las que pueden dar lugar a efectos adversos en ciertos diseños.

El rango de variación del ángulo del deflector lateral (θ_c) tiene como límite inferior los 10 grados y como límite superior puede considerarse los 30 grados. Para este último, la onda de choque es muy alta, haciendo que el flujo se deforme considerablemente y que el chorro se concentre en sitio de impacto aguas abajo. Por lo tanto, a mayor θ_c , mayor es la altura del chorro.

4.3.4. SALTO EN ESQUÍ CON UMBRAL DE ALTURA VARIABLE

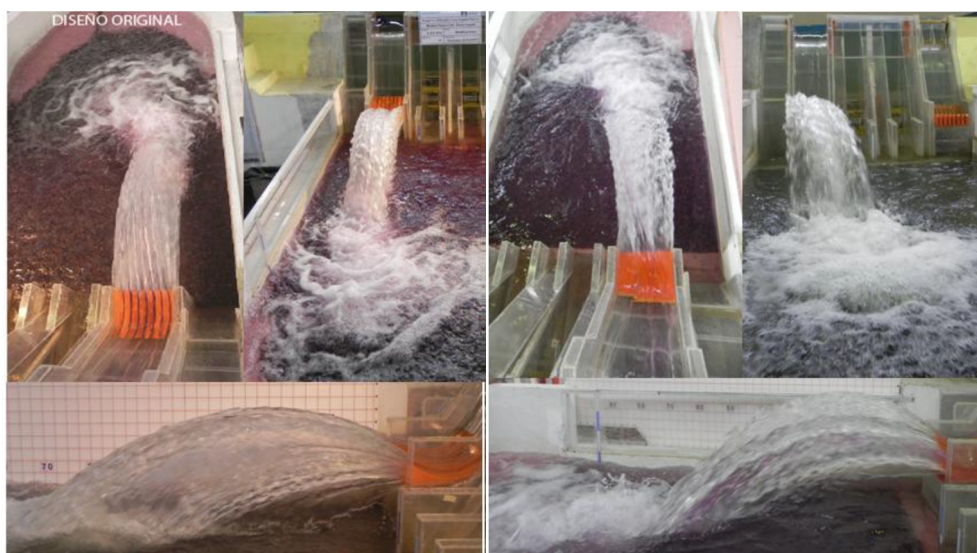
Del estudio para la presa Chili Bar, realizado por Dodge & Mefford, (1990), se concluye que la socavación producida por las alternativas propuestas es menor en comparación con la configuración del salto en esquí del prototipo. En lo que respecta a la comparación entre las modificaciones planteadas se tiene que:

- La configuración con 2 niveles, para el 50% del caudal de la máxima crecida probable, produce una mayor acumulación de sedimento al pie de la estructura, un área de afectación mayor pero menor profundidad de socavación, en comparación con el salto en esquí convencional (un solo nivel).
- La configuración con 3 niveles, para el 50% del caudal de la máxima crecida probable, produce más acumulación de sedimento al pie de la estructura, un alcance de chorro mayor y una menor profundidad de socavación, en comparación con el salto en esquí convencional.

- Entre las dos configuraciones con diferentes niveles: la de 2 niveles produce una profundidad de socavación ligeramente menor a la de 3, sin embargo, esta última tiene un alcance mayor y también una mayor acumulación de sedimento.

En lo que respecta a la configuración utilizada en el proyecto Toachi – Pilatón, al comparar con el diseño inicial propuesto, el salto con umbral de altura variable presenta una ligera desviación del flujo hacia el centro del cauce (Foto 4.6), produce una profundidad de socavación y un alcance ligeramente mayor (para $Q_{\text{máx}}$), y un área de influencia 11% menor a la del diseño original.

Foto 4.6: Comportamiento del chorro de un salto en esquí tipo Angostura y de un salto en esquí con umbral de altura variable



Fuente: (Dávila, 2013, págs. 97-100)

4.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En lo referente al análisis de la literatura técnica para las diferentes formas especiales del salto en esquí:

- De los tipos de salto en esquí, los más utilizados son los que disponen de deflectores (dentados) o con estrechamiento gradual de paredes, existiendo varios estudios relacionados con: su geometría,

el foso de socavación, el alcance del chorro y la distribución de presiones. En cambio, para los saltos en esquí con deflector lateral y con umbral de altura variable, no existe suficiente investigación que permita generalizar el comportamiento de este tipo de estructuras.

En lo concerniente al análisis comparativo de la información técnica existente:

- De acuerdo al resumen que se presenta en la Tabla 4.12, se puede observar que el uso del salto en esquí con deflectores es común en presas de alturas que varían entre 60 y 135 m, mientras que los saltos con estrechamiento de paredes se han utilizado en presas más altas que oscilan entre 157 y 305 m.

Tabla 4.12: Resumen de las condiciones para el uso de los diferentes tipos de salto en esquí, según la literatura técnica recopilada.

Tipo de salto en esquí especial	Años	Caudal (m ³ /s)	Alto de la presa (m)	Observaciones
Salto en esquí con deflectores (dentados)	1954-2012	1200 - 12400	60 - 135	-
Salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes	1986-2015*	3000 - 28000	157 - 305	-
Salto en esquí con estrechamiento lateral de un solo lado	1965-2012	1200 - 8100	60 - 220	Incluyen datos de las alternativas de disipación usadas en modelos (no usadas en el diseño final)
Salto en esquí con umbral de altura variable	1965-2013	1200 - 7079	36.3 - 60	Incluyen datos de las alternativas de disipación usadas en modelos (no usadas en el diseño final)

* Año de inicio de construcción del proyecto

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- De lo referente a los saltos en esquí con estrechamiento lateral de un solo lado y con umbral de altura variable, no se puede establecer un rango de aplicabilidad debido a que su uso ha sido limitado.

En lo que respecta a la síntesis de resultados teóricos y experimentales:

- El uso de deflectores (dientes) reduce el alcance del chorro, aumenta la superficie de impacto en el cauce y disminuye la profundidad de socavación, siendo ésta última, la ventaja frente a un salto en esquí sin estos dispositivos. Para caudales con períodos de retorno bajos,

los deflectores disminuyen la trayectoria del chorro de manera más evidente. Cuando los deflectores se colocan alejados de los extremos, el flujo se expande presentando menor socavación. Finalmente, la forma transversal trapezoidal de los deflectores presenta menor posibilidad de cavitación en relación con los deflectores rectangulares.

- Para el salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes se destaca lo siguiente: la socavación del cauce se puede reducir de $1/3$ a $2/3$ respecto a un salto convencional, los ángulos de las napas superior e inferior varían de -10 a 45 grados, el número de Froude de aproximación puede encontrarse de 4 a 9.7 , la relación de aspecto (l_c/b) es con mayor frecuencia de 1.5 a 1.8 , el ángulo de contracción (θ_c) varía de 8.5 a 13.5 grados y el valor de contracción (bc/b) es adecuado en el rango de 0.2 a 0.4 , aproximadamente.
- Para el salto con estrechamiento de un solo lado (deflector lateral) se tiene lo siguiente: la finalidad principal es orientar el chorro, el ángulo del deflector ($\theta_c = 10$ a 30 grados) es la dimensión que más incide en el comportamiento del flujo (a mayor ángulo, mayor es la altura del chorro), la relación de contracción (bc/b) es mayor a 0.5 y la relación de aspecto (l_c/b) es menor a 1 .
- En lo que respecta a estudios futuros por realizar, debido a la escasa disponibilidad de análisis referente a los saltos en esquí con umbral de altura variable, se recomienda la modelación física para investigar diferentes configuraciones geométricas que permitan alcanzar un mejor entendimiento del comportamiento del flujo en esta estructura.

CAPÍTULO 5.

CRITERIOS Y BASES PARA EL DISEÑO DE UN SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL Y DE FORMAS ESPECIALES

El salto en esquí convencional fue considerado por primera vez en Francia en la presa Dordogne (1935). Luego, Godon (1936), Coyne (1944, 1951), Auroy (1951), Maitre y Obolenski (1954) registraron observaciones en prototipo. En los siguientes años, Rhone y Peterka (1959) mejoraron el diseño del cucharón, más adelante presentado por la U.S Bureau of Reclamation (1983).

Después, Balloffet (1961) calculó y registro las presiones en el cucharón, encontrando que la máxima carga de presión es alrededor de 4% más grande que la calculada para valores pequeños de d/R (profundidad del flujo en cucharón/radio de curvatura). Henderson y Tierney (1963) demostraron que para valores pequeños de la relación (d/R), el ángulo de deflexión del cucharón es de al menos 45 grados. Luego, Chen y Yu (1965) calcularon la distribución de presión a lo largo de un cucharón para ángulos de deflexión entre 75 grados y 95 grados, resultando los máximos valores de presión similares a los propuestos por Balloffet. Más adelante, Lenau y Cassidy (1969) mejoraron el método propuesto por Chen y Yu, demostrando que el efecto de la viscosidad es insignificante y que el efecto de la gravedad es considerable, donde la presión máxima así depende del número de froude en la aproximación y de la relación (d_0/R).

En los siguientes años, Rajan y Shivashankara Rao (1980), Mason (1993) y Hager y Juon (2000), recopilaron y presentaron varias recomendaciones básicas para el diseño del salto en esquí.

En lo referente a los saltos en esquí de formas especiales: Luthra (1965) desarrolló los saltos en esquí con deflectores (dientes), posteriormente Chengyi (1988) realizó varias investigaciones para la optimización de la forma de los deflectores, recomendando el uso de dientes trapezoidales. En el 2004, Cheng Sheng & Chen Minlin, presentan criterios para el diseño de deflectores rectangulares, y en el mismo año Gonzáles Fariñas en su estudio recomienda un tipo de diente para trampolines de solera plana. Luego, en China, en las Concrete

Gravity Dam Design Specifications - SL319 (2005) se establecen varios criterios para el dimensionamiento de deflectores (dientes) para saltos en esquí. Ercicum et al. (2010) realiza un estudio comparativo del comportamiento de los deflectores dependiendo de su colocación en el cucharón.

En el caso de salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes, Vischer & Hager (1995) mencionan parámetros básicos para el correcto funcionamiento del estrechamiento. Hangen (2000) presenta una metodología para el dimensionamiento del estrechamiento de paredes. En las Concrete Gravity Dam Design Specifications - SL319 (2005), se mencionan los parámetros principales a considerar para el diseño. Finalmente, Huang et al. (2006) presentan criterios generales para el correcto dimensionamiento del estrechamiento, y formulaciones para determinar el valor de la presión máxima y su localización en el cucharón de este tipo de salto en esquí.

5.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FÍSICO

El principal objetivo de los saltos en esquí convencional y sus diferentes configuraciones consiste en solucionar los inconvenientes de disipación de energía, específicamente del agua proveniente del vertedero de excesos de una presa en una central hidroeléctrica, de manera segura y económica. Principalmente, el problema consiste en evaluar la incidencia de la socavación en las estructuras aledañas y márgenes del cauce, para lo que se requiere definir: la altura, el alcance del chorro, la forma y profundidad del foso.

Para el uso de la estructura hidráulica tipo salto en esquí es necesario considerar:

- Ubicación de las obras anexas (casa de máquinas, descargas, vías).
- Geología de la zona de descarga, material del lecho del cauce (roca).
- Altura de la presa (altas).

- Pendiente del canal de aproximación o rápida (Menor a 4V:1H)⁵⁶
- Velocidad del flujo en la rápida.
- Caudales de descarga.

El escogimiento de la forma especial del salto en esquí depende de las siguientes características:

- Ancho del cauce aguas abajo.
- Estabilidad de las márgenes del cauce.
- Orientación del o los vertederos.
- Disipación de energía (reducción de la socavación).
- Cavitación en la estructura.

5.2. EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA AL PIE DE UNA PRESA

En la estructura tipo salto en esquí, una mínima parte de la energía es disipada en la cubeta, la mayoría se pierde cuando el chorro se encuentra en contacto con el aire y en la interacción con el colchón de aguas abajo.

Cuando sobre el lecho de un cauce existe la acción dinámica de un chorro turbulento, se produce la destrucción mecánica o fractura hidráulica de la roca. A mayor intensidad de turbulencia del chorro, mayor será la fluctuación de presión resultando en una mayor socavación.

La combinación de fuerzas que un chorro de un salto en esquí ejerce sobre el lecho, varían conforme se desarrolla el foso de socavación. Las presiones inducidas por el chorro generan suficiente tensión en las discontinuidades de la roca, propagando las fisuras a lo largo de las fallas naturales de la roca. Grietas perpendiculares a las fisuras propagadas, son inducidas por el

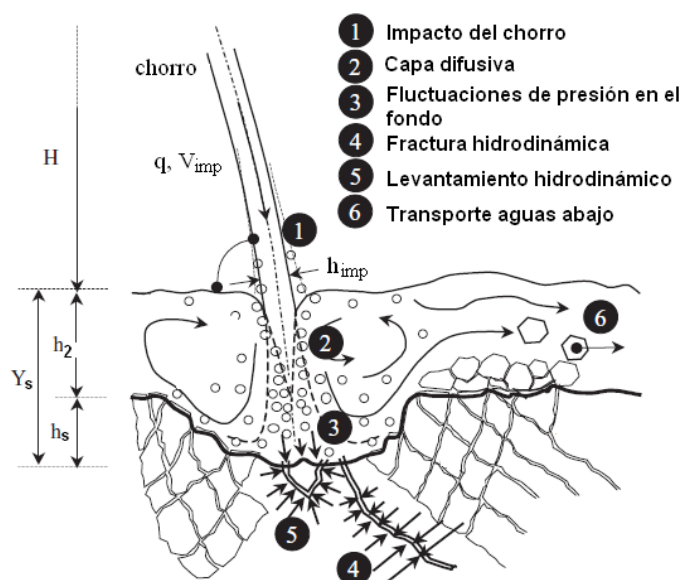
⁵⁶DenliTokyay, Nuray (s.f.). *Design of Dissipation Structures*.
www.scribd.com/doc/190779627/CE458-Chapter-5. p 48.

mismo esfuerzo o por liberación de presiones existentes en las juntas, formando así bloques de roca.

El efecto del chorro sobre el lecho está influenciado por la condición y la orientación de las discontinuidades de la roca respecto al chorro. Es decir, mientras más alineados estén los planos de estratificación de la roca al ángulo de incidencia del chorro, será más fácil la penetración del mismo y por ende más fácil el proceso de fractura hidráulica.

Debido al desfase entre la acción de la fluctuación de presiones hidráulicas ejercidas sobre la roca y las que son propias de la roca, se genera un diferencial de presiones. Estas fuerzas son las que aflojan los bloques de roca, causando su movimiento, desgaste y posterior arrastre por las corrientes re-circulantes. Luego, debido a la recirculación y al contacto con otros bloques, éstos se desgastan lo suficiente para ser arrastrados por la corriente de lavado. Este proceso continúa hasta alcanzar el equilibrio, es decir, hasta cuando el chorro ha perdido suficiente energía para no producir socavación.

Figura 5.1: Proceso de socavación en la zona de incidencia del chorro



Fuente: (Bollaert & Schleiss, 2003, pág. 2)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3. RECOPIACIÓN DE CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE SALTOS EN ESQUÍ AL PIE DE PRESA

5.3.1. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL

El salto en esquí convencional como estructura de disipación se considera adecuado cuando:

- Se dispone de presas altas.
- La velocidad al pie de la presa excede los 20 m/s⁵⁷.
- La profundidad de agua en la descarga es mucho menor a la requerida para la formación del resalto hidráulico.
- El lecho del cauce del río aguas abajo de la descarga se encuentra compuesto de roca.

La cubeta deflectora del salto en esquí, llamada también cucharón, debe estar diseñada para cargas de presión hidrostáticas y dinámicas, y tiene como objetivos principales direccionar el chorro hacia el aire para su aeración y lanzarlo hacia la ubicación adecuada aguas abajo, para todos los caudales de operación. En el diseño del salto en esquí convencional se requiere dimensionar o definir:

- Forma del cucharón, radio de la cubeta deflectora.
- Ángulo de salida.
- Elevación del fondo (invert) y de la salida del salto en esquí.

5.3.1.1. Radio de la Cubeta:

El radio de la cubeta incide en la longitud y distribución de presiones sobre la misma. Para definir esta dimensión en un salto en esquí, en la Tabla 5.1 se presenta las siguientes recomendaciones:

⁵⁷Ghahfarokhi, G., Van Gelder, P., & Vrijiling, J. (2008). Probabilistic Description of Scour Hole Downstream of Flip bucket Spillway of Large Dams. *ANCOLD Conference Technical Proceedings*, (pág. 1). Holanda.

Tabla 5.1: Fórmulas y recomendaciones para definir el radio del salto en esquí

RADIO DE LA CUBETA			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Damle (1966)	$R = \left(\frac{H_o}{d_o}\right)^{0,5} d_o$	$H_o = \frac{V_o^2}{2g}$
2	Varshney y Bajaj (1970)	$R = \frac{d_o}{0,06} (Fr_o^{0,5} - 1,96)$	Con base en datos de prototipo
3	Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos - México (1977)	$R = (2,5 \text{ a } 3,0)d_o$	
4	KNS Rao (1978)	Para $3 < Fro < 5,5$: $R = (11,534 Fr_o^{0,5} - 9,113 Fr_o^{0,25}) d_o$ (Datos de prototipo)	
		Para $5,5 < Fro < 10,0$: $R = 4,037 d_o (Fr_o - 3,7627)$ (Datos de prototipo)	
5	U.S.B.R. (1987)	$R > 5 d_o$	Radio Mínimo
6		$R = \left(\frac{H_o}{hp_{m\acute{a}x}}\right) d_o$	$H_o = \frac{V_o^2}{2g}$
7	Mason (1993)	$R = (3 \text{ a } 5)d_o$	
8	Khatsuria (2005)	$R = \sqrt{h_c \times Y_{c-c}}$	
9		$R = (3 \text{ a } 7)d_o$	
10	Bureau of Indian Standards (2010)	$R > 3 d_{o \text{ máx}}$	Radio Mínimo
11		$R = (0,6 \text{ a } 0,8) \sqrt{hc \times H_{sc}}$	0,8 para diseño preliminar

Donde:

do: Calado de aproximación (m)

do_{máx}: Máximo calado de aproximación (m)

Fro: Froude de aproximación

hc: Carga de agua sobre la cresta (m)

Ho: Carga de velocidad en la aproximación (m)

hp_{máx}: Carga de presión máxima (m)

Hsc: Diferencia de niveles entre el embalse y la superficie del agua en el invert (m)

R: Radio del cucharón (m)

Vo: Velocidad media del flujo de aproximación (m/s)

Yc-c: Distancia vertical desde la cresta y el invert del cucharón (m)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.1.2. Elevación del salto en esquí:

La cota del fondo del cucharón (invert) depende del nivel de la roca disponible para la cimentación de la estructura y de la disposición de las obras, por ejemplo, cuando la casa de máquinas se ubica por debajo del cucharón, esta obra define la cota del salto en esquí.

Según Nuray Denli, la elevación de la salida del chorro del salto en esquí debe encontrarse del 30 a 50 % de la altura de la presa y debe estar por arriba del nivel de aguas abajo, para prevenir la abrasión del cucharón por entrada del material del lecho o daños por cavitación debido a la variación de la inmersión del cucharón.

5.3.1.3. Ángulo de salida del cucharón:

El ángulo de salida del salto en esquí afecta en el alcance del flujo y en la profundidad de socavación. Considerando los rangos mostrados en la Tabla 5.2, mientras mayor sea en ángulo de salida, mayor será el alcance del chorro y la profundidad de socavación será mayor. Por lo tanto, la elección final de este parámetro depende tanto del alcance del chorro que se requiera, como de la resistencia de la roca en el sitio de impacto.

Tabla 5.2: Fórmulas y recomendaciones para definir el ángulo de salida del cucharón del salto en esquí

ANGULO DE SALIDA DEL SALTO EN ESQUI (ϕ_c)			
Nº	AUTOR	VALOR	OBSERVACIONES
1	Edward Elevatorski (1959)	20° - 30°	
2	Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos - México (1977)	30° - 45°	
3	Nuray Denli Tokyay (s.f.)	20° - 40°	
4	Rajan y Shivashankara Rao (1980)	20° - 40°	
5	Mason (1993)	20° - 35°	
6	Especificaciones de Diseño de Presas a Gravedad - China (2005)	15 - 35°	
7	Khatsuria (2005)	20° - 40°	FIGURA 5.4
8	Bureau of Indian Standards (2010)	30° - 40°	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.1.4. Presión en el cucharón:

Las presiones a lo largo del cucharón dependen de la velocidad de aproximación, el radio de curvatura de la cubeta y fundamentalmente de la fuerza centrífuga y el calado.

Tabla 5.3: Cálculo de la presión en el cucharón del salto en esquí

PRESIÓN EN EL CUCHARÓN			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Balloffet (1961)	$hp_{m\acute{a}x} = d_o + \frac{V_o^2}{2g} \left(1 - \left(\frac{R - d_o}{R} \right)^2 \right)$	
2		$hp = H_x - (H_x - d_o \cos \phi') \left(\frac{R - d_o}{R} \right)^2$ Para determinar la distribución de presión a lo largo del cucharón, excepto en el labio.	
3	Nuray Denli Tokyay (s.f.)	$\frac{hp_{m\acute{a}x}}{d_o} = \frac{d_o}{R} Fr_o^2$	$Fr_o = \frac{q}{(gd_o^3)^{0,5}}$
4	Mason (1993)		
5	Bureau of Indian Standards (2010)	$P = \left(\frac{V_o^2}{gR} + 1 \right) \gamma d_o$	P en t/m ²
6		$P_{m\acute{a}x} = f(V_o, R, d_o)$	Vo= 10 a 45 m/s R/do= 4 a 10 P _{máx} en t/m ² Ábaco (FIGURA 5.2)

Donde:

ϕ' : Ángulo medido desde el punto más bajo del cucharón hasta un punto x a lo largo de la curva (°)

γ : Peso específico del agua (t/m³)

d_o : Calado de aproximación (m)

Fr_o : Froude de aproximación

hp : Carga de presión (m)

$hp_{m\acute{a}x}$: Carga de presión máxima (m)

H_x : Carga de energía hasta un punto x en el fondo del cucharón (m)

P : Presión (t/m²)

$P_{m\acute{a}x}$: Presión máxima (t/m²)

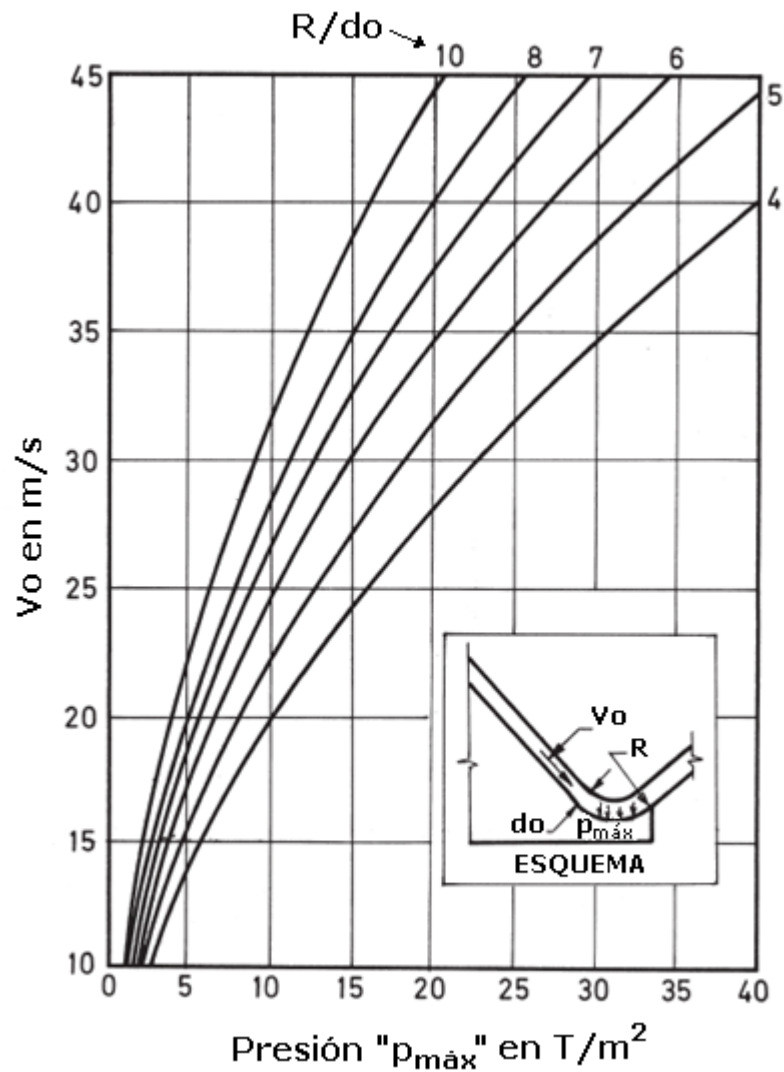
q : Caudal unitario (m²/s)

R : Radio del cucharón (m)

V_o : Velocidad media del flujo de aproximación (m/s)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 5.2: Ábaco para determinar la presión máxima en la cubeta (t/m^2) de un salto en esquí convencional



Fuente: (Bureau of Indian Standards, 2010, pág. 16)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.1.5. Ángulo de despegue del chorro:

Para la determinación del ángulo de despegue del chorro (θ'), en la Tabla 5.4 se presenta varias formulaciones con las cuales se puede determinar este parámetro.

Tabla 5.4: Fórmulas y recomendaciones para definir el ángulo de despegue del chorro

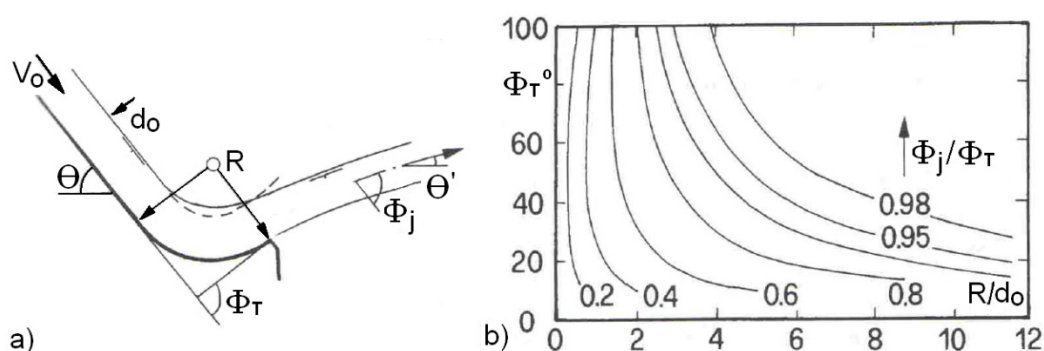
ANGULO DE SALIDA DEL CHORRO			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Orlov (1974)	$\Theta' = \phi_j - \Theta$	R/d pequeño (ϕ_j FIGURA 5.3) $Fr_o > 5(\text{sen}\Theta)^{0.5}$
2		$\Theta' = \phi_T - \Theta$	Si R/d grande, $\phi_j = \phi_T$ $Fr_o > 5(\text{sen}\Theta)^{0.5}$
3	Quadri et al. (1977)	$\Theta' = f(\phi_c, R, d_o)$	Ábaco (FIGURA 5.4)

Donde:

- Θ' : Ángulo de salida del chorro (°)
- d_o : Calado de aproximación (m)
- ϕ_c : Ángulo de salida del cucharón (°)
- ϕ_j : Ángulo total de salida del chorro (°)
- Fr_o : Froude de aproximación
- R : Radio del cucharón (m)
- Θ : Ángulo de inclinación del fondo del canal de aproximación (°)
- ϕ_T : Ángulo total de deflexión del cucharón (°)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

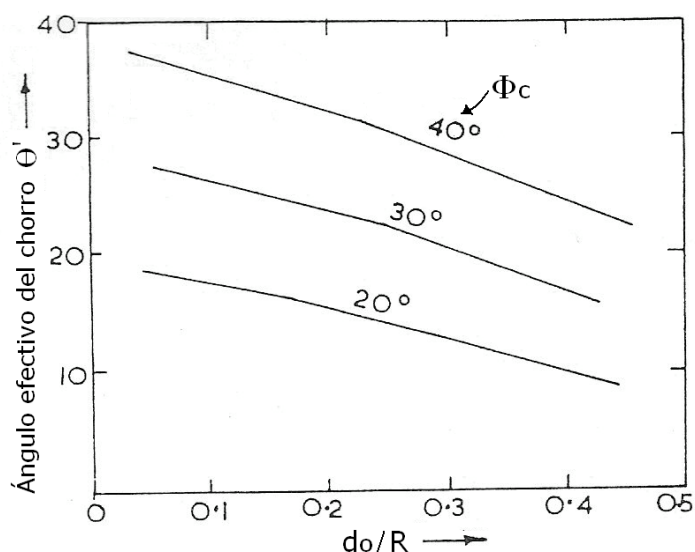
Figura 5.3: Ábaco para determinar el ángulo de salida del chorro del salto en esquí convencional (Orlov)



Fuente: (Vischer & Hager, 1995, pág. 140)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 5.4: Ábaco para determinar el ángulo de salida del chorro del salto en esquí convencional (Quadri et al.)



Fuente: (Khatsuria, 2005, pág. 447)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.1.6. Ángulo del labio aguas abajo de la salida del chorro:

El ángulo del labio medido desde la horizontal en sentido anti-horario (θ_L), depende del ángulo de salida del chorro (θ') y se considera en el diseño con el objetivo de evitar la presencia de sub presión al final del cucharón (labio). En la Tabla 5.5, se presenta el criterio de diseño.

Tabla 5.5: Definición del ángulo del labio aguas abajo de la salida del salto en esquí

ANGULO DEL LABIO (Medido desde la horizontal en sentido horario, θ_L)			
Nº	AUTOR	VALOR	OBSERVACIONES
1	Khatsuria (2005) - U.S.B.R (1978)	$\theta_L = \theta'' - \theta'$	Para evitar cavitación al final del labio: $\theta'' > 40^\circ$ θ'' : medido desde la napa inferior del chorro hasta el labio. Ábaco (FIGURA 5.5)

Donde:

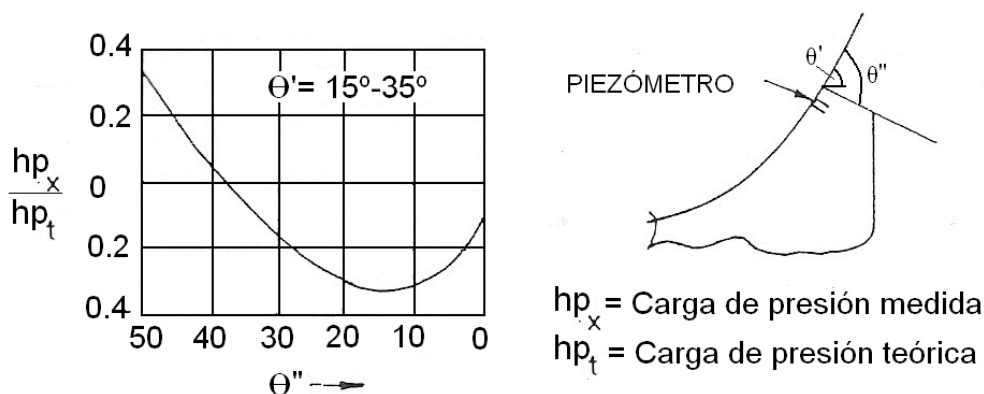
θ_L : Ángulo del labio medido desde la horizontal en sentido horario ($^\circ$)

θ'' : Ángulo del labio medido desde la napa inferior del chorro ($^\circ$)

θ' : Ángulo de salida del chorro ($^\circ$)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 5.5: Ábaco para determinar el ángulo del labio aguas abajo de la salida del salto en esquí



Fuente: (Khatsuria, 2005, pág. 453)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.1.7. Ángulo expansión transversal del chorro:

Para la determinación del ángulo de expansión transversal del chorro (ψ_j , medido desde el eje de simetría hacia uno de los lados), en la Tabla 5.6 se presenta una formulación con la cual se puede determinar este parámetro.

Tabla 5.6: Fórmula para determinar el ángulo de expansión transversal del chorro

ÁNGULO DE EXPANSIÓN TRANSVERSAL DEL CHORRO			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Vischer y Hager (1995)	$\psi_j = \tan^{-1} \left(\frac{1,05 \left(\frac{d}{Y} \right)^{0,5}}{\tanh(6\bar{q}^{1/3})} \right)$	Rango entre 5 y 10° $d/R < 0,10$ $\bar{q} = q / (gL_v^3)^{0,5}$

Donde:

ψ_j : Ángulo de expansión transversal del chorro (°)

d : Calado en el cucharón (m)

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

L_v : Longitud del vertedero desde la cresta hasta el labio (m)

q : Caudal unitario ($m^3/s/m$)

Y : Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del cucharón (m)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.1.8. Recomendaciones generales:

- Se recomienda aguas abajo de la cubeta el reforzamiento del lecho con hormigón armado en una longitud de alrededor de 15 m con un espesor mínimo de 1 m.⁵⁸

5.3.2. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES (DENTADO)

Los saltos en esquí con deflectores disipan mayor energía que un salto en esquí convencional, disminuyendo la socavación aguas abajo de la estructura. Este tipo de salto en esquí, es recomendable cuando:

- Las condiciones geológicas del cauce aguas abajo requieran de una menor afectación del chorro.
- Es posible sacrificar un porcentaje del alcance del chorro sin que éste ponga en riesgo la estabilidad de la estructura y sus obras anexas.
- La configuración del proyecto, específicamente la ubicación de los vertederos de excesos, donde el chorro no afecte significativamente a la morfología del cauce debido a la posible expansión transversal del chorro por el uso de deflectores (dientes).

Los saltos en esquí con deflectores pueden tener varios tipos de dientes, de los cuales los más utilizados son los deflectores rectangulares y los deflectores trapezoidales. A continuación se presentan criterios de dimensionamiento de estos deflectores (dientes):

5.3.2.1. Recomendaciones generales:

En la Tabla 5.7 se presentan recomendaciones generales en cuanto a la forma y disposición de los deflectores en el cucharón.

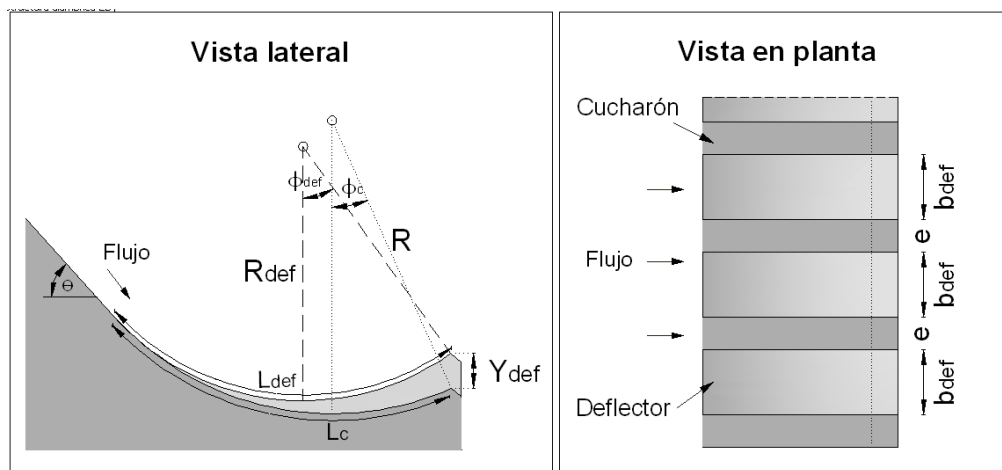
⁵⁸ Bureau of Indian Standards (2010). *Criteria for Hydraulic Design of Bucket Type Energy Dissipators*. p. 15.

Tabla 5.7: Recomendaciones generales para el uso de deflectores

GENERALIDADES		
Nº	AUTOR	RECOMENDACIONES
1	Luthra (1965) ⁵⁹	El espaciamiento de los deflectores debe ser uniforme. El perfil longitudinal del deflector debe ser de la forma del cucharón.
2	Chengyi (1988) ⁶⁰	El deflector debe ser trapezoidal con paredes expandidas para: reducir la presencia de presiones negativas en la estructura de disipación y para obtener una menor socavación.
3	Epicum et al (2010)	La repartición de los deflectores debe ser alejada de los extremos (paredes del cucharón), ya que esta configuración es más favorable en cuanto a la disminución de volumen y profundidad de socavación.

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

A continuación se presentan las tablas base y figuras guía, utilizadas dentro de los criterios y recomendaciones de diseño en los numerales 5.3.2.2 al 5.3.2.9.

Figura 5.6: Esquema de deflectores rectangulares

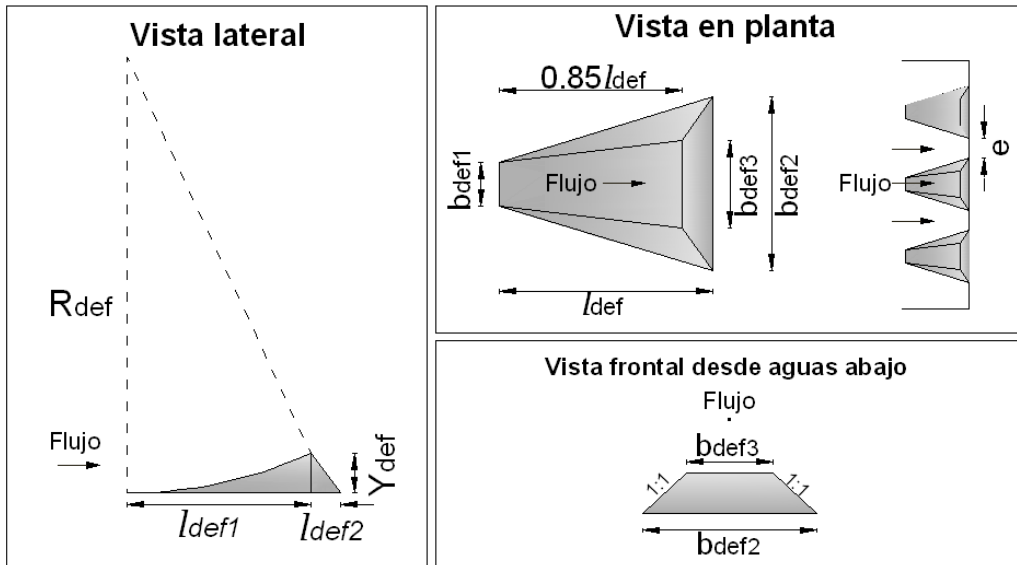
Fuente: (Republic of China Water Industry Standard, 2005, pág. 9)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

⁵⁹Vischer, D. L., & Hager, W. H. (1995). *Energy Dissipators*. Rotterdam: A. A. Balkema. p 116.

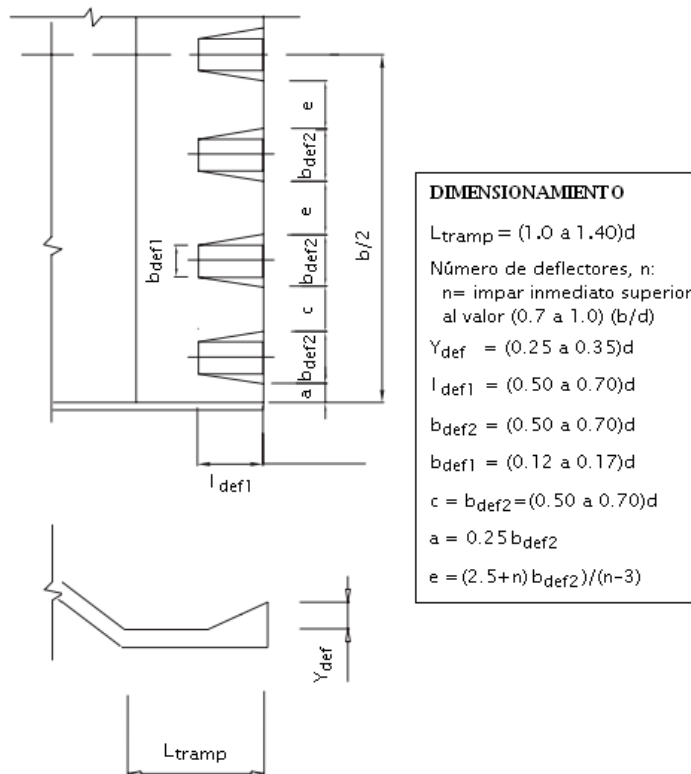
⁶⁰Golzari, F. (2004). Effect of using dentate ski jump spillways on scouring profile. *2nd International Conference on Scour and Erosion-Singapore*, 367-375.p 369.

Figura 5.7: Esquema guía para definir la geometría de deflectores trapezoidales con perfil curvo.



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 5.8: Dimensionamiento de trampolín plano con deflectores tipo L-1



Fuente: (González Fariñas, 2004, pág. 403)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 5.8: Geometrías de deflectores (dientes) utilizadas en presas en China

N°	Nombre del Proyecto	Fin de construcción	Tipo de deflector	Condiciones de operación	Diferencia de ángulos de salida			Relación de anchos del deflector			% ocupación	Altura del deflector		Radio (m)		
					$\Phi_{def} - \Phi_c = \Delta\Phi_c$	e	b _{def}	e / b _{def}	(m)	Y _{def} /R		R _{def}	R	R _{def} /R		
1	Fengman	1953	Rectangular	Sin cavitación	40	30	10	1.0	1.7	0.6	0.63	1.5	0.13	12.0	12.0	1.0
2	Shizitan	1956	Rectangular	Sin cavitación	32	26	6	1.3	2.0	0.7	0.61	1.5	0.09	15.0	17.2	0.9
3	Meishan	1959	Rectangular	Sin cavitación	44	40	4	-	-	-	-	-	-	7.5	8.9	0.8
4	Zhexi	1963	Rectangular (original)	Cavitación Severa	40	13	27	3.4	4.6	0.7	-	2.75	-	11.0	17.3	0.6
5	Xinanjiang	1970	Rectangular	Sin cavitación	30	12	18	2.5	2.5	1.0	0.50	1.6	0.03	20.0	47.0	0.4
6	Gutian 1	1973	Rectangular	Sin cavitación	40	25	15	1.6	2.6	0.6	0.62	2.5	0.24	8.9	10.2	0.9
7	Huanglongtan	1976	Rectangular	Sin cavitación	34	24	10					1.8	0.09	22.1	19.0	1.2
8	Ansha	1978	Rectangular	Sin cavitación	25	15	10	2.8	3.6	0.8	0.56	3.5	0.14	22.4	25.1	0.9
9	Chitan	1978	Rectangular	Sin cavitación	38	18	20	1.5	2.5	0.6	0.63	2.25	0.08	29.9	30.0	1.0
				-	25	18	7	-	-	-	-	2.18	0.10	18.4	22.0	0.8

PROMEDIO	
STD	
RANGO	MÁX
	MÍN

0.7	0.59
0.2	0.05
0.9	0.64
0.5	0.54

0.11
0.06
0.17
0.05

0.9
0.2
1.1
0.7

Fuente: (Bureau of Indian Standards, 2010, págs. 8-9)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 5.9: Número y ancho de deflectores rectangulares (dientes) utilizados en varias presas

N°	Nombre del Proyecto	Fin de construcción	Tipo de deflector	b (m)	n	b _{def}	% de ocupación	b _{def} /b
1	Slapy	1954	Rectangular	21.0	4	2.7	0.51	0.13
2	Orlik	1963	Rectangular	45.0	18	1.3	0.52	0.03
3	Xinanjiang	1970	Rectangular	177.5	36	2.5	0.51	0.01
4	Longshou Secondary	-	Rectangular	28.0	6	3.0	0.64	0.11
5	Toachi - Pilatón	2010	Rectangular	14.0	2	3.3	0.46	0.23

PROMEDIO	
STD	
RANGO	MÁX
	MÍN

0.5	0.10
0.1	0.09
0.6	0.19
0.5	0.01

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 5.10: Geometrías de deflectores trapezoidales (dientes) utilizadas en varias presas

N°	Nombre del Proyecto	Fin de construcción	Características del cucharón con deflectores			Diferencia de ángulos de salida			Relación de anchos del deflector					Altura del deflector		Longitud del deflector					Pendiente pared		Radio (m)			
			Tipo de deflector	b (m)	n	$\Phi_{def} - \Phi_c = \Delta\Phi_c$	e/b_{def2}	ocupación	b_{def1}/b_{def2}	b_{def3}/b_{def2}	b_{def2}/b	Y_{def}/R_{def}	Y_{def}/R_{def}	l_{def}/b_{def2}	l_{def1}/b_{def2}	l_{def2}/b_{def2}	l_{def3}/b_{def2}	m/m	R_{def}	R	R_{def}/R					
1	Zhexi	1963	Trapezoidal (actual)	146.0	18	40	20	20	-	-	-	-	-	1.6	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	11.0	15.0	0.7
2	Golzari	2004	Trapezoidal	47.4	5	20	0	20	0.28	0.78	0.25	0.43	0.16	2.0	0.13	1.18	1.01	0.17	0.86	0.96	15.0	-	-	-	-	
3	Shahryar	2005	Trapezoidal	34.0	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	Lechang Gorge	2011	Trapezoidal	60.0	4	20	0	20	0.47	0.68	0.34	0.59	0.17	2.1	0.06	1.38	1.17	0.21	0.85	1.00	35.0	26.0	1.3	-	-	

PROMEDIO
STD
RANGO
MÁX
MÍN

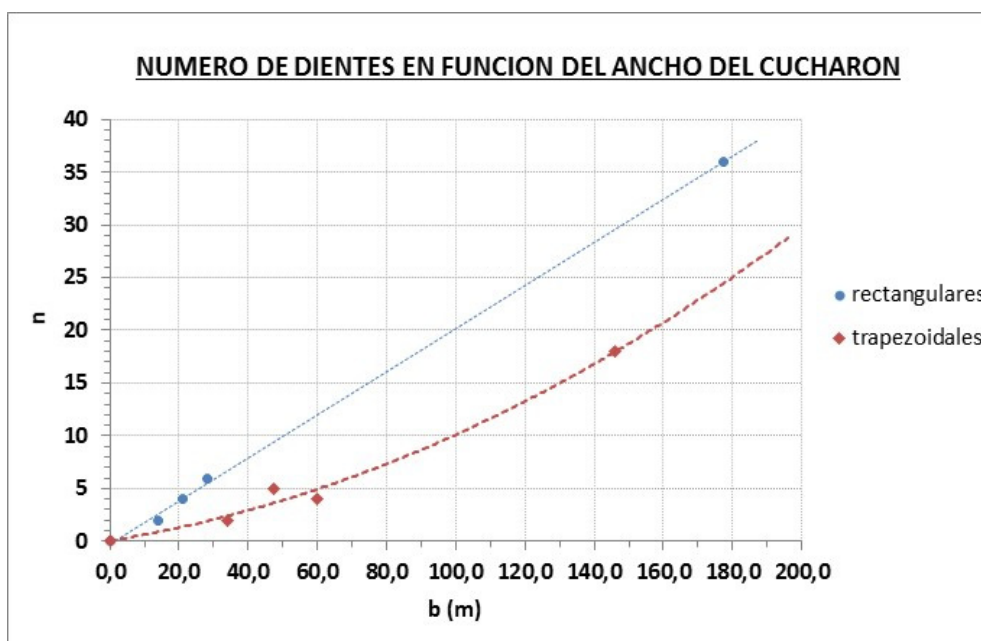
0.38	0.73	0.30	0.51	0.16
0.13	0.07	0.06	0.11	0.01
0.51	0.80	0.36	0.62	0.17
0.25	0.66	0.24	0.40	0.15

0.11	1.28	1.09	0.19	0.85	1.0
0.05	0.14	0.11	0.03	0.01	0.0
0.16	1.42	1.20	0.21	0.86	1.0
0.07	1.14	0.98	0.16	0.85	0.9

1.0
0.4
1.5
0.6

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 5.9: Número de dientes en función del ancho del cucharón, utilizados en varios proyectos (Tabla 5.9 y Tabla 5.10)



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.2.2. Ángulos de salida:

La elección adecuada de los ángulos de salida, tanto del cucharón como de los deflectores, disminuye la posibilidad de que se presenten problemas de cavitación en la estructura de disipación. Es por ello que en la Tabla 5.11 se presentan los rangos admisibles de estos ángulos.

Tabla 5.11: Relaciones y recomendaciones para definir el ángulo de salida de los deflectores (dientes)

ANGULO DE SALIDA			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Chen Sheng & Chen Minlin (2004)	$\Delta\phi_c = \phi_{def} - \phi_c = 5^\circ \text{ a } 10^\circ$	Diferencia entre ángulo de salida del deflector y del cucharón, para deflectores rectangulares.
2		$\frac{\phi_c + \phi_{def}}{2} = 20^\circ \sim 30^\circ$	Valor promedio del ángulo de salida para deflectores rectangulares.
3	González Fariñas (2004)	$\theta'_{def} = 6,601 \ln\left(\frac{Y_{def}}{d}\right) + 20,8$	Ángulo de salida medio de chorro sobre los deflectores con perfil longitudinal triangular (Fr_o entre 9 y 39, y $\phi_c = 0^\circ$) FIGURA 5.8
4	Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	$\phi_{def} = \Delta\phi_c + \phi_c$	Para deflectores rectangulares. $\Delta\phi_c = 5-10^\circ$ (espaciamiento uniforme) $\Delta\phi_c = 15-20^\circ$ (espaciamiento no uniforme) $\phi_{def} = 25 \text{ a } 44^\circ$ $\phi_c = 12 \text{ a } 40^\circ$ TABLA 5.8 y FIGURA 5.6
5	Varios proyectos (-)	$\phi_{def} = \Delta\phi_c + \phi_c$	Para deflectores trapezoidales. $\Delta\phi_c \sim 20^\circ$ $\phi_c = 0$ Ver TABLA 5.10

Donde:

ϕ_c : Ángulo de salida del cucharón ($^\circ$)

ϕ_{def} : Ángulo de salida del deflector ($^\circ$)

θ'_{def} : Ángulo de salida del chorro sobre los deflectores ($^\circ$)

Y_{def} : Altura del deflector (m)

d : Calado en el cucharón aguas arriba del deflector (m)

Fr_o : Froude del flujo de aproximación

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.2.3. Radio del deflector (R_{def})

La Tabla 5.12 a continuación, presenta rangos de radio del deflector relativo al radio de la cuchara, (R_{def}/R).

Tabla 5.12: Radio relativo del deflector (R_{def}/R)

RADIO RELATIVO DEL DEFLECTOR			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	$R_{def} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{2 \sin\left(\frac{\phi_{def} + \theta}{2}\right)}$ $\frac{R_{def}}{R} = 0,7 \sim 1,1$	Para deflectores rectangulares TABLA 5.8 y FIGURA 5.6
2	Varios proyectos (-)	$\frac{R_{def}}{R} = 0,7 \sim 1,3$	Para deflectores trapezoidales, en base a prototipos. TABLA 5.10

Donde:

ϕ_{def} : Ángulo de salida del deflector (°)

R : Radio de la cuchara (m)

R_{def} : Radio del deflector (m)

θ : Ángulo de la rápida (°)

x_1, y_1 : Coordenadas del fin de la rápida (m)

x_2, y_2 : Coordenadas del labio del deflector (m), donde y_2 es la coordenada del labio del cucharón

más la altura del deflector

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.2.4. Alto del deflector (Y_{def})

En la Tabla 5.13, se presenta varias relaciones para determinar la altura de los deflectores.

Tabla 5.13: Relaciones para determinar la altura de los deflectores

ALTO DEL DEFLECTOR			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Chen Sheng & Chen Minlin (2004)	$Y_{def} \approx 1,5 m$	Para deflectores rectangulares
3	González Fariñas (2004)	$\frac{Y_{def}}{d} = 0,25 \sim 0,35$	Para deflectores trapezoidales con perfil longitudinal triangular tipo L-1 (Fr_o entre 9 y 39). FIGURA 5.8
2	Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	$\frac{Y_{def}}{R} = 0,05 \sim 0,17$	Para deflectores rectangulares TABLA 5.8
4	Varios proyectos (-)	$Y_{def} = 2R_{def} \left(\sin \frac{\phi_{def}}{2} \right)^2$ $\frac{Y_{def}}{R_{def}} = 0,07 \sim 0,16$	Para deflectores trapezoidales, en base a prototipos. FIGURA 5.7 y TABLA 5.10

Donde:

d : Calado en el cucharón aguas arriba del deflector (m)

Fr_o : Froude del flujo de aproximación

R : Radio del cucharón (m)

R_{def} : Radio del deflector (m)

Y_{def} : Altura del deflector (m)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.2.5. Largo del deflector

La Tabla 5.14 contiene recomendaciones respecto a la longitud que deben tener los deflectores.

Tabla 5.14: Recomendaciones para determinar la longitud de los deflectores de un salto en esquí dentado

LONGITUD DE DEFLECTORES			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	González Fariñas (2004)	$l_{def1} = 0,5d \sim 0,7d$	Deflectores trapezoidales con perfil longitudinal triangular tipo L-1 (Fr_o entre 9 y 39). FIGURA 5.8
2	Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	$L_c = R (\phi_c + \theta)$ $L_{def} = R_{def} (\phi_{def} + \theta)$	Para deflectores rectangulares, con el mismo punto de partida que el cucharón.
3	Varios proyectos (-)	$l_{def1} = 2R_{def} \sin\left(\frac{\phi_{def}}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_{def}}{2}\right)$ $\frac{l_{def1}}{l_{def}} \approx 0,85$ $l_{def} = l_{def1} + l_{def}$	Para deflectores trapezoidales, en base a prototipos. FIGURA 5.7 y TABLA 5.10

Donde:

d : Calado en el cucharón aguas arriba del deflector (m)

ϕ_c : Ángulo de salida del cucharón (°)

ϕ_{def} : Ángulo de salida del deflector (°)

Fr_o : Froude del flujo de aproximación

l_{def1} : Longitud del deflector desde su punto inicial hasta el punto más alto del mismo (m)

l_{def2} : Longitud del deflector desde el punto más alto hasta el labio de la cuchara (m)

R : Radio del cucharón (m)

R_{def} : Radio del deflector (m)

L_c : Longitud curva del cucharón (m)

L_{def} : Longitud curva del deflector (m)

θ : Ángulo de la rápida (°)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.2.6. Ancho del deflector y espaciamiento.

En la Tabla 5.15, se presenta las relaciones que deben existir entre el ancho de los deflectores y el espaciamiento entre ellos, tanto para deflectores rectangulares como trapezoidales.

Tabla 5.15: Relaciones entre ancho de los deflectores y espaciamiento

ANCHO DEL DELECTOR VS ESPACIAMIENTO			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Chen Sheng & Chen Minlin (2004)	$\frac{b_{def}}{e} > 1$	Para deflectores rectangulares
2	González Fariñas (2004)	$b_{def1} = 0,12d \sim 0,17d$ $b_{def2} = 0,50d \sim 0,70d$ $a = 0,25b_{def2}$ $c = b_{def2}$ $e = \frac{(2,5 + n)}{n - 3} b_{def2}$	Para deflectores trapezoidales tipo L-1 (Fr_o entre 9 y 39) Espaciamientos entre deflectores (c y e) y paredes del vertedero (a) FIGURA 5.8
3	Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	$\frac{e}{b_{def}} = 0,5 \sim 0,9$	Para deflectores rectangulares TABLA 5.8 y FIGURA 5.6
4	Huang et al.(2011)	$\frac{e}{b_{def2}} \approx 0,5$	Para deflectores trapezoidales
5	Varios Proyectos (-)	$\frac{e}{b_{def2}} = 0,25 \sim 0,51$ $b_{def2} = \frac{b (\% \text{ ocupación})}{n}$ $\frac{b_{def1}}{b_{def2}} = 0,24 \sim 0,36$ $b_{def3} = b_{def2} - 2Y_{def}$	Para deflectores trapezoidales TABLA 5.10 y FIGURA 5.7 Se recomienda que se cumplan las siguientes relaciones: $\frac{l_{def}}{b_{def2}} = 1,14 \sim 1,42$ $\frac{b_{def2}}{b} = 0,15 \sim 0,17$
6		$\frac{b_{def}}{b} = 0,01 \sim 0,19$	Para deflectores rectangulares TABLA 5.9 y FIGURA 5.6

Donde:

- a : Espaciamiento entre el deflector y la pared (m)
- b_{def} : Ancho del deflector rectangular (m)
- b_{def1} : Ancho inicial del deflector trapezoidal (m)
- b_{def2} : Ancho inferior a la salida del deflector trapezoidal (m)
- c : Espaciamiento luego del primer deflector más cercano a la pared (m)
- d : Calado en el cucharón aguas arriba del deflector (m)
- e : Espaciamiento entre deflectores (m)
- Fr_o : Froude del flujo de aproximación
- l_{def} : Longitud del deflector (m)
- n : Número de dientes
- Y_{def} : Altura del deflector (m)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.2.7. Número de deflectores

Una guía para la determinación del número de deflectores a utilizar, se muestra en la Tabla 5.16 a continuación:

Tabla 5.16: Determinación del número de deflectores

NUMERO DE DEFLECTORES			
Nº	AUTOR	FÓRMULA*	OBSERVACIONES
1	González Fariñas (2004)	$n = \frac{\% \text{ ocupación } b}{100 b_{def2}}$ $n = \frac{0,5b}{b_{def2}}$	Deflectores trapezoidales con perfil longitudinal triangular tipo L-1 (Fr_0 entre 9 y 39). FIGURA 5.8 n debe ser el impar inmediatamente superior 0.5 equivale al 50 % de ocupación del ancho de la cuchara
2	Epicum et al (2010)	$\text{Ocupación} = \frac{2}{5} \text{ ó } \frac{3}{5}$	Para deflectores rectangulares. Preferiblemente usar 3/5 de ocupación. FIGURA 5.9

Donde:

n: Número de deflectores

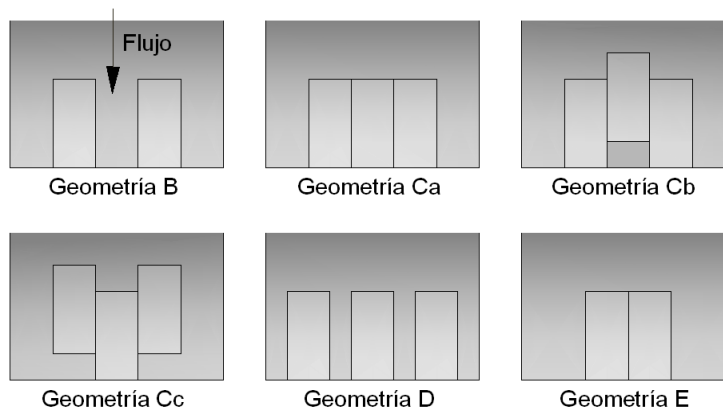
b_{def2} : Ancho inferior a la salida del deflector trapezoidal (m)

b: Ancho a la salida del cucharón (m)

Fr_0 : Froude del flujo de aproximación

* Ocupación de los deflectores respecto al ancho de la cuchara.

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 5.10: Distribución de deflectores recomendadas por Epicum et al. (2010)

Fuente: (Epicum, et. al., 2010, pág. 108)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.2.8. Pendiente de las paredes del deflector

La Tabla 5.17 contiene el valor recomendado de la pendiente de las paredes laterales de dientes trapezoidales, el cual se ha obtenido con base en varios proyectos (Tabla 5.10) que han utilizado este tipo de dientes.

Tabla 5.17: Pendiente de las paredes laterales de deflectores trapezoidales

PENDIENTE DE LAS PAREDES DE LOS DEFLECTORES			
Nº	AUTOR	VALOR	OBSERVACIONES
1	Varios proyectos (-)	1H : 1V	Para deflectores trapezoidales, en base a prototipos. FIGURA 5.7 y TABLA 5.10

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.2.9. Número de Froude

(González Fariñas, 2004), en su estudio establece que los deflectores tipo L-1, se limitan para un rango de Froude de 7 a 39, como se puede observar en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18: Rango de número de Froude a utilizarse en el diseño de deflectores tipo L-1

NUMERO DE FROUDE			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	González Fariñas (2004)	$Fr_o = 7 \sim 39$	Para deflectores trapezoidales con perfil longitudinal triangular tipo L-1. FIGURA 5.8
2		$Fr_{m\acute{a}x} = \frac{2,94(d + 10)}{d}$	

Donde:

d : Calado en el cucharón aguas arriba del deflector (m)

Fr_o : Froude del flujo de aproximación

$Fr_{m\acute{a}x}$: Froude máximo por debajo del cual no se presentan presiones subatmosféricas en los deflectores

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.3. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES

Los saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes ayudan a disipar una mayor cantidad de energía con respecto al convencional, pero teniendo como propósito principal el direccionar el chorro hacia el centro del cauce. Este tipo de salto en esquí es recomendable cuando:

- El río es angosto y con laderas profundas.
- La configuración del proyecto y la ubicación u orientación de los vertederos de excesos hacen necesario la concentración del chorro a lo largo del eje del cauce.

A continuación se presentan los criterios de dimensionamiento de este tipo de dissipador de energía:

5.3.3.1. Recomendaciones generales:

En la Tabla 5.19 se presentan recomendaciones generales para un adecuado dimensionamiento de los saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes.

Tabla 5.19: Recomendaciones generales para el correcto dimensionamiento de saltos en esquí con estrechamiento de paredes

GENERALIDADES		
Nº	AUTOR	RECOMENDACIONES
1	Vischer y Hager (1995)	El correcto funcionamiento de la contracción depende del Froude de aproximación (Fr_2), el grado de convergencia (b_c/b) y el ángulo de contracción (θ_c)
2	Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	Los parámetros a considerar para el diseño son: 1) El ángulo de salida del cucharón 2) La relación de contracción (b_c/b) 3) El ángulo de contracción (θ_c)
3	Huang et al. (2006)	El ángulo de contracción debe ser seleccionado cuidadosamente para evitar disturbios en el flujo que conlleven a una sobre elevación del calado. Las paredes curvas reducen el efecto de las ondas de choque, pero son de difícil construcción. El uso de sección transversal trapezoidal es útil cuando la variación de caudales es amplia, pero su construcción es más compleja que una sección transversal rectangular.

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

A continuación se presentan las tablas base y figuras guía, utilizadas dentro de los criterios y recomendaciones de diseño de los numerales 5.3.3.2 al 5.3.3.9.

Tabla 5.20: Características del salto en esquí con estrechamiento de paredes de varios proyectos

Nombre del proyecto		Contracción	Angulo de contracción	Longitud de contracción
		bc/b	Θ_c	lc/b
Presa Hunan East River *		0.25	4.74	
Proyecto Hidroeléctrico Ankang*		0.38		
Presa Yantan *		0.37	16.70	
Presa Guizhou Dongfeng *	Vertedero central	0.25	2.03	
	Vertedero lateral	0.33	2.11	
Presa Guangdong old *		0.11	13.65	
Vertedero Hubei SHUIBUYA*		0.25	12.68	
Presa Hubei Bajiaohe *		0.33	8.00	
Presa Shaanxi *		0.27	18.16	
Fujian Nanping*		0.25	5.00	
			8.75	
Tunel de la Presa Guang Xi Sian River *		0.25	3.65	
Vertedero Guizhou*		0.30	9.00	
Presa Guangzhao		0.28	18.70	1.10
Presa Laxiwa		0.36	12.10	1.50
		0.40	10.00	1.70
Presa Longyang		0.30	12.70	1.60
Presa Dong Jiang		0.75	4.80	1.50
		0.33	9.50	2.00

PROMEDIO	0.3	10	1.6
STD	0.1	5	0.3
RANGO +	0.4	15	1.9
RANGO -	0.2	4	1.3

Fuente: *(Huang et al, 2006)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 5.21: Guía para el diseño de saltos en esquí con estrechamiento de paredes

RELACIONES PARA EL DISEÑO INICIAL DE SALTOS EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE PAREDES								
Fr_0	θ_c	K	l_c/b	b_c/b	d_1/d_0	l_{oc1}/b	d_2/d_0	Fr_2
3	3	0.468	2.141	0.776	1.223	1.185	1.447	2.367
	4	0.569	2.054	0.713	1.254	1.159	1.509	2.300
	5	0.656	1.985	0.653	1.277	1.139	1.555	2.253
	6	0.735	1.928	0.595	1.295	1.124	1.591	2.217
	7	0.809	1.869	0.541	1.309	1.113	1.619	2.189
	8	0.881	1.833	0.485	1.321	1.014	1.642	2.168
	9	0.950	1.791	0.433	1.330	1.096	1.660	2.150
	10	1.112	1.724	0.392	1.364	1.070	1.727	2.089
	11	1.321	1.653	0.357	1.407	1.039	1.811	2.018
	12	1.548	1.586	0.326	1.450	1.008	1.895	1.950
	13	1.802	1.523	0.297	1.495	0.978	1.982	1.885
4	3	0.594	2.682	0.719	1.334	1.525	1.689	2.942
	4	0.738	2.523	0.647	1.381	1.478	1.771	2.767
	5	0.870	2.436	0.574	1.416	1.445	1.862	2.769
	6	0.990	2.349	0.506	1.442	1.422	1.918	2.717
	7	1.111	2.271	0.442	1.464	1.403	1.964	2.677
	8	1.229	2.202	0.381	1.481	1.388	2.000	2.645
	9	1.354	2.138	0.323	1.494	1.376	2.032	2.620
	10	1.615	2.041	0.280	1.547	1.335	2.140	2.533
	11	1.950	1.940	0.246	1.610	1.286	2.275	2.431
	12	2.324	1.847	0.215	1.675	1.239	2.413	2.336
	13	2.738	1.761	0.187	1.742	1.193	2.555	2.245
5	3	0.717	3.127	0.672	1.446	1.812	1.943	3.449
	4	0.906	2.940	0.589	1.508	1.748	2.080	3.314
	5	1.082	2.796	0.511	1.554	1.703	2.183	3.220
	6	1.252	2.678	0.437	1.590	1.669	2.263	3.152
	7	1.423	2.575	0.368	1.618	1.643	2.326	3.099
	8	1.603	2.484	0.302	1.642	1.623	2.380	3.058
	9	1.792	2.400	0.240	1.661	1.606	2.423	3.024
	10	2.168	2.276	0.197	1.729	1.549	2.576	2.912
	11	2.654	2.150	0.164	1.814	1.483	2.770	2.784
	12	3.200	2.035	0.135	1.901	1.420	2.968	2.664
	13	3.819	1.929	0.109	1.990	1.360	3.173	2.551
6	3	0.868	3.461	0.637	1.589	2.031	2.241	3.867
	4	1.114	3.224	0.549	1.672	1.944	2.243	3.696
	5	1.202	3.076	0.462	1.735	1.883	2.434	3.691
	6	1.400	2.925	0.385	1.783	1.883	2.522	3.615
	7	1.610	2.793	0.314	1.821	1.804	2.592	3.558
	8	1.837	2.674	0.248	1.852	1.777	2.648	3.514
	9	2.096	2.584	0.181	1.878	1.755	2.696	3.478
	10	2.556	2.409	0.150	1.970	1.681	2.861	3.359
	11	3.145	2.252	0.125	2.085	1.596	3.063	3.226
	12	3.816	2.111	0.103	2.203	1.517	3.267	3.104
	13	4.595	1.980	0.086	2.325	1.442	3.472	2.990

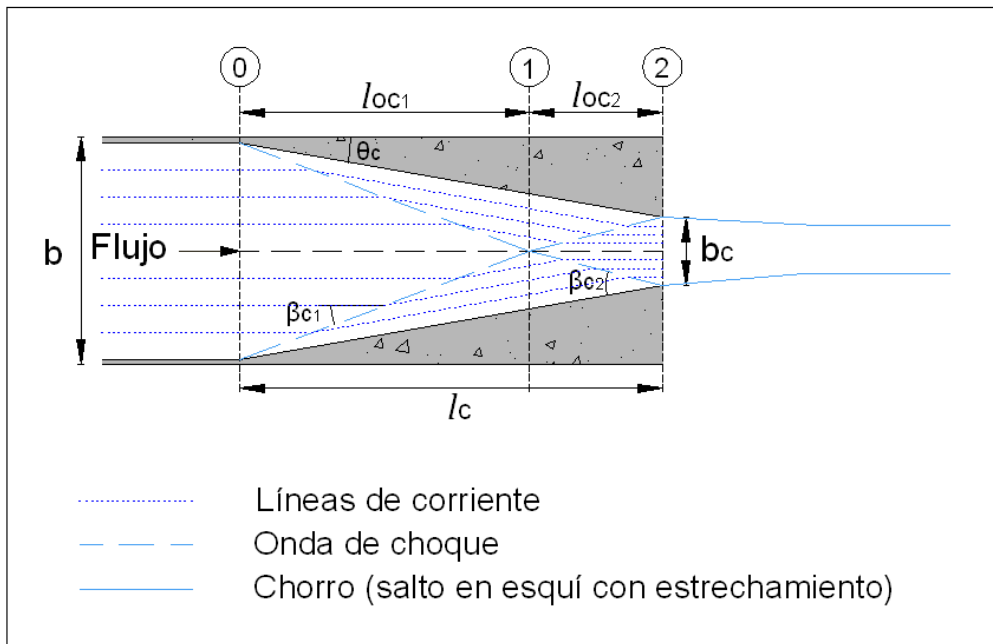
Continúa.

RELACIONES PARA EL DISEÑO INICIAL DE SALTOS EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE PAREDES									
Fr_0	θ_c	K	l_c/b	b_c/b	d_1/d_0	l_{oc1}/b	d_2/d_0	Fr_2	
7	3	1.069	3.671	0.615	1.787	2.161	2.614	1.184	
	4	1.392	3.385	0.527	1.901	2.047	2.862	3.799	
	5	1.592	3.193	0.441	1.987	1.969	2.948	3.911	
	6	1.871	3.019	0.365	2.054	1.912	3.071	3.822	
	7	2.167	2.870	0.295	2.107	1.869	3.169	3.754	
	8	2.491	2.738	0.230	2.151	1.835	3.249	3.702	
	9	2.864	2.615	0.172	2.187	1.807	3.314	3.659	
	10	3.517	2.438	0.140	2.315	1.715	3.543	3.520	
	11	4.351	2.261	0.121	2.477	1.611	3.828	3.365	
	12	5.314	2.100	0.107	2.644	1.514	4.114	3.225	
	13	6.421	1.954	0.098	2.817	1.424	4.403	3.096	
	8	3	1.303	3.806	0.601	2.018	2.238	3.043	4.437
		4	1.710	3.480	0.513	2.169	2.099	3.362	4.199
5		2.048	3.247	0.432	2.284	2.004	3.546	4.076	
6		2.420	3.056	0.358	2.737	1.936	3.710	3.974	
7		2.816	2.893	0.290	2.445	1.884	3.841	3.897	
8		3.255	2.749	0.227	2.503	1.844	3.946	3.837	
9		3.764	2.617	0.171	2.552	1.811	4.034	3.790	
10		4.650	2.422	0.146	2.726	1.703	4.343	3.633	
11		5.772	2.227	0.134	2.945	1.582	4.723	3.460	
12		7.067	2.053	0.127	3.172	1.472	5.106	3.305	
13		8.566	1.896	0.125	3.409	1.371	5.497	3.164	
9		3	1.604	3.873	0.594	2.282	2.271	3.570	4.610
		4	2.094	3.517	0.508	2.479	2.109	3.949	4.361
	5	2.572	3.255	0.430	2.628	1.999	4.230	4.198	
	6	3.048	3.050	0.359	2.744	1.921	4.441	4.085	
	7	3.565	2.875	0.294	2.838	1.862	4.611	4.000	
	8	4.137	2.772	0.235	2.915	1.816	4.748	3.935	
	9	4.803	2.584	0.181	2.979	1.780	4.862	3.883	
	10	5.951	2.375	0.162	3.207	1.659	5.261	3.712	
	11	7.408	2.167	0.158	3.497	1.525	5.765	3.524	
	12	9.095	1.982	0.157	3.799	1.404	6.257	3.356	
	13	11.044	1.816	0.161	4.114	1.294	6.765	3.204	
	10	3	1.887	3.981	0.583	2.490	2.346	4.069	4.803
		4	2.465	3.595	0.497	2.723	2.164	4.528	4.531
5		3.043	3.314	0.420	2.900	2.042	4.871	4.351	
6		3.635	3.094	0.350	3.038	1.956	5.137	4.225	
7		4.278	2.908	0.286	3.150	1.891	5.351	4.131	
8		5.009	2.747	0.228	3.241	1.840	5.543	4.050	
9		5.862	2.603	0.175	3.318	1.800	5.707	3.983	
10		7.391	2.385	0.159	3.591	1.668	6.299	3.768	
11		9.344	2.171	0.156	3.939	1.523	7.055	3.529	
12		11.582	1.985	0.156	4.301	1.394	7.845	3.317	
13		14.138	1.820	0.160	4.682	1.277	8.677	3.123	

Fuente: (Hangen, 2000, pág. 236 a 238)

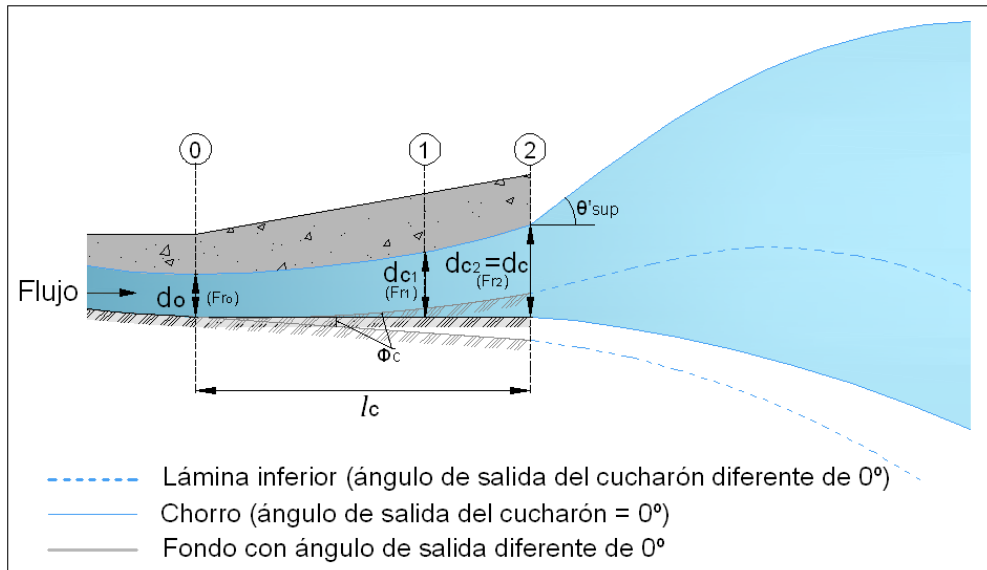
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 5.11: Esquema en planta de un salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes



Fuente: (Hangen, 2000, pág. 214)
Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 5.12: Perfil del flujo en un salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.3.2. Ángulos de salida:

La elección adecuada de los ángulos de salida del cucharón (napa inferior del flujo) y de la napa superior definirán el alcance del chorro. En la Tabla 5.22 se presentan los rangos recomendados para estos ángulos.

Tabla 5.22: Recomendaciones para definir el ángulo de salida del cucharón y del chorro

ANGULO DE SALIDA			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Vischer y Hager (1995)	$\theta' = -10^\circ \sim 45^\circ$	El rango del ángulo de salida del chorro es amplio debido a que la contracción causa que la napa inferior y superior tengan diferente ángulo de salida.
2	Ni Hangen (2000)	$\phi_c = -10^\circ \sim 10^\circ$	Basado en la recopilación de datos de varios proyectos
		$\theta'_{sup} = 35^\circ \sim 40^\circ$	El ángulo de salida de la napa superior del chorro debe estar dentro del rango especificado.
		$\theta'_{sup} = \tan^{-1} \left(\left(\frac{d_o}{b} \right) K \right) + \phi_c$ $K = \left(\frac{d_2 - d_o}{l_{co2}} \right) \left(\frac{b}{d_o} \right)$	Utilizando la metodología propuesta por el autor se calcula el ángulo de salida de la napa superior del chorro
3	Huang et al. (2006)	$\phi_c = 0^\circ \sim 10^\circ$	

Donde:

- b:** Ancho antes de la contracción (m)
- d_{c2} :** Calado en la salida de la contracción (m)
- d_o :** Calado del flujo de aproximación a la contracción (m)
- ϕ_c :** Ángulo de salida del fondo del estrechamiento ($^\circ$)
- K:** Coeficiente relacionado con el ángulo de salida, en una contracción.
- l_{co2} :** Longitud del tramo desde el primer choque de frentes de onda y la salida de la contracción(m)
- θ' :** Ángulo de salida del chorro ($^\circ$)
- θ'_{sup} :** Ángulo de salida de la napa superior del chorro ($^\circ$)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.3.3. Grado de convergencia – (bc/b).

En la Tabla 5.23 se presenta recomendaciones de varios autores de relaciones de convergencia o de contracción, adecuadas para los saltos en esquí con estrechamiento de paredes.

Tabla 5.23: Relaciones de convergencia o contracción para el diseño de estrechamiento gradual de paredes en saltos en esquí

GRADO DE CONVERGENCIA			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Vischer y Hager (1995)	$\frac{b_c}{b} = \frac{1}{4} \sim \frac{1}{6}$	Rango del grado de convergencia para que el dispositivo trabaje satisfactoriamente. Para: $4 < Fr_o < 10$ FIGURA 5.10
2	Ni Hangen (2000)	$\left(\frac{b_c}{b}\right)_{\min} = \frac{1,30}{(2 + Fr_o^2)^{3/2}}$ $\left(\frac{b_c}{b}\right)_{\min} = \frac{5,20}{(2 + Fr_o^2)^{3/2}}$	$(bc/b)_{\min}$ es el valor mínimo para que no se presente resalto hidráulico en la contracción, es decir, el valor bc/b seleccionando debe ser mayor al $(bc/b)_{\min}$. La fórmula que utiliza el valor de 5.20 incluye un factor de seguridad.
3	Huang et al. (2006)	$\frac{b_c}{b} = 0,2 \sim 0,4$	
4	Sun Shuangke et al. (-)	$\frac{b_c}{b} = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$	
5	Varios proyectos (-)	$\frac{b_c}{b} = 0,2 \sim 0,4$	Recopilación de datos de varios proyectos. TABLA 5.20

Donde:

b : Ancho antes de la contracción (m)

b_c : Ancho contraído (m)

Fr_o : Froude del flujo de aproximación

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.3.4. Longitud de la contracción

La Tabla 5.24 contiene relaciones para la determinación de la longitud de contracción. La longitud es adecuada cuando en la contracción se presenta el choque del flujo entre sí y luego el impacto del mismo con las paredes.

Tabla 5.24: Relaciones para la determinación de la longitud de contracción en un salto en esquí con estrechamiento de paredes

LONGITUD DE CONTRACCIÓN			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Ni Hangen (2000)	$l_c = l_{oc1} + l_{oc2}$ $l_{oc1} = \frac{0,5b}{\tan \beta_{c1}}$ $l_{oc2} = \frac{\frac{b}{2} - l_{oc1} \tan \theta_c}{\tan(\beta_{c2} - \theta_c) + \tan \theta_c}$ $\sin(\beta_{c1,c2}) = \frac{1}{Fr_{o,1}} \sqrt{\frac{d_{c1,c2}}{2d_{o,c1}} \left(1 + \frac{d_{c1,c2}}{d_{o,c1}}\right)}$	Ver FIGURA 5.10
2	Varios proyectos (-)	$\frac{l_c}{b} = 1,3 \sim 1,9$	Recopilación de datos de varios proyectos con anchos de vano que varían entre 5 y 20m. TABLA 5.20

Donde:

- b : Ancho antes de la contracción (m)
- $\beta_{c1,2}$: Ángulo de onda de choque en la contracción, 1 y 2 respectivamente (°)
- l_c : Longitud de la contracción (m)
- $l_{oc1,2}$: Longitud de onda de choque en la contracción, 1 y 2 respectivamente (m)
- θ_c : Ángulo de contracción (°)
- $d_{c1,2}$: Calados de la onda de choque, 1 y 2 respectivamente (m)
- d_o : Calado del flujo de aproximación a la contracción (m)
- Fr_o : Froude del flujo de aproximación

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.3.5. Ángulo de contracción – (θ_c)

En la Tabla 5.25 se presenta las recomendaciones y relaciones para establecer el ángulo de la contracción.

Tabla 5.25: Recomendaciones y relaciones para determinar el ángulo de contracción (θ_c)

ANGULO DE CONTRACCIÓN			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Ni Hangen (2000)	$K = \tan(\theta'_{sup} - \phi_c) \left(\frac{b}{d_o} \right)$	El ángulo de contracción se obtiene con el valor de K de la TABLA 5.21
		$\theta_c = 3^\circ \sim 13^\circ$	Asumir θ_c para obtener los valores de las relaciones de la TABLA 5.21, y verificar que se cumpla $(bc/b)_{\min}$ y θ'_{sup}
2	Huang et al. (2006)	$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{b - b_c}{2l_c} \right)$	
3	Varios proyectos (-)	$\theta_c = 4^\circ \sim 15^\circ$	Recopilación de datos de varios proyectos. TABLA 5.20

Donde:

- b : Ancho antes de la contracción (m)
- b_c : Ancho contraído (m)
- d_o : Calado del flujo de aproximación a la contracción (m)
- K : Coeficiente relacionado con el ángulo de salida, en una contracción.
- l_c : Longitud de la contracción (m)
- θ' : Ángulo de salida del chorro ($^\circ$)
- θ_c : Ángulo de contracción ($^\circ$)
- θ'_{sup} : Ángulo de salida de la napa superior del chorro ($^\circ$)
- ϕ_c : Ángulo de salida del cucharón ($^\circ$)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.3.6. Perfil del flujo

La Tabla 5.26 contiene las formulaciones y el procedimiento para la determinación del perfil del flujo en la contracción.

Tabla 5.26: Determinación del perfil del flujo en la contracción de un salto en esquí con estrechamiento de paredes

PERFIL DEL FLUJO			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Ni Hangen (2000)	$\lambda_{c1,c2} = 0,058 \frac{(Fr_{o,1} - 1)^{0,6}}{0,042 + \frac{\theta_c \pi}{180}}$ $\frac{d_{c1,c2}}{d_{o,c1}} = \left(\lambda_{c1,c2} \frac{\theta_c \pi}{180} \sqrt{0,5 + 0,25 Fr_{o,1}^2 + 1} \right)^2$ $\left(\frac{d_{c1,c2}}{d_{o,c1}} \right)_{corr} = 1 + \left(\left[\frac{d_{c1,c2}}{d_{o,c1}} \right]_{Fr:5,5} - 1 \right) \left(\frac{Fr_{o,1}^2 - 1}{4,5} \right)$	<p>$\lambda_{c1,c2}$ es válido para: $\theta_c \leq 9.23^\circ$ (en caso de ser mayor utilizar 9.23°) y $5.5 \leq Fr_{o,1} \leq 9.28$ (en caso de estar fuera del rango se debe calcular con el límite más cercano 5.5 ó 9.28).</p> <p>$d_{c1,c2}/d_{o,c1}$, es válido para: θ_c (utilizar el valor real) y $5.5 \leq Fr_{o,1} \leq 9.28$ (en caso de estar fuera del rango se debe calcular con el límite más cercano 5.5 ó 9.28, cuando $1 \leq Fr_{o,1} \leq 5.5$ se debe aplicar la corrección $(d_{c1,c2}/d_{o,c1})_{corr}$, utilizando el $Fr_{o,1}$ real)</p> <p>Ver FIGURA 5.11</p>

Donde:

$d_{c1,c2}$: Calados en de la onda de choque, 1 y 2 respectivamente (m)

d_o : Calado del flujo de aproximación a la contracción (m)

Fr_1 : Froude del flujo para d_{c1}

Fr_o : Froude del flujo de aproximación

$\lambda_{c1,c2}$: Coeficiente para el $Fr_{o,1}$ respectivamente

θ_c : Ángulo de contracción ($^\circ$)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.3.7. Desempeño de la contracción

El desempeño adecuado de la contracción depende del número de Froude en la aproximación de la misma y de su grado de convergencia, como se muestra en la Tabla 5.27.

Tabla 5.27: Desempeño de la contracción

DESEMPEÑO DE LA CONTRACCIÓN			
Nº	AUTOR	OBSERVACIONES	
1	Huang & Wu (2008)	$Fr_o < 3$ $\frac{b}{b_c} > 2,5$	Formación de resalto hidráulico por asfixia
		$3,0 < Fr_o < 4,5$ $2,5 < \frac{b}{b_c} < 4,0$	Baja capacidad de dispersión
		$4,5 < Fr_o < 10$ $2,5 < \frac{b}{b_c} < 6,7$	Suficiente capacidad de dispersión. Desempeño satisfactorio
		$Fr_o > 10$ $\frac{b}{b_c} > 2,5$	Flujo sobre' forzado. Formación de grandes ondas de choque.

Donde:

b : Ancho antes de la contracción (m)

b_c : Ancho contraído (m)

Fr_o : Froude del flujo de aproximación

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.3.8. Número de Froude

La determinación del número de Froude en la contracción se puede realizar según la Tabla 5.28.

Tabla 5.28: Número de Froude en la contracción de un salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes

NUMERO DE FROUDE A LA SALIDA DEL CHORRO			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Ni Hangen (2000)	$Fr_{1,2} = \sqrt{2 \left[\frac{d_{o,c1}}{d_{c1,c2}} (1 + 0,5Fr_{o1}^2) - 1 \right]}$	FIGURA 5.11

Donde:

$d_{c1,c2}$: Calados en de la onda de choque, 1 y 2 respectivamente (m)

d_o : Calado del flujo de aproximación a la contracción (m)

Fr_o : Froude del flujo de aproximación

$Fr_{1,2}$: Froude del flujo para d_{c1} y d_{c2} respectivamente. Fr_2 corresponde a la salida del chorro.

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.3.9. Presión Máxima

En la Tabla 5.29, se presenta un guía para la determinación de la presión máxima en un salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes.

Tabla 5.29: Determinación de la presión máxima en un salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes

PRESIÓN MÁXIMA			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Vischer y Hager (1995)	$\frac{p_{Máx}}{\gamma} \approx 0,3H_o \text{ a } 0,5H_o$	
2	Huang et al. (2006)	$\frac{p_{Máx}}{\gamma} = d_o + \frac{p_{dMáx}}{\gamma} + k_c \frac{p_{cMáx}}{\gamma}$ $\frac{p_{dMáx}}{\gamma} = \left[1 - \left(\frac{R - d_o}{R} \right)^2 \right] (H_{sc} - d_o)$ $k_c \frac{p_{cMáx}}{\gamma} = k_c H_{sc} 0,2642 \left(\frac{b}{b_c} - \tan \theta_c \right)^{1,1277} (d_k)^{0,9082}$ $d_k = \frac{\sqrt[3]{q^2}}{\frac{\sqrt{g}}{H_{sc}}}$ $k_c = 1.2 \text{ o } 1.3$ <p>$p_{cMáx}$ y d_k son válidas para: $0.125 \leq b_c / b \leq 0.4$, $0.133 \leq \tan(\theta_c) \leq 0.194$, $0.0818 \leq d_k \leq 0.162$, $\phi_c = 0^\circ$</p>	

Donde:

- b : Ancho antes de la contracción (m)
- b_c : Ancho contraído (m)
- d_o : Calado a la entrada de la contracción (m)
- d_k : Calado crítico relativo
- ϕ_c : Ángulo de salida del cucharón ($^\circ$)
- H_{sc} : Carga a la superficie del agua en el punto más bajo del cucharón (m)
- H_o : Carga de energía en la aproximación (m)
- k_c : Coeficiente de contracción
- $p_{cMáx}$: Presión máxima debido a la contracción de las paredes (T/m^2)
- $p_{dMáx}$: Presión dinámica máxima debido a la curvatura del fondo (T/m^2)
- q : Caudal unitario ($m^3/s.m$)
- R : Radio de la cuchara (m)
- θ_c : Ángulo de contracción ($^\circ$)
- γ : Peso específico del agua (T/m^3)
- g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Adicionalmente, con la Tabla 5.30 se puede determinar la ubicación de la presión máxima debido a la contracción.

Tabla 5.30: Ubicación de la presión máxima debida al estrechamiento gradual de paredes

UBICACIÓN DE LA PRESIÓN MÁXIMA			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Huang et al. (2006)	$\frac{l_{pc\text{máx}}}{l_c} = 0,965 - 1,4d_k$ $d_k = \frac{\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}}{H_{sc}}$	Válido para: $0.125 \leq bc / b \leq 0.4$, $0.133 \leq \tan(\theta_c) \leq 0.194$, $0.0818 \leq dk \leq 0.162$, $\phi_c = 0^\circ$

Donde:

- b : Ancho antes de la contracción (m)
- b_c : Ancho contraído (m)
- d_k : Calado crítico relativo
- ϕ_c : Ángulo de salida del cucharón ($^\circ$)
- H_{sc} : Carga a la superficie del agua en el punto más bajo del cucharón (m)
- l_c : Longitud de la contracción (m)
- $l_{pc\text{max}}$: Ubicación de la presión máxima por contracción, medida desde el inicio de la contracción (m)
- q : Caudal unitario (m³/s.m)
- θ_c : Ángulo de contracción ($^\circ$)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.3.3.10. Radio del fondo del estrechamiento

El fondo del estrechamiento puede tener una pendiente positiva o negativa. En el caso de una contra-pendiente, el fondo puede tener un fondo curvo, por lo que en la Tabla 5.31 se determina el radio del mismo.

Tabla 5.31: Radio del fondo curvo del estrechamiento

RADIO DEL FONDO DEL ESTRECHAMIENTO		
Nº	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	$R_c = \frac{l_c}{2 \sin\left(\frac{\phi_c}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_c}{2}\right)}$	Obtenido por geometría

Donde:

- ϕ_c : Ángulo de salida del cucharón ($^\circ$)
- l_c : Longitud de la contracción (m)
- R_c : Radio del fondo del estrechamiento (m)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.4. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS BENEFICIOS RESPECTO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA – FORMACIÓN DE LOS CUENCOS DE SOCAVACIÓN AL PIE

5.4.1. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES (DENTADO)

Con base en el análisis de la información técnica recopilada, al comparar los saltos en esquí con deflectores y el salto en esquí convencional (Tabla 5.32), se obtiene en general:

- El uso de salto en esquí con deflectores reduce el alcance del chorro, pero sin que la distancia mínima de impacto sea excesivamente menor.
- La profundidad de socavación máxima es menor en saltos en esquí con deflectores que en saltos en esquí convencionales, excepto en ciertos casos cuando los deflectores se colocan junto a las paredes del cucharón (especialmente en cucharas angostas), produciendo una mayor socavación.
- En lo que respecta a la superficie y volumen de socavación, los saltos en esquí con deflectores, en general, presentan fosos de menor superficie y volumen, en comparación con un salto convencional con el mismo ángulo de salida que los deflectores.
- El foso de socavación puede adquirir una forma en planta ovalada o redonda, dependiendo de la disposición de los deflectores, a diferencia del salto en esquí convencional, donde la forma del foso tiene una tendencia rectangular.

Tabla 5.32: Comparación de características del foso de socavación de un salto en esquí convencional y uno con deflectores

Tipo de salto en esquí	Alcance	Profundidad de socavación máxima	Superficie de socavación	Volumen de socavación	Forma del foso de socavación
Salto en esquí convencional	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Rectangular
Salto en esquí con deflectores (dentado)	Menor	Menor	Menor	Menor	Ovalado / Redondo

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.4.2. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES

Del análisis de la información técnica disponible respecto al uso de saltos en esquí con estrechamiento de paredes, se obtiene que:

- El uso de salto en esquí con contracción de paredes disminuye la socavación que se obtendría con un salto en esquí convencional.
- Debido a la diferencia existente entre la napa superior e inferior de un chorro proveniente de un estrechamiento, la forma del foso es alargada en el sentido del flujo y angosta en el sentido transversal.

Tabla 5.33: Comparación de características del foso de socavación de un salto en esquí convencional y uno con estrechamiento

Tipo de salto en esquí	Socavación máxima	Forma del foso de socavación
Salto en esquí convencional	Mayor	Rectangular
Salto en esquí con estrechamiento	Menor	Ovalado

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5.5. CONCLUSIONES

- El uso del salto en esquí como disipador de energía es una alternativa segura y económica, cuando las condiciones geológicas de la zona, características de la presa y características del flujo son las adecuadas,

es decir, cuando el material del lecho sea roca, la presa sea alta, la pendiente de la rápida sea menor a 4V:1H, y cuando las velocidades y caudales de descarga sean altos.

- Cuando el uso de un salto en esquí convencional no satisface todas las necesidades de disipación, es posible utilizar formas especiales del salto en esquí. La forma especial del salto en esquí dependerá tanto de la orientación del o los vertederos y de la presencia de cavitación en la estructura, como de las condiciones aguas abajo (ancho del cauce, estabilidad de las márgenes, socavación).
- La disipación de energía se da principalmente por la interacción del chorro con el aire y por la interacción del chorro con el cauce aguas abajo. Ésta última, es la que disipa la mayor cantidad de energía ya que el chorro impacta el colchón y seguidamente el lecho del cauce, produciendo la fractura de la roca y la consecuente socavación hasta el punto de equilibrio, en el que la potencia del chorro es menor a la necesaria para producir este fenómeno.

En lo que respecta al dimensionamiento de saltos en esquí al pie de una presa:

- Para el diseño de saltos en esquí convencionales es necesario definir principalmente: el radio del cucharón, ya que incide en la longitud del mismo y en la distribución de presiones; el ángulo de salida, ya que afecta el alcance del chorro y la profundidad de socavación; la elevación del fondo del cucharón (invert) y la elevación de la salida del salto en esquí, para prevenir que la estructura de disipación trabaje sumergida.
- Para el diseño de saltos en esquí con deflectores (dentados) es necesario definir: la forma de los deflectores, rectangular o trapezoidal; los ángulos de salida adecuados tanto del cucharón como del deflector, para disminuir posibles problemas de cavitación; las dimensiones del ancho, espaciamiento, radio, longitud y número de deflectores a utilizar.

- Para el diseño de saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes es necesario definir: el ángulo de salida tanto del cucharón como del chorro, ya que éstos definirán el alcance del mismo; el ángulo, la longitud y la relación de contracción adecuados, para evitar disturbios en el flujo; el perfil del flujo y el número de Froude para conocer las condiciones de salida del chorro.

En lo que respecta al análisis preliminar de los beneficios respecto de la disipación de energía – formación de los cuencos de socavación al pie de la presa:

- El salto en esquí con deflectores comparado con un salto en esquí convencional, este último con el mismo ángulo de salida de los deflectores, presenta las siguientes características:

Tipo de salto en esquí	Alcance	Profundidad de socavación máxima	Superficie de socavación	Volumen de socavación	Forma del foso de socavación
Salto en esquí convencional	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Rectangular
Salto en esquí con deflectores (dentado)	Menor	Menor	Menor	Menor	Ovalado / Redondo

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- El salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes comparado con un salto en esquí convencional, presenta una menor socavación y una forma de su foso ovalado.

CAPÍTULO 6.

GUÍA DE DISEÑO BÁSICO - DIMENSIONAMIENTO DE UN SALTO EN ESQUÍ AL PIE DE PRESA

6.1. CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DEL TIPO DEL SALTO EN ESQUÍ

Para la selección del tipo de salto en esquí, en general, es necesario tomar en consideración los siguientes aspectos:

- Disipación de energía (profundidad de socavación)
- Alcance y dirección del chorro (disposición de obras y morfología del cauce)
- Facilidad de construcción y mantenimiento

En la Tabla 6.1, se caracteriza los escenarios en los cuales es recomendable la utilización de cada uno de los tipos de salto en esquí.

Tabla 6.1: Matriz de selección del tipo de salto en esquí

DESCRIPCIÓN	TIPO DE SALTO EN ESQUÍ		
	Convencional	Con deflectores	Con estrechamiento gradual de paredes
OBJETIVO	Alejar el chorro del pie de la presa, proponiendo una estructura económica tomando en consideración la energía a ser disipada	Inducir mayor disipación de energía, por dispersión del chorro (introducción de aire), que un salto convencional	Direccionar el chorro hacia una zona específica del cauce aguas abajo
CARACTERÍSTICAS	Aeración del chorro en el aire y lanzamiento del mismo aguas abajo del pie de la presa	Posibilidad de cavitación en los deflectores (mantenimiento periódico)	Mayor alcance vertical del chorro (Introducción de aire) Preservar la estabilidad de las laderas del cauce aguas abajo
	-	Menor profundidad de socavación	Menor socavación
	Foso de socavación tiende a ser rectangular	Foso de socavación ovalado o circular	Configuración alargada del foso de socavación
	Facilidad de construcción y menor mantenimiento	Mayor complejidad de construcción y mantenimiento	Mediana complejidad de construcción
APLICABILIDAD	Presas altas ≈ 50 m.	Presas con alturas de ≈ 60 a 135 m.	Presas con alturas de ≈ 157 a 305 m.
	Velocidad en la rápida ≥ 20 m/s	Velocidad en la rápida ≥ 20 m/s	Velocidad en la rápida ≥ 20 m/s
	Lecho aguas abajo compuesto de roca	Ausencia de roca a cierta profundidad, identificada en el perfil estratigráfico	Lecho aguas abajo compuesto de roca
	Cauce relativamente ancho, que permita captar el chorro de incidencia	Cauce relativamente ancho, que permita captar el chorro de incidencia	Cauce estrecho y laderas profundas aguas abajo
	Profundidad aguas abajo no provoca resalto hidráulico	Cuando se pueda sacrificar el alcance del chorro sin comprometer las obras anexas	No hay limitante en la zona de incidencia longitudinal del chorro Orientación de vertederos inadecuada

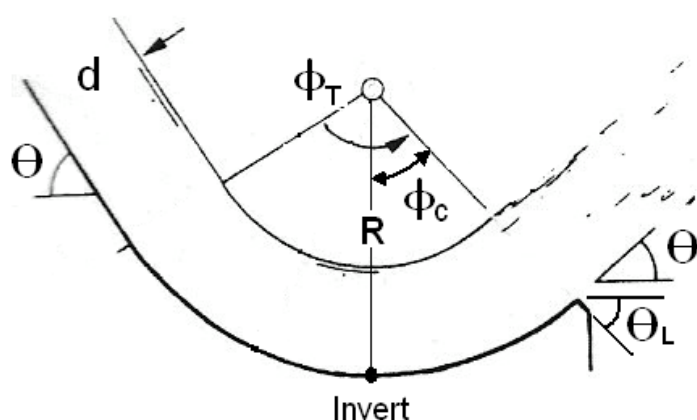
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

6.2. PROCEDIMIENTO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SALTO EN ESQUÍ

6.2.1. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL

Los parámetros a dimensionar en el salto en esquí convencional se puede observar en la Figura 6.1.

Figura 6.1: Características principales de un salto en esquí convencional



Fuente: (Vischer & Hager, Energy Dissipators, 1995, pág. 121)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

1. Definir el radio de la curvatura de la cubeta deflectora con base en la recopilación de fórmulas propuestas por varios autores, como se muestra en la Tabla 5.1, las mismas que en su mayoría se encuentran en función del calado, velocidad y Froude de aproximación.
2. Determinar la cota del fondo del cucharón, con lo cual se define el punto de tangencia entre la rápida y el cucharón, considerando el radio calculado previamente. Una recomendación para la definición de la cota del invert se presente en la sección 5.3.1.2.
3. Con base en los rangos de ángulos de salida recomendados por los diferentes autores (Tabla 5.2) y considerando el alcance del chorro requerido, elegir el valor del ángulo de salida.

4. Calcular la presión máxima en el cucharón según la Tabla 5.3, la misma que depende de los siguientes parámetros:
 - Radio del cucharón
 - Calado, velocidad y número de Froude en la aproximación
5. Definir el ángulo de despegue del chorro del salto en esquí (Tabla 5.4) en función de los siguientes parámetros:
 - Radio de la cubeta
 - Calado de aproximación
 - Ángulo de inclinación de la rápida
 - Ángulo de salida de la cubeta

Nota: Según Orlov (1974), su criterio es válido para Froude de aproximación mayores a $5(\sin(\theta))^{0.5}$.

6. Luego, en función del ángulo de salida del chorro, determinar el ángulo del labio de la salida de la cubeta, tal que permita prevenir la presencia de subpresión, siguiendo el criterio de U.S.B.R. (1978) y Khatsuria (2005) presentado en la Tabla 5.5.
7. Finalmente, mediante el criterio de Vischer & Hager (1995) presentado en la Tabla 5.6, calcular el ángulo de expansión transversal del chorro, el mismo que depende de:
 - Longitud del cimacio desde la cresta hasta el labio
 - Calado en la cubeta deflectora
 - Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del cucharón

Nota: Según Vischer & Hager (1995), el criterio es válido cuando la relación calado del cucharón respecto al radio en el cucharón es menor a 0.10.

6.2.2. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES (DENTADO)

El escogimiento de la forma transversal de los dientes resulta de la ponderación de los siguientes factores: cavitación en los dientes, facilidad de construcción y mantenimiento.

6.2.2.1. Diseño de deflectores rectangulares:

En la Figura 5.6 se puede observar los parámetros principales a dimensionar en el diseño de deflectores rectangulares.

1. Definir el ángulo de salida del cucharón con los criterios presentados en la Tabla 5.2.
2. Escoger el valor de la diferencia entre los ángulos de salida del deflector y el cucharón (rangos requeridos para prevenir cavitación).
3. Con el criterio anterior, determinar el ángulo de salida de los deflectores, según la Tabla 5.11.
4. Definir el radio del cucharón de la misma forma que en un salto en esquí convencional (Tabla 5.1).
5. Luego, determinar la altura del deflector en función de los valores recomendados, por los distintos autores (Tabla 5.13), de la relación: Altura del deflector/Radio del cucharón.
6. Tomando como centro de origen el fin de la rápida, determinar las coordenadas x y y del inicio y fin del cucharón.
7. Determinar las coordenadas del fin del deflector con base en la altura del mismo y de las coordenadas del fin de la rápida.
8. Calcular geoméricamente el radio del deflector, en función de las coordenadas determinadas y la suma de los ángulos de la rápida y deflector.

9. Comprobar que la relación Radio del deflector/Radio del cucharón, se encuentre en los rangos recomendados en la Tabla 5.12.
10. Considerando que el cucharón y los deflectores inician al fin de la rápida, calcular geoméricamente la longitud de la curva, en función de los ángulos de deflexión y los radios previamente determinados
11. Tomando en cuenta el ancho del vano y con base en la recopilación de información referente a la cantidad de dientes utilizados en varios proyectos (Figura 5.10), se define un valor referencial de número de dientes.
12. Luego, en función de las recomendaciones de varios autores, se define el valor de la relación Espaciamiento/Ancho del deflector (Tabla 5.15), con la cual se determina el porcentaje de ocupación total de los dientes en el ancho del vano.

$$Ocupación = \frac{1}{1 + e/b_{def}} \quad (6.1)$$

13. Calcular el valor del ancho del deflector (dimensión constructiva) en función del porcentaje de ocupación, ancho del vano y número de dientes.

$$b_{def} = \frac{\frac{\% ocupación}{100} b}{n} \quad (6.2)$$

14. Una vez dimensionado el ancho constructivo del deflector, re-calcular el porcentaje de ocupación.

$$\% Ocupación_{real} = \frac{100 b_{def} n}{b} \quad (6.3)$$

15. Con el porcentaje de ocupación real, corregir la relación Espaciamiento/Ancho del deflector.

$$\frac{e}{b_{def}} = \frac{1}{ocupación} - 1 \quad (6.4)$$

16. Con el ancho del deflector y la relación Espaciamiento/Ancho del deflector, obtener el espaciamiento entre dientes.
17. Finalmente, chequear que la relación geométrica Ancho deflector/Ancho del vano, se encuentre en el rango recomendado originado a partir de la información de varios proyectos (Ver Tabla 5.15)

6.2.2.2. Diseño de deflectores trapezoidales con perfil curvo:

En la Figura 5.7 se puede observar los parámetros principales a dimensionar para deflectores trapezoidales con perfil curvo.

1. Considerar que el deflector inicia desde el invert del cucharón.
2. Considerar que el ángulo de salida del cucharón es cero, es decir existe un fondo plano horizontal.
3. Definir el valor de la diferencia de ángulos en la salida entre el fondo plano horizontal y el deflector.

$$\Delta\phi_c \approx 20^\circ \quad (6.5)$$

Con cuyo valor queda definido el ángulo de salida del deflector.

4. Definir el radio entre la rápida y el invert del cucharón, de la misma manera que en el salto en esquí convencional (ver Tabla 5.1).
5. Luego, escoger el valor de la relación Radio del deflector/Radio del cucharón, de acuerdo al rango obtenido en el análisis de las características de varios proyectos, como se presenta en la Tabla 5.12.
6. Una vez definido el valor de la relación entre radios, obtener el radio del deflector.
7. Con el ángulo de salida y el radio del deflector, calcular geoméricamente la altura del deflector.

8. Comprobar que la relación Alto deflector/Radio del deflector se encuentre dentro del rango recomendado en la Tabla 5.13.
9. La longitud del fondo del fondo del deflector se define como la suma de dos tramos: la dimensión de la proyección horizontal del tramo curvo del deflector y la longitud de la proyección horizontal del detalle de la salida del deflector. En donde, la primera se define geoméricamente y la segunda es aproximadamente del 17 al 18% de la primera.
10. Tomando en cuenta el ancho del vano y con base en la recopilación de información referente a la cantidad de dientes utilizados en varios proyectos (Figura 5.9), se define un valor referencial de número de dientes.
11. Calcular la ocupación de los dientes en el vano de igual manera que el paso 12 del diseño de deflectores rectangulares.

Nota: El ancho del deflector, en este caso, se refiere al ancho inferior del deflector a la salida (b_{def2}).

12. Calcular el valor constructivo del ancho inferior del deflector a la salida (b_{def2}) al igual que en el paso 13 del diseño de deflectores rectangulares.
13. Determinar el ancho inicial del deflector (b_{def1}) en función del valor de la relación Ancho inicial del deflector/Ancho inferior del deflector a la salida, obtenido del rango procedente de datos de prototipos (ver Tabla 5.15).
14. Calcular el ancho superior del deflector a la salida (b_{def3}), tal que, la pendiente de las paredes laterales al final del deflector cumplan la relación 1V:1H.
15. Re-calcular la ocupación (ocupación real) de la misma manera que en el paso 14 del diseño de deflectores rectangulares.

Nota: El ancho del deflector, en este caso, se refiere al ancho inferior del deflector a la salida (b_{def2}).

16. Calcular el espaciamiento entre dientes en función de la relación Espaciamiento/Ancho inferior del deflector a la salida, obtenida con la ocupación real.

$$\frac{e}{b_{def2}} = \frac{1}{ocupación} - 1 \quad (6.6)$$

17. Chequear que la relación Longitud del deflector/ Ancho inferior del deflector a la salida se encuentre en el rango referencial que se presenta en la Tabla 5.14, originado a partir de la información de varios proyectos.
18. Calcular la pendiente de las paredes laterales al final del deflector y verificar que ésta se encuentre cercana a la relación 1V:1H.
19. Finalmente, definir la disposición de los deflectores en el vano con base al estudio realizado por Erpicum et al (2010), el mismo que concluye que los deflectores que se encuentran alejados de los muros laterales son más convenientes considerando el comportamiento del flujo y la magnitud de la socavación.

6.2.2.3. Diseño de deflectores trapezoidales con perfil triangular (González Fariñas, 2004):

La metodología para determinación de las dimensiones de este tipo de deflectores se encuentra en función del calado de aproximación, y se limita para valores de número de Froude en la aproximación entre 9 y 39. Adicionalmente, el autor establece que la efectividad de estos deflectores es máxima cuando el calado aguas abajo es 2 veces la diferencia de nivel entre el labio de la solera y el nivel de aguas abajo. En la Figura 5.8 se puede observar los parámetros a dimensionar en este tipo de deflector.

Las formulaciones propuestas para el diseño, junto con el procedimiento, se presentan en los siguientes pasos:

1. El perfil longitudinal del deflector (en el sentido del flujo) es triangular.
2. Considerar que el ángulo de salida de la solera es cero (fondo plano horizontal).
3. Determinar la altura del deflector como: 0.25 a 0.35 del calado de aproximación.
4. Luego, definir el ángulo de salida medio del chorro sobre los deflectores, el cual se encuentra en función de la relación Altura del deflector/Calado en la aproximación.

$$\theta'_{def} = 6.601 \ln\left(\frac{Y_{def}}{d}\right) + 20.8 \quad (6.7)$$

5. Calcular el largo del deflector como: 0.50 a 0.70 del calado de aproximación.
6. Determinar el valor de la longitud de la solera pudiendo ser 1.0 a 1.4 del calado de aproximación.
7. González Fariñas (2004), define que el porcentaje de ocupación del vano es de 50%.
8. Definir el ancho inicial del deflector como: 0.12 a 0.17 del calado de aproximación.
9. Calcular el ancho inferior del deflector a la salida como: 0.50 a 0.70 del calado de aproximación.
10. Determinar el número de dientes en función de la ocupación, el ancho del vano y del ancho inferior del deflector a la salida, sabiendo que el número de dientes corresponde al impar inmediato superior.

$$n = \frac{0.5 b}{b_{def2}} \quad (6.8)$$

11. Definir el espaciamiento del primer deflector con el muro lateral como: 0.25 del ancho inferior del deflector a la salida.

12. Calcular el espaciamiento entre el primer y el segundo deflector como: 0.5 a 0.7 del calado de aproximación.
13. Si el número de dientes es mayor a 3, calcular el espaciamiento entre deflectores intermedios, en función del número de dientes y el ancho inferior del deflector a la salida.

$$e = \frac{(2.5 + n)b_{def2}}{(n - 3)} \quad (6.9)$$

14. Finalmente, determinar el número de Froude máximo por debajo del cual no se presentan presiones subatmosféricas en los deflectores, el mismo que se encuentra en función del calado de aproximación.

$$Fr_{m\acute{a}x} = \frac{2.94(d + 10)}{d} \quad (6.10)$$

6.2.3. DISEÑO DE SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE PAREDES

El dimensionamiento de este tipo de salto en esquí se fundamenta en la teoría de las ondas de choque. En la Figura 5.11 y Figura 5.12 se presenta los parámetros principales del salto en esquí con estrechamiento de paredes.

Considerando la metodología propuesta por Hangen (2000), el procedimiento para el diseño del estrechamiento es el siguiente:

1. Definir el ángulo de salida del fondo de la contracción de acuerdo a la recomendación presentada en la Tabla 5.22.
2. Seleccionar el ángulo de salida de la napa superior según el rango recomendado por Hangen (2000) en la Tabla 5.22.
3. Calcular el factor "K" que relaciona el ángulo de salida de la napa superior del chorro (Tabla 5.25), tomando como eje de referencia el fondo de la contracción.

4. Calcular el valor mínimo de la relación ancho contraído respecto al ancho inicial (Tabla 5.23), relacionada con el Froude de aproximación, necesaria para que no se presente resalto hidráulico por asfixia en la contracción.
5. Definir iterativamente el ángulo de la contracción según la recomendación de Hangen (2000) en la Tabla 5.25, hasta que el ángulo de napa superior asumido sea igual o cercano al ángulo de la napa superior calculado.
6. Calcular el factor " λ_1 " que relaciona el Froude de aproximación y el ángulo de la contracción, como se muestra en la Tabla 5.26.
7. Calcular la relación calado en el choque de frentes de onda respecto al calado al inicio del estrechamiento (aproximación), según la Tabla 5.26, la misma que está relacionada con: el Froude de aproximación, el ángulo de contracción y el factor " λ_1 ".
8. Luego de definida la relación de calados, con el valor del calado de aproximación, se calcula el calado en el choque de frentes de onda.
9. Calcular la longitud entre el inicio de la contracción y el punto del primer choque de frentes de onda, la misma que es función del ancho inicial de la contracción y del ángulo de frente de onda " β_{c1} ". En la Figura 5.11 se presenta un esquema de la contracción y el choque de onda.
10. Calcular el número de Froude en el primer choque de frentes de onda, el mismo que se encuentra relacionado con: los calados al inicio de la contracción y el punto de choque de frentes de onda, y el Froude en la aproximación. En la Tabla 5.28 se presenta la ecuación definida por Hangen (2000).
11. Calcular el factor " λ_2 " que relaciona el Froude obtenido en el primer choque de frentes de onda y el ángulo de la contracción, como se muestra en la Tabla 5.26.

12. Calcular la relación calado a la salida de la contracción respecto al calado en el primer choque de frentes de onda, según la Tabla 5.26, la misma que está relacionada con: el Froude obtenido en el primer choque de frentes de onda, el ángulo de contracción y el factor “ λ_2 ”.
13. Luego de definida la relación de calados, con el valor del calado obtenido en el primer choque de frentes de onda, se calcula el calado a la salida de la contracción.
14. Calcular la longitud del segundo tramo de la contracción definido desde el primer choque de frentes de onda hasta la salida de la contracción (Tabla 5.24), la misma que es función de los siguientes parámetros:
 - Ancho inicial de la contracción
 - Longitud del primer tramo de la contracción
 - Ángulo de la contracción
 - Segundo ángulo de frente de onda “ β_{c2} ”

En la Figura 5.11 se puede observar un esquema de la contracción en donde se acotan los parámetros mencionados.

15. Calcular el número de Froude a la salida de la contracción, el mismo que se encuentra relacionado con: los calados en el primer punto de choque de frentes de onda y en la salida de la contracción, y el Froude en el primer punto de choque de frentes de onda. En la Tabla 5.28 se presenta la ecuación definida por Hangen (2000).
16. Recalcular del factor “K” con base en: los resultados obtenidos del calado en la salida de la contracción y la longitud del segundo tramo de la contracción, y los datos del calado en la aproximación y el ancho inicial.

$$K = \left(\frac{d_2 - d_o}{l_{co2}} \right) \left(\frac{b}{d_o} \right) \quad (6.11)$$

17. Calcular el ángulo de la salida de la napa superior del chorro, en función del factor “ $K_{\text{recalculado}}$ ”.

$$\theta'_{sup} = \tan^{-1} \left(\left(\frac{d_o}{b} \right) K \right) + \phi_c \quad (6.12)$$

18. Calcular la longitud total de la contracción, sumando las longitudes de los dos tramos:
19. Luego, dividir la longitud total para el ancho inicial y así obtener la relación l_c/b .
20. Calcular geoméricamente el ancho a la salida de la contracción, con los valores de la longitud total y el ángulo de contracción.
21. A continuación, dividir el ancho a la salida de la contracción para el ancho inicial y así obtener la relación b_c/b .
22. Comparar los resultados obtenidos mediante la metodología de Hangen (2000) con las recomendaciones dadas por otros autores de los siguientes parámetros:
- Ángulo de salida del fondo del estrechamiento
 - Ángulo de salida de la napa superior del chorro
 - Relación de contracción (b_c/b)
 - Desempeño de la contracción, tomando en cuenta los rangos de Froude en la aproximación y los intervalos de la relación de contracción (b_c/b)
 - Relación de la longitud total de la contracción respecto al ancho inicial (l_c/b)
 - Ángulo de la contracción medido de un solo lado

Los siguientes pasos, seccionados por autor, corresponden al cálculo de la presión máxima en el cucharón.

▪ **Según Vischer & Hager (1995)**

23. Definir la carga de energía en la aproximación considerando el calado y la velocidad en la aproximación.
24. Calcular la carga de presión máxima en función de la carga de energía en la aproximación, según la recomendación que se presenta en la Tabla 5.29.

▪ **Según Huang et al. (2006)**

25. Calcular la diferencia de niveles entre la superficie del agua en el embalse y la superficie del agua en el invert del cucharón (Carga a la superficie del agua en el punto más bajo del cucharón).
26. Determinar el calado crítico relativo a la carga a la superficie del agua en el punto más bajo del cucharón (ver Tabla 5.29), en función del caudal unitario en la entrada de la contracción y la aceleración de la gravedad.
27. Luego, definir el valor de la carga de presión máxima en el estrechamiento (ver Tabla 5.29), la misma que resulta de la suma de:
- Presión hidrostática: f (calado de aproximación)
 - Presión dinámica: f (radio del cucharón, calado de aproximación, carga a la superficie del agua en el punto más bajo del cucharón)
 - Presión debida al estrechamiento: f (ancho inicial, ancho a la salida de la contracción, ángulo de contracción, calado crítico relativo, carga a la superficie del agua en el punto más bajo del cucharón y el factor “ K_c ” ($K_c = 1.2$ a 1.3))

Nota: *Los cálculos de presión debido al estrechamiento y el calado crítico relativo son válidos cuando las relaciones y parámetros de encuentran en los siguientes intervalos:*

- $0.125 \leq b_c/b \leq 0.40$
- $0.133 \leq \tan(\theta_c) \leq 0.194$
- $0.0818 \leq d_k \leq 0.162$
- $\Phi_c = 0^\circ$

28. Calcular la ubicación de la presión máxima debido al estrechamiento, según la Tabla 5.30, la que se encuentra en función del calado crítico relativo y de la longitud total de la contracción.

Nota: El cálculo es válido cuando las relaciones y parámetros de encuentran en los siguientes intervalos:

- $0.125 \leq b_c/b \leq 0.40$
- $0.133 \leq \tan(\theta_c) \leq 0.194$
- $0.0818 \leq d_k \leq 0.162$
- $\Phi_c = 0^\circ$

6.3. EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DE ENERGÍA SEGÚN EL CUENCO DE SOCAVACIÓN – ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROFUNDIDADES, DEL ALCANCE Y DE LA FORMA DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN

6.3.1. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL

6.3.1.1. Trayectoria del Chorro:

La definición de la trayectoria del flujo procedente del salto en esquí, consiste en determinar el alcance horizontal y vertical del chorro. El alcance depende de: la diferencia de elevación entre el labio y el nivel aguas abajo, el ángulo de salida del cucharón, la velocidad de salida del flujo del salto en esquí y la resistencia del aire. En la Tabla 6.2 y Tabla 6.3 se muestran las formulaciones para la determinación de los 2 parámetros que definen la trayectoria.

Respecto a la influencia de la resistencia del aire en el chorro de salida del salto en esquí, si la velocidad en el labio del cucharón es menor a 20

m/s, la resistencia del aire es pequeña y puede considerarse despreciable; en cambio, si la velocidad es mayor a 20 m/s, el efecto de la resistencia del aire adquiere importancia, por ejemplo, el alcance horizontal del chorro disminuye aproximadamente en un 30%⁶¹ cuando la velocidad en el labio se encuentra alrededor de 40 m/s.

Tabla 6.2: Fórmulas para definir el alcance horizontal del chorro procedente del salto en esquí

ALCANCE HORIZONTAL DEL CHORRO			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Edward Elevatorski (1959)	$L_t = 1,9 Y \sin(2\theta')$	Alcance máximo cuando $\phi_c=45^\circ$. Considera resistencia del aire
2	U.S.B.R. (1987)	$L_t = 2k Y \sin(2\theta')$	k=1 (Alcance teórico) k=0,9 (Considera pérdidas por resistencia del aire, turbulencia, desintegración del chorro)
3	Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)	$L_t = \left(\frac{1}{gk^2}\right) \ln(1 + 2k\alpha V_{labio} \cos \phi_c)$ $\alpha = \tan^{-1}(kV_{labio} \sin \phi_c)$ k=Factor de resistencia de aire en función de la velocidad en el labio (Figura 6.3)	
4	HDC (1988) - Bureau of Indian Standards (2010)	$\frac{L_t}{hv_{labio}} = \sin 2\phi_c + 2 \cos(\phi_c) \sqrt{(\sin \phi_c)^2 + \frac{y_i}{hv_{labio}}}$ No considera las pérdidas en el vertedero, ni la entrada del aire al chorro, el alcance real puede ser menor. Ábaco, Figura 6.2	

Donde:

ϕ_c : Ángulo de salidad del cucharón ($^\circ$)

θ' : Ángulo de salida del chorro ($^\circ$)

$h v_{labio}$: Carga de velocidad en el labio del cucharón (m/s)

k: Factor de resistencia del aire

L_t: Alcance horizontal del chorro (m)

y_i: Distancia vertical entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo (m)

Y: Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del cucharón (m)

V_{labio}: Velocidad en la salida del cucharón (m/s)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

⁶¹Khatsuria, R. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. New York: Marcel Dekker.p 455.

Tabla 6.3: Fórmulas para definir el alcance vertical del chorro procedente del salto en esquí

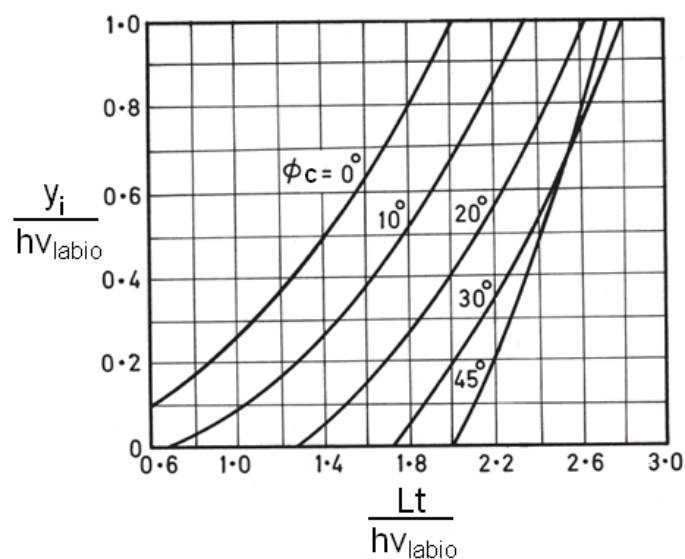
ALCANCE VERTICAL DEL CHORRO			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Edward Elevatorski (1959)	$y_M = Y \sin \theta'^2$	Desprecia la resistencia del aire
3	Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)	$y = \left(\frac{1}{gk^2} \right) \ln (\cos v + \tan \alpha \sin v)$ $\alpha = \tan^{-1} (kV_{labio} \sin \phi_c)$ $v = \frac{\exp(gk^2x) - 1}{kV_{labio} \cos \phi_c}$ k=Factor de resistencia de aire en función de la velocidad en el labio (Figura 6.3)	
3	Bureau of Indian Standards (2010)	$y_M = \frac{V_o^2 (\sin \theta')^2}{2g}$	

Donde:

- k:** Factor de resistencia del aire
- ϕ_c :** Ángulo de salidad del cucharón ($^\circ$)
- θ' :** Ángulo de salida del chorro ($^\circ$)
- x:** abscisas medidas desde el labio (m)
- y_M :** Distancia vertical entre el labio del cucharón hasta el punto más alto del chorro (m)
- y:** ordenadas del chorro medidas desde el labio (m)
- Y:** Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del cucharón (m)
- V_{labio} :** Velocidad en la salida del cucharón (m/s)
- V_o :** Velocidad media del flujo de aproximación (m/s)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

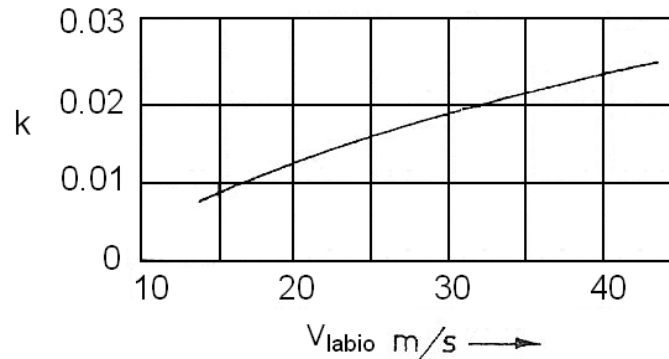
Figura 6.2: Ábaco para determinar el alcance horizontal del chorro procedente de un salto en esquí convencional



Fuente: (Bureau of Indian Standards, 2010, pág. 18)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 6.3: Ábaco para determinar el factor de resistencia del aire para el cálculo del alcance del chorro procedente de un salto en esquí convencional



Fuente:(Khatsuria, 2005, pág. 456)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

En la Tabla 6.4 se presenta una formulación para calcular el ángulo de incidencia del chorro en función del ángulo de salida del cucharón, la distancia entre el nivel en el embalse y el labio del cucharón, y la distancia entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo.

Tabla 6.4: Fórmula para definir el ángulo de impacto del chorro en el cuenco aguas abajo de la presa

ANGULO DE IMPACTO			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Yildiz et al. (1994)	$\alpha' = \tan^{-1} \frac{\sin \phi_c^2 + \frac{y_i}{Y}}{\cos \phi_c}$	

Donde:

ϕ_c : Ángulo de salida del cucharón (°)

α' : Ángulo de entrada del chorro al colchón de aguas (°)

y_i : Distancia vertical entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo (m)

Y : Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del cucharón (m)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

6.3.1.2. Profundidad de Socavación:

La profundidad de socavación en el sitio de impacto del chorro procedente de un salto en esquí, depende de los siguientes parámetros:

- La intensidad de la descarga (caudal unitario).

- Altura del vertedero.
- Geometría del cucharón
- Nivel aguas abajo
- Ángulo de salida del salto en esquí
- Condiciones de operación del vertedero
- Condiciones del estrato rocoso (tipo y grado de homogeneidad de la roca)
- Tiempo en el que se produce el proceso de socavación.

Sin embargo, la mayoría de los análisis correlacionan a la socavación con dos parámetros dominantes: el caudal unitario (q) y la carga total (H). En la Tabla 6.5 se muestra las fórmulas propuestas por distintos autores para el cálculo de la socavación.

Tabla 6.5: Fórmulas para determinar la profundidad de socavación producto del impacto del chorro procedente del salto en esquí

PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	Schoklitsch (1932)	$Y_s = 0,521 \frac{q^{0,57} H^{0,2}}{d_{90}^{0,32}}$	Considera el d_{90} del material del lecho. Recomendada por Azlina et al. (2008)
2	Veronese (1937)	$Y_s = 1,9 q^{0,54} H^{0,225}$	Aplicable a prototipo. Tiende a sobre estimar la profundidad de socavación (Corroborado por Azlina et al - 2008).
3	Chen (1963)	$Y_s = K q^{0,5} Y^{0,25}$	Considera características de la roca. Utilizada en proyectos en China. (Ref. Liu, 2005). K=0,7 a 1,1 (Roca Dura) K=1,1 a 1,4 (Roca Media) K=1,4 a 1,8 (Roca Suave)
4	Damle A (1966)	$Y_s = 0,652 q^{0,5} Y^{0,5}$	Aplicable a modelos y prototipo. Escenario más desfavorable.

Continúa.

Continuación Tabla 6.5

PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
5	Damle B (1966)	$Y_s = 0,543 q^{0,5} \gamma^{0,5}$	Definida para salto en esqui en modelo.
6	Damle C (1966)	$Y_s = 0,362 q^{0,5} \gamma^{0,5}$	Definida para salto en esqui en prototipo.
7	Martins (1973)	$Y_s = 1,5 q^{0,6} \gamma^{0,1}$	Considera la altura entre nivel del agua en el embalse y el nivel del labio del cucharón.
8	Taraimovich (1978)	$Y_s = 0,633 q^{0,67} H^{0,25}$	Buenos resultados en prototipo. (Ref. Mason, 1985)
9	Machado (1980)	$Y_s = 1,35 \frac{q^{0,5} H^{0,3145}}{d_{90}^{0,0645}}$	Considera principios teóricos. Corroborada en laboratorio y prototipo.
10	INCYTH (1981)	$Y_s = 1,413 q^{0,5} H^{0,25}$	Buenos resultados en prototipo. (Ref. Mason, 1985)
11	Mason y Arumugam (1985)	$Y_s = 3,27 \frac{q^{0,6} H^{0,05} h_2^{0,15}}{g^{0,3} d_m^{0,1}}$	Aplicable en modelos. Incluye el diámetro medio. Si no se dispone de este dato, $d_m=0,25$ m
12	Mason y Arumugam (1985)	$Y_s = (6,42 - 3,10 h_2^{0,1}) \frac{q^{(0,6 - \frac{H}{200})} H^{(0,15 - \frac{H}{200})} h_2^{0,15}}{g^{0,3} d_m^{0,1}}$	Aplicable en prototipos. Incluye el diámetro medio. Si no se dispone de este dato, $d_m=0,25$ m
13	Yildiz y Uzucek (1996)	$Y_s = 1,50 q^{0,54} H^{0,225} \sin \alpha'$	Fórmula de Veronese modificada con el ángulo de incidencia del chorro.
14	Liu (2002)	$Y_s = K_c (0,41 + 0,082 d_m) \frac{q^{2/3} H^{1/3}}{d_m^{1/3}}$	Considera estudios experimentales y principios teóricos sobre las fuerzas fluctuantes que actúan en el lecho rocoso por incidencia del chorro. $K_c=0,62$ (Mas resistente) $K_c=1,0$ (Menos Resistente)

Continúa.

Continuación Tabla 6.5

PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
15	Liu (2005)	$Y_s = \sqrt{h_2^2 + \left(K_s^2 \left(\frac{Y_s}{h_{imp} \sin \alpha'} \right)^{-m} \left(\frac{q\sqrt{H}}{\sqrt{g}} \right) \right)}$	Incluye resistencia de la roca. (Ref. Presa Tres Gargantas - China). Cálculo mediante proceso iterativo. Ke=0,8 a 2 (Alta Resist.) Ke=2 a 3,2 (Mediana Resist.) Ke=3,2 a 4,5 (Baja Resist.) Ke=4,5 a 6,4 (Muy baja Resist.)
16	Ghahfarokhi et al. (2008)	$Y_s = 15,89 h_2 \left(\frac{V}{\sqrt{g h_2}} \right)^{1,1308} \left(\frac{H}{h_2} \right)^{-0,3019} \left(\frac{R}{h_2} \right)^{-0,2597} \left(\frac{d_{50}}{h_2} \right)^{0,1002} (\sin \phi_c)^{0,4014}$	En base a datos de modelo reportados por Azmathullah (2005)
17	Bureau of Indian Standards (2010)	$Y_s = m(qY)^{0,5}$	m=0,36 (S.mínima) m=0,54 (S. más probable) m=0,90 (S.máxima-estabilización del foso) Ábaco (Figura 6.4)
18		$Y_s = K_r q^{0,54} H^{0,225}$	En función de la fórmula de Veronese (1937). Kr depende de la resistencia de la roca. Kr=0,25 (Roca mas resistente) Kr=2,5 (Roca menos resistente)

Donde:

ϕ_c : Ángulo de salida del cucharón (°)

α' : Ángulo de entrada del chorro al colchón de aguas (°)

d_{50} : Tamaño donde el 50% del material que pasa es fino (m)

d_{90} : Tamaño donde el 90% del material que pasa es fino (m)

d_m : Diámetro medio del material del lecho (m)

h_2 : Calado en el cauce aguas abajo (m)

h_{imp} : Ancho del chorro en el impacto en el eje x (m)

H: Diferencia de niveles entre el embalse y el nivel aguas abajo (m)

q: Caudal unitario (m²/s)

R: Radio del cucharón (m)

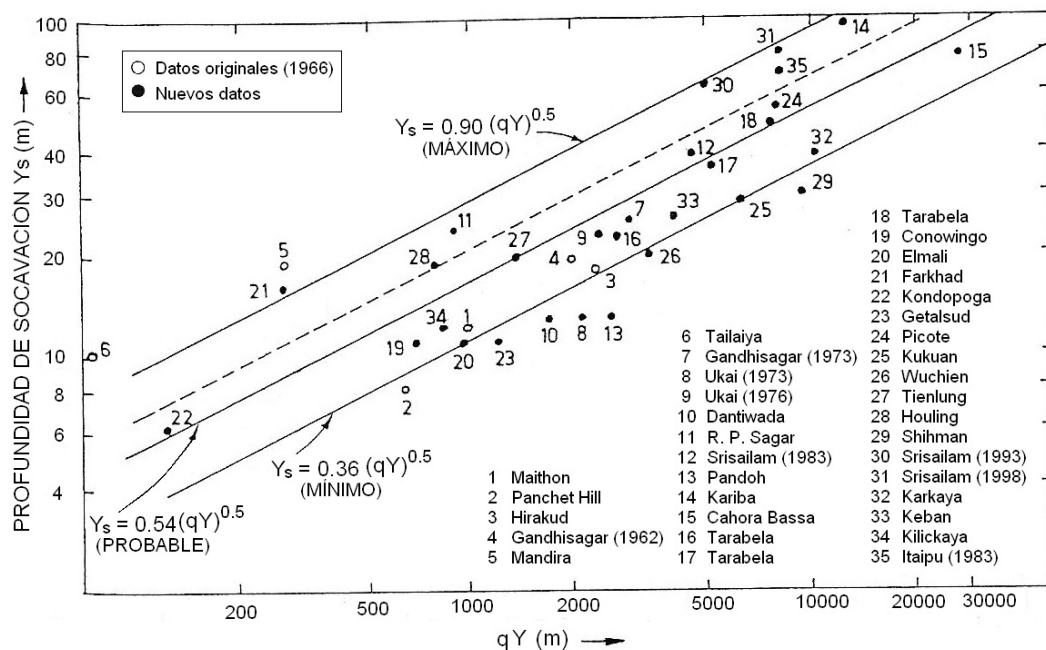
V: Velocidad media aguas abajo del foso de socavación (m/s)

Y: Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del cucharón (m)

Ys: Profundidad de socavación medida desde el nivel aguas abajo (m)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 6.4: Ábaco para determinar la profundidad de socavación (Y_s) producto del chorro procedente de un salto en esquí



Fuente: (Bureau of Indian Standards, 2010, pág. 19)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Las ecuaciones presentadas en la Tabla 6.5, pueden ser clasificadas en tres grupos: específicas para prototipos, específicas para modelos y no específicas.

- Las ecuaciones aplicables en prototipos son: Veronese (1973), Chen (1963), Damle A y C (1966), Taraimovich (1978), INCYTH (1981), Mason & Arumugam (1985) – Ecuación 12 en la Tabla 6.5, Yildiz & Uzucek (1996) y Bureau of Indian Standards (2010) – Ecuación 18 en la Tabla 6.5.
- Las ecuaciones aplicables en modelo son: Damle B (1966), Mason & Arumugam (1985) – Ecuación 11 en la Tabla 6.5 y Ghahfarokhi (2008).
- Las ecuaciones no específicas, es decir, aplicables tanto en prototipos como en modelos son: Schoklitsch (1932), Martins (1973), Machado (1980), Liu (2002), Liu (2005) y Bureau of Indian Standards (2010) – Ecuación 17 en la Tabla 6.5.

Una metodología semi-empírica para la determinación de la socavación producida por un chorro proveniente de un salto en esquí es el Método del Índice de Erodabilidad, el cual considera: la potencia del chorro (energía por unidad de área), y la capacidad resistente del suelo a la erosión (Índice de erosionabilidad). Es decir, si la potencia del chorro es mayor a la resistencia del suelo se produce la socavación. A continuación se presenta el método del *Índice de Erodabilidad* adaptado de Annandale (2006).

La resistencia de la roca a la socavación se la conoce como el Índice de Erodabilidad (K_e), el cual se determina mediante la siguiente ecuación:

$$K_e = M_s K_b K_d J_s \quad (6.13)$$

En donde, M_s es el número de resistencia de masa, K_b es el número del tamaño del bloque, K_d es el número de resistencia al corte en el contorno de la discontinuidad, J_s es el número de estructura relativa del terreno.

- **Número de resistencia de masa (M_s):**

$$M_s = C_r 0.78 UCS^{1.05} \quad ; \text{para } USC \leq 10MPa \quad (6.14)$$

$$M_s = C_r UCS \quad ; \text{para } USC > 10MPa \quad (6.15)$$

En donde, **UCS** es la compresión no confinada, C_r es el coeficiente de densidad relativa.

$$C_r = \frac{g \rho_r}{\gamma_r} \quad (6.16)$$

$\rho_r(\text{kg/m}^3)$ es la densidad de la roca, $\gamma_r(\text{N/m}^3)$ es el peso específico de la roca (27×10^3), $g(\text{m/s}^2)$ es la aceleración de la gravedad.

En la Tabla 6.1, se presentan los valores de M_s para diferentes características de la roca.

Tabla 6.6: Número de resistencia de Masa

NÚMERO DE RESISTENCIA AL MATERIAL - Ms PARA ROCA			
Dureza de la roca*	Pruebas de identificación en campo	UCS Mpa	Ms
Roca muy suave, o suelo muy duro	El material se destruye bajo golpes firmes con un cuña afilada y puede ser pelado con un cuchillo; muy duro para sacar una muestra triaxial a mano	<1.7	0.87
		1.7-3.3	1.86
Roca Suave	Puede ser descascarada o pelada con cuchillo; penetración de 1 a 3mm con golpes firmes.	3.3-6.6	3.95
		6.6-13.2	8.39
Roca dura	No puede ser descascarada o pelada con un cuchillo; una muestra en la mano puede ser rota con un golpe firme de martillo.	13.2-26.4	17.70
Roca muy dura	Una muestra en la mano, se rompe con un martillo con más de un golpe	26.4-53.0	35.00
		53.0-106.0	70.00
UCS 106-212 MPa faltante en la tabla)		106-212	--
Roca extremadamente dura	Muestra requiere de muchos golpes para romper a través del material intacto	<212	280.00

* La dureza de la roca es clasificada por las características de dureza y no por su origen geológico.

Fuente:(Annandale, 2006, pág. 102)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

- **Número del tamaño del bloque (K_b):**

$$K_b = \frac{RQD}{J_n} ; \text{ para } 5 \leq RQD \leq 100 \text{ y } 1 \leq J_n \leq 100 \quad (6.17)$$

En donde, **RQD** es designación de la calidad de la roca, **J_n** es el número de serie de juntas.

Tabla 6.7: Número de serie de juntas

NUMERO DE SERIE DE JUNTAS - Jn	
Descripción	Jn
Intacto; nada o pocas juntas	1.00
Una serie de juntas	1.22
Una serie de juntas más aleatorias	1.50
Dos series de juntas	1.83
Dos series de juntas más aleatorias	2.24
Tres series de juntas	2.73
Tres series de juntas más aleatorias	3.34
Cuatro series de juntas	4.09
Más de cuatro series de juntas	5.00

Fuente:(Annandale, 2006, pág. 107)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Si no se dispone del valor de RQD, éste puede ser determinado mediante la siguiente ecuación:

$$RQD = 105 - \left(\frac{10}{J_x J_y J_z^{0.33}} \right) \quad (6.18)$$

En donde, J_x , J_y , J_z , (m) son los espaciamientos promedio entre series de juntas en las tres direcciones.

- **Número de resistencia al corte en el contorno de la discontinuidad (K_d):**

$$K_d = \frac{J_r}{J_a} \quad (6.19)$$

En donde, J_r es la rugosidad de la pared de la junta, J_a es la alteración de la superficie de la junta.

Tabla 6.8: Número de rugosidad de las juntas

NUMERO DE RUGOSIDAD DE LA JUNTA - Jr		
Separación de la junta	Condición de dureza de la junta	Jr
Juntas o fracturas son ajustadas y se cierran durante flujo turbulento	Juntas discontinuas; gradeadas	4.0
	Juntas irregulares; ondulante	3.0
	Juntas lisas; ondulante	2.0
	Junta suavemente pulida; ondulante	1.5
	Juntas irregulares; planas	1.5
	Juntas lisas; planas	1.0
	Junta suavemente pulida; planas	0.5
Juntas o fracturas abiertas y permanecen abiertas durante el flujo	Juntas son abiertas o contienen un canal de grosor suficiente para prevenir el contacto de paredes durante el flujo.	1.0
	Destrozadas o micro-destrozadas	1.0

Fuente:(Annandale, 2006, pág. 109)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 6.9: Número de alteración de las juntas

NUMERO DE ALTERACIÓN DE LA JUNTA - Ja			
Identificación en campo de la apertura	Ja por ancho de apertura		
	< 1.0 mm	1.0-5.0 mm	≥ 5.00 mm
Junta curada rellena de material impermeable (cuarzo, calcita o epidotita)	0.75	--	--
Pared de la junta inalterada, superficie manchada.	1.0	--	--
Ligeramente alterada, no se suavisa, material de roca mineral no cohesivo o relleno de roca triturada.	2.0	2.0	4.0
No se suavisa, ligeramente arcillosa, relleno no cohesivo	3.0	6.0	10.0
No se suavisa, relleno de mineral de arcilla altamente sobreconsolidado, con o sin roca triturada.	3.0	6.0	10.0
Capas de arcilla mineral suave o de baja fricción, o pequeñas cantidades de arcilla expansiva.	4.0	8.0	13.0
Relleno de arcilla mineral suave moderadamente sobreconsolidada, con o sin roca triturada.	4.0	8.0	13.0
Arcilla expansiva destrozada o micro-destrozada, con o sin roca triturada.	5.0	10.0	18.0

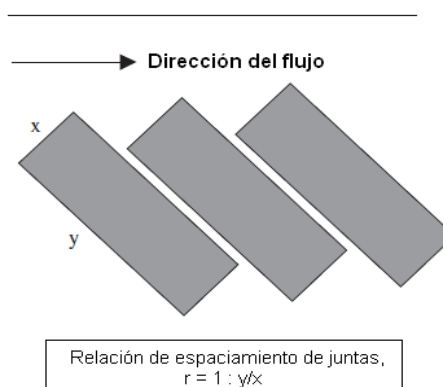
Fuente:(Annandale, 2006, pág. 110)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

- **Número de estructura relativa del terreno (Js):**

Esté numero es función de la orientación de las juntas que pueden permitir la entrada del agua y así remover el material. En la Tabla 6.10, se presentan los valores de Js.

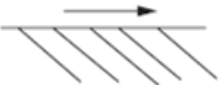
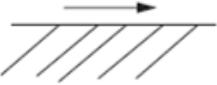
Figura 6.5: Determinación de la relación de espaciamiento de juntas: r



Fuente:(Annandale, 2006, pág. 114)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 6.10: Número de estructura relativa del terreno

NUMERO DE LA ESTRUCTURA RELATIVA DEL TERRENO - Js					
Dirección de la pendiente de la serie de junta menos favorable	Ángulo efectivo de la pendiente de la serie de junta menos favorable	Relación de espaciamiento de juntas *			
en Grados	en Grados	1:1	1:2	1:4	1:8
180/0	Vertical 90	1.14	1.20	1.24	1.26
Dirección de la inclinación aguas abajo (Con dirección del flujo) 	89	0.78	0.71	0.65	0.61
	85	0.73	0.68	0.61	0.57
	80	0.67	0.60	0.55	0.52
	70	0.56	0.50	0.46	0.43
	60	0.50	0.46	0.42	0.40
	50	0.49	0.46	0.43	0.41
	40	0.53	0.49	0.46	0.45
	30	0.63	0.59	0.55	0.53
	20	0.84	0.77	0.71	0.67
	10	1.25	1.10	0.98	0.90
	5	1.39	1.23	1.09	1.01
	1	1.50	1.33	1.19	1.10
0/180	Horizontal 0	1.14	1.09	1.05	1.02
Dirección de la inclinación aguas arriba (Con dirección contraria al flujo) 	-1	0.78	0.85	0.90	0.94
	-5	0.73	0.79	0.84	0.88
	-10	0.67	0.72	0.78	0.81
	-20	0.56	0.62	0.66	0.69
	-30	0.50	0.55	0.58	0.60
	-40	0.49	0.52	0.55	0.57
	-50	0.53	0.56	0.59	0.61
	-60	0.63	0.68	0.71	0.73
	-70	0.84	0.91	0.97	1.01
	-80	1.26	1.41	1.53	1.61
	-85	1.39	1.55	1.69	1.77
	-89	1.50	1.68	1.82	1.91
180/0	Vertical -90	1.14	1.20	1.24	1.26
Usar 1.0 para roca intacta y sin juntas					

* (1:r) donde r=y/x, x es pequeño y y es la dimensión larga (usar Js para 1:8 si r>1:8)

Fuente:(Annandale, 2006, pág. 113)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

• UMBRAL DE SOCAVACIÓN

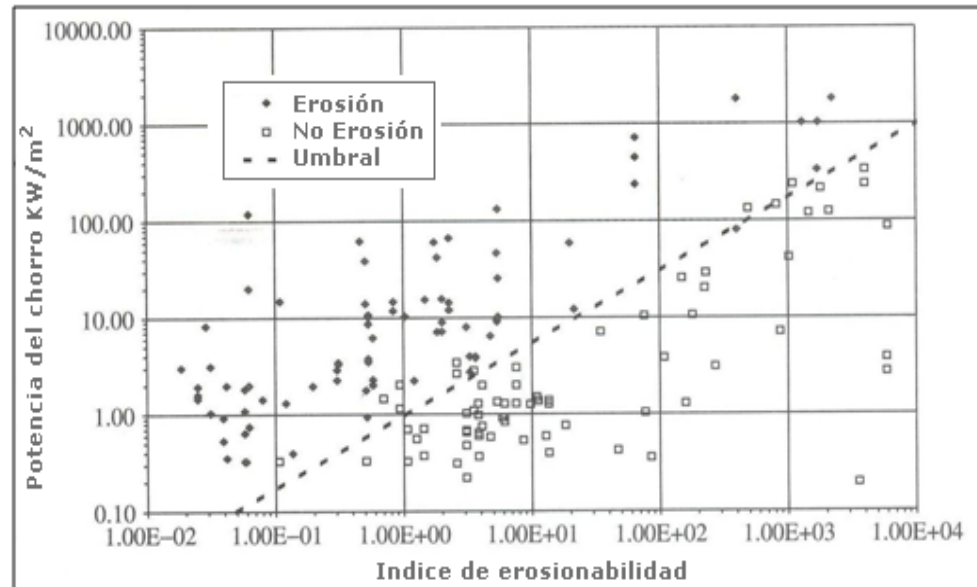
El Índice de Erodabilidad es convertido a potencia (kW/m^2) mediante la ecuación (6. 20), la cual representa el umbral para la socavación.

$$Pot_u = K_e^{0.75} \quad (6. 20)$$

En donde, Pot_u (kW/m^2) es la potencia del umbral de erosión, K_e es el Índice de Erodabilidad.

En la Figura 6.6, se puede observar gráficamente el umbral de erosión establecido por Annandale en 1995.

Figura 6.6: Umbral de erosión con base en el índice de erosionabilidad y la potencia del chorro



Fuente:(Annandale, 2006, pág. 224)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

- **POTENCIA DEL CHORRO INCIDENTE**

La potencia del chorro por unidad de área en el impacto con la superficie del agua del cuenco se determina con la siguiente ecuación:

$$Pot_{jet} = \frac{\gamma QH}{A_{imp}} \quad (6.21)$$

En donde, **Pot_{jet} (kW/m²)** es la potencia del chorro por unidad de área, **Q (m³/s)** es el caudal descargado, **H (m)** distancia entre la superficie libre del embalse y la superficie libre del cauce aguas abajo, **A_{imp} (m)** es el área del chorro en el impacto con la superficie de agua.

Castillo (2006), determinó que el ancho incidente de chorros rectangulares está dado por la siguiente ecuación:

$$h_{imp} = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4.28 Tu \sqrt{d_s} [\sqrt{H} - \sqrt{d_s}] \quad (6. 22)$$

En donde, h_{imp} (**m**) es el ancho del chorro en el punto de impacto con las superficie de agua del cuenco aguas abajo, H (**m**) distancia entre la superficie libre del embalse y la superficie libre del cauce aguas abajo, q (**m³/s.m**) es el caudal unitario, Tu (-) es la turbulencia inicial del chorro, d_s (**m**) es calado a la salida del salto en esquí.

Además, es necesario determinar si el chorro se ha desarrollado o no antes de incidir en el cuenco, para lo cual se debe determinar la longitud de rotura del chorro. Si la longitud de desarrollo del chorro es menor a su trayectoria, en el cuenco incide un chorro ya desarrollado. Castillo (2006), propone que la longitud de desarrollo se determine mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{L_d}{d_s Fr_s^2} = \frac{0,85}{(1.07 Tu Fr_s^2)^{0.82}} \quad (6. 23)$$

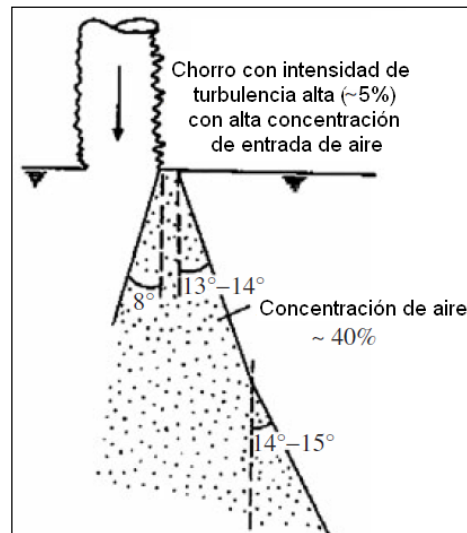
En donde, L_d (**m**) es la longitud de rotura o desarrollo del chorro (chorros rectangulares), Tu (-) es la turbulencia inicial del chorro, Fr_s (-) es el número de Froude a la salida del salto en esquí, d_s (**m**) es calado a la salida del salto en esquí.

Una vez que el chorro ingresa al cuenco, la potencia se ve afectada por la difusión del chorro la cual es dependiente de su turbulencia inicial. Como ya se mencionó en la sección 2.1.5, la turbulencia inicial en saltos en esquí está entre 3 y 5% según Bollaert (2002) y de 4 a 8% según Manso (2006).

Para Annandale (2006), el cálculo de la potencia del chorro a partir de la superficie libre del agua puede hacerse por dos formas. La primera es mediante la determinación del área del chorro a una

profundidad determinada, la cual se obtiene guiándose en lo establecido por Ervine & Flavey (1987)⁶², ver Figura 6.7.

Figura 6.7: Difusión de chorro circular con alto grado de turbulencia



Fuente:(Annandale, 2006, pág. 153)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Por lo que la potencia del chorro en el cuenco queda definida por:

$$Pot_{cuenco} = \frac{\gamma QH}{A_i} \quad (6. 24)$$

En donde, **Pot_{cuenco} (kW/m²)** es la potencia del chorro por unidad de área en el cuenco amortiguador, **Q (m³/s)** es el caudal descargado, **H (m)** distancia entre la superficie libre del embalse y la superficie libre del cauce aguas abajo, **A_i (m²)** es el área del chorro a una profundidad determinada a partir de la superficie libre del agua en el cuenco.

La segunda manera para determinar la potencia del chorro en el cuenco es mediante la utilización de los coeficientes de presión dinámica fluctuante y promedio, los cuales se pueden determinar de la siguiente forma:

⁶² Annandale, G. (2006). *Scour Technology-Mechanics and Engineering Practice*. Denver, Colorado: McGraw-Hill.p 155.

- **Coeficiente de presión dinámica promedio⁶³:**

Para $Y_s \leq 5.5h_{imp}$

$$C_p = 1 - 0.0014e^{5.755(H/Ld)} \quad \text{para } \frac{H}{Ld} < 1 \quad (6.25)$$

$$C_p = 14.643e^{-3.244(H/Ld)} \quad \text{para } \frac{H}{Ld} \geq 1 \quad (6.26)$$

Para $Y_s > 5.5h_{imp}$ (Colchón de agua efectivo)

$$C_p = ae^{-b(Y_s/h_{imp})} \quad (6.27)$$

En donde, los coeficientes a y b se determinan de la Tabla 6.11

Tabla 6.11: Coeficientes a y b para determinar el coeficiente de presión dinámica promedio

H/Ld	a	b
≤ 0.85	2.5	0.2
0.90-1.0	1.7	0.18
1.00-1.10	1.35	0.18
1.10-1.20	1	0.17
1.20-1.30	0.88	0.18
1.30-1.40	0.39	0.15
1.40-1.60	0.24	0.14
≥ 1.60	0.14	0.12

Fuente:(Castillo & Carrillo, 2013, pág. 6)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

- **Coeficiente de presión dinámica fluctuante⁶⁴:**

Para $Y_s/h_{imp} \leq 14$

$$C'_p = a \left(\frac{Y_s}{h_{imp}} \right)^3 + b \left(\frac{Y_s}{h_{imp}} \right)^2 + c \left(\frac{Y_s}{h_{imp}} \right) + d \quad (6.28)$$

⁶³Castillo, L., & Carrillo, J. (2013). *Scour estimation of the Paute-Cardenillo Dam*.Cartagena, España.

⁶⁴Castillo, L., & Carrillo, J. (2013). *Scour estimation of the Paute-Cardenillo Dam*.Cartagena, España.

En donde, los coeficientes a, b, c y d se determinan de la Tabla 6.12:

Tabla 6.12: Coeficientes a, b, c y d para determinar el coeficiente de presión dinámica fluctuante para $Y_s/h_{imp} \leq 14$

		$0 \leq Y_s/h_{imp} \leq 14$			
H/Ld	a	b	c	d	
≤ 0.80	0.00030	-0.01000	0.0815	0.08	
0.80-1.0	0.00030	-0.01000	0.0790	0.13	
1.0-1.30	-0.00001	-0.00220	0.0160	0.35	
1.30-1.60	0.00003	-0.00180	0.0100	0.21	
1.60-1.80	0.00005	-0.00195	0.0098	0.16	
≥ 1.80	0.00005	-0.00190	0.0010	0.11	

Fuente:(Castillo & Carrillo, 2013, pág. 6)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Para $Y_s/h_{imp} > 14$

$$C'_p = ae^{-b(Y_s/h_{imp})} \quad (6. 29)$$

En donde, los coeficientes a y b se determinan de la Tabla 6.13:

Tabla 6.13: Coeficientes a y b para determinar el coeficiente de presión dinámica fluctuante para $Y_s/h_{imp} > 14$

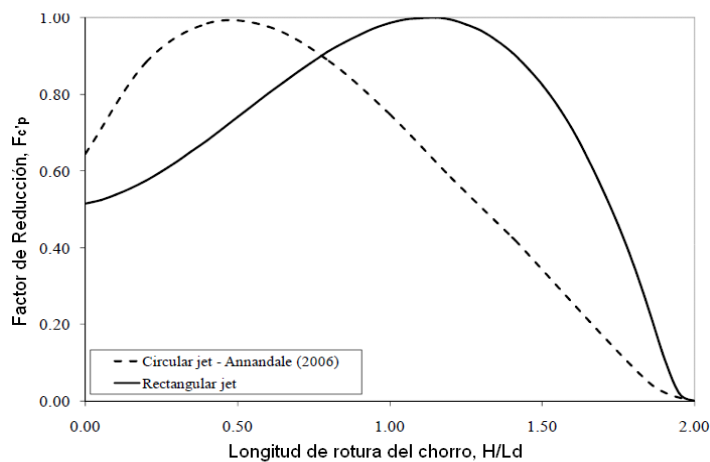
		$Y_s/h_{imp} > 14$	
H/Ld	a	b	
≤ 0.80	1.5	0.21	
0.80-1.0	1.8	0.21	
1.0-1.30	1.0	0.15	
1.30-1.60	0.4	0.12	
1.60-1.80	1.3	0.23	
≥ 1.80	2.5	0.35	

Fuente:(Castillo & Carrillo, 2013, pág. 6)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Y el factor de reducción del coeficiente de presión fluctuante se determina de la Figura 6.8:

Figura 6.8: Factor de reducción del coeficiente de presión dinámica fluctuante (C'_p)



Fuente:(Castillo & Carrillo, 2013, pág. 5)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Por lo que la variación de la presión del chorro por unidad de área en función de la relación (Y_s/h_{imp}) queda determinada por la siguiente ecuación:

$$Pot_{cuenco} \left(\frac{Y_s}{h_{imp}} \right) = C_p \left(\frac{Y_s}{h_{imp}} \right) \frac{\gamma QH}{A_{imp}} + F_{c'p} C'_p \left(\frac{Y_s}{h_{imp}} \right) \frac{\gamma QH}{A_{imp}} \quad (6.30)$$

En donde, **Pot_{cuenco} (kW/m²)** es la potencia del chorro por unidad de área en el cuenco amortiguador, **Q (m³/s)** es el caudal descargado, **H (m)** distancia entre la superficie libre del embalse y la superficie libre del cauce aguas abajo, **A_{imp} (m²)** es el área del chorro en el impacto con la superficie de agua, **h_{imp} (m)** es el grosor del chorro en el impacto con la superficie de agua, **Y_s (m)** es la profundidad del cuenco medida desde la superficie libre del agua, **F_{c'p}** es el factor de reducción de C'_p , **C_p** y **C'_p** son los coeficientes de variación de presión dinámica promedio y fluctuante, respectivamente.

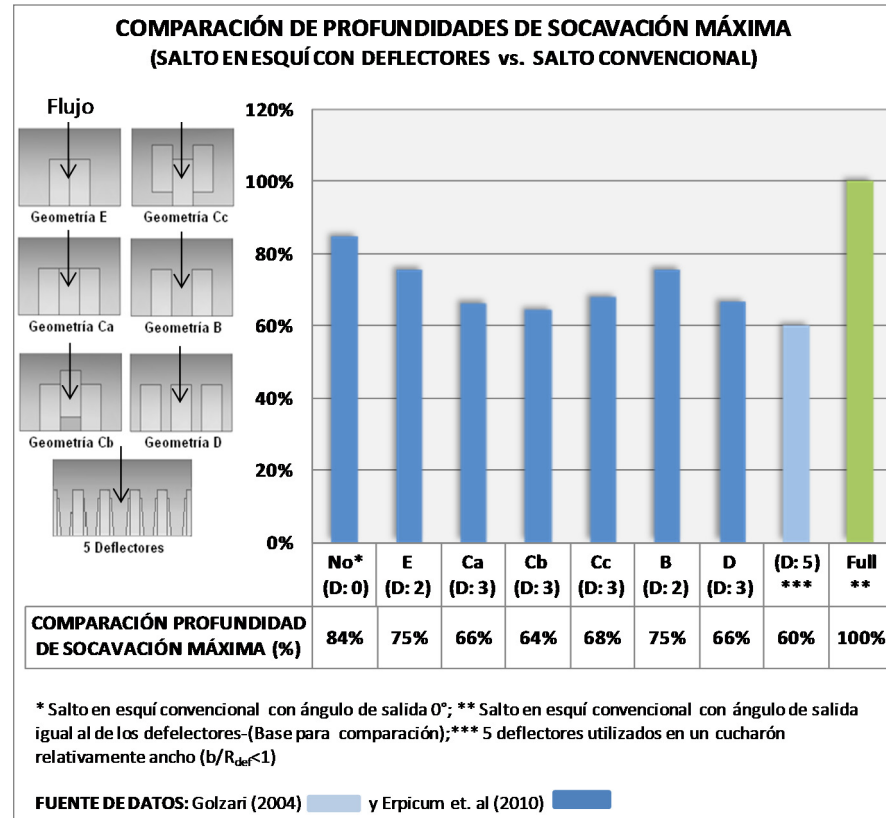
Finalmente, se debe comparar la presión del umbral de erosión (Pot_u) con la presión del chorro en el cuenco (Pot_{cuenco}) para determinar si habrá socavación o no a partir del fondo del cuenco. Es decir, no existirá socavación en el fondo del cuenco si Pot_{cuenco} es menor a Pot_u .

6.3.2. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES (DENTADO) VS. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL

Con base a los estudios realizados por Erpicum et. al (2010) y Golzari (2004), al comparar un salto en esquí convencional con saltos en esquí con deflectores (varias configuraciones) se obtiene que: la profundidad de socavación, el alcance, la superficie y el volumen de socavación varían de la siguiente forma:

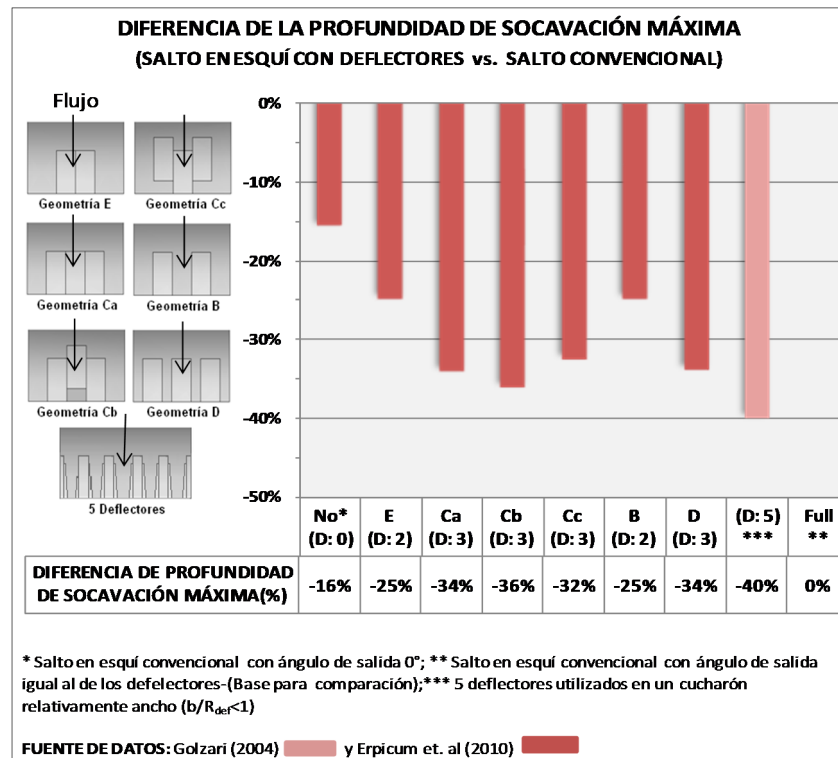
- **Profundidad de socavación máxima:** Al comparar un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores con el mismo ángulo de salida, la profundidad de socavación máxima disminuye entre 25% y 40%, para saltos en esquí con 2 deflectores y 5 deflectores, respectivamente. (Figura 6.9, Figura 6.10 y Tabla 6.14).

Figura 6.9: Comparación de la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 6.10: Diferencia en la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 6.14: Comparación y variación de la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores

ANÁLISIS DE PROFUNDIDADES			
Disposición de deflectores	Comparación de profundidades de socavación máxima	Diferencia de profundidad de socavación máxima	Ancho relativo del cucharón b/R_{def}
No*	84%	-16%	0.6
E	75%	-25%	0.6
Ca	66%	-34%	0.6
Cb	64%	-36%	0.6
Cc	68%	-32%	0.6
B	75%	-25%	0.6
D	66%	-34%	0.6
(D: 5) ***	60%	-40%	3.1
Full **	100%	0%	

* Salto en esquí convencional con ángulo de salida 0°

** Salto en esquí convencional con ángulo de salida igual al de los deflectores - (Base para comparación)

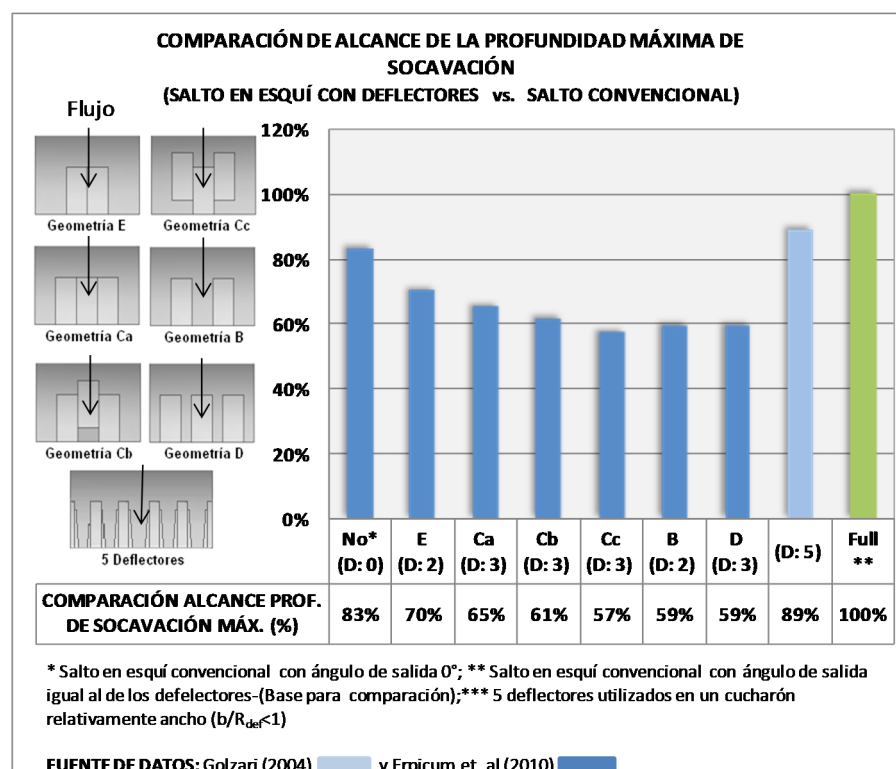
*** 5 deflectores utilizados en un cucharón relativamente ancho ($b/R_{def}>1$)

Fuente de datos: *** (Golzari, 2004) y (Erpicum et al, 2010)
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

De la Figura 6.10 y la Tabla 6.14, se puede observar que las configuraciones más eficientes en cuanto a la reducción de la profundidad de socavación (34% – 36%), en cucharas relativamente angostas ($b/R_{def} < 1$), son aquellas que poseen tres dientes alejados de las paredes. Para el caso de cucharas relativamente anchas ($b/R_{def} > 1$), se puede observar que el uso de 5 dientes es altamente efectivo para la reducción de la profundidad de socavación.

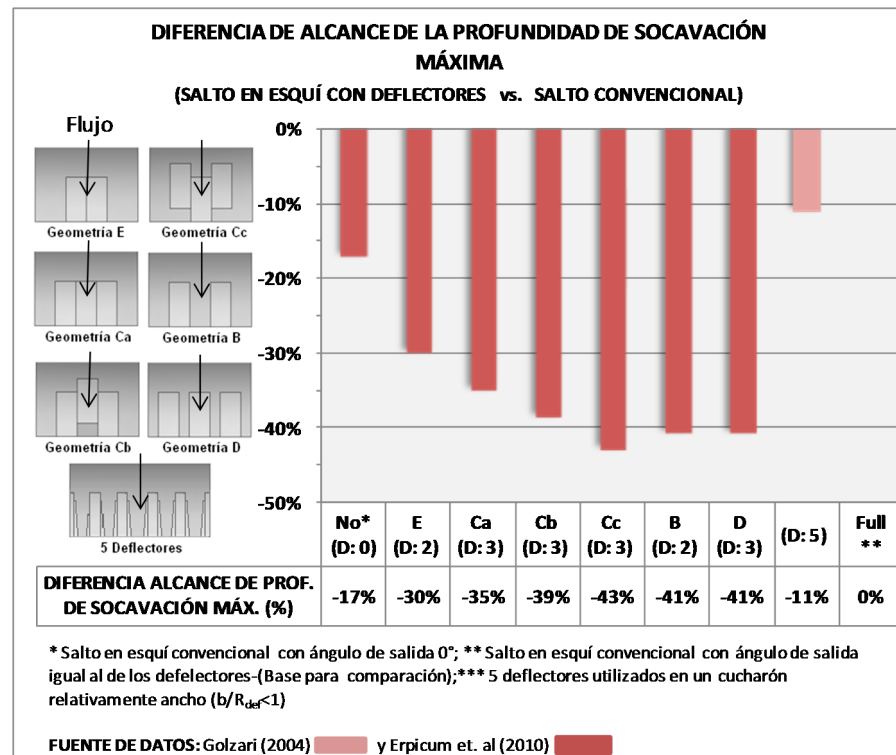
- **Alcance (Profundidad de socavación máxima):** El alcance de la profundidad de socavación máxima disminuye entre 11% (5 deflectores) y 43% (3 deflectores juntos: 2 desplazados hacia atrás), al comparar con el alcance de un salto convencional. (Figura 6.11, Figura 6.12 y Tabla 6.15).

Figura 6.11: Comparación del alcance de la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 6.12: Diferencia en el alcance de la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 6.15: Comparación y variación del alcance de la profundidad de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores

ANÁLISIS DE ALCANCE (PROFUNDIDAD MÁXIMA)			
Disposición de deflectores	Comparación de alcance de socavación máxima	Diferencia de alcance de socavación máxima	Ancho relativo del cucharón b/R_{def}
No* (D: 0)	83%	-17%	0.6
E (D: 2)	70%	-30%	0.6
Ca (D: 3)	65%	-35%	0.6
Cb (D: 3)	61%	-39%	0.6
Cc (D: 3)	57%	-43%	0.6
B (D: 2)	59%	-41%	0.6
D (D: 3)	59%	-41%	0.6
(D: 5)	89%	-11%	3.1
Full **	100%	0%	

* Salto en esquí convencional con ángulo de salida 0°

** Salto en esquí convencional con ángulo de salida igual al de los deflectores - (Base para comparación)

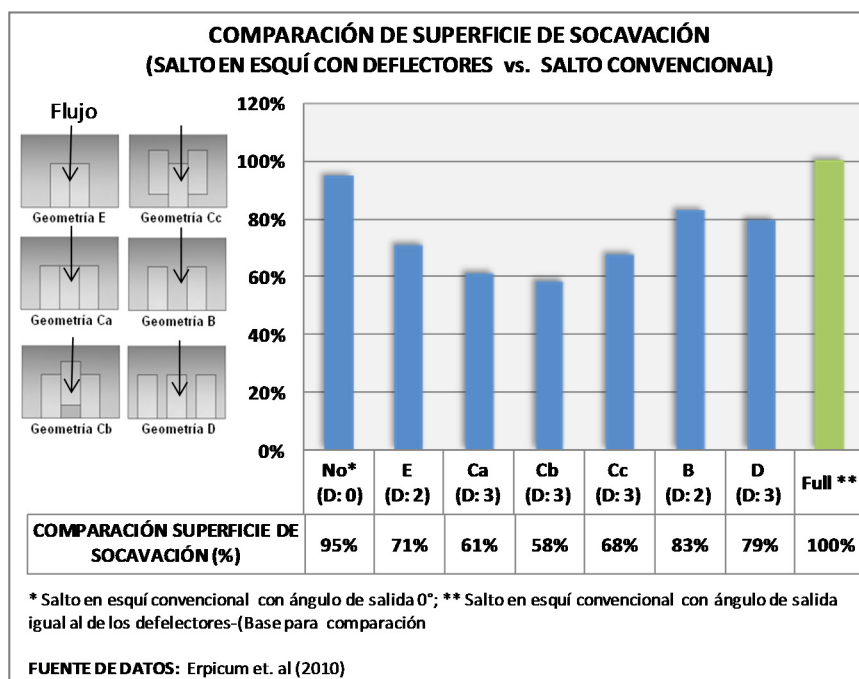
*** 5 deflectores utilizados en un cucharón relativamente ancho ($b/R_{def} > 1$)

Fuente de datos: *** (Golzari, 2004) y (Erpicum et al, 2010)
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

En la Figura 6.12 y la Tabla 6.15, se obtiene que para cucharas relativamente angostas ($b/R_{def} < 1$), las configuraciones que afectan en menor porcentaje (30% - 35%) al alcance de la máxima profundidad de socavación, son aquellas que poseen dos y tres dientes sin espaciamiento entre ellos, los cuales también pueden considerarse como un solo diente con una ocupación del ancho de la cuchara de $2/5$ y $3/5$, respectivamente. Para el caso de cucharas relativamente anchas ($b/R_{def} > 1$), el uso de 5 dientes reduce de forma mínima (11%) el alcance de la máxima profundidad de socavación.

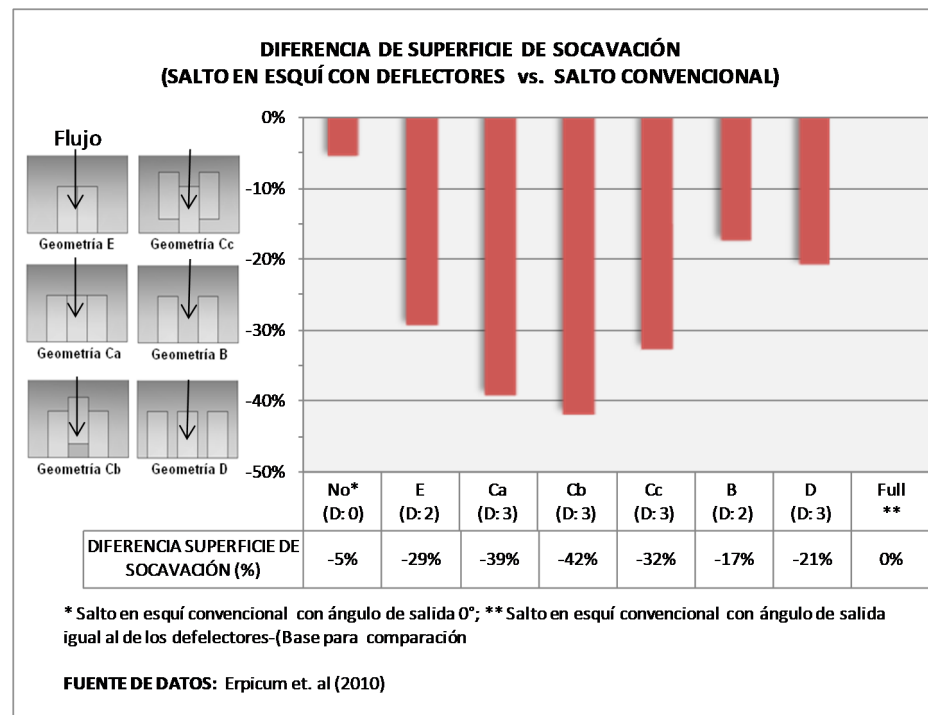
- **Superficie de socavación:** En todas las disposiciones de los deflectores tomadas en consideración, el área de socavación disminuye en comparación con un salto convencional. Como se puede observar en la Figura 6.13, Figura 6.14 y Tabla 6.16, la disminución de la superficie de socavación está entre 17% y 42% que corresponden al caso de 2 deflectores centrados y 3 deflectores juntos (1 desplazado hacia atrás), respectivamente.

Figura 6.13: Comparación de la superficie de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 6.14: Diferencia en la superficie de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 6.16: Comparación y variación de la superficie de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores

ANÁLISIS DE SUPERFICIE DE SOCAVACIÓN			Ancho relativo del cucharón b/Rdef
Disposición de deflectores	Comparación de área de socavación	Diferencia de área de socavación	
No* (D: 0)	95%	-5%	0.6
E (D: 2)	71%	-29%	0.6
Ca (D: 3)	61%	-39%	0.6
Cb (D: 3)	58%	-42%	0.6
Cc (D: 3)	68%	-32%	0.6
B (D: 2)	83%	-17%	0.6
D (D: 3)	79%	-21%	0.6
Full **	100%	0%	

* Salto en esquí convencional con ángulo de salida 0°

** Salto en esquí convencional con ángulo de salida igual al de los deflectores - (Base para comparación)

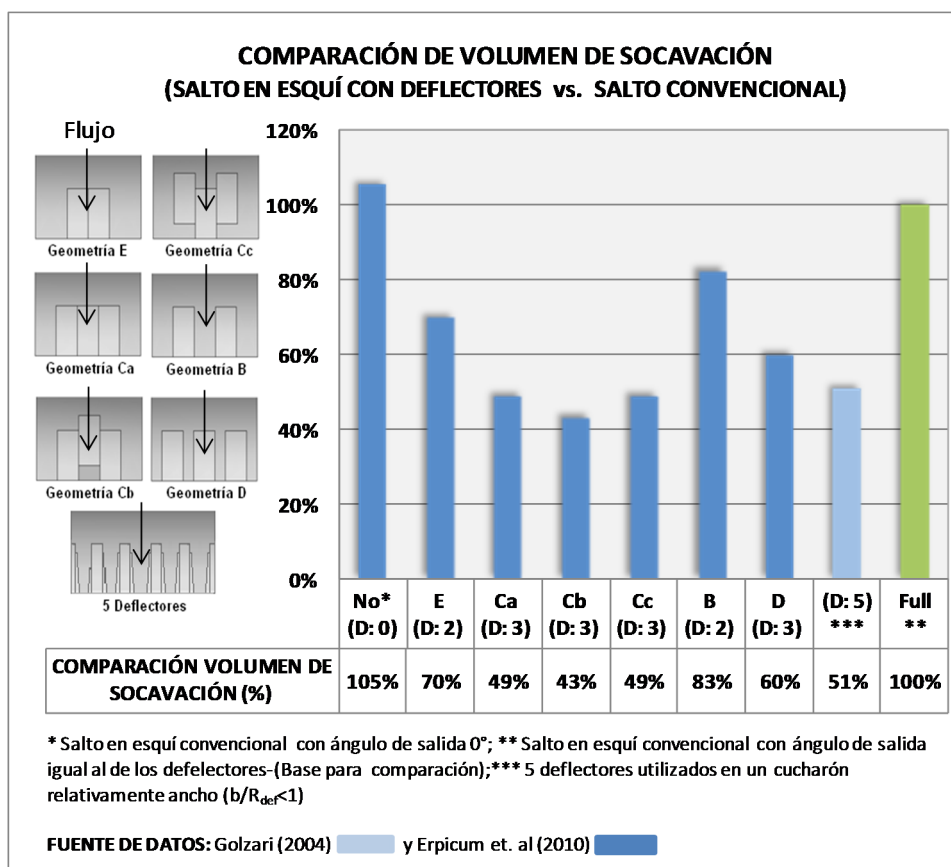
Fuente de datos:(Erpicum et al, 2010)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

En cuanto a disminución de la superficie de socavación, la Figura 6.14 y la Tabla 6.16, permiten concluir que para cucharas, relativamente angostas ($b/R_{def} < 1$), las configuraciones con tres dientes juntos permiten reducir en mayor porcentaje el área de socavación (32% - 42%).

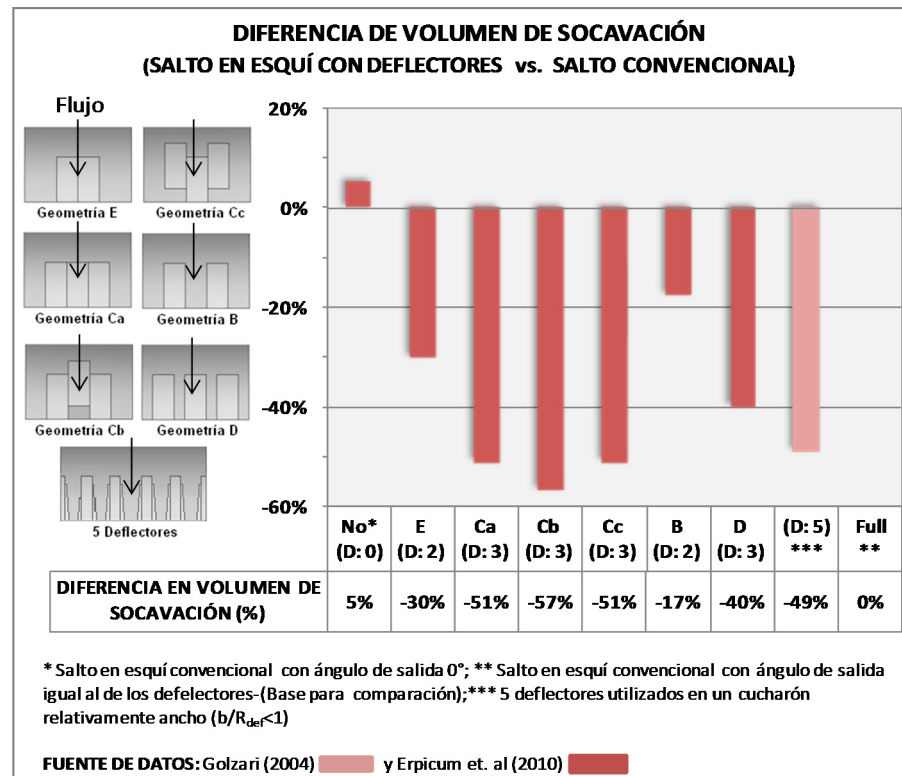
- **Volumen de socavación:** Al igual que en la superficie de socavación, en general, el volumen de socavación disminuye en comparación con un salto convencional. Como se puede observar en la Figura 6.15, Figura 6.16 y Tabla 6.17, la disminución está entre 17% y 57% que corresponden al caso de 2 deflectores centrados y 3 deflectores juntos (1 desplazado hacia atrás), respectivamente.

Figura 6.15: Comparación de volúmenes de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 6.16: Diferencia de volumen de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 6.17: Comparación y variación de volumen de socavación máxima de un salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores

ANÁLISIS DE VOLUMEN DE SOCAVACIÓN			
Disposición de deflectores	Comparación de volumen de socavación	Diferencia de volumen de socavación	Ancho relativo del cucharón b/R_{def}
No* (D: 0)	105%	5%	0.6
E (D: 2)	70%	-30%	0.6
Ca (D: 3)	49%	-51%	0.6
Cb (D: 3)	43%	-57%	0.6
Cc (D: 3)	49%	-51%	0.6
B (D: 2)	83%	-17%	0.6
D (D: 3)	60%	-40%	0.6
(D: 5)***	51%	-49%	3.1
Full**	100%	0%	

* Salto en esquí convencional con ángulo de salida 0°

** Salto en esquí convencional con ángulo de salida igual al de los deflectores - (Base para comparación)

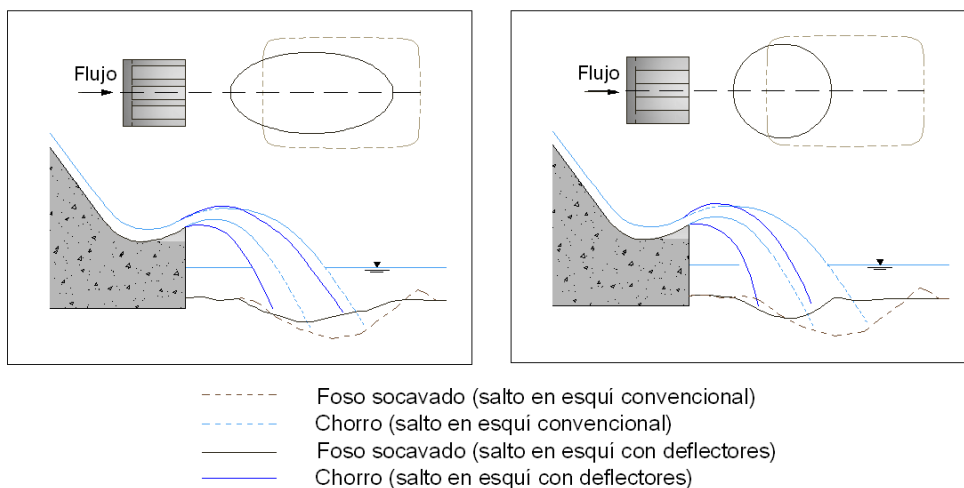
*** 5 deflectores utilizados en un cucharón relativamente ancho ($b/R_{def} < 1$)

Fuente de datos: *** (Golzari, 2004) y (Erpicum et al, 2010)
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Finalmente, en la Figura 6.16 y la Tabla 6.17, se puede observar que al igual que para el caso de la superficie de socavación las configuraciones más eficientes, para cucharas relativamente angostas ($b/R_{def}<1$), son las que poseen tres dientes juntos (51% - 57%). Para el caso de cucharas relativamente anchas ($b/R_{def}>1$), se puede observar que el uso de 5 dientes es muy efectivo para la reducción del volumen de socavación.

- **Forma del foso de socavación:** Cuando se utilizan deflectores en los saltos en esquí, el foso de socavación puede adquirir una forma en planta ovalada o redonda, dependiendo de la disposición de los dispositivos; a diferencia del salto en esquí convencional, donde la forma del foso tiene una tendencia rectangular, como ya se mencionó en el numeral 5.4.1. En la Figura 6.17 y Tabla 6.18, se puede observar la variación en la forma del foso socavado.

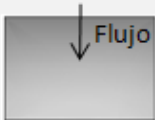


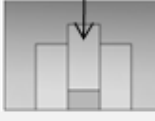

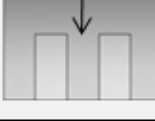
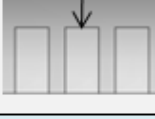
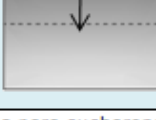
Figura 6.17: Comparación de: alcance del chorro, profundidad y forma del foso de socavación de salto en esquí convencional y con deflectores (2 disposiciones).



Nota: Salto en esquí convencional con el mismo ángulo de salida que los deflectores

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 6.18: Comparación de las formas del foso de socavación para salto en esquí convencional y saltos en esquí con deflectores

FORMA DEL FOSO DE SOCAVACIÓN		
Disposición de deflectores		Forma en planta del foso de socavación
No* (D: 0)		Ovalada (alargada en el sentido del flujo)
E (D: 2)		Redonda
Ca (D: 3)		Redonda
Cb (D: 3)		Redonda
Cc (D: 3)		Redonda/ Ovalada (alargada en el sentido del flujo)
B (D: 2)		Ovalada (alargada en el sentido del flujo)
D (D: 3)		Ovalada (alargada en el sentido del flujo)
Full **		Rectangular (alargada en el sentido del flujo)

NOTA: Formas de foso obtenidas para cucharones relativamente angostos ($b/R_{def} < 1$)

* Salto en esquí convencional con ángulo de salida 0°

** Salto en esquí convencional con ángulo de salida igual al de los deflectores - (Base para comparación)

FUENTE DE DATOS: Erpicum et. al (2010)

Fuente:(Erpicum et al, 2010, pág. 109)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

6.3.2.1. Profundidad de Socavación:

Dado que hasta la actualidad no se han desarrollado formulaciones específicas para el cálculo de la socavación en saltos en esquí con deflectores, es necesario recurrir a información obtenida en estudios de modelos a escala en los cuales se compare las profundidades de socavación en modelo con las de formulaciones empíricas existentes.

Hermosa (2013), realizó el estudio experimental en modelo físico del cuenco de socavación de la presa Toachi, la misma que tiene dos vertederos cimacio con disipadores en salto en esquí con dos deflectores cada uno. En este estudio, el autor compara las profundidades de socavación obtenidas en modelo y las calculadas con ecuaciones empíricas utilizadas para saltos en esquí convencionales, considerando como variable principal el tamaño del material del cuenco.

Como resultado de la comparación, Hermosa (2013) recomienda el uso de las formulaciones establecidas por Schoklitsch (1932) y Machado (1980) ya que con estas se obtienen los menores errores porcentuales, correspondientes a $\pm 20\%$ ⁶⁵.

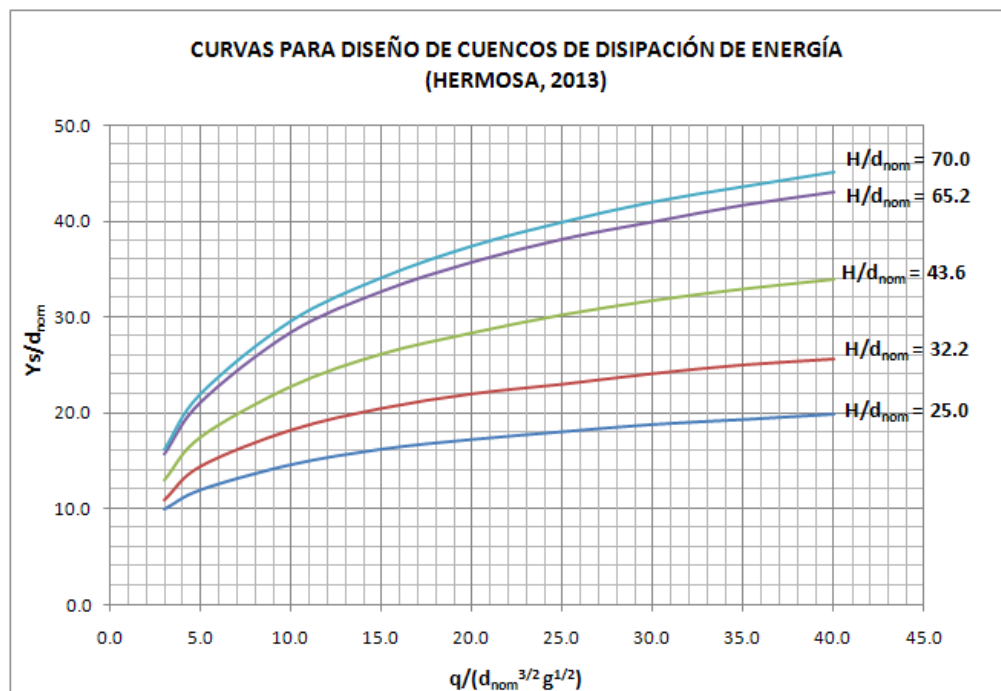
$$\text{Schoklitsch(1932): } Y_s = 0.521 \frac{q^{0.57} H^{0.20}}{d_{90}^{0.32}} \quad (6.31)$$

$$\text{Machado (1980): } Y_s = 1.35 \frac{q^{0.50} H^{0.3145}}{d_{90}^{0.0645}} \quad (6.32)$$

Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos de la investigación del modelo, Hermosa (2013) propone un ábaco (Figura 6.18) para determinar la profundidad del cuenco de socavación en función del diámetro nominal del material del lecho.

⁶⁵Hermosa, D. (2013). *Estudio Experimental en Modelo Físico Sobre el Desarrollo del Cuenco de Socavación al pie de la Presa Toachi*. Quito, Ecuador: Escuela. p 96-97.

Figura 6.18: Curvas para el diseño de cuencos de disipación de energía



Fuente:(Hermosa, 2013, pág. 95)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

La aplicabilidad de los resultados obtenidos por Hermosa (2013), se limita para proyectos con similares características al de la presa Toachi (ver Tabla 6.19), principalmente las condiciones de control aguas abajo del cuenco amortiguador, es decir, que exista una transición (estrechamiento) asimétrica hacia el río inmediatamente aguas abajo del cuenco.

Tabla 6.19: Principales características del proyecto Toachi

PROYECTO TOACHI					
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA PRESA			CARACTERÍSTICAS DE LA TRANSICIÓN AL RÍO		
Altura de la presa	59.0	m	Longitud de la transición	85.0	m
Longitud de la presa	170.5	m	Ancho al inicio de la transición	68.0	m
Rango de Caudales	250.0	m^3/s	Ancho al final de la transición	17.3	m
	1200.0				
Carga de diseño	7.5	m	Pendiente longitudinal	0.02	m/m
Ancho de cada vertedero	14.0	m	Angulo de la margen derecha	13.00	°
Número de deflectores por vertedero	2	-	Angulo de la margen izquierda	26.00	°
Diferencia de nivel entre el labio del cuhcarón y el fondo original del lecho	24.2	m	Material	hormigón	-

Fuente de datos:(Hermosa, 2013)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

6.3.3. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE PAREDES VS. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL

Al comparar un salto en esquí convencional con saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes se obtiene que: la socavación y la forma del foso de socavación varían de la siguiente forma:

- **Socavación:** Según Gao & Li (1983)⁶⁶, el uso de saltos en esquí con estrechamiento de paredes, reduce la socavación entre 1/3 y 2/3 de la socavación obtenida con un salto en esquí convencional con ángulo de salida de 30°. La reducción en la profundidad de socavación es debida a que el chorro se dispersa longitudinalmente facilitando la entrada de aire y reduciendo así, la acción del chorro en el cauce aguas abajo.
- **Forma del foso de socavación:** Cuando se utiliza estrechamiento de paredes en un salto en esquí, el foso de socavación adquiere una forma en planta ovalada alargada en el sentido del flujo. Esta forma se debe al ancho contraído a la salida del salto en esquí y a la consecuente diferencia del ángulo de despegue y alcances de las napas.

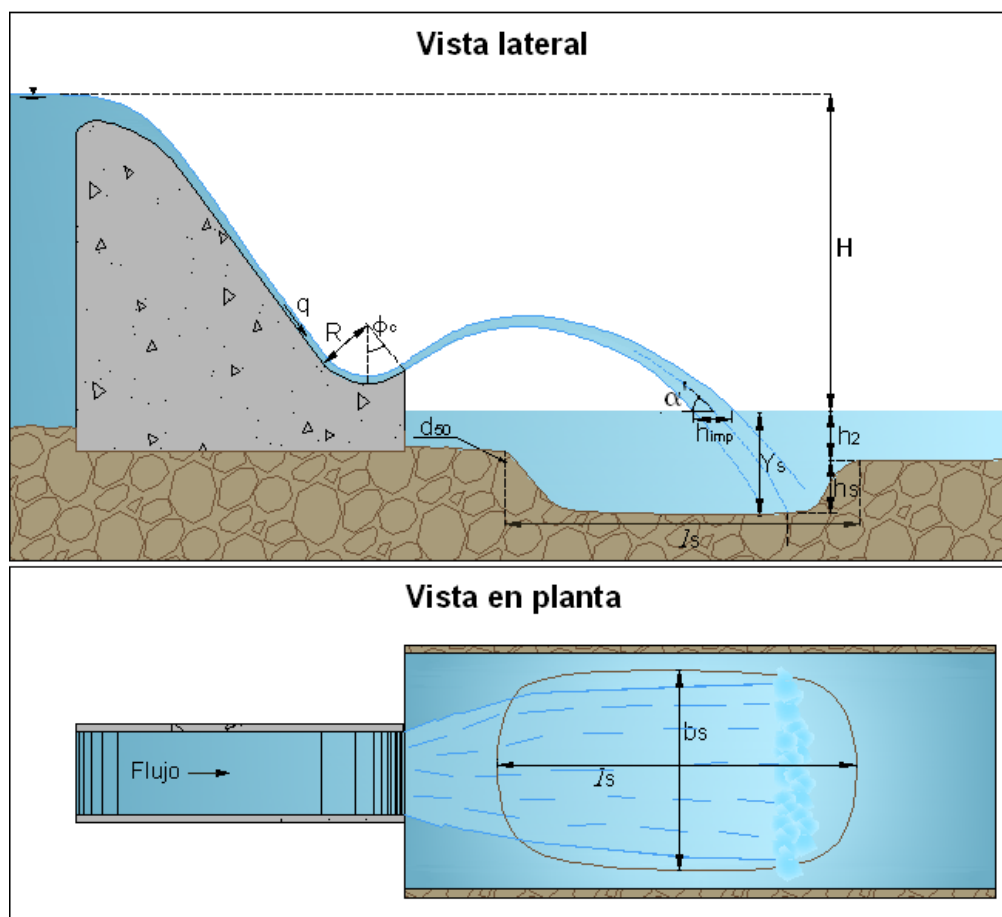
Comparando la longitud y ancho de los fosos de socavación entre el salto convencional y el salto con estrechamiento de paredes, se obtiene que la longitud del foso de socavación del estrechamiento es mayor y por lo contrario, el ancho es menor que el del foso del salto en esquí convencional. La variación de forma del foso de socavación dependerá del grado de contracción del estrechamiento, a mayor contracción menor será el ancho del foso y viceversa.

⁶⁶Guo, J. (2012). Recent Achievements in Hydraulic Research in China. *china Institute of water Resources and Hydropower Research (IWHR)* , 485-505.p 487.

6.4. DISEÑO DEL CUENCO PREEXCAVADO

Cuando al pie del vertedero existe un salto en esquí, el chorro proveniente del mismo provoca la socavación del cauce aguas abajo de la presa. Para reducir la cantidad de material de lecho socavado por el chorro y controlar la socavación, en varios casos es necesaria la pre-excavación del cuenco. En la Figura 6.19, se puede observar las características de un cuenco pre-excavado.

Figura 6.19: Dimensiones y parámetros que inciden en el cuenco pre-excavado



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Para conocer si es conveniente conformar un cuenco pre-excavado es necesario determinar el riesgo de ocurrencia de las crecidas en el período de vida útil del proyecto. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$Riesgo = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^n \quad (6. 33)$$

En donde, **Tr (años)** es el periodo de retorno de la crecida, **n (años)** es el período de vida útil del proyecto.

A menor riesgo, menos viable es la construcción de un cuenco pre-excavado.

Según Schleiss (2002), el cuenco pre-excavado debe ser similar al foso formado naturalmente por el chorro. Además, recomienda que los cuencos pre-excavados sean para periodos de retorno no mayores a 50 y 100 años, debido a que los cuencos diseñados para mayores periodos de retorno, dejan de ser económicamente viables.

A continuación se presentan varios criterios para la determinación de las dimensiones del cuenco amortiguador.

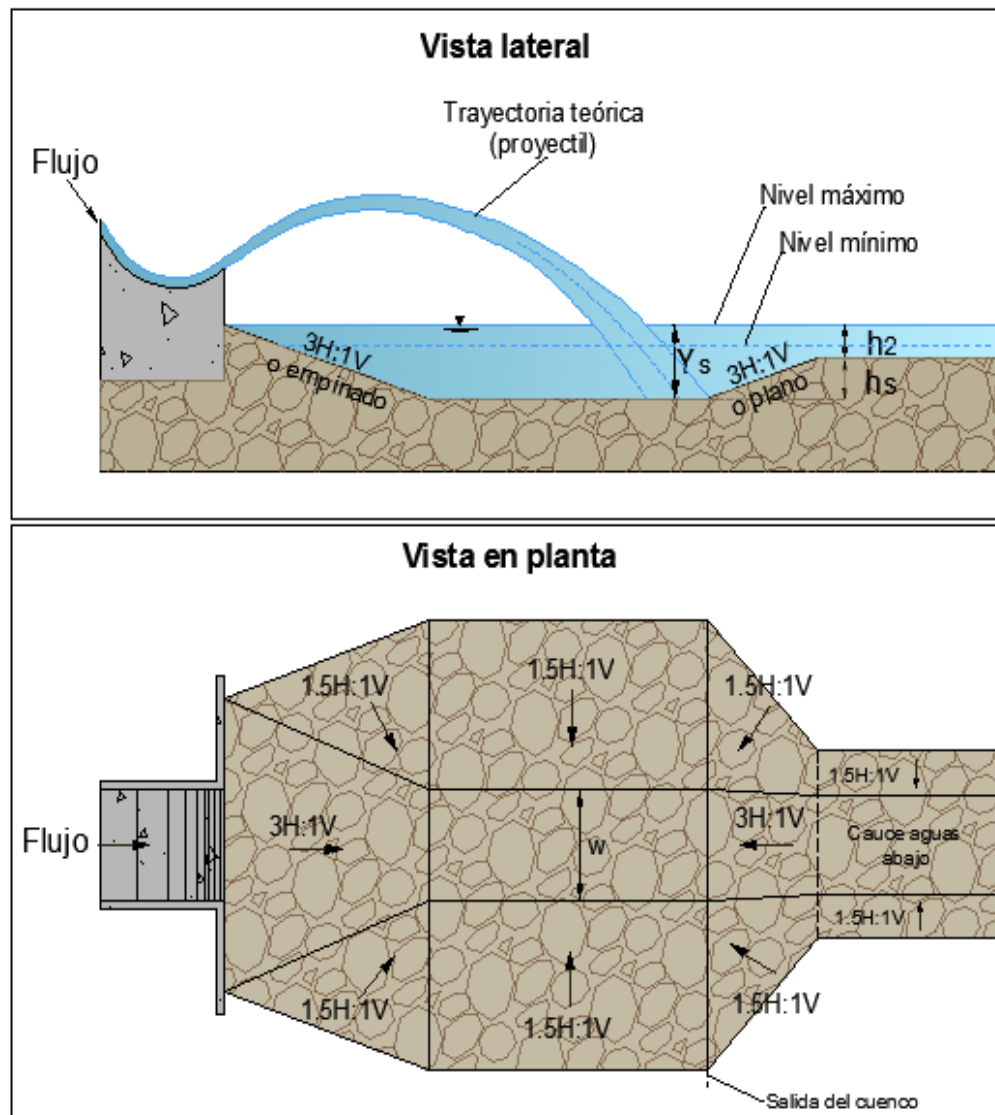
- **U.S.B.R** ⁶⁷:

Establece que no existe un criterio definido y único que permita disipar energía satisfactoriamente para toda la gama de escenarios (caudales, alcances, ángulos de incidencia), pero plantea algunos criterios referenciales para cuencos pequeños.

Los criterios se limitan para el caso en el que el ángulo de incidencia es mayor a 25 grados, ya que si es menor el chorro rebota sobre la superficie, avanzando a gran velocidad y provocando ondas que originan socavación adicional en el foso.

⁶⁷Martínez, E., Batanero, P., Martínez, I., & González, E. (2007). *Bureau of Reclamation - Diseño de Pequeñas Presas* (Traducción 3era Edición Americana ed.). (E. Martínez, P. Batanero, I. Martínez, E. Martínez, & E. Gonzáles, Trads.) Madrid: Bellisco - Ediciones Técnicas y Científicas. p 482.

Figura 6.20: Características del cuenco pre-excavado



Fuente: (Martinez et. al, 2007)

Modificado por: Toapaxi A., Jorge.

Donde: w (ancho del foso en el fondo) es mayor al ancho de incidencia del chorro ó aquél ancho que limite la velocidad del flujo a la salida del cuenco a 1 m/s. Y_s (el caldo del cuenco) equivale a $1/5$ de la diferencia entre el nivel de agua máximo en el embalse y el máximo calado aguas abajo.

- **Martins (1973):**

Propone el diseño del cuenco de saltos en esquí, basado en un ensayo tridimensional utilizando material no cohesivo (cubos de mortero). El diseño no es válido para chorros horizontales o chorros en caída libre (presa en arco).

$$h_s = Y_s - h_2 \quad (6.34)$$

$$l_s = (0.8 + 2 \cos \alpha')^4 \sqrt[4]{h_s (h_s + h_{imp})^3} \quad (6.35)$$

$$b_s = 1.6 \sqrt[4]{h_s (h_s + h_{imp})^3} \quad (6.36)$$

- **Taraimovich (1978) & Mason (1993):**

Las fórmulas para dimensionar el cuenco pre-excavado propuestas por Taraimovich (válidas para chorros circulares), son adaptadas a chorros rectangulares por Mason (1993), definiéndolas de la siguiente manera:

$$l_s = h_s \left(3 + 0.67 \frac{Q}{g^{0.5} \left(\frac{4bd}{\pi} \right)^{1.25}} \right) \quad (6.37)$$

$$b_s = h_s \left(3 + 0.30 \frac{Q}{g^{0.5} \left(\frac{4bd}{\pi} \right)^{1.25}} \right) \quad (6.38)$$

En donde, $l_s(\mathbf{m})$ es la longitud del cuenco pre-excavado en el sentido del chorro, $b_s(\mathbf{m})$ es el ancho del cuenco pre-excavado, $Q(\mathbf{m}^3/\mathbf{s})$ es el caudal, $d(\mathbf{m})$ es el calado del flujo en el salto en esquí, $b(\mathbf{m})$ es el ancho del chorro, $g(\mathbf{m}/\mathbf{s}^2)$ es la aceleración de la gravedad y $h_s(\mathbf{m})$ es la profundidad de socavación medida desde el nivel natural del cauce.

- **Ghahfarokhi et al (2008):**

Propone el diseño del cuenco de saltos en esquí basado en datos experimentales reportados por Azmathullah (2005).

$$h_s = 15.89h_2 \left(\frac{V}{\sqrt{gh_2}} \right)^{1.1308} \left(\frac{H}{h_2} \right)^{-0.3019} \left(\frac{R}{h_2} \right)^{-0.2597} \left(\frac{d_{50}}{h_2} \right)^{0.1002} (\sin \phi_c)^{0.4014} - h_2 \quad (6.39)$$

$$b_s = 7.20h_2 \left(\frac{V}{\sqrt{gh_2}} \right)^{0.3581} \left(\frac{H}{h_2} \right)^{0.3918} \left(\frac{R}{h_2} \right)^{0.0774} \left(\frac{d_{50}}{h_2} \right)^{0.0203} (\sin \phi_c)^{0.2986} \quad (6.40)$$

$$l_s = 0.942h_2 \left(\frac{V}{\sqrt{gh_2}} \right)^{0.0223} \left(\frac{H}{h_2} \right)^{0.8182} \left(\frac{R}{h_2} \right)^{0.1351} \left(\frac{d_{50}}{h_2} \right)^{0.0071} (\sin \phi_c)^{-1.3839} \quad (6.41)$$

Tabla 6.20: Características de presas utilizadas por Azmathullah (2005)

Presa	Altura	Logitud de Presa	Vertedero			Q diseño (m ³ /s)	Radio del cucharón (m)	Ángulo de salida del cucharón (°)
			Vanos	Ancho c/vano (m)	Compuertas			
Subarnarekha	52	720	13	15	Radiales 15x15	26150	25	32.5
Ranganadi	60	-	7	10	-	12500	18	35
Parbati	85	-	3	6	Radiales	1850	28	30

Fuente: (Ghahfarokhi et. al, 2008)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

A continuación se presenta una tabla resumen que contiene los criterios para el dimensionamiento del cuenco amortiguador al pie de presas con salto en esquí.

Tabla 6.21: Resumen de criterios de dimensionamiento del cuenco pre-excavado al pie de una presa

DISEÑO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO			
Nº	AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
1	U.S.B.R.	$h_s = \frac{1}{5} H - h_2$ <p>w > ancho de incidencia del chorro ó aquel ancho que limite la velocidad del flujo a la salida del cuenco a 1 m/s</p>	Las pendientes de las paredes del cuenco se presentan en la Figura 6.20
2	Martins (1973)	$h_s = 1,5 q^{0,6} Y^{0,1} - h_2$ $b_s = 1,6 \sqrt[4]{h_s (h_s + h_{imp})^3}$ $l_s = (0,8 + 2 \cos \alpha') \sqrt[4]{h_s (h_s + h_{imp})^3}$	<p>Con base en ensayo tridimensional utilizando material no cohesivo (cubos de mortero)</p> <p>Para saltos en esquí</p> <p>No válido para chorros horizontales o chorros a caída libre (presa en arco)</p>
3	Taraimovich (1978) & Mason (1993)	$b_s = h_s \left(3 + 0,30 \left(\frac{Q}{g^{0,5} \left(\frac{4bd}{\pi} \right)^{1,25}} \right) \right)$ $l_s = h_s \left(3 + 0,67 \left(\frac{Q}{g^{0,5} \left(\frac{4bd}{\pi} \right)^{1,25}} \right) \right)$	Las ecuaciones son presentadas por Taraimovich (1978) para chorros circulares y adaptadas por Mason (1993) para chorros rectangulares.
4	Ghahfarokhi et al. (2008)	$h_s = 15,89 h_2 \left(\frac{V}{\sqrt{g h_2}} \right)^{1,1308} \left(\frac{H}{h_2} \right)^{-0,3019} \left(\frac{R}{h_2} \right)^{-0,2597} \left(\frac{d_{50}}{h_2} \right)^{0,1002} (\sin \phi_c)^{0,4014} - h_2$ $b_s = 7,20 h_2 \left(\frac{V}{\sqrt{g h_2}} \right)^{0,2581} \left(\frac{H}{h_2} \right)^{0,3918} \left(\frac{R}{h_2} \right)^{0,0774} \left(\frac{d_{50}}{h_2} \right)^{0,0203} (\sin \phi_c)^{0,2986}$ $l_s = 0,942 h_2 \left(\frac{V}{\sqrt{g h_2}} \right)^{0,0223} \left(\frac{H}{h_2} \right)^{0,8182} \left(\frac{R}{h_2} \right)^{0,1351} \left(\frac{d_{50}}{h_2} \right)^{0,0071} (\sin \phi_c)^{-1,3829}$ <p style="text-align: center;">En base a datos de modelo reportados por Azmathullah (2005)</p>	

Donde:

- α' : Ángulo de entrada del chorro al colchón de aguas (°)
- b**: Ancho del vano (m)
- b_s**: Ancho del cuenco (m)
- d**: Calado en el salto en esquí (m)
- d₅₀**: Tamaño donde el 50% del material que pasa es fino (m)
- ϕ_c : Ángulo de salida del cucharón (°)
- H**: Diferencia de niveles entre el embalse y el nivel aguas abajo (m)
- h₂**: Calado en el cauce aguas abajo (m)
- h_{imp}**: Grosor del chorro en el impacto con el colchón aguas abajo (m)
- h_s**: Altura de socavación desde el fondo natural del lecho (m)
- l_s**: Longitud del cuenco (m)
- q**: Caudal unitario (m²/s)
- Q**: Caudal (m³/s)
- R**: Radio del cucharón (m)
- V**: Velocidad media aguas abajo del foso de socavación (m/s)
- w**: Ancho del fondo del cuenco pre-excavado (m)
- Y**: Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del cucharón (m)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

6.5. CONCLUSIONES

En cuanto a las consideraciones para la selección del tipo de salto en esquí:

- El uso del salto en esquí convencional, como disipador de energía, es una alternativa económica por su facilidad constructiva y su requerimiento mínimo de mantenimiento, siempre y cuando se cumplan las siguientes características de la presa y del cauce aguas abajo de la misma: la presa debe ser alta (aproximadamente de 50m de altura), la velocidad en la rápida debe superar los 20 m/s, el nivel aguas abajo debe ser inferior al nivel del labio del cucharón, el cauce aguas abajo debe estar compuesto por roca y ser lo suficientemente ancho para captar el chorro y no afectar las laderas.
- El salto en esquí con deflectores (dientes), es conveniente cuando se requiere una mayor disipación de energía que la que se obtiene con un salto en esquí convencional. Esta alternativa de disipación, a diferencia del salto en esquí convencional, es de mayor complejidad constructiva y requiere de mantenimiento más frecuente. Su uso es adecuado cuando la presa es alta (aproximadamente de 60 a 135m de altura) y cuando el sacrificar el alcance del chorro no afecte las obras anexas.
- El salto en esquí con estrechamiento de paredes es útil para direccionar el chorro a un lugar específico. Este tipo de salto en esquí es adecuado cuando la presa es muy alta (aproximadamente 157 a 305m de altura), el cauce es estrecho, las laderas son profundas y cuando no exista limitación en la zona de incidencia longitudinal del chorro debido a la forma alargada que adquiere en su trayectoria.

En cuanto a la evaluación de la pérdida de energía según el cuenco de socavación:

- El alcance del chorro, es importante, debido a que define el sitio donde se produce de la máxima profundidad de socavación en el cauce aguas abajo. Los factores que definen y afectan el alcance vertical como

horizontal son: la distancia vertical entre el labio y el nivel aguas abajo, el ángulo de salida del cucharón, la velocidad del flujo a la salida y la resistencia del aire; ésta última adquiere importancia para velocidades del chorro mayores a 20 m/s, ya que reduce el alcance.

- La profundidad de socavación en el cauce aguas abajo de una presa con salto en esquí depende principalmente de las características de la presa (altura y geometría del cucharón), condiciones de operación, caudal por unidad de ancho y de las características del cauce aguas abajo de la presa (nivel aguas abajo y tipo de estrato rocoso)
- Para obtener profundidades de socavación empíricas lo más aproximadas a las profundidades que se pueden presentar en el proyecto en estudio, es necesario aplicar las ecuaciones empíricas según su origen, es decir basadas en observaciones de prototipos o modelos. Por esta razón se presenta a continuación la clasificación de las formulaciones de acuerdo a su aplicabilidad.

Tabla 6.22: Clasificación de las formulaciones de socavación según su aplicabilidad

CLASIFICACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA SOCAVACIÓN AL PIE DE PRESAS CON SALTO EN ESQUÍ		
PROTOTIPOS	MODELOS	PROTOTIPOS Y MODELOS
<ul style="list-style-type: none"> • Veronese (1937) • Chen (1963) • Damle A (1966) • Damle C (1966) • Taraimovich (1978) • INCYTH (1981) • Mason y Arumugam (1985)- Tabla 6.5 (12) • Yildiz y Uzucek (1996) • Bureau of Indian Standards (2010)- Tabla 6.5 (18) 	<ul style="list-style-type: none"> • Damle B (1966) • Mason y Arumugam (1985)- Tabla 6.5 (11) • Ghahfarokhi et al. (2008) 	<ul style="list-style-type: none"> • Schoklitsch (1932) • Martins (1973) • Machado (1980) • Liu (2002) • Liu (2005) • Bureau of Indian Standards (2010)- Tabla 6.5 (17)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- La capacidad resistente del estrato rocoso frente a la incidencia de un chorro, puede medirse con el Índice de Erodabilidad. Este índice

permite comparar la potencia límite que resiste el fondo del lecho con la potencia real del chorro, es decir, mientras la potencia del chorro sea mayor al umbral de erodabilidad del lecho, existirá socavación.

- Los saltos en esquí con deflectores o dientes son eficientes en reducir la profundidad, superficie y volumen de socavación con relación al salto en esquí convencional. Para cucharas relativamente angostas ($b/R_{def} < 1$), cuando se coloca un solo diente lo más eficiente es que éste ocupe $3/5$ del ancho de la cuchara, ya que comparando con un salto en esquí convencional disminuye: la profundidad en 34%, la superficie de socavación en 39 %, el volumen de socavación un 51% y el alcance del chorro solo un 35%. En el caso en que se coloquen 2 o 3 dientes, éstos deben estar alejados de los muros laterales y distribuidos de manera uniforme para garantizar la eficiencia de los mismos.
- El salto en esquí con estrechamiento de paredes es efectivo para reducir la profundidad de socavación en comparación a un salto en esquí convencional. La reducción de la profundidad de socavación puede ser entre 33.3% y 66.6% dependiendo del grado de contracción, es decir a mayor contracción la difusión será mayor y por ende la reducción de la profundidad de socavación será mayor. Adicionalmente, el foso de socavación será más alargado cuanto mayor sea la contracción.

En cuanto al diseño del cuenco pre-excavado:

- La construcción de un cuenco pre-excavado al pie de una presa reduce la producción de material socavado y es económicamente conveniente cuando el riesgo de ocurrencia de las crecidas, durante el período de vida útil de la presa, es alto. En lo que respecta al diseño del cuenco pre-excavado, se recomienda que la forma del mismo sea similar, en forma, al foso de socavación producido por el chorro.

CAPÍTULO 7.

HOJA DE CÁLCULO PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE SALTOS EN ESQUÍ Y EJEMPLOS

7.1. HOJA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE SALTOS EN ESQUÍ

A fin de facilitar el dimensionamiento de las diferentes formas de saltos en esquí, se propone una hoja de cálculo para el diseño de los mismos, la cual comprende:

- El diseño del vertedero cimacio
- El cálculo de los perfiles de flujo sobre el vertedero
- El diseño de tres tipos de saltos en esquí: convencional, dentado y con estrechamiento de paredes.
- La determinación de alcances del chorro proveniente del salto en esquí
- El cálculo de la profundidad de socavación
- El diseño del cuenco pre-excavado

Los resultados obtenidos a través de la hoja de cálculo deben ser sujetos a verificación y optimización mediante la realización de un modelo físico del proyecto de interés.

▪ **LIMITACIONES**

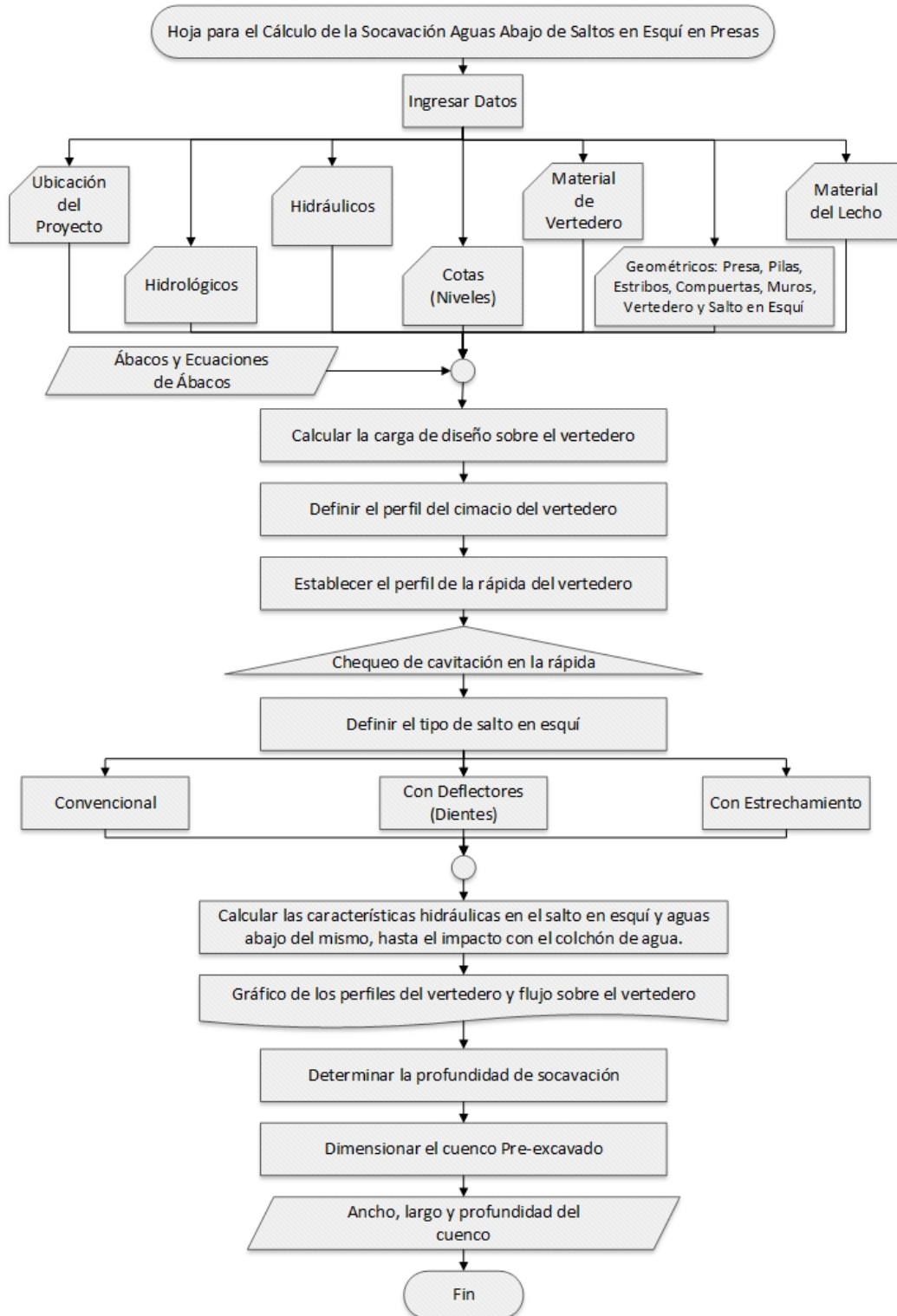
A continuación se presenta los limitantes con los cuales se generó la hoja de cálculo:

- La hoja de cálculo está diseñada para utilizar en versión Excel 2013 (Windows 8).
- Válido para presas altas $P/H_d > 1.33$ y con paramento vertical

- Pendiente de la rápida menor a 1V:0.6H
- El perfil del flujo calculado es aproximado
- El programa realiza los cálculos exclusivamente para la carga de diseño. Sin embargo para la socavación, se permite el cálculo de la misma para un caudal diferente al de diseño.
- Para el diseño de saltos en esquí con deflectores trapezoidales, el ángulo de salida del cucharón es cero, es decir existe un fondo plano horizontal.
- El diseño de saltos en esquí con estrechamiento de paredes se limita para casos donde el ancho del vano del vertedero esté dentro del rango de 5 a 20 metros, o muy cercano.
- En lo referente al cálculo de la socavación no se toma en cuenta, de ser el caso, el efecto del choque de chorros antes del ingreso al colchón de agua.
- La socavación calculada es para suelos no cohesivos.
- La variable tiempo (tiempo de duración de la crecida) no se considera en el cálculo de la profundidad de socavación.

7.1.1. DIAGRAMA DE FLUJO

Figura 7.1: Procedimiento para el cálculo de la socavación aguas abajo de saltos en esquí en presas



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

7.1.2. MANUAL DE USO

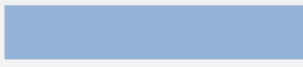


La hoja de cálculo para el diseño de saltos en esquí consta de las siguientes partes principales:

- Ingreso de datos
- Cálculo del perfil del vertedero cimacio y perfil de agua sobre el mismo.
- Diseño del cucharón para salto en esquí convencional
- Diseño de salto en esquí con deflectores
- Diseño de salto en esquí con estrechamiento de paredes
- Cálculo de la socavación
- Diseño del cuenco pre-excavado

CÓMO TRABAJA LA HOJA DE CÁLCULO

La hoja de cálculo consta de tres procesos, a los cuales se les ha asignado un color distintivo:

Tabla 7.1: Procesos y colores distintivos de la hoja de cálculo

PROCESO	COLOR
<i>Datos</i>	
<i>Cálculos</i>	
<i>Resultados y Gráficos</i>	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

1. DATOS:

Los datos necesarios para el diseño del vertedero y del salto en esquí, deben ingresarse solamente en la hoja "DATOS", la cual está conformada de la siguiente forma:

Figura 7.2: Conformación de la hoja "DATOS"

DATOS			
UBICACIÓN DEL PROYECTO			OBSERVACIONES
Latitud	0.0	°	
Altitud	777.0	msnm	
HIDROLÓGICOS			OBSERVACIONES
Tiempo de concentración		min	
Periodo de retorno	10000	años	
Caudal de diseño	2336.0	m ³ /s	

Nombre del dato a ingresar
Valor del dato (celda modificable)
Unidades
Comentarios, recomendaciones y rangos de validez.

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Notas:

- Los cambios en datos deberá hacerse desde la hoja "DATOS".
- Cuando en las características del cucharón se desee adoptar un valor en específico, primeramente se deberá seleccionar en todas las pestañas desplegadas, la opción NINGUNO. A continuación se deberá ingresar el valor deseado en la hoja "CRITERIOS BASE" en la celda "NINGUNO".
- Cuando se seleccione el Radio del Cucharón, siempre se deberá presionar los botones rojos ubicados en la celda observaciones.

Cualquier otra hoja del programa distinta a la hoja "DATOS", contendrá una sección de datos, los cuales no son modificables. Excepto en el caso en que existan celdas de color celeste claro , en cualquier proceso de la hoja, deberá ingresarse el valor

del dato solicitado tomando en cuenta las observaciones correspondientes, como se puede ver a continuación:

Figura 7.3: Ejemplo de celdas especiales para el ingreso de datos

ANCHO DEL DEFLECTOR Y ESPACIAMIENTO (b_{def} , e)			
DATOS			OBS.
Ancho del vano (b)	14.0	m	
Calado al inicio del cucharón (do)	1.88	m	Para Gonzáles Fariñas (2004)
Froude del flujo de aproximación (Fr_a)	8.0	-	Para Gonzáles Fariñas (2004)
Numero de dientes (n)			
ECUACIÓN	n		OBS.
Varios proyectos (-)	1		Número referencial. Sujeto a chequeo por dimensión constructiva del ancho del diente. Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales
Numero de dientes (n) adoptado	2		
Relación e/b_{def} y Porcentaje de ocupación			
ECUACIÓN	e/b_{def}	ocupación	OBS.
Chen Sheng & Chen Minlin (2004)	0.90	-	$e/b_{def} < 1$. Válido para deflectores rectangulares
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	0.90	-	Escoger e/b_{def} entre 0,5 y 0,9. Válido para deflectores rectangulares

Valor a ingresar

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

2. CÁLCULOS:

Todas las pestañas, exceptuando la hoja “DATOS” contiene la sección cálculos, identificada con color rojo :

Figura 7.4: Ejemplo de la sección Cálculos

CÁLCULO DE CAVITACIÓN EN LA RÁPIDA										
DATOS				OBS.						
Caudal (Q)	2335.16	m ³ /s								
Aceleración de la gravedad (g)	9.78	m/s ²								
Ancho al inicio de la rápida (b_{inicio})	40.21	m		b efectivo, si está entre las pilas						
Pendiente de la rápida (So)	1.11	m/m								
Presión Atmosférica (p_{atm})	9.40	m		Función de la elevación-HYDRAULIC DESIGN CHART 000-2						
Presión de Vapor (p_{v22})	0.17	m		Función de la temperatura-HYDRAULIC DESIGN CHART 001-2						
CÁLCULO DEL SIGMA DE CAVITACIÓN (σ)										
X (m)	Ancho (m)	d (m)	Area (m)	V (m/s)	h (m)	h_{200} (m)	$\alpha V^2/2g$ (m)	σ	Chequeo	Observaciones
11.20	40.21	3.847	154.68	15.10	2.57	11.97	11.65	1.01	OK	
12.46	40.21	3.615	145.37	16.06	2.42	11.82	13.19	0.88	OK	
13.72	40.21	3.425	137.70	16.96	2.29	11.69	14.70	0.78	OK	
14.98	40.21	3.264	131.22	17.80	2.18	11.58	16.19	0.71	OK	
16.23	44.40	2.813	124.91	18.69	1.88	11.28	17.87	0.62	OK	
17.49	44.40	2.706	120.16	19.43	1.81	11.21	19.31	0.57	OK	
18.75	44.40	2.611	115.94	20.14	1.75	11.15	20.74	0.53	OK	
20.01	44.40	2.526	112.16	20.82	1.69	11.09	22.17	0.49	OK	
21.27	44.40	2.449	108.75	21.47	1.64	11.04	23.58	0.46	OK	

Cálculos

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

3. RESULTADOS Y GRÁFICOS:

Todas las pestañas, exceptuando la hoja "DATOS", contienen las secciones resultados y gráficos, identificadas con color verde :

Figura 7.5: Ejemplo de la sección Resultados y Gráficos

RAPIDA			
DATOS			
Nivel de la cresta del cimacio	NC	783.90	msnm
Nivel del punto de tangencia	NPT	777.11	msnm
Nivel del punto más bajo del cucharón	N Inv	744.90	msnm
Distancia en X al punto de tangencia con el	X PT	11.20	m
Pendiente de la rápida	H	0.90	-
	V	1.00	-
CALCULOS			
Inclinación de la rápida	Θ	48.01	°
Desnivel entre la cresta y el invert	Yc-c	39.00	m
Nivel fin de la rápida	N FR	749.14	m
RESULTADOS			
Distancia en X al punto final de la rápida	X rápida	36.37	m
Longitud de la rápida	L rápida	37.63	m
COORDENADAS			
%	X (m)	Y (m)	Cota (msnm)
0.00	11.20	6.80	777.11
0.05	12.46	8.19	775.71
0.10	13.72	9.59	774.31
0.15	14.98	10.99	772.91
0.20	16.23	12.39	771.51
0.25	17.49	13.79	770.11
0.30	18.75	15.19	768.71
OBSERVACIONES			
PARA AUTOCAD			
Coordenadas			
			11,2,777,105
			12,459,775,707
			13,717,774,308
			14,976,772,91
			16,234,771,511
			17,493,770,113
			18,751,768,715

Resultados y series de datos para gráficos

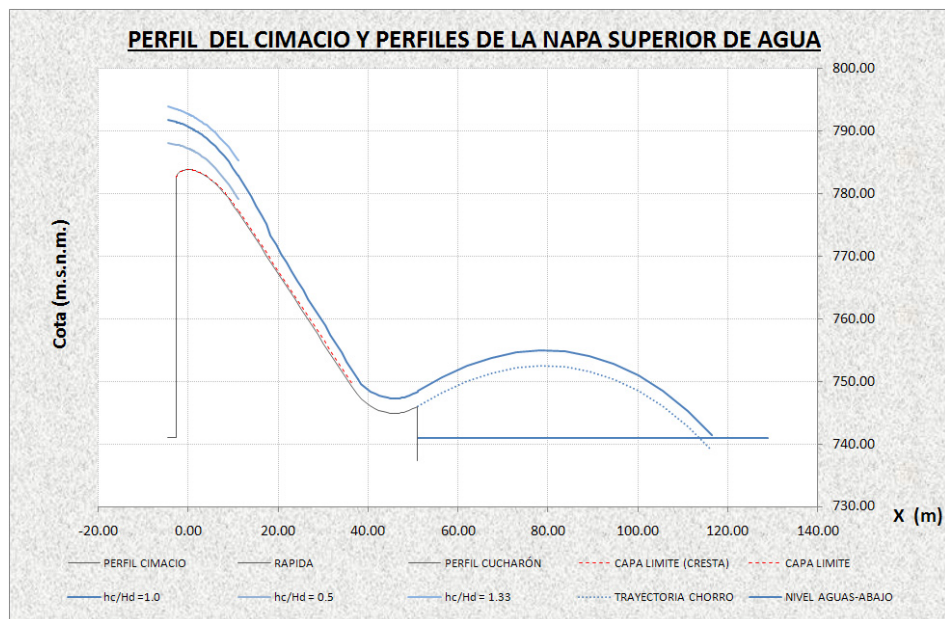
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

En lo que respecta a los gráficos, se tiene series de datos tanto para graficar en Excel como para graficar en CAD.

4. GRÁFICO

En la hoja de cálculo es presenta una representación gráfica del proyecto, en el cual constan los resultados obtenidos con la hoja de cálculo para el diseño de un salto en esquí convencional.

Figura 7.6: Ejemplo de representación gráfica del proyecto (vertederos con salto en esquí)



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

5. OBSERVACIONES:

Todo proceso, ya sean Datos, Cálculos o Resultados contienen una columna de observaciones en donde se tiene comentarios, advertencias, rangos de validez o vínculos. Estas observaciones deben ser tomadas como una guía dentro de la hoja de cálculo, por lo cual éstas no pueden ser ignoradas ni pasadas por alto.

7.2. EJEMPLOS DE CÁLCULO

Una presa a gravedad tipo RCC dispone de un vertedero de excesos contemplado para evacuar los caudales de excedencia durante los posibles eventos de crecida, el mismo que permitirá controlar el nivel de agua en el embalse y regular el flujo del agua hacia aguas abajo sin comprometer a la población u obras cercanas al proyecto.

El vertedero se encuentra compuesto de tres vanos, que van de 12,0 m en la cresta hasta 12,7 m al pie del vertedero. Calcular el flujo a lo largo del vertedero, dimensionar el tipo de salto en esquí y determinar la geometría del cuenco pre-excavado.

A continuación en la Tabla 7.2 se muestra el caudal de diseño, las cotas representativas, las características geométricas y el equipamiento para la presa en estudio.

Tabla 7.2: Características del proyecto en estudio

Caudales de diseño		
Caudal de diseño (Tr=5000 años)	2150	m ³ /s
Temperatura del agua (T)		
	15,0	°C
Velocidad media del flujo (aguas abajo del foso de socavación)		
	5,0	m/s
Niveles de Operación		
Nivel de la corona de la presa	1190,0	msnm
Nivel de aguas de máxima operación del embalse	1187,8	msnm
Nivel mínimo normal de operación del embalse	1177,7	msnm
Nivel de la cresta del cimacio	1178,3	msnm
Nivel del punto más bajo del cucharón (invert)	1129,9	msnm
Nivel del lecho en el sitio de impacto del chorro	1124,0	msnm
Nivel de máxima crecida aguas abajo	1126,5	msnm
PRESA		
Talud paramento aguas arriba	vertical	
Pendiente de la rápida	0,85 H: 1V	
Altura total desde el fondo del río	66	m
Altura total desde la cimentación	90	m
VERTEDERO DE EXCEDENCIAS		
Número de unidades	3	
Número de pilas intermedias	2	
Ancho de las pilas	2,8	m
Longitud de la pilas	20	m
Número de estribos	2	
Radio de los estribos	1,0	m
Tipo de perfil hidrodinámico	Creager	
Control	Compuertas	
Dimensiones del orificio	12,0 x 9,7 m	
Tipo de dissipador de energía	Salto en esquí	
Muros entre vanos	Si	
Ancho de muros centrales	1,4	m
CARACTERISTICAS DEL LECHO		
Diámetro medio de bloques de roca	0,60	m
D90	1,10	m
Ángulo de reposo del material granular	0,8	°

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

7.2.1. CÁLCULOS GENERALES

Una vez ingresados los datos dados en el enunciado del ejemplo, se selecciona los autores por los cuales se desea calcular el radio y ángulo de salida del cucharón.

Tabla 7.3: Determinación del radio y ángulo de salida del cucharón convencional

CARACTERÍSTICAS DEL CUCHARÓN				OBSERVACIONES
RADIO (R)				
Khatsuria (2005)	▼	15,3	m	
U.S.B.R (1987)	▼	9,1	m	
Bureau of Indian (2010)	▼	16,7	m	
NINGUNO	▼	0,0	m	
NINGUNO	▼	0,0	m	
NINGUNO	▼	0,0	m	
<i>Radio Adoptado</i>		13,7	m	<input type="button" value="CALCULAR R"/> <input type="button" value="AJUSTAR R"/>
ÁNGULO DE SALIDA DEL CUCHARÓN (ϕ_c)				
Khatsuria (2005)	▼	20,0	°	Ingresar valor de 20 - 40 grados
Elevatorski (1959)	▼	25,0	°	Ingresar valor de 20 - 30 grados
SARH - México (1977)	▼	30,0	°	Ingresar valor de 30 - 45 grados
Nuray Denli Tokyay (s.f.)	▼	30,0	°	Ingresar valor de 20 - 40 grados
Rajan y Rao (1980)	▼	20,0	°	Ingresar valor de 20 - 40 grados
Especificaciones de Diseño - China (2005)	▼	15,0	°	Ingresar valor de 15 - 35 grados
<i>Ángulo de salida del cucharón</i>		24,0	°	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

1. CALCULO DE LA CARGA DE DISEÑO

Tabla 7.4: Determinación de la carga de diseño

DATOS				OBSERVACIONES
Caudal de diseño	Q	2150	m ³ /s	
Altura de la presa	P	66	m	
Nivel de máxima operación del embalse	NMO	1187,8	msnm	
Nivel de la cresta del perfil	NC	1178,3	msnm	

CALCULOS				OBSERVACIONES
Desnivel NMO y NC	hc	9,50	m	
Relación altura de la presa/carga sobre la cresta	P/hc	6,95	-	
Coefficiente de descarga con paramento vertical	Cvert	2,18	-	
Relación de carga de energía / carga de diseño	He/Hd	1	-	
Coefficiente de contracción de pilas	Kp	0,00	-	
Relación carga de energía respecto al radio del estribo	He/R	9,50	-	
Coefficiente de contracción de estribos	Ka	0,09	-	
Ancho neto del vertedero	Lneto	35,40	m	
Ancho efectivo del vertedero	Lef	33,69	m	
Numero de vanos	N vanos	3	-	
Ancho de los vanos	Lvano	11,80	m	
Carga de energía	He	9,50	m	
Velocidad de aproximación	V	0,80	m	La velocidad se determina con la carga en el embalse, es decir la sumatoria de (hc+P)
Carga de velocidad de aproximación	hv	0,03	m	
Relación carga de velocidad / carga de energía	hv/He	0,003	-	La carga de velocidad es despreciable

RESULTADOS				OBSERVACIONES
Carga de diseño calculada	Hd	9,50	m	Hd=He
Capacidad máxima del vertedero	Qmáx	2150,52	m ³ /s	
Caudal unitario efectivo	q	63,83	m ³ /s.m	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

2. DISEÑO DEL CIMACIO Y PERFIL DE FLUJO

Tabla 7.5: Calculo del perfil cimacio

PERFIL CIMACIO			
DATOS			
Ecuación del perfil del cimacio $X^n = K H_d^{n-1} Y$	K	2	
	n	1,85	
Carga de diseño	Hd (m)	9,50	
Pendiente de la rápida	H	0,85	
	V	1	

PARA EL PERFIL AGUAS ARRIBA DE LA CRESTA	PARA EL PERFIL AGUAS ABAJO DE LA CRESTA	LONGITUD DE LA CRESTA
--	---	-----------------------

GEOMETRÍA			OBSERVACIONES
R1 (m)	R2 (m)	R3 (m)	HDC CHART 111-2/1
0,38	1,90	4,75	
X1 (m)	X2 (m)	X3 (m)	
2,68	2,62	1,6625	
Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	
1,29	1,10	0,80	

PUNTO DE TANGENCIA		OBSERVACIONES
X/Hd	X (m)	HDC CHART 111-1 (Válido para pendientes de 0.1H:1V hasta 1H:1V)
1,33	12,70	
Y/Hd	Y (m)	
0,86	8,13	

LONGITUD DE LA CRESTA		OBSERVACIONES
X (m)	Lcresta (m)	HDC CHART 111-18/1
12,70	18,45	

COORDENADAS			OBSERVACIONES
X (m)	Y (m)	Cota (msnm)	Paramento vertical
-4,678	66	1112,3	
-2,678	66	1112,3	HDC CHART 111-2/1
-2,678	1,292	1177,0	
-2,660	1,179	1177,1	
-2,641	1,131	1177,2	
-2,622	1,095	1177,2	
-2,470	0,880	1177,4	
-2,280	0,678	1177,6	
-2,090	0,525	1177,8	
-1,900	0,409	1177,9	
-1,663	0,300	1178,0	
-1,425	0,219	1178,1	
-0,950	0,096	1178,2	
-0,475	0,024	1178,3	
0,000	0,000	1178,3	

COORDENADAS			OBSERVACIONES
X (m)	Y (m)	Cota (msnm)	HDC CHART 111-1
0,00	0,000	1178,30	
0,10	0,001	1178,30	
0,20	0,004	1178,30	
0,30	0,008	1178,29	
0,40	0,014	1178,29	
0,50	0,020	1178,28	
0,60	0,029	1178,27	
0,70	0,038	1178,26	
0,80	0,049	1178,25	
0,90	0,061	1178,24	
1,00	0,074	1178,23	
1,20	0,103	1178,20	
1,40	0,137	1178,16	
1,60	0,176	1178,12	
1,80	0,219	1178,08	
2,00	0,266	1178,03	
2,50	0,402	1177,90	
3,00	0,563	1177,74	
3,50	0,749	1177,55	
4,00	0,959	1177,34	
4,50	1,192	1177,11	
5,00	1,449	1176,85	
6,00	2,030	1176,27	
7,00	2,700	1175,60	
8,00	3,456	1174,84	
9,00	4,298	1174,00	
10,00	5,223	1173,08	
11,00	6,230	1172,07	
12,00	7,318	1170,98	
12,70	8,127	1170,17	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.6: Calculo de la napa superior del flujo sobre el perfil cimacio

NAPA SUPERIOR DEL FLUJO SOBRE EL PERFIL CIMACIO			
DATOS			
Carga de diseño	Hd (m)	9,50	
Cota de la cresta	NC (msnm)	1178,3	

PARA EL PERFIL DE AGUA EN EL CIMACIO - hc/Hd = 1.0			
X (m)	Y (m)	Cota (msnm)	OBSERVACIONES
-4,68	-8,36	1186,66	HDC CHART 111-11
-2,68	-7,97	1186,27	
-2,68	-7,97	1186,27	
-2,66	-7,97	1186,27	
-2,64	-7,96	1186,26	
-2,62	-7,96	1186,26	
-2,47	-7,92	1186,22	
-2,28	-7,88	1186,18	
-2,09	-7,83	1186,13	
-1,90	-7,78	1186,08	
-1,66	-7,72	1186,02	
-1,43	-7,65	1185,95	
-0,95	-7,52	1185,82	
-0,48	-7,37	1185,67	
0,00	-7,21	1185,51	
0,10	-7,18	1185,48	
0,20	-7,14	1185,44	
0,30	-7,11	1185,41	
0,40	-7,07	1185,37	
0,50	-7,03	1185,33	
0,60	-7,00	1185,30	
0,70	-6,96	1185,26	
0,80	-6,92	1185,22	
0,90	-6,88	1185,18	
1,00	-6,84	1185,14	
1,20	-6,76	1185,06	
1,40	-6,68	1184,98	
1,60	-6,60	1184,90	
1,80	-6,51	1184,81	
2,00	-6,43	1184,73	
2,50	-6,20	1184,50	
3,00	-5,96	1184,26	
3,50	-5,70	1184,00	
4,00	-5,43	1183,73	
4,50	-5,15	1183,45	
5,00	-4,85	1183,15	
6,00	-4,20	1182,50	
7,00	-3,48	1181,78	
8,00	-2,70	1181,00	
9,00	-1,84	1180,14	
10,00	-0,91	1179,21	
11,00	0,10	1178,20	
12,00	1,19	1177,11	
12,70	2,01	1176,29	

PARA EL PERFIL DE AGUA EN EL CIMACIO - hc/Hd = 0.5			
X (m)	Y (m)	Cota (msnm)	OBSERVACIONES
-4,68	-4,43	1182,73	HDC CHART 111-11
-2,68	-4,17	1182,47	
-2,68	-4,17	1182,47	
-2,66	-4,17	1182,47	
-2,64	-4,16	1182,46	
-2,62	-4,16	1182,46	
-2,47	-4,13	1182,43	
-2,28	-4,10	1182,40	
-2,09	-4,06	1182,36	
-1,90	-4,02	1182,32	
-1,66	-3,97	1182,27	
-1,43	-3,92	1182,22	
-0,95	-3,80	1182,10	
-0,48	-3,67	1181,97	
0,00	-3,53	1181,83	
0,10	-3,50	1181,80	
0,20	-3,47	1181,77	
0,30	-3,44	1181,74	
0,40	-3,41	1181,71	
0,50	-3,37	1181,67	
0,60	-3,34	1181,64	
0,70	-3,30	1181,60	
0,80	-3,27	1181,57	
0,90	-3,23	1181,53	
1,00	-3,19	1181,49	
1,20	-3,12	1181,42	
1,40	-3,04	1181,34	
1,60	-2,96	1181,26	
1,80	-2,88	1181,18	
2,00	-2,79	1181,09	
2,50	-2,57	1180,87	
3,00	-2,33	1180,63	
3,50	-2,07	1180,37	
4,00	-1,79	1180,09	
4,50	-1,50	1179,80	
5,00	-1,19	1179,49	
6,00	-0,51	1178,81	
7,00	0,24	1178,06	
8,00	1,07	1177,23	
9,00	1,97	1176,33	
10,00	2,95	1175,35	
11,00	4,00	1174,30	
12,00	5,13	1173,17	
12,70	5,96	1172,34	

PARA EL PERFIL DE AGUA EN EL CIMACIO - hc/Hd = 1.33			
X (m)	Y (m)	Cota (msnm)	OBSERVACIONES
-4,68	-10,73	1189,03	HDC CHART 111-11
-2,68	-10,27	1188,57	
-2,68	-10,27	1188,57	
-2,66	-10,27	1188,57	
-2,64	-10,26	1188,56	
-2,62	-10,26	1188,56	
-2,47	-10,22	1188,52	
-2,28	-10,17	1188,47	
-2,09	-10,12	1188,42	
-1,90	-10,06	1188,36	
-1,66	-10,00	1188,30	
-1,43	-9,93	1188,23	
-0,95	-9,78	1188,08	
-0,48	-9,62	1187,92	
0,00	-9,46	1187,76	
0,10	-9,43	1187,73	
0,20	-9,39	1187,69	
0,30	-9,35	1187,65	
0,40	-9,32	1187,62	
0,50	-9,28	1187,58	
0,60	-9,24	1187,54	
0,70	-9,21	1187,51	
0,80	-9,17	1187,47	
0,90	-9,13	1187,43	
1,00	-9,09	1187,39	
1,20	-9,01	1187,31	
1,40	-8,93	1187,23	
1,60	-8,85	1187,15	
1,80	-8,76	1187,06	
2,00	-8,68	1186,98	
2,50	-8,45	1186,75	
3,00	-8,21	1186,51	
3,50	-7,97	1186,27	
4,00	-7,71	1186,01	
4,50	-7,43	1185,73	
5,00	-7,14	1185,44	
6,00	-6,53	1184,83	
7,00	-5,85	1184,15	
8,00	-5,11	1183,41	
9,00	-4,31	1182,61	
10,00	-3,44	1181,74	
11,00	-2,50	1180,80	
12,00	-1,48	1179,78	
12,70	-0,73	1179,03	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.7: Determinación del calado sobre el perfil cimacio

CALADO SOBRE EL PERFIL CIMACIO			
	hc/Hd = 1.0	hc/Hd = 0.5	hc/Hd = 1.33
X (m)	d (m)	d (m)	d (m)
-4,68	74,36	70,43	76,73
-2,68	9,26	5,46	11,57
-2,68	9,26	5,46	11,57
-2,66	9,15	5,35	11,45
-2,64	9,09	5,30	11,39
-2,62	9,06	5,26	11,35
-2,47	8,80	5,01	11,10
-2,28	8,56	4,78	10,85
-2,09	8,36	4,59	10,64
-1,90	8,19	4,43	10,47
-1,66	8,02	4,27	10,30
-1,43	7,87	4,14	10,14
-0,95	7,61	3,90	9,88
-0,48	7,39	3,70	9,65
0,00	7,21	3,53	9,46
0,10	7,18	3,50	9,43
0,20	7,14	3,47	9,39
0,30	7,11	3,45	9,36
0,40	7,08	3,42	9,33
0,50	7,05	3,39	9,30
0,60	7,03	3,37	9,27
0,70	7,00	3,34	9,24
0,80	6,97	3,32	9,22
0,90	6,94	3,29	9,19
1,00	6,92	3,27	9,16
1,20	6,87	3,22	9,11
1,40	6,82	3,18	9,07
1,60	6,78	3,14	9,02
1,80	6,73	3,10	8,98
2,00	6,69	3,06	8,94
2,50	6,60	2,97	8,85
3,00	6,52	2,89	8,78
3,50	6,45	2,82	8,72
4,00	6,39	2,75	8,66
4,50	6,34	2,69	8,62
5,00	6,30	2,64	8,59
6,00	6,23	2,54	8,56
7,00	6,18	2,46	8,55
8,00	6,16	2,39	8,57
9,00	6,14	2,33	8,61
10,00	6,13	2,27	8,66
11,00	6,13	2,23	8,73
12,00	6,12	2,19	8,80
12,70	6,12	2,17	8,85

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

3. DISEÑO DE LA RÁPIDA Y PERFIL DEL FLUJO

Tabla 7.8: Cálculo del perfil y longitud de la rápida

RAPIDA			
DATOS			
Nivel de la cresta del cimacio	NC	1178,30	msnm
Nivel del punto de tangencia	NPT	1170,17	msnm
Nivel del punto más bajo del cucharón	N Inv	1129,90	msnm
Distancia en X al punto de tangencia con el cimacio	X PT	12,70	m
Pendiente de la rápida	H	0,85	-
	V	1,00	-
CALCULOS			
Inclinación de la rápida	Θ	49,64	°
Desnivel entre la cresta y el invert	Yc-c	48,40	m
Nivel fin de la rápida	N FR	1134,73	m
RESULTADOS			
Distancia en X al punto final de la rápida	X rápida	42,83	m
Longitud de la rápida	L rápida	46,52	m
COORDENADAS			OBSERVACIONES
X (m)	Y (m)	Cota (msnm)	
12,70	8,13	1170,17	
14,21	9,90	1168,40	
15,71	11,67	1166,63	
17,22	13,44	1164,86	
18,73	15,22	1163,08	
20,23	16,99	1161,31	
21,74	18,76	1159,54	
23,25	20,53	1157,77	
24,75	22,31	1155,99	
26,26	24,08	1154,22	
27,76	25,85	1152,45	
29,27	27,62	1150,68	
30,78	29,39	1148,91	
32,28	31,17	1147,13	
33,79	32,94	1145,36	
35,30	34,71	1143,59	
36,80	36,48	1141,82	
38,31	38,26	1140,04	
39,82	40,03	1138,27	
41,32	41,80	1136,50	
42,83	43,57	1134,73	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.9: Calculo del perfil y velocidad del flujo en la rápida

PERFIL Y VELOCIDAD DEL FLUJO EN LA RÁPIDA					
DATOS				OBS.	
Caudal	$Q_{m\acute{a}x}$	2150,52	m^3/s		
n de Mannig	n	0,014	$s/m^{1/3}$		
Aceleración de la gravedad	g	9,78	m/s^2		
Ancho al inicio de la rápida	$b_{inicial}$	33,69	m	b efectivo, si está entre las pilas	
Pendiente de la rápida	S_o	1,18	m/m		
Calado al inicio de la rápida	$hc/Hd=1,0$	$d_{dise\tilde{n}o}$	3,96	m	Calado perpendicular al fondo de la rápida
	$hc/Hd=0,5$	d	1,41	m	
	$hc/Hd=1,33$	d	5,73	m	

Calculo d

OBSERVACIONES		CALCULOS (METODO DEL PASO)
		APLICABLE A CANALES NO PRISMATICOS Y CON PENDIENTE MENOR A 1(V): 0.6(H), DONDE LA PERDIDA POR FRICCION ES REPRESENTATIVA.

X (m)	ΔX (m)	Ancho (m)	δ (m)	d (m)	Area (m)	R (m)	$R^{4/3}$	V (m/s)	$\alpha V^2/2g$ (m)	E	ΔE	S_f	\hat{S}_f	$S_o - \hat{S}_f$	ΔX (m)	Fr	Diferencia	Chequeo
12,70	--	33,69	0,1334	3,962	133,47	3,21	4,73	16,11	13,28	15,84	--	0,0108	--	--	--	3,2	--	--
14,21	1,51	33,69	0,1461	3,703	124,75	3,04	4,40	17,24	15,20	17,60	1,75	0,0133	0,01	1,16	1,51	3,6	0,00	ok
15,71	1,51	38,20	0,1585	3,055	116,70	2,63	3,64	18,43	17,37	19,34	1,75	0,0183	0,02	1,16	1,51	4,2	0,00	ok
17,22	1,51	38,20	0,1706	2,905	110,97	2,52	3,43	19,38	19,21	21,09	1,74	0,0214	0,02	1,16	1,51	4,5	0,00	ok
18,73	1,51	38,20	0,1824	2,776	106,06	2,42	3,26	20,28	21,03	22,82	1,74	0,0247	0,02	1,15	1,51	4,8	0,00	ok
20,23	1,51	38,20	0,1940	2,664	101,78	2,34	3,10	21,13	22,83	24,56	1,73	0,0282	0,03	1,15	1,51	5,1	0,00	ok
21,74	1,51	38,20	0,2054	2,566	98,01	2,26	2,97	21,94	24,62	26,28	1,73	0,0318	0,03	1,15	1,51	5,4	0,00	ok
23,25	1,51	38,20	0,2166	2,478	94,65	2,19	2,85	22,72	26,40	28,01	1,72	0,0355	0,03	1,14	1,51	5,7	0,00	ok
24,75	1,51	38,20	0,2277	2,399	91,63	2,13	2,74	23,47	28,17	29,72	1,72	0,0394	0,04	1,14	1,51	6,0	0,00	ok
26,26	1,51	38,20	0,2386	2,327	88,90	2,07	2,65	24,19	29,92	31,43	1,71	0,0433	0,04	1,14	1,51	6,3	0,00	ok
27,76	1,51	38,20	0,2493	2,262	86,42	2,02	2,56	24,89	31,67	33,14	1,70	0,0475	0,05	1,13	1,51	6,6	0,00	ok
29,27	1,51	38,20	0,2599	2,203	84,14	1,97	2,48	25,56	33,41	34,83	1,70	0,0517	0,05	1,13	1,51	6,8	0,00	ok
30,78	1,51	38,20	0,2704	2,148	82,05	1,93	2,40	26,21	35,13	36,52	1,69	0,0560	0,05	1,12	1,51	7,1	0,00	ok
32,28	1,51	38,20	0,2807	2,097	80,11	1,89	2,34	26,84	36,85	38,21	1,68	0,0605	0,06	1,12	1,51	7,4	0,00	ok
33,79	1,51	38,20	0,2909	2,050	78,32	1,85	2,27	27,46	38,56	39,89	1,68	0,0650	0,06	1,11	1,51	7,6	0,00	ok
35,30	1,51	38,20	0,3011	2,006	76,65	1,82	2,22	28,06	40,26	41,56	1,67	0,0697	0,07	1,11	1,51	7,9	0,00	ok
36,80	1,51	38,20	0,3111	1,966	75,09	1,78	2,16	28,64	41,95	43,22	1,66	0,0744	0,07	1,10	1,51	8,1	0,00	ok
38,31	1,51	38,20	0,3210	1,927	73,63	1,75	2,11	29,21	43,63	44,88	1,66	0,0792	0,08	1,10	1,51	8,4	0,00	ok
39,82	1,51	38,20	0,3308	1,891	72,25	1,72	2,06	29,76	45,30	46,53	1,65	0,0842	0,08	1,09	1,51	8,6	0,00	ok
41,32	1,51	38,20	0,3406	1,858	70,96	1,69	2,02	30,30	46,97	48,17	1,64	0,0892	0,09	1,09	1,51	8,8	0,00	ok
42,83	1,51	38,20	0,3502	1,826	69,75	1,67	1,98	30,83	48,62	49,80	1,63	0,0943	0,09	1,08	1,51	9,1	0,00	ok

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.10: Chequeo de cavitación en la rápida

CÁLCULO DE CAVITACIÓN EN LA RÁPIDA										
DATOS				OBS.						
Caudal (Q)	2150,52	m3/s								
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²								
Ancho al inicio de la rápida (b _{inicial})	33,69	m		b efectivo, si está entre las pilas						
Pendiente de la rápida (S _o)	1,18	m/m								
Presión Atmosférica (p _{atm})	8,97	m		Función de la elevación-HYDRAULIC DESIGN CHART 000-2						
Presión de Vapor (p _{vap})	0,17	m		Función de la temperatura-HYDRAULIC DESIGN CHART 001-2						

CALCULO DEL SIGMA DE CAVITACIÓN (σ)										
X (m)	Ancho (m)	d (m)	Area (m)	V (m/s)	h (m)	h _{abs} (m)	αV ² /2g (m)	σ	Chequeo	Observaciones
12,70	33,69	3,962	133,47	16,11	2,57	11,53	13,28	0,86	OK	
14,21	33,69	3,703	124,75	17,24	2,40	11,36	15,20	0,74	OK	
15,71	38,20	3,055	116,70	18,43	1,98	10,95	17,37	0,62	OK	
17,22	38,20	2,905	110,97	19,38	1,88	10,85	19,21	0,56	OK	
18,73	38,20	2,776	106,06	20,28	1,80	10,76	21,03	0,50	OK	
20,23	38,20	2,664	101,78	21,13	1,73	10,69	22,83	0,46	OK	
21,74	38,20	2,566	98,01	21,94	1,66	10,63	24,62	0,42	OK	
23,25	38,20	2,478	94,65	22,72	1,60	10,57	26,40	0,39	OK	
24,75	38,20	2,399	91,63	23,47	1,55	10,52	28,17	0,37	OK	
26,26	38,20	2,327	88,90	24,19	1,51	10,47	29,92	0,34	OK	
27,76	38,20	2,262	86,42	24,89	1,47	10,43	31,67	0,32	OK	
29,27	38,20	2,203	84,14	25,56	1,43	10,39	33,41	0,31	OK	
30,78	38,20	2,148	82,05	26,21	1,39	10,36	35,13	0,29	OK	
32,28	38,20	2,097	80,11	26,84	1,36	10,33	36,85	0,28	OK	
33,79	38,20	2,050	78,32	27,46	1,33	10,29	38,56	0,26	OK	
35,30	38,20	2,006	76,65	28,06	1,30	10,27	40,26	0,25	OK	
36,80	38,20	1,966	75,09	28,64	1,27	10,24	41,95	0,24	OK	
38,31	38,20	1,927	73,63	29,21	1,25	10,22	43,63	0,23	OK	
39,82	38,20	1,891	72,25	29,76	1,23	10,19	45,30	0,22	OK	
41,32	38,20	1,858	70,96	30,30	1,20	10,17	46,97	0,21	OK	
42,83	38,20	1,826	69,75	30,83	1,18	10,15	48,62	0,21	OK	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

7.2.2. SALTO EN ESQUÍ CONVENCIONAL

• DIMENSIONAMIENTO

Tabla 7.11: Cálculo del perfil del cucharón

PERFIL DEL CUCHARÓN			
DATOS			OBS.
Ángulo de la rápida (θ)	49,64	°	
Cota del invert del cucharón	1129,90	msnm	
Radio del cucharón (R)	13,70	m	
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)	24,00	°	
Cota del centro de curvatura	1143,60	msnm	
Ángulo de deflexión del cucharón (ϕ_r)	73,64	°	Ángulo de la rápida más ángulo de salida del cucharón
Longitud del cucharón (L_c)	17,61	m	
Cota fin de la rápida	1134,73	msnm	
Abscisa fin de la rápida	42,83	m	

CÁLCULO DE COORDENADAS DEL CUCHARÓN			
%	PERFIL CUCHARÓN		Obs.
	X (m)	Cota (msnm)	
0,00	42,83	1134,73	
0,10	44,01	1133,50	
0,20	45,19	1132,53	
0,30	46,35	1131,77	
0,40	47,48	1131,18	
0,50	48,58	1130,73	
0,60	49,63	1130,39	
0,70	50,64	1130,15	
0,80	51,58	1130,00	
0,90	52,46	1129,92	
1,00	53,27	1129,90	
0,00	53,27	1129,90	
0,10	53,84	1129,91	
0,20	54,41	1129,95	
0,30	54,98	1130,01	
0,40	55,55	1130,09	
0,50	56,12	1130,20	
0,60	56,67	1130,33	
0,70	57,23	1130,48	
0,80	57,77	1130,66	
0,90	58,31	1130,86	
1,00	58,84	1131,08	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.12: Perfil del flujo en el cucharón

PERFIL DE AGUA EN EL CUCHARÓN			
DATOS			OBS.
Calado al inicio del cucharón (<i>do</i>)	1,83	m	
Velocidad en el inicio del cucharón (<i>Vo</i>)	30,83	m/s	
Aceleración de la gravedad (<i>g</i>)	9,78	m/s ²	
Radio Hidráulico (<i>Rh</i>)	1,67	m	Al inicio del cucharón
Incremento de volumen en la profundidad del flujo (<i>u</i>)	32,67	%	Douma

CÁLCULO DE PERFIL DE AGUA EN EL CUCHARÓN

X (m)	PERFIL AGUA CUCHARÓN		Obs.
	d (m)	Cota (msnm)	
44,22	2,42	1135,91	
44,22	2,42	1135,91	
45,19	2,42	1134,96	
46,35	2,42	1134,20	
47,48	2,42	1133,60	
48,58	2,42	1133,15	
49,63	2,42	1132,81	
50,64	2,42	1132,58	
51,58	2,42	1132,43	
52,46	2,42	1132,35	
53,27	2,42	1132,32	
53,27	2,42	1132,32	
53,84	2,42	1132,33	
54,41	2,42	1132,37	
54,98	2,42	1132,43	
55,55	2,42	1132,51	
56,12	2,42	1132,62	
56,67	2,42	1132,75	
57,23	2,42	1132,91	
57,77	2,42	1133,08	
58,31	2,42	1133,28	
58,84	2,42	1133,51	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.13: Determinación de la presión en el cucharón

PRESIÓN EN EL CUCHARÓN					
DATOS					OBS.
Calado al inicio del cucharón (do)	1,83	m			
Velocidad en el inicio del cucharón (Vo)	30,83	m/s			
Número de Froude al inicio del cucharón (Fro)	9,1	-			
Radio del cucharón (R)	13,70	m			
Relación: R/do	7,50	m/m			
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²			
Nivel de aguas de máxima operación	1187,8	msnm			
Ángulo de la rápida (θ)	49,6	°			
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)	24,0	°			

DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL CUCHARÓN - Balloffet (1961)					
X (m)	Cota (msnm)	Hx (m)	ϕ' (°)	hp _x (m)	OBS.
42,83	1134,73	50,45	49,64	13,44	
44,01	1133,50	51,68	42,49	13,87	
45,19	1132,53	52,64	36,12	14,20	
46,35	1131,77	53,40	30,33	14,47	
47,48	1131,18	53,99	24,98	14,68	
48,58	1130,73	54,45	20,01	14,83	
49,63	1130,39	54,78	15,38	14,95	
50,64	1130,15	55,02	11,07	15,03	
51,58	1130,00	55,17	7,07	15,09	
52,46	1129,92	55,25	3,38	15,11	
53,27	1129,90	55,27	0,00	15,12	
53,27	1129,90	55,27	0,00	15,12	
53,84	1129,91	55,26	2,40	15,12	
54,41	1129,95	55,23	4,80	15,11	
54,98	1130,01	55,17	7,20	15,08	
55,55	1130,09	55,08	9,60	15,06	
56,12	1130,20	54,97	12,00	15,02	
56,67	1130,33	54,84	14,40	14,97	
57,23	1130,48	54,69	16,80	14,92	
57,77	1130,66	54,51	19,20	14,86	
58,31	1130,86	54,31	21,60	14,79	
58,84	1131,08	54,09	24,00	14,71	

CARGA DE PRESIÓN MÁXIMA EN EL CUCHARÓN					
ECUACIÓN	hp _{máx}		OBS.		
Balloffet (1961)	13,92	m			
Nuray Denli Tokyay (s.f.)	20,01	m			
Mason (1993)					
Bureau of Indian Standards (2010)	14,79	m	Bureau of Indian Standards, numeral 5.2.2.1		
	13,00	t/m ²	(P máx) VER VALOR EN ÁBACO		
	13,03	m	Vo=10 a 45 m/s ; R/do= 4 a 10		
hp máx adoptada	21,0	m			

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.14: Cálculo del ángulo de salida del chorro, detalle del labio y ángulo de expansión transversal del chorro

ANGULO DE SALIDA DEL CHORRO (θ')			
DATOS			OBS.
Calado al inicio del cucharón (d_0)	1,83	m	
Radio del cucharón (R)	13,70	m	
Relación: R/d_0	7,5	m/m	
Relación: d_0/R	0,13	m/m	
Número de Froude al inicio del cucharón (Fro)	9,1	-	
Ángulo de la rápida (θ)	49,6	°	
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)	24,0	°	
Ángulo total de deflexión del cucharón (ϕ_T)	73,64	°	
Relación: ϕ_c/ϕ_T (Para Orlov)	1,00	-	VER VALOR EN ÁBACO
ECUACIÓN		θ'	OBS.
Orlov (1974)		24,00	°
Quadri et al. (1977)		21,00	°
Ángulo de salida del chorro (θ') adoptado		22,5	°
			Válido para: $Fro > 5(\text{sen } \theta)^{0,5}$
			VER VALOR EN ÁBACO
DETALLE DEL LABIO - ÁNGULO DEL LABIO (θ_L)			
Khatsuria (2005) - U.S.B.R (1978)	Ángulo del labio medido desde la napa inferior del chorro (θ'')	45,00	°
	Ángulo del labio medido desde la horizontal, horariamente (θ_L)	22,5	°
			DEFINIR VALOR EN ÁBACO
ANGULO DE EXPANSIÓN TRANSVERSAL DEL CHORRO (ψ_j)			
DATOS			OBS.
Calado al inicio del cucharón (d_0)	1,83	m	
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio (Y)	56,7	m	
Caudal unitario (q)	63,8	m ³ /s.m	
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²	
Longitud del vertedero (L_v)	82,6	m	Distancia medida desde la cresta hasta el labio
Radio del cucharón (R)	13,7	m	
Relación: d_0/R	0,13	m/m	Válido para: $d_0/R < 0,10$
ECUACIÓN		ψ_j	OBS.
Vischer y Hager (1995)		-	°
			Ángulo medido desde el eje hacia uno de los lados. Generalmente el valor se encuentra entre 5 y 10 grados

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- **ALCANCE DEL CHORRO, SOCAVACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO**

Tabla 7.15: Determinación del alcance horizontal del chorro

ALCANCE HORIZONTAL DEL CHORRO (Lt)				
DATOS				OBS.
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio (Y)		56,7	m	
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)		24,0	°	
Ángulo de salida del chorro (θ')		22,5	°	
Factor de resistencia del aire (k)	(Para U.S.B.R)	0,9	-	k=1 (Alcance Teórico), k=0,9 (Considera resistencia de aire, turbulencia)
	(Para Kawakami)	0,018	-	En función de la velocidad del flujo en el labio
Aceleración de la gravedad (g)		9,78	m/s ²	
Velocidad en el labio (V_{labio})		30,83	m/s	Se asume igual a la velocidad de aproximación
Carga velocidad en el labio ($h v_{labio}$)		48,62	m	
Distancia vertical entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo (y_i)		4,6	m	
ECUACIÓN		Lt		OBS.
Edward Elevatorski (1959)		76,20	m	Alcance máximo cuando $\theta'=45^\circ$. Considera resistencia del aire. En función de θ'
U.S.B.R. (1987)		72,19	m	Dependiendo del factor "k", considera la resistencia del aire. En función de θ'
Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)		63,88	m	Considera la resistencia del aire. En función de ϕ_c
Bureau of Indian Standards (2010)		78,46	m	No considera las pérdidas en el vertedero, ni la entrada del aire al chorro. El alcance real puede ser menor. En función de θ'
Alcance horizontal del chorro (Lt)	Promedio	72,7	m	
	Mínimo	63,9	m	
	Máximo	78,5	m	

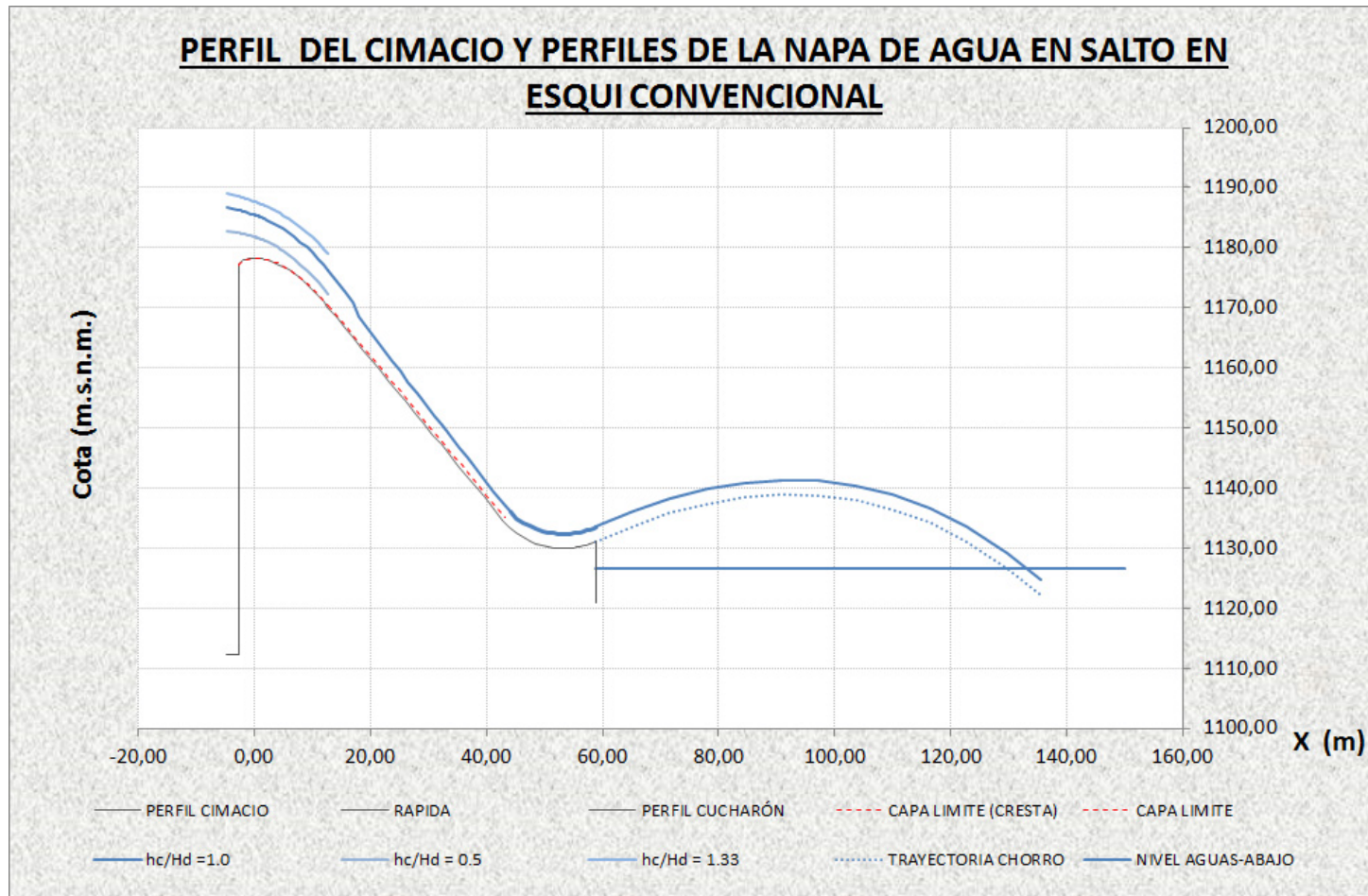
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.16: Determinación del alcance vertical del chorro

ALCANCE VERTICAL DEL CHORRO (y_M)					
DATOS					OBS.
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio (Y)		56,7	m		
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)		24,0	°		
Ángulo de salida del chorro (θ')		22,5	°		
Aceleración de la gravedad (g)		9,78	m/s ²		
Factor de resistencia del aire (k) (Para Kawakami)		0,018	-		En función de la velocidad del flujo en el labio
Velocidad en el labio (V_{labio})		30,83	m/s		Se asume igual a la velocidad de aproximación
TRAYECTO DEL CHORRO (KAWAKAMI)					
%	X (m)	Y (m)	X' (m)	Cota (msnm)	OBS.
0,00	0,00	0,00	58,84	1131,08	
0,10	6,39	2,61	65,23	1133,69	
0,20	12,78	4,72	71,62	1135,80	
0,30	19,16	6,31	78,00	1137,39	
0,40	25,55	7,35	84,39	1138,44	
0,50	31,94	7,82	90,78	1138,90	
0,60	38,33	7,67	97,17	1138,75	
0,70	44,71	6,86	103,55	1137,94	
0,80	51,10	5,34	109,94	1136,43	
0,90	57,49	3,08	116,33	1134,16	
1,00	63,88	0,00	122,72	1131,08	
1,11	70,90	-4,40	129,74	1126,68	Modificar el % hasta que la cota sea similar a la cota del nivel aguas abajo:1126,5msnm
1,20	76,65	-8,86	135,49	1122,22	
ECUACIÓN		y_M		OBS.	
Edward Elevatorski (1959)		8,31	m	Desprecia la resistencia del aire. En función de θ'	
Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)		7,82	m	Considera la resistencia del aire. En función de ϕ_c	
Bureau of Indian Standards (2010)		7,12	m	En función de θ'	
Alcance vertical del chorro (y_M)		7,8	m	Promedio	
ANGULO DE IMPACTO DEL CHORRO (α')					
DATOS					OBS.
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)		24,0	°		
Distancia vertical entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo (y_i)		4,6	m		
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio (Y)		56,7	m		
ECUACIÓN		α'		OBS.	
Yildiz et al. (1994)		27,4	°		

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Figura 7. 7: Representación gráfica del vertedero y del chorro proveniente del salto en esquí



Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.17: Profundidad de socavación y dimensiones del cuenco pre-excavado

DIMENSIONAMIENTO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO			
Tipo de salto en esquí: Convencional, Deflectores o Estrechamiento?	CONVENCIONAL		Ir a dimensionamiento de cuenco pre-excavado para salto en esquí convencional
SALTO DE ESQUÍ CONVENCIONAL			
PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN			
ECUACIÓN	Y _s (m)		OBS.
Veronese	45		Aplicable a prototipos
Damle A	39		Aplicable a prototipos y modelos
INCYTH	32		Aplicable a prototipos
Taraimovich	29		Aplicable a prototipos
Mason y Arumugam (prototipos)	33		Aplicable a prototipos y considera el material del lecho
Promedio	36		
ANCHO Y LARGO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO			
DATOS			OBS.
Diferencia entre el nivel de agua en el embalse y el nivel del agua aguas abajo (H)	61,30	m	
Caudal unitario (q)	63,83	m ³ /s.m	
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²	
Calado a la salida del salto en esquí (ds)	2,42	m	
Turbulencia a la salida del salto en esquí (Tu)	7,0	%	Según Manso (2006) la intensidad de turbulencia a la salida de un salto en esquí está entre 4 y 8 %. Escoger un valor dentro del rango especificado.
Ancho del chorro en el impacto en el eje x (h _{imp})	4,77	m	Según Castillo (2006)
Ancho del chorro en el impacto en el eje z (b _{imp})	11,80	m	
Ángulo de incidencia del chorro (α')	27,4	°	
Diámetro medio de bloques de roca (d ₅₀)	0,60	m	
Calado aguas abajo (h _z)	2,50	m	
Ángulo de salida del cucharón (φ _c)	24,0	°	
Radio del cucharón (R)	13,70	m	
Velocidad media aguas abajo del foso de socavación (V)	5,00	m/s	
ECUACIÓN	b _s	l _s	OBS.
Martins (1973)	67	95	Con base en ensayo tridimensional utilizando material no cohesivo (cubos de mortero) No válido para chorros horizontales o chorros a caída libre (presa en arco)
Taraimovich (1978) & Mason (1993)	128	161	Las ecuaciones son presentadas por Taraimovich (1978) para chorros circulares y adaptadas por Mason (1993) para chorros rectangulares.
Ghahfarokhi et al. (2008)	54	140	En base a datos de modelo reportados por Azmathullah (2005)
Promedio	83	132	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

7.2.3. SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES

1. DEFLECTORES RECTANGULARES

• DIMENSIONAMIENTO

Tabla 7.18: Ángulo de salida de los deflectores rectangulares

CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO DE SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES (DIENTES)			
Deflectores rectangulares (R) o trapezoidales (T)?	R		
DEFLECTORES RECTANGULARES			
Fuente: (Water of China Water Industry Standard - Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319, 2005)			
<p>Vista lateral</p>		<p>Vista en planta</p>	
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.			
ÁNGULO DE SALIDA DE LOS DEFLECTORES (ϕ_{def})			
DATOS			OBS.
Diferencia entre ángulo de salida del cucharón y el deflector ($\Delta\phi_c$)	10,0	°	Se recomienda una diferencia de ángulos entre 5 y 10 grados para deflectores rectangulares
Calado al inicio del cucharón (d_o)	-	m	-
Froude del flujo de aproximación (Fr_o)	-	-	-
ECUACIÓN	ϕ_c	ϕ_{def}	OBS.
Chen Sheng & Chen Minlin (2004)	24,0	34,00	Para deflectores rectangulares
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)		34,00	Para deflectores rectangulares
González Fariñas (2004)	-	-	Angulo de salida promedio del chorro para deflectores trapezoidales con perfil longitudinal triangular tipo L-1
Varios Proyectos (1963-2011)	-	-	Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales
Ángulo de salida del deflector rectangular	34,0		-

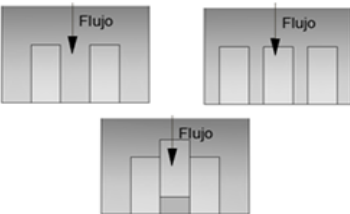
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.19: Radio, alto y largo de los deflectores rectangulares

RADIO DE LOS DEFLECTORES (R_{def})					
DATOS			OBS.		
Radio del cucharón (R)	13,7	m	Para deflectores rectangulares		
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	34,00	°			
Ángulo de la rápida (Θ)	49,64	°			
Coordenadas del fin de la rápida	X	42,83			m
	Cota	1134,73			msnm
Coordenadas del fin del cucharón	X	58,84			m
	Cota	1131,08	msnm		
ECUACIÓN		R_{def}/R	R_{def}	OBS.	
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)		0,9	12,10	R_{def}/R puede estar entre 0,7 y 1,1 para deflectores rectangulares	
Varios Proyectos (1963-2011)		0,9	-	Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales, la relación R_{def}/R puede estar entre 0,7 y 1,3	
Radio del deflector rectangular		0,9	12,10		
ALTO DE LOS DEFLECTORES (Y_{def})					
DATOS			OBS.		
Radio del cucharón (R)	13,7	m	Para deflectores trapezoidales		
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	-	°			
Calado al inicio del cucharón (do)	-	m			
Froude del flujo de aproximación (Fr_o)	-	-			
ECUACIÓN		Y_{def}	OBS.		
Chen Sheng & Chen Minlin (2004)		1,50	Para deflectores rectangulares		
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)		Y_{def}/R 0,11	1,51	Para deflectores rectangulares. Escoger Y_{def}/R_{def} entre 0,05 y 0,17.	
González Fariñas (2004)		-	Para deflectores trapezoidales con perfil longitudinal triangular tipo L-1 (Fro entre 9-39) y ángulo de salida del cucharón de 0 grados		
Varios Proyectos (1963-2011)		-	-	Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales Y_{def}/R_{def} puede estar entre 0,07 y 0,16	
Altura del deflector rectangular		1,50	Promedio		
LARGO DE LOS DEFLECTORES (l_{def})					
DATOS			OBS.		
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)	24,0	°	Para deflectores rectangulares		
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	34,0	°			
Ángulo de la rápida (Θ)	49,6	°			
Radio del cucharón (R)	13,7	m			
Radio del deflector (R_{def})	12,1	m			
Calado al inicio del cucharón (do)	-	m			
-	-	-			
ECUACIÓN		$S_{def 1}$	$S_{def 2}$	-	OBS.
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)		17,61	17,66	-	Para deflectores rectangulares
González Fariñas (2004)		-	-	-	Para deflectores trapezoidales con perfil longitudinal triangular tipo L-1
Varios Proyectos (1963-2011)		-	-	-	Para deflectores trapezoidales
Longitud del deflector rectangular		17,61	17,66	-	Corresponde a la longitud de la curva

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.20: Ancho, espaciamento y distribución de los deflectores

ANCHO DEL DEFLECTOR Y ESPACIAMIENTO (b_{def} , e)					
DATOS			OBS.		
Ancho del vano (b)	11,8	m			
Calado al inicio del cucharón (d_0)	-	m	-		
Froude del flujo de aproximación (Fr_0)	-	-	-		
Numero de dientes (n)					
ECUACIÓN	n		OBS.		
Varios proyectos (-)	2		Número referencial. Sujeto a chequeo por dimensión constructiva del ancho del diente. Basado en información de proyectos con deflectores rectangulares		
Numero de dientes (n) adoptado		2			
Relación e/b_{def} y Porcentaje de ocupación					
ECUACIÓN	e/b_{def}	ocupación	OBS.		
Chen Sheng & Chen Minlin (2004)	0,90	0,53	$e/b_{def} < 1$. Válido para deflectores rectangulares		
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	0,90	0,53	Escoger e/b_{def} entre 0,5 y 0,9. Válido para deflectores rectangulares		
Epicum (2010)	1,00	0,50	Para deflectores rectangulares la ocupación debe ser 2/5 ó 3/5		
González Fariñas (2004)	-	-	0,5 equivale al 50% de ocupación de la cuchara. Válido para deflectores tipo L-1.		
Huang et al. (2011)	-	-	$e/b_{def2} = 0,5$. Válido para deflectores trapezoidales		
Varios Proyectos (1963-2011)	0,30	-	e/b_{def2} entre 0,25 y 0,51. Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales		
Para deflector rectangular		0,93	0,52	Promedio	
Ancho del deflector rectangular - b_{def}					
ECUACIÓN	b_{def}	-	-	e	OBS.
Chen Sheng & Chen Minlin (2004)	3,13	-	-	2,92	Para deflectores rectangulares
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	3,13	-	-	2,92	Para deflectores rectangulares
Epicum (2010)	2,95	-	-	2,75	Para deflectores rectangulares
Huang et al. (2011)	-	-	-	-	Para deflectores trapezoidales
Varios Proyectos (1963-2011)	-	0,30	-	-	Basado en información de prototipos la relación b_{def1}/b_{def2} puede estar entre 0,24 y 0,36
	-	-	-	-	
Para deflector rectangular		3,10	-	-	2,90
Cálculo del espaciamento real - e_{real}					
n	b_{def}	ocupación	e/b_{def}	e_{real}	OBS.
2	3,10	0,53	0,90	2,80	OK
Chequeo de relaciones geométricas del deflector				OBS.	
b_{def}/b		0,26		Basado en información de prototipos con deflectores rectangulares ' b_{def}/b ' puede estar en el rango referencial de 0,01 a 0,19	
DISTRIBUCIÓN DE LOS DEFLECTORES EN EL VANO					
DISTRIBUCIÓN			OBSERVACIONES		
			Epicum et al (2010) recomienda que exista espaciamento entre los deflectores y los muros laterales, para conseguir una mejor disipación y reducción del foso de socavación		

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.21: Cálculo del ángulo se salida del chorro sobre deflectores rectangulares

ANGULO DE SALIDA DEL CHORRO SOBRE LOS DEFLECTORES (θ')			
DATOS			OBS.
Calado al inicio del cucharón (do)	1,83	m	
Radio del deflector (R_{def})	12,10	m	
Relación: R_{def}/do	6,6	m/m	
Relación: do/R_{def}	0,15	m/m	
Número de Froude al inicio del cucharón (Fro)	9,1	-	
Ángulo de la rápida (Θ)	49,6	°	
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	34,0	°	
Ángulo total de deflexión del deflector ($\phi_{\tau def}$)	83,6	°	
Relación: ϕ_j/ϕ_{τ} (Para Orlov)	1,00	-	VER VALOR EN ÁBACO
ECUACIÓN		θ'	OBS.
Orlov (1974)		34,00	°
Quadri et al. (1977)		30,00	°
Ángulo de salida del chorro (θ') adoptado		32,0	°
			Válido para: $Fro > 5(\text{sen } \Theta)^{0,5}$
			VER VALOR EN ÁBACO

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- **ALCANCE DEL CHORRO, SOCAVACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO**

Tabla 7.22: Determinación del alcance horizontal del chorro

ALCANCE HORIZONTAL DEL CHORRO SOBRE LOS DEFLECTORES (Lt)				
DATOS			OBS.	
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del deflector (Y)		55,2	m	
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})		34,0	°	
Ángulo de salida del chorro sobre el deflector (θ')		32,0	°	
Factor de resistencia del aire (k)	(Para U.S.B.R)	0,9	-	
	(Para Kawakami)	0,018	-	
Aceleración de la gravedad (g)		9,78	m/s^2	
Velocidad en el labio del deflector (V_{labio})		30,83	m/s	
Carga velocidad en el labio del deflector (hV_{labio})		48,62	m	
Distancia vertical entre el labio del deflector y el nivel aguas abajo (y_i)		6,1	m	
ECUACIÓN		Lt		OBS.
Edward Elevatorski (1959)		94,29	m	Alcance máximo cuando $\theta'=45^\circ$. Considera resistencia del aire. En función de θ'
U.S.B.R. (1987)		89,33	m	Dependiendo del factor "k", considera la resistencia del aire. En función de θ'
Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)		76,83	m	Considera la resistencia del aire. En función de ϕ_c
Bureau of Indian Standards (2010)		96,24	m	No considera las pérdidas en el vertedero, ni la entrada del aire al chorro. El alcance real puede ser menor. En función de θ'
Alcance horizontal del chorro sobre el deflector (Lt)	Promedio	89,2	m	
	Mínimo	76,8	m	
	Máximo	96,2	m	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.23: Determinación del alcance vertical del chorro

ALCANCE VERTICAL DEL CHORRO SOBRE LOS DEFLECTORES (y_M)					
DATOS					OBS.
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del deflector (Y)	55,2	m			
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	34,0	°			
Ángulo de salida del chorro sobre el deflector (Θ')	32,0	°			
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²			
Factor de resistencia del aire (k) (Para Kawakami)	0,018	-			En función de la velocidad del flujo en el labio
Velocidad en el labio del deflector (V_{labio})	30,83	m/s			Se asume igual a la velocidad de aproximación
TRAYECTO DEL CHORRO SOBRE LOS DEFLECTORES (KAWAKAMI)					
%	X (m)	Y (m)	X' (m)	Cota (msnm)	OBS.
0,00	0,00	0,00	58,84	1132,58	
0,10	7,68	4,76	66,52	1137,34	
0,20	15,37	8,63	74,21	1141,21	
0,30	23,05	11,57	81,89	1144,16	
0,40	30,73	13,53	89,57	1146,12	
0,50	38,41	14,44	97,25	1147,02	
0,60	46,10	14,22	104,94	1146,80	
0,70	53,78	12,78	112,62	1145,36	
0,80	61,46	10,02	120,30	1142,60	
0,90	69,15	5,81	127,99	1138,39	
1,00	76,83	0,00	135,67	1132,58	
1,08	82,98	-5,91	141,82	1126,67	Modificar el % hasta que la cota sea similar a la cota del nivel aguas abajo: 1126,5msnm
1,20	92,19	-17,16	151,03	1115,43	
ECUACIÓN		y_M		OBS.	
<i>Edward Elevatorski (1959)</i>		15,51	m	Desprecia la resistencia del aire. En función de θ'	
<i>Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)</i>		14,44	m	Considera la resistencia del aire. En función de ϕ_c	
<i>Bureau of Indian Standards (2010)</i>		13,65	m	En función de θ'	
Alcance vertical del chorro (y_M)		14,6	m	Promedio	
ANGULO DE IMPACTO DEL CHORRO PROVENIENTE DE LOS DEFLECTORES (α')					
DATOS					OBS.
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	34,0	°			
Distancia vertical entre el labio del deflector y el nivel aguas abajo (y_i)	6,1	m			
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del deflector (Y)	55,2	m			
ECUACIÓN		α'		OBS.	
<i>Yildiz et al. (1994)</i>		35,5	°		

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.24: Profundidad de socavación y dimensiones del cuenco pre-excavado

SALTO DE ESQUÍ CON DEFLECTORES (DIENTES)			
Tipo de deflector		R	
PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN			
DATOS			OBS.
Diferencia entre el nivel de agua en el embalse y el nivel del agua aguas abajo (H)	61,3	°	Para: Hermosa(2013) Válido para H/d _{nom} entre 25 y 70 Válido para q/(d _{nom} ^{3/2} g ^{1/2}) entre 3 y 40
Caudal unitario (q)	63,83	m ³ /s.m	
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²	
Diámetro nominal (d _{nom})	0,60	m	
H/d _{nom}	102,17	-	
q/(d _{nom} ^{3/2} g ^{1/2})	43,93	-	
Profundidad de socavación adimensional (Y _s /d _{nom})		m	<u>No es posible definir la relación Y_s/d_{nom}. Parámetros adimensionales fuera de rango</u>
ECUACIÓN	Y _s (m)		OBS.
Schoklitsch	12		Considera el material del lecho. Ecuación recomendada por Hermosa (2013), para saltos en esquí con deflectores
Machado	39		Aplicable a prototipos y modelos. Ecuación recomendada por Hermosa (2013), para saltos en esquí con deflectores
Hermosa	-		Curvas obtenidas con base en modelo
Promedio	26		
ANCHO Y LARGO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO			
DATOS			OBS.
Diferencia entre el nivel de agua en el embalse y el nivel del agua aguas abajo (H)	61,30	m	
Caudal unitario (q)	63,83	m ³ /s.m	
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²	
Calado a la salida del salto en esquí (ds)	2,42	m	
Ancho del chorro en el impacto en el eje x (h _{imp})	12,07	m	
Ancho del chorro en el impacto en el eje z (b _{imp})	11,80	m	
Ángulo de incidencia del chorro (α')	31,5	°	
Diámetro medio de bloques de roca (d ₅₀)	0,60	m	
Calado aguas abajo (h ₂)	2,50	m	
Ángulo de salida del deflector (φ _{def})	34,0	°	Promedio de los ángulos de incidencia de la napa sobre el deflector y de la napa del cucharón
Radio del deflector (R _{def})	12,10	m	
Velocidad media aguas abajo del foso de socavación (V)	5,00	m/s	
ECUACIÓN	b _s	l _s	OBS.
Martins (1973)	51	80	Con base en ensayo tridimensional utilizando material no cohesivo (cubos de mortero) No válido para chorros horizontales o chorros a caída libre (presa en arco)
Taraimovich (1978) & Mason (1993)	90	113	Las ecuaciones son presentadas por Taraimovich (1978) para chorros circulares y adaptadas por Mason (1993) para chorros rectangulares.
Ghahfarokhi et al. (2008)	58	88	En base a datos de modelo reportados por Azmathullah (2005)
Promedio	66	94	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

2. DEFLECTORES TRAPEZOIDALES

• DIMENSIONAMIENTO

Tabla 7.25: Ángulo de salida de los deflectores trapezoidales

CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO DE SALTO EN ESQUÍ CON DEFLECTORES (DIENTES)			
Deflectores rectangulares (R) o trapezoidales (T)?		T	
DEFLECTORES TRAPEZOIDALES			
Fuente: Varios Proyectos (-)		Fuente: González Fariñas (2004)	
<p>Diagramas de un deflector trapezoidal: Vista lateral, Vista en planta, y Vista frontal desde aguas abajo.</p>	<p>Diagrama de un deflector trapezoidal tipo L-1 con detalles de flujo y dimensiones.</p>		
ÁNGULO DE SALIDA DE LOS DEFLECTORES (ϕ_{def})			
DATOS			OBS.
Diferencia entre ángulo de salida del cucharón y el deflector ($\Delta\phi_c$)	20,0	o	Se recomienda una diferencia de ángulos de 20 grados para deflectores trapezoidales
Calado al inicio del cucharón (do)	1,83	m	Para González Fariñas (2004)
Froude del flujo de aproximación (Fr_o)	9,1	-	Para González Fariñas (2004)
ECUACIÓN	ϕ_c	ϕ_{def}	OBS.
Chen Sheng & Chen Minlin (2004)	-	-	Para deflectores rectangulares
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)		-	Para deflectores rectangulares
González Fariñas (2004)	0	12,85	Ángulo de salida promedio del chorro para deflectores trapezoidales con perfil longitudinal triangular tipo L-1 (Fro entre 9-39) y ángulo de salida del cucharón de 0 grados
Varios Proyectos (1963-2011)		20,00	Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales. Ángulo de salida del cucharón de 0
Ángulo de salida del deflector trapezoidal	20,0		Ángulo de salida del deflector trapezoidal con perfil curvo

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.26: Radio, alto y largo de los deflectores trapezoidales

RADIO DE LOS DEFLECTORES (R_{def})						
DATOS				OBS.		
Radio del cucharón (R)	13,7	m				
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	-	°				
Ángulo de la rápida (Θ)	-	°				
Coordenadas del fin de la rápida	X	-	m		Para deflectores rectangulares	
	Cota	-	msnm			
Coordenadas del fin del cucharón	X	-	m			
	Cota	-	msnm			
ECUACIÓN		R_{def}/R	R_{def}	OBS.		
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)		-	-	Rdef/R puede estar entre 0,7 y 1,1 para deflectores rectangulares		
Varios Proyectos (1963-2011)		0,9	12,30	Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales, la relación Rdef/R puede estar entre 0,7 y 1,3		
Radio del deflector trapezoidal		-	12,30			
ALTO DE LOS DEFLECTORES (Y_{def})						
DATOS				OBS.		
Radio del cucharón (R)	13,7	m				
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	20,0	°			Para deflectores trapezoidales	
Calado al inicio del cucharón (do)	1,83	m			Para Gonzáles Fariñas (2004)	
Froude del flujo de aproximación (Fr_o)	9,1	-			Para Gonzáles Fariñas (2004)	
ECUACIÓN		Y_{def}	OBS.			
Chen Sheng & Chen Minlin (2004)		-	Para deflectores rectangulares			
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)		0,11	-	Para deflectores rectangulares. Escoger Y_{def}/R_{def} entre 0,05 y 0,17.		
González Fariñas (2004)		0,55	Para deflectores trapezoidales con perfil longitudinal triangular tipo L-1 (Fro entre 9-39) y ángulo de salida del cucharón de 0 grados			
Varios Proyectos (1963-2011)		0,74	Y_{def}/R_{def}	Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales Y_{def}/R_{def} puede estar entre 0,07 y 0,16		
			0,06			
LARGO DE LOS DEFLECTORES (l_{def})						
DATOS				OBS.		
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)	0,0	°				
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	20,0	°				
Ángulo de la rápida (Θ)	-	°				
Radio del cucharón (R)	13,7	m				
Radio del deflector (R_{def})	-	m			Para deflectores rectangulares	
Calado al inicio del cucharón (do)	1,83	m			Para Gonzáles Fariñas (2004)	
ECUACIÓN		l_{def1}	l_{def2}	l_{def}	l_{tramp}	OBS.
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)		-	-	-	-	Para deflectores rectangulares
González Fariñas (2004)		1,10	-	1,10	2,19	Para deflectores trapezoidales con perfil longitudinal triangular tipo L-1
Varios Proyectos (1963-2011)		4,21	0,69	4,90	-	Para deflectores trapezoidales
Longitud del deflector trapezoidal		4,21	0,69	4,90	-	Para deflectores trapezoidales con perfil longitudinal curvo

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.27: Ancho y espaciamiento de los deflectores trapezoidales

ANCHO DEL DEFLECTOR Y ESPACIAMIENTO (b_{def} , e)					
DATOS			OBS.		
Ancho del vano (b)	11,8	m			
Calado al inicio del cucharón (d_0)	1,83	m	Para González Fariñas (2004)		
Froude del flujo de aproximación (Fr_o)	9,1	-	Para González Fariñas (2004)		
Numero de dientes (n)					
ECUACIÓN	n		OBS.		
Varios proyectos (-)	1		Número referencial. Sujeto a chequeo por dimensión constructiva del ancho del diente. Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales		
Numero de dientes (n) adoptado	2				
Relación e/b_{def} y Porcentaje de ocupación					
ECUACIÓN	e/b_{def}	ocupación	OBS.		
Chen Sheng & Chen Minlin (2004)	0,90	-	$e/b_{def} < 1$. Válido para deflectores rectangulares		
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	0,90	-	Escoger e/b_{def} entre 0,5 y 0,9. Válido para deflectores rectangulares		
Epicum (2010)	-	0,50	Para deflectores rectangulares la ocupación debe ser 2/5 ó 3/5		
González Fariñas (2004)	-	0,50	0,5 equivale al 50% de ocupación de la cuchara. Válido para deflectores tipo L-1.		
Huang et al. (2011)	0,50	0,67	$e/b_{def2} = 0,5$. Válido para deflectores trapezoidales		
Varios Proyectos (1963-2011)	0,30	0,77	e/b_{def2} entre 0,25 y 0,51. Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales		
Para deflector trapezoidal	0,40	0,72	Promedio		
Anchos del deflector trapezoidal					
ECUACIÓN	b_{def2}	b_{def1}	b_{def3}	e	OBS.
Chen Sheng & Chen Minlin (2004)	-	-	-	-	Para deflectores rectangulares
Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 (2005)	-	-	-	-	Para deflectores rectangulares
Epicum (2010)	-	-	-	-	Para deflectores rectangulares
Huang et al. (2011)	3,95	-	-	1,58	Para deflectores trapezoidales
Varios Proyectos (1963-2011)	$b_{def1}/b_{def2} =$	0,30	3,06	1,82	Basado en información de prototipos la relación b_{def1}/b_{def2} puede estar entre 0,24 y 0,36
		4,54			
Para deflector trapezoidal	4,20	1,30	2,70	1,70	
González Fariñas (2004)	1,10	0,26	-	2,60	a
	n				7
Cálculo del espaciamiento real - e_{real}					
n	b_{def}	ocupación	e/b_{def}	e_{real}	OBS.
2	4,20	0,71	0,40	1,70	OK
Chequeo de relaciones geométricas del deflector			OBS.		
l_{def}/b_{def2}	1,17		Basado en información de prototipos con deflectores trapezoidales ' l_{def}/b_{def2} ' puede estar en el rango referencial de 1,14 a 1,42		

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.28: Pendiente de las paredes de los deflectores trapezoidales (VP) y número de Froude máximo (GF)

PENDIENTE DE LAS PAREDES DE LOS DEFLECTORES (TRAPEZOIDAL)				
ECUACIÓN	m/m	H	V	OBS.
Varios Proyectos (1963-2011)	0,99	1,00	0,99	La pendiente está dentro del rango recomendado de 1H:1V

NUMERO DE FROUDE MÁXIMO (Fr máx)			
DATOS			OBS.
Calado al inicio del cucharón (do)	1,83	m	Para González Fariñas (2004)

ECUACIÓN	Fr _{máx}	OBS.
González Fariñas (2004)	19,04	Froude máximo por debajo del cual no se presentan presiones subatmosféricas en los deflectores. Válido para deflectores tipo L-1.

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- **ALCANCE DEL CHORRO, SOCAVACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO (DEFLECTORES TRAPEZOIDALES –VARIOS PROYECTOS)**

Tabla 7.29: Cálculo del ángulo se salida del chorro sobre deflectores trapezoidales (VP)

DIENTES TRAPEZOIDALES - VARIOS PROYECTOS (-)			
ANGULO DE SALIDA DEL CHORRO SOBRE LOS DEFLECTORES (θ')			
DATOS			OBS.
Calado al inicio del cucharón (do)	1,83	m	
Radio del deflector (R _{def})	12,30	m	
Relación: R _{def} /do	6,7	m/m	
Relación: do/R _{def}	0,15	m/m	
Número de Froude al inicio del cucharón (Fro)	9,1	-	
Ángulo de la rápida (θ)	49,6	°	
Ángulo de salida del deflector (φ _{def})	20,0	°	
Ángulo total de deflexión del deflector (φ _{Tdef})	69,6	°	
Relación: φ _i /φ _T (Para Orlov)	1,00	-	VER VALOR EN ÁBACO

ECUACIÓN	θ'	OBS.
Orlov (1974)	20,00	° Válido para: Fro>5(sen θ) ^{0,5}
Quadri et al. (1977)	18,00	° VER VALOR EN ÁBACO
Ángulo de salida del chorro (θ') adoptado	19,00	°

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.30: Determinación del alcance horizontal del chorro

ALCANCE HORIZONTAL DEL CHORRO (Lt)				
DATOS				OBS.
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del deflector (Y)		57,2	m	
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)		0,0	°	
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})		20,0	°	
Ángulo de salida del chorro sobre el deflector (θ')		19,0	°	
Factor de resistencia del aire (k)	(Para U.S.B.R)	0,9	-	k=1 (Alcance Teórico), k=0,9 (Considera resistencia de aire, turbulencia)
	(Para Kawakami)	0,018	-	En función de la velocidad del flujo en el labio
Aceleración de la gravedad (g)		9,78	m/s ²	
Velocidad en el labio del deflector (V_{labio})		30,83	m/s	Se asume igual a la velocidad de aproximación
Carga velocidad en el labio del deflector (hV_{labio})		48,62	m	
Distancia vertical entre el labio del deflector y el nivel aguas abajo (yi)		4,1	m	
ALCANCE MÁXIMO (CHORRO SOBRE EL DEFLECTOR)				
ECUACIÓN		Lt _{máx}		OBS.
Edward Elevatorski (1959)		66,86	m	Alcance máximo cuando $\theta'=45^\circ$. Considera resistencia del aire. En función de θ'
U.S.B.R. (1987)		63,34	m	Dependiendo del factor "k", considera la resistencia del aire. En función de θ'
Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)		56,24	m	Considera la resistencia del aire. En función de ϕ_c
Bureau of Indian Standards (2010)		70,13	m	No considera las pérdidas en el vertedero, ni la entrada del aire al chorro. El alcance real puede ser menor. En función de θ'
Alcance horizontal del chorro proveniente de los deflectores (Lt)	Promedio	64,2	m	
	Mínimo	56,2	m	
	Máximo	70,1	m	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.31: Determinación del alcance vertical del chorro

ALCANCE VERTICAL DEL CHORRO (y_m)					
DATOS					OBS.
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del deflector (Y)	57,2	m			
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	20,0	°			
Ángulo de salida del chorro sobre el deflector (Θ')	19,0	°			
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²			
Factor de resistencia del aire (k) (Para Kawakami)	0,018	-			En función de la velocidad del flujo en el labio
Velocidad en el labio del deflector (V_{labio})	30,83	m/s			Se asume igual a la velocidad de aproximación
Distancia vertical entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo (y_{i2})	3,4	m			
TRAYECTO DEL CHORRO SOBRE LOS DEFLECTORES (KAWAKAMI)					
%	X (m)	Y (m)	X' (m)	Cota (msnm)	OBS.
0,00	0,00	0,00	57,47	1130,64	
0,10	5,62	1,87	63,10	1132,51	
0,20	11,25	3,38	68,72	1134,02	
0,30	16,87	4,52	74,35	1135,16	
0,40	22,50	5,25	79,97	1135,89	
0,50	28,12	5,57	85,60	1136,21	
0,60	33,75	5,45	91,22	1136,09	
0,70	39,37	4,86	96,85	1135,50	
0,80	45,00	3,78	102,47	1134,42	
0,90	50,62	2,17	108,09	1132,81	
1,00	56,24	0,00	113,72	1130,64	
1,14	64,12	-4,05	121,59	1126,59	Modificar el % hasta que la cota sea similar a la cota del nivel aguas abajo:1126,5msnm
1,20	67,49	-6,17	124,97	1124,47	
ECUACIÓN		Y_m		OBS.	
Edward Elevatorski (1959)		6,06	m	Desprecia la resistencia del aire. En función de θ'	
Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)		5,57	m	Considera la resistencia del aire. En función de ϕ_c	
Bureau of Indian Standards (2010)		5,15	m	En función de θ'	
Alcance vertical del chorro proveniente de los deflectores (y_m)		5,6	m	Promedio	
TRAYECTO DE LA NAPA INFERIOR DEL CHORRO PARA EL FONDO CON ANGULO DE SALIDA IGUAL A CERO					
%	Y (m)	X (m)	X' (m)	Cota (msnm)	OBS.
0,00	0,00	0,00	58,17	1129,90	
0,10	0,34	8,13	66,30	1129,56	
0,20	0,68	11,50	69,67	1129,22	
0,30	1,02	14,08	72,25	1128,88	
0,40	1,36	16,26	74,43	1128,54	
0,50	1,70	18,18	76,35	1128,20	
0,60	2,04	19,92	78,09	1127,86	
0,70	2,38	21,51	79,68	1127,52	
0,80	2,72	23,00	81,17	1127,18	
0,90	3,06	24,39	82,56	1126,84	
1,00	3,40	25,71	83,88	1126,50	
1,10	3,74	26,97	85,14	1126,16	
1,20	4,08	28,17	86,34	1125,82	
ANGULO DE IMPACTO DEL CHORRO (α')					
DATOS					OBS.
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	20,0	°			
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)	0,0	°			
Distancia vertical entre el labio del deflector y el nivel aguas abajo (y_{i1})	4,1	m			
Distancia vertical entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo (y_{i2})	3,4	m			
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del deflector (Y_1)	57,2	m			
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del cucharón (Y_2)	57,9	m			
ECUACIÓN		α'		OBS.	
Yildiz et al. (1994)		napa superior	napa inferior	24,2	13,6

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.32: Profundidad de socavación y dimensiones del cuenco pre-excavado

PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN			
DATOS			OBS.
Diferencia entre el nivel de agua en el embalse y el nivel del agua aguas abajo (H)	61,3	°	Para: Hermosa(2013) Válido para H/d _{nom} entre 25 y 70 Válido para q/(d _{nom} ^{3/2} g ^{1/2}) entre 3 y 40
Caudal unitario (q)	63,83	m ³ /s.m	
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²	
Diámetro nominal (d _{nom})	0,60	m	
H/d _{nom}	102,17	-	
q/(d _{nom} ^{3/2} g ^{1/2})	43,93	-	
Profundidad de socavación adimensional (Ys/d _{nom})		m	No es posible definir la relación Ys/d _{nom} . Parámetros adimensionales fuera de rango
ECUACIÓN	Y _s (m)		OBS.
Schoklitsch	12		Considera el material del lecho. Ecuación recomendada por Hermosa (2013), para saltos en esquí con deflectores
Machado	39		Aplicable a prototipos y modelos. Ecuación recomendada por Hermosa (2013), para saltos en esquí con deflectores
Hermosa	-		Curvas obtenidas con base en modelo
Promedio	26		
ANCHO Y LARGO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO			
DATOS			OBS.
Diferencia entre el nivel de agua en el embalse y el nivel del agua aguas abajo (H)	61,30	m	
Caudal unitario (q)	63,83	m ³ /s.m	
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²	
Calado a la salida del salto en esquí (ds)	2,42	m	
Ancho del chorro en el impacto en el eje x (h _{imp})	37,71	m	
Ancho del chorro en el impacto en el eje z (b _{imp})	11,80	m	
Ángulo de incidencia del chorro (α')	18,9	°	
Diámetro medio de bloques de roca (d ₅₀)	0,60	m	
Calado aguas abajo (h _z)	2,50	m	
Ángulo de salida del deflector (φ _{def})	20,0	°	Promedio de los ángulos de incidencia de la napa sobre el deflector y de la napa del cucharón
Radio del deflector (R _{def})	12,30	m	
Velocidad media aguas abajo del foso de socavación (V)	5,00	m/s	
ECUACIÓN	b _s	l _s	OBS.
Martins (1973)	51	130	Con base en ensayo tridimensional utilizando material no cohesivo (cubos de mortero) No válido para chorros horizontales o chorros a caída libre (presa en arco)
Taraimovich (1978) & Mason (1993)	90	113	Las ecuaciones son presentadas por Taraimovich (1978) para chorros circulares y adaptadas por Mason (1993) para chorros rectangulares.
Ghahfarokhi et al. (2008)	50	175	En base a datos de modelo reportados por Azmathullah (2005)
Promedio	64	139	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- **ALCANCE DEL CHORRO, SOCAVACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO (DEFLECTORES TRAPEZOIDALES – GONZALEZ FARIÑAS)**

Tabla 7.33: Determinación del alcance horizontal del chorro

DIENTES TRAPEZOIDALES - GONZALEZ FARIÑAS (2004)				
ALCANCE HORIZONTAL DEL CHORRO (Lt)				
DATOS				OBS.
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del deflector (Y)		57,4	m	
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)		0,0	°	
Ángulo de salida del chorro sobre el deflector (θ')		12,9	°	
Factor de resistencia del aire (k)	(Para U.S.B.R)	0,9	-	k=1 (Alcance Teórico), k=0,9 (Considera resistencia de aire, turbulencia)
	(Para Kawakami)	0,018	-	En función de la velocidad del flujo en el labio
Aceleración de la gravedad (g)		9,78	m/s ²	
Velocidad en el labio del deflector (V_{labio})		30,83	m/s	Se asume igual a la velocidad de aproximación
Carga velocidad en el labio del deflector (hV_{labio})		48,62	m	
Distancia vertical entre el labio del deflector y el nivel aguas abajo (y_i)		3,9	m	
ALCANCE MÁXIMO (CHORRO SOBRE EL DEFLECTOR)				
ECUACIÓN		Lt _{máx}		OBS.
Edward Elevatorski (1959)		47,26	m	Alcance máximo cuando $\theta'=45^\circ$. Considera resistencia del aire. En función de θ'
U.S.B.R. (1987)		44,78	m	Dependiendo del factor "k", considera la resistencia del aire. En función de θ'
Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)		39,32	m	Considera la resistencia del aire
Bureau of Indian Standards (2010)		55,36	m	No considera las pérdidas en el vertedero, ni la entrada del aire al chorro. El alcance real puede ser menor. En función de θ'
Alcance horizontal del chorro proveniente de los deflectores (Lt)	Promedio	46,7	m	
	Mínimo	39,3	m	
	Máximo	55,4	m	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.34: Determinación del alcance vertical del chorro

ALCANCE VERTICAL DEL CHORRO (y_m)					
DATOS					OBS.
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del deflector (Y)	57,4	m			
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)	0,0	°			
Ángulo de salida del chorro sobre el deflector (θ')	12,9	°			
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²			
Factor de resistencia del aire (k) (Para Kawakami)	0,018	-			En función de la velocidad del flujo en el labio
Velocidad en el labio del deflector (V_{labio})	30,83	m/s			Se asume igual a la velocidad de aproximación
Distancia vertical entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo (y_{i2})	3,4	m			
TRAYECTO DEL CHORRO SOBRE LOS DEFLECTORES (KAWAKAMI)					
%	X (m)	Y (m)	X' (m)	Cota (msnm)	OBS.
0,00	0,00	0,00	55,46	1130,45	
0,10	3,93	0,82	59,39	1131,46	
0,20	7,86	1,47	63,32	1132,11	
0,30	11,80	1,95	67,25	1132,59	
0,40	15,73	2,26	71,19	1132,90	
0,50	19,66	2,38	75,12	1133,02	
0,60	23,59	2,32	79,05	1132,96	
0,70	27,52	2,06	82,98	1132,70	
0,80	31,46	1,59	86,91	1132,23	
0,90	35,39	0,91	90,85	1131,55	
1,00	39,32	0,00	94,78	1130,64	
1,30	51,11	-4,16	106,57	1126,48	Modificar el % hasta que la cota sea similar a la cota del nivel aguas abajo:1126,5msnm
1,50	58,98	-8,24	114,44	1122,40	
ECUACIÓN		Ym		OBS.	
Edward Elevatorski (1959)		2,84	m	Desprecia la resistencia del aire. En función de θ'	
Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)		2,38	m	Considera la resistencia del aire. En función de ϕ_c	
Bureau of Indian Standards (2010)		2,41	m	En función de θ'	
Alcance vertical del chorro proveniente de los deflectores (y_m)		2,6	m	Promedio	
TRAYECTO DE LA NAPA INFERIOR DEL CHORRO PARA EL FONDO CON ANGULO DE SALIDA IGUAL A CERO					
%	Y (m)	X (m)	X' (m)	Cota (msnm)	OBS.
0,00	0,00	0,00	55,46	1129,90	
0,10	0,34	8,13	63,59	1129,56	
0,20	0,68	11,50	66,96	1129,22	
0,30	1,02	14,08	69,54	1128,88	
0,40	1,36	16,26	71,72	1128,54	
0,50	1,70	18,18	73,64	1128,20	
0,60	2,04	19,92	75,38	1127,86	
0,70	2,38	21,51	76,97	1127,52	
0,80	2,72	23,00	78,46	1127,18	
0,90	3,06	24,39	79,85	1126,84	
1,00	3,40	25,71	81,17	1126,50	
1,10	3,74	26,97	82,43	1126,16	
1,20	4,08	28,17	83,63	1125,82	
ANGULO DE IMPACTO DEL CHORRO (α')					
DATOS					OBS.
Ángulo de salida del chorro sobre el deflector (θ')	12,9	°			
Ángulo de salida del cucharón (ϕ_c)	0,0	°			
Distancia vertical entre el labio del deflector y el nivel aguas abajo (y_{i1})	3,9	m			
Distancia vertical entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo (y_{i2})	3,4	m			
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del deflector (Y)	57,4	m			
Distancia vertical entre el nivel del embalse y el labio del cucharón (Y_2)	57,9	m			
ECUACIÓN		α'		OBS.	
Yıldız et al. (1994)		napa superior	napa inferior	19,2	13,6

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.35: Profundidad de socavación y dimensiones del cuenco pre-excavado

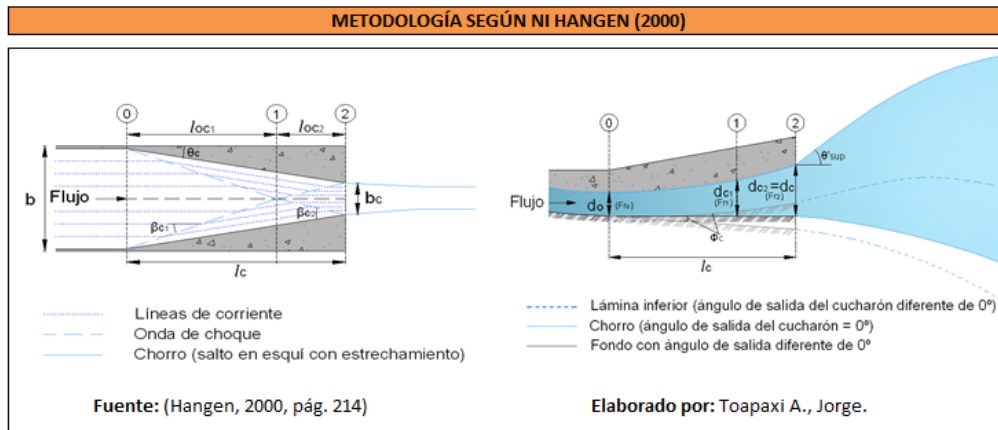
PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN			
DATOS			OBS.
Diferencia entre el nivel de agua en el embalse y el nivel del agua aguas abajo (H)	61,3	°	Para: Hermosa(2013) Válido para H/d_{nom} entre 25 y 70 Válido para $q/(d_{nom}^{3/2} g^{1/2})$ entre 3 y 40
Caudal unitario (q)	63,83	$m^3/s.m$	
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s^2	
Diámetro nominal (d_{nom})	0,60	m	
H/d_{nom}	102,17	-	
$q/(d_{nom}^{3/2} g^{1/2})$	43,93	-	
Profundidad de socavación adimensional (Y_s/d_{nom})		m	No es posible definir la relación Y_s/d_{nom} . Parámetros adimensionales fuera de rango
ECUACIÓN		Y_s (m)	OBS.
Schoklitsch		12	Considera el material del lecho. Ecuación recomendada por Hermosa (2013), para saltos en esquí con deflectores
Machado		39	Aplicable a prototipos y modelos. Ecuación recomendada por Hermosa (2013), para saltos en esquí con deflectores
Hermosa		-	Curvas obtenidas con base en modelo
Promedio		26	
ANCHO Y LARGO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO			
DATOS			OBS.
Diferencia entre el nivel de agua en el embalse y el nivel del agua aguas abajo (H)	61,30	m	
Caudal unitario (q)	63,83	$m^3/s.m$	
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s^2	
Calado a la salida del salto en esquí (ds)	2,42	m	
Ancho del chorro en el impacto en el eje x (h_{imp})	25,40	m	
Ancho del chorro en el impacto en el eje z (b_{imp})	11,80	m	
Ángulo de incidencia del chorro (α')	16,4	°	
Diámetro medio de bloques de roca (d_{50})	0,60	m	
Calado aguas abajo (h_2)	2,50	m	
Ángulo de salida del deflector (ϕ_{def})	-	°	Promedio de los ángulos de incidencia de la napa sobre el deflector y de la napa del cucharón
Radio del deflector (R_{def})	-	m	
Velocidad media aguas abajo del foso de socavación (V)	-	m/s	
ECUACIÓN	b_s	l_s	OBS.
Martins (1973)	51	111	Con base en ensayo tridimensional utilizando material no cohesivo (cubos de mortero) No válido para chorros horizontales o chorros a caída libre (presa en arco)
Taraimovich (1978) & Mason (1993)	90	113	Las ecuaciones son presentadas por Taraimovich (1978) para chorros circulares y adaptadas por Mason (1993) para chorros rectangulares.
Ghahfarokhi et al. (2008)	-	-	En base a datos de modelo reportados por Azmathullah (2005)
Promedio	70	112	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

7.2.4. SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE PAREDES

• DIMENSIONAMIENTO

Tabla 7.36: Dimensionamiento del estrechamiento según Hangen (2000)



DATOS			OBS.
Ancho del vano (b)	11,8	m	-
Calado al inicio del cucharón (d_0)	1,83	m	
Froude del flujo de aproximación (Fr_o)	9,1	-	
Ángulo de salida del fondo (ϕ_c)	0	°	Se recomienda que la pendiente del fondo de la contracción esté entre -10 y 10 grados
Angulo de salida de napa superior asumido (θ'_{sup} asumido)	40	°	El ángulo de salida de la napa superior del chorro debe estar entre 35 y 40 grados
Factor K esperado	5,4	°	Factor relacionado con el ángulo de salida de la napa superior del chorro
bc/b_{min}	(1)	0,02	-
	(2)	0,06	-

La opción (2) utiliza un factor de seguridad.

ANGULOS			OBS.
θ_c	8,9	°	Escoger el valor del ángulo de contracción (entre 3 y 13 grados), tal que θ'_{sup} calculado $\approx \theta'_{sup}$ asumido. Ok

SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		OBS.
λ_1	1,03	λ_2	0,72	
d_{c2}/d_0	3,00	d_{c2}/d_{c1}	1,68	
d_{c1}	5,49	d_{c2}	9,19	
l_{c1}	21,00	l_{c2}	8,70	
Fr_1	5,10	Fr_2	3,84	

CHEQUEO DEL ÁNGULO DE SALIDA DE LA NAPA SUPERIOR DEL CHORRO		OBS.
$K_{recalculado}$	5,47	Ok
θ'_{sup}	40,3	

RELACIONES DE CONTRACCIÓN				OBS.
l_c	29,70	l_c/b	2,52	Longitud horizontal medida desde el fin de la rápida hasta la salida del flujo
b_c	2,50	b_c/b	0,21	OK

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.37: Definición de las coordenadas del inicio y fin de la contracción

COORDENADAS DEL INICIO Y FIN DE LA CONTRACCIÓN			
DATOS			OBS.
Ángulo de salida del fondo (ϕ_c)	0,0	°	
Longitud de la contracción (l_c)	29,7	m	Longitud horizontal medida desde el fin de la rápida hasta la salida del flujo
Radio del cucharón (R)	13,7	m	
Distancia horizontal entre el final de la rápida y el invert del cucharón	10,4	m	El invert del cucharón corresponde al calculado para el salto en esquí convencional
Cota del invert del cucharón	1129,90	msnm	

X (m)	Cota (msnm)	OBS.
42,83	1134,73	Coordenadas de inicio del cucharón y de la contracción
53,27	1129,90	Coordenadas del fin del cucharón
63,83	1129,90	
72,53	1129,90	Coordenadas de la salida de la contracción

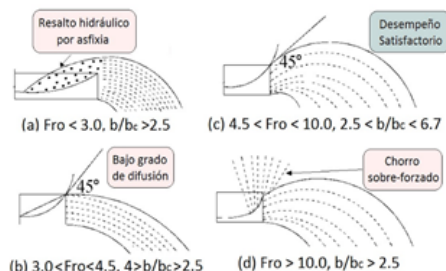
Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.38: Chequeo de los resultados obtenidos con Hanen (2000)

RESULTADOS DEL DISEÑO DE SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO GRADUAL DE PAREDES			
ÁNGULO DE SALIDA DEL FONDO DEL ESTRECHAMIENTO (ϕ_c) Y ÁNGULO DE SALIDA DE LA NAPA SUPERIOR DEL CHORRO (θ'_{sup})			
ECUACIÓN	ϕ_c	θ'_{sup}	OBS.
<i>Ni Hangen (2000)</i>	-	40,3	El ángulo de salida de la napa superior del chorro debe estar entre 35 y 40 grados.
	0,0	-	De acuerdo con la recopilación de datos de varios proyectos realizada por el autor, el ángulo de salida del fondo debe estar entre -10 y 10 grados.
RECOMENDACIÓN		OBS.	
<i>Vischer & Hager (1995)</i>	ϕ_c y θ'_{sup} deben estar entre -10 y 45 grados. En donde ϕ_c toma un valor dentro del rango más bajo y θ'_{sup} toma un valor dentro del rango más alto.	El ángulo de salida del fondo y el de la napa superior del chorro cumplen con el rango recomendado por el autor	
<i>Huang et al. (2006)</i>	El ángulo de salida del fondo debe ser de 0 a 10 grados.	El ángulo de salida del fondo está dentro del rango recomendado por el autor	

Continúa.

Continuación Tabla 7.38

ANCHO CONTRAÍDO (b_c) Y RELACIÓN DE CONTRACCIÓN (b_c/b)			
DATOS			OBS.
Ancho al inicio de la contracción (b)	11,8	m	
Froude del flujo de aproximación (Fr_o)	9,1	-	
ECUACIÓN	b_c	b_c/b	OBS.
Ni Hangen (2000)	2,5	0,21	
RECOMENDACIÓN			OBS.
Vischer & Hager (1995)	El grado de convergencia debe estar entre 0,167 (1/6) y 0,25 (1/4) y el número de Froude en la aproximación entre 4 y 10.		La relación de contracción (b_c/b) cumple con la recomendación del autor para el rango del número de Froude (Fro)
Ni Hangen (2000)	(b_c/b) _{min} es el valor para que no se presente resalto hidráulico por asfixia en la contracción, es decir, el valor de la relación de contracción calculado debe ser mayor al (b_c/b) _{min} .		(b_c/b) _{min} (1) 0,02
			(b_c/b) _{min} (2) 0,06
Huang et al. (2006)	Recomienda una relación b_c/b entre 0,2 y 0,4		La relación de contracción (b_c/b) cumple con las recomendaciones
Varios proyectos (-)	Basado en información de varios proyectos se recomienda una relación b_c/b entre 0,2 y 0,4		
Sun Shuangke et al. (-)	Recomienda una relación b_c/b entre 0,20 (1/5) y 0,33 (1/3)		La relación de contracción (b_c/b) cumple con la recomendación del autor
DESEMPEÑO DE LA CONTRACCIÓN			OBS.
Huang & Wu (2008)	 <p>(a) Fro < 3.0, $b/b_c > 2.5$ (c) $4.5 < Fro < 10.0$, $2.5 < b/b_c < 6.7$</p> <p>(b) $3.0 < Fro < 4.5$, $4 > b/b_c > 2.5$ (d) $Fro > 10.0$, $b/b_c > 2.5$</p>		Chorro con suficiente grado de difusión. Desempeño satisfactorio
LONGITUD DE LA CONTRACCIÓN (l_c) Y RELACIÓN (l_c/b)			
ECUACIÓN	l_c (m)	l_c/b	OBS.
Ni Hangen (2000)	29,7	2,5	
RECOMENDACIÓN			OBS.
Varios proyectos (-)	Basado en información de varios proyectos se recomienda una relación l_c/b entre 1,3 y 1,9. Válido para anchos de vano entre 5 y 20.		La relación de la longitud de la contracción respecto al ancho inicial, no cumple con la recomendación
ANGULO DE CONTRACCIÓN (θ_c)			
ECUACIÓN	θ_c (°)	OBS.	
Ni Hangen (2000)	8,9	El ángulo de contracción debe estar entre 3 y 13 grados	
RECOMENDACIÓN			OBS.
Varios proyectos (-)	Basado en datos de varios proyectos, el ángulo de contracción debe estar entre 4 y 15 grados		El ángulo de contracción calculado se encuentra dentro del rango recomendado

Continúa.

Continuación Tabla 7.38

PERFIL DEL FLUJO			
ECUACIÓN	d_{c1}	d_{c2}	OBS.
<i>Ni Hagen (2000)</i>	5,49	9,19	d_{c2} corresponde al calado a la salida de la contracción

NUMERO DE FROUDE A LA SALIDA DE LA CONTRACCIÓN(Fr_2)			
ECUACIÓN	Fr_1	Fr_2	OBS.
<i>Ni Hagen (2000)</i>	5,10	3,84	Fr_2 corresponde al Froude a la salida de la contracción

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- **ALCANCE DEL CHORRO, SOCAVACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO**

Tabla 7.39: Determinación del alcance horizontal del chorro

CARACTERÍSTICAS DEL CHORRO PROVENIENTE DEL SALTO EN ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO DE PAREDES				
ALCANCE HORIZONTAL DEL CHORRO (L_t)				
DATOS			OBS.	
Distancia vertical entre el nivel del embalse y la salida del fondo de la contracción (Y)		57,9	m	
Ángulo de salida del fondo de la contracción (ϕ_c)		0,0	°	
Ángulo de salida de la napa superior del chorro (θ'_{sup})		40,3	°	
Factor de resistencia del aire (k)	(Para U.S.B.R.)	0,9	-	$k=1$ (Alcance Teórico), $k=0,9$ (Considera resistencia de aire, turbulencia)
	(Para Kawakami)	0,021	-	En función de la velocidad del flujo en la salida
Aceleración de la gravedad (g)		9,78	m/s^2	
Calado a la salida de la contracción (d_c ó d_{c2})		9,19	m	
Número de Froude a la salida de la contracción (Fr_2)		3,84	-	
Velocidad a la salida de la contracción (V_2)		36,39	m/s	

ALCANCE MÁXIMO (NAPA SUPERIOR DEL CHORRO)				
ECUACIÓN	$L_{t_{máx}}$		OBS.	
<i>Edward Elevatorski (1959)</i>	108,53	m	Alcance máximo cuando $\theta'=45^\circ$. Considera resistencia del aire. En función de θ'	
<i>U.S.B.R. (1987)</i>	102,82	m	Dependiendo del factor "k", considera la resistencia del aire. En función de θ'	
<i>Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)</i>	99,15	m	Considera la resistencia del aire.	
Alcance horizontal de la napa superior del chorro ($L_{t_{max}}$)	Promedio	103,6	m	
	Mínimo	99,2	m	
	Máximo	108,5	m	

ALCANCE MÍNIMO (NAPA INFERIOR DEL CHORRO)				
ECUACIÓN	$L_{t_{min}}$		OBS.	
<i>Edward Elevatorski (1959)</i>	0,00	m	Alcance máximo cuando $\theta'=45^\circ$. Considera resistencia del aire. En función de θ'	
<i>U.S.B.R. (1987)</i>	0,00	m	Dependiendo del factor "k", considera la resistencia del aire. En función de θ'	
<i>Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)</i>	0,00	m	Considera la resistencia del aire. En función de ϕ_c	
Alcance horizontal de la napa inferior del chorro ($L_{t_{min}}$)	Promedio	0,0	m	
	Mínimo	0,0	m	
	Máximo	0,0	m	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.40: Determinación del alcance vertical del chorro

ALCANCE VERTICAL DEL CHORRO (y_M)					
DATOS					OBS.
Distancia vertical entre el nivel del embalse y la salida del fondo de la contracción (Y)	57,9	m			
Ángulo de salida del fondo de la contracción (ϕ_c)	0,0	°			
Ángulo de salida de la napa superior del chorro (θ'_{sup})	40,3	°			
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²			
Factor de resistencia del aire (k) (Para Kawakami)	0,021	-			En función de la velocidad del flujo a la salida de la contracción
Calado a la salida de la contracción (d_c ó d_{c2})	9,19	m			
Velocidad a la salida de la contracción (V_2)	36,39	m/s			
Distancia vertical entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo (y_i)	3,4	m			
TRAYECTORIA MÁXIMA DEL CHORRO (NAPA SUPERIOR DEL CHORRO)					
TRAYECTO DEL CHORRO (KAWAKAMI)					
%	X (m)	Y (m)	X' (m)	Cota (msnm)	OBS.
0,00	0,00	0,00	72,53	1139,09	
0,10	9,92	7,80	82,45	1146,89	
0,20	19,83	14,32	92,36	1153,42	
0,30	29,75	19,46	102,28	1158,56	
0,40	39,66	23,09	112,19	1162,18	
0,50	49,58	25,03	122,11	1164,13	
0,60	59,49	25,09	132,02	1164,19	
0,70	69,41	23,01	141,94	1162,10	
0,80	79,32	18,44	151,86	1157,54	
0,90	89,24	10,96	161,77	1150,06	
1,00	99,15	0,00	171,69	1139,09	
1,09	107,58	-12,64	180,11	1126,45	Modificar el % hasta que la cota sea similar a la cota del nivel aguas abajo:1126,5msnm
1,20	118,98	-35,88	191,52	1103,21	
ECUACIÓN		y_{Mmax}		OBS.	
Edward Elevatorski (1959)		24,22	m	Desprecia la resistencia del aire.	
Kawakami (1973) - Khatsuria (2005)		25,09	m	Considera la resistencia del aire.	
Bureau of Indian Standards (2010)		28,32	m	En función de θ'	
Alcance vertical de la napa superior del chorro (y_{Mmax})		25,9	m	Promedio	
TRAYECTO DE LA NAPA INFERIOR DEL CHORRO PARA FONDO CON ANGULO DE SALIDA MENOR O IGUAL A CERO					
%	Y (m)	X (m)	X' (m)	Cota (msnm)	OBS.
0,00	0,00	0,00	72,53	1129,90	
0,10	0,34	9,60	82,13	1129,56	
0,20	0,68	13,57	86,10	1129,22	
0,30	1,02	16,62	89,15	1128,88	
0,40	1,36	19,19	91,72	1128,54	
0,50	1,70	21,46	93,99	1128,20	
0,60	2,04	23,50	96,04	1127,86	
0,70	2,38	25,39	97,92	1127,52	
0,80	2,72	27,14	99,67	1127,18	
0,90	3,06	28,79	101,32	1126,84	
1,00	3,40	30,34	102,88	1126,50	
1,10	3,74	31,83	104,36	1126,16	
1,20	4,08	33,24	105,77	1125,82	
ANGULO DE IMPACTO DEL CHORRO (α')					
DATOS					OBS.
Ángulo de salida del fondo de la contracción (ϕ_c)	0,0	°			
Ángulo de salida de la napa superior del chorro (θ'_{sup})	40,3	°			
Distancia vertical entre el labio del cucharón y el nivel aguas abajo (y_i)	3,4	m			
Distancia vertical entre el nivel del embalse y la salida del fondo de la contracción (Y)	57,9	m			
Calado a la salida de la contracción (d_c ó d_{c2})	9,19	m			
ECUACIÓN		α' (°)		OBS.	
Yildiz et al. (1994)		napa superior	napa inferior	42,4	13,6

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

Tabla 7.41: Profundidad de socavación y dimensiones del cuenco pre-excavado

SALTO DE ESQUÍ CON ESTRECHAMIENTO			
PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN			
ECUACIÓN	Y _s (m)		OBS.
Veronese	45		Aplicable a prototipos
Damle A	39		Aplicable a prototipos y modelos
INCYTH	32		Aplicable a prototipos
Taraimovich	29		Aplicable a prototipos
Mason y Arumugam (prototipos)	33		Aplicable a prototipos y considera el material del lecho
Promedio socavación - salto en esquí convencional	36		
Profundidad de socavación - estrechamiento de paredes	18		Gao & Li (1983) establecen que estrechamiento de paredes disminuye la profundidad de socavación entre 1/3 y 2/3 de la profundidad de socavación obtenida con un salto convencional
ANCHO Y LARGO DEL CUENCO PRE-EXCAVADO			
DATOS			OBS.
Diferencia entre el nivel de agua en el embalse y el nivel del agua aguas abajo (H)	61,30	m	
Caudal por vano (Q _{vano})	716,84	m ³ /s	
Aceleración de la gravedad (g)	9,78	m/s ²	
Calado a la salida de la contracción (dc)	9,19	m	
Ancho del chorro en el impacto en el eje x (h _{imp})	77,24	m	
Ancho del chorro en el impacto en el eje z (b _{imp})	2,50	m	
Ángulo de incidencia del chorro (α')	28,0	°	Promedio de los ángulos de incidencia de la napa superior e inferior del estrechamiento
Diámetro medio de bloques de roca (d ₅₀)	0,60	m	
Calado aguas abajo (h ₂)	2,50	m	
ECUACIÓN	b _s	l _s	OBS.
Martins (1973)	28	152	Con base en ensayo tridimensional utilizando material no cohesivo (cubos de mortero) No válido para chorros horizontales o chorros a caída libre (presa en arco)
Taraimovich (1978) & Mason (1993)	62	82	Las ecuaciones son presentadas por Taraimovich (1978) para chorros circulares y adaptadas por Mason (1993) para chorros rectangulares.
Promedio	45	117	

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

CAPÍTULO 8.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- **CAPITULO 1**

Respecto a la descripción del flujo sobre el cimacio de una presa:

- Los factores que inciden en el coeficiente de descarga (**C**) en vertederos tipo cimacio se resume en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Lista de factores que inciden en el coeficiente de descarga

Factores	Variación
Forma o Tipo de cresta	Creager, WES, entre otros
Carga sobre el vertedero	Igual, mayor o menor a la carga de diseño
Inclinación de la cara aguas arriba del vertedero	Vertical, inclinada (3V:1H, 3V:2H y 3V:3H)
Presiones	Cero, sobrepresión o subpresión atmosférica

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- La mezcla agua – aire sobre el cimacio de un vertedero en una presa incide en: el aumento en el volumen del flujo, lo cual debe ser considerado dentro del diseño de la altura de los muros laterales del vertedero (bordo libre); y la reducción de los efectos de la cavitación sobre la superficie de la estructura de excesos.

Referente al efecto de la gravedad, la viscosidad y de la tensión superficial en el movimiento supercrítico de un canal de sección transversal rectangular con curvatura cóncava:

- En general, en el flujo a superficie libre existe una influencia secundaria de la viscosidad y de la tensión superficial, no así la gravedad, que a través del número de Froude, es útil en el diseño de estructuras hidráulicas.
- La gravedad permite el movimiento del agua en canales con flujo a superficie libre, y clasifica al flujo en subcrítico, crítico y supercrítico.

En el flujo es supercrítico, cuando el número de Froude es mayor a la unidad, prevalece la energía cinética, la velocidad y la profundidad es relativamente alta y baja, respectivamente. Este tipo de flujo se presenta en canales de alta pendiente, por ejemplo, en el flujo sobre la rápida de un vertedero y en la cubeta deflectora de la estructura de disipación tipo salto en esquí.

- La viscosidad permite definir generalmente al flujo como laminar o turbulento. En estructuras hidráulicas es difícil que se presente el flujo laminar, por lo que el flujo en el salto en esquí se considera turbulento. La viscosidad adquiere importancia en modelos hidráulicos, donde el objetivo es identificar posibles formaciones de vórtices o zonas de separación de la corriente.
- La tensión superficial no es predominante en prototipos, pero tiene relevancia en casos en los que sus fuerzas gobiernan el movimiento, por ejemplo, en el estudio en modelo del flujo sobre un vertedero, se considera el efecto de la tensión superficial para cargas sobre el vertedero menor a 3 cm, por arriba de este valor la influencia es despreciable en la curvatura de la superficie libre del agua y por ende en el coeficiente de descarga.
- El régimen de flujo que se presenta en canales rectangulares con fondo con curvatura cóncava es el régimen supercrítico – turbulento.

Referente a la descripción de la alternativa clásica de evaluación de las pérdidas de energía por fricción y del efecto de la curvatura cóncava en flujo supercrítico:

- En flujo a superficie libre existen pérdidas por fricción y pérdidas localizadas, donde las pérdidas por fricción pueden ser despreciadas cuando la longitud del canal es menor a 9 m.
- Sobre un fondo curvo cóncavo (salto en esquí) debido a la curvatura importante de las líneas de corriente en un tramo de canal

relativamente corto, se presenta flujo supercrítico rápidamente variado, por lo que, el efecto de la fricción y por consiguiente de sus pérdidas es despreciable.

- El fondo curvo cóncavo en el flujo supercrítico hace posible la presencia de la aceleración centrífuga que causa un aumento en la presión. La variación de la presión en un fondo curvo adquiere mayor importancia cuanto mayor es la velocidad del flujo y menor el radio de curvatura. Para el caso de flujo supercrítico, estos efectos son mucho más apreciables que para flujo subcrítico.

- **CAPITULO 2**

Respecto a la caracterización del flujo sobre el salto en esquí, del flujo de salida y del impacto en el cuenco al pie de la presa:

- La correcta disipación de energía contenida en flujos de vertederos de presas altas depende de las condiciones del flujo en todo su trayecto. En el caso particular de saltos en esquí, el flujo en la rápida tiene altas velocidades y una importante concentración de aire, ocasionando que el flujo en la salida del cucharón tenga un grado de turbulencia entre 4 % y 8 %. Este grado de turbulencia junto con la concentración de aire afectan a la trayectoria del chorro, disminuyendo su alcance hasta en un 30% y permitiendo, además, una mayor y más rápida disipación de la energía en la zona de impacto.

Referente a la distribución de velocidades y de presiones en el fondo del salto en esquí y al inicio del chorro de salida desde el esquí:

- Debido a que las líneas de corriente del flujo sobre el cucharón del salto en esquí tienen curvatura, la distribución de velocidades es diferente a la que se presenta en un canal con pendiente continua, adquiriendo una forma logarítmica deformada con tendencia

uniforme, en donde el mayor valor de velocidad se presenta en la superficie.

- La distribución de velocidades en vertical a la salida del salto en esquí también tiende a ser uniforme. Aguas abajo, en el chorro a descarga libre, se presenta una distribución de velocidades cuyo valor máximo se encuentra en el eje, disminuyendo con tendencia Gaussiana conforme se aleja del mismo. De manera similar, en el sentido longitudinal, la velocidad disminuye a medida que se aleja del punto de descarga.
- El perfil de las presiones a lo largo del cucharón de un salto en esquí puede ser determinado mediante varios métodos teóricos, de los cuales, el propuesto por Lenau & Cassidy es el que brinda una buena aproximación, sin embargo, las mediciones en modelos gobiernan cualquier otro método, ya que estos aparte de dar una distribución de presiones similar a la real, ayudan a detectar posibles particularidades que se puedan presentar en los prototipos.
- La presión a la salida del salto en esquí depende del ángulo de inclinación del labio medido desde la horizontal, el mismo que no debe ser menor a 40 grados para no generar presiones negativas.

Referente a los tipos de saltos en esquí a ser examinados:

- Las geometrías de los diferentes tipos de salto en esquí dependen esencialmente de los objetivos a conseguir dentro de la disipación de energía (erosión del lecho) y la dirección del chorro, los mismos que dependen de las características propias de cada proyecto, como por ejemplo: la disposición de las obras (orientación de los vertederos), altura de la presa, material del lecho y geología de las laderas en el sitio de impacto, y morfología del cauce aguas abajo de la presa.
- Dentro de los tipos de saltos en esquí, los que disponen de deflectores tipo angostura, con paredes de estrechamiento gradual y

los que poseen un umbral de altura variable, tienen como principal objetivo mejorar la disipación de energía con respecto al salto convencional mediante la introducción de aire en el chorro. Por otro lado, el salto en esquí que dispone de un estrechamiento brusco en curva, busca esencialmente mejorar el salto en esquí convencional, direccionando el chorro por lo general hacia el centro del cauce. Posterior al adecuado estudio en modelo físico, geometrías innovadoras distintas a las enunciadas pueden ser consideradas en el diseño de un proyecto.

Respecto a los parámetros característicos de los diferentes tipos de movimiento – evaluación de la disipación de energía al pie de presa (cuencos de socavación):

- El movimiento del flujo y la disipación de energía en el colchón de agua, ubicado aguas abajo de la presa, depende principalmente de: el caudal unitario, turbulencia, la geometría del chorro, el ángulo de incidencia del chorro (ángulo de entrada al cuenco), el material del lecho y la formación del foso de socavación.
- En un análisis en perfil, del movimiento y disipación del flujo en el cuenco, se puede identificar que el chorro se divide al impactar con el lecho en 2 corrientes de direcciones contrarias, luego, cada una de ellas se divide en 2 corrientes más, una que se aleja del chorro principal y otra que se dirige hacia el mismo, esta última responsable de originar zonas de vorticidad. Adicionalmente, se puede identificar la presencia de un resalto ahogado cerca al impacto del chorro y una zona de ondas superficiales aguas abajo del foso.
- En un análisis en planta, del movimiento y disipación del chorro en colchón de agua, por lo general, se puede presentar recirculación del flujo en las zonas laterales aledañas al impacto del chorro que originan vórtices de eje vertical. En cuanto al material procedente del foso de socavación, originado por el impacto del chorro, la mayor

cantidad de material se encuentra aguas abajo del foso, en la dirección del eje central del chorro.

- **CAPITULO 3**

- La relación funcional para el proceso de socavación aguas abajo del salto en esquí, contempla los siguientes parámetros: caudal unitario, carga total, radio de curvatura de la cuchara, ángulo del labio del salto en esquí, calado aguas abajo del foso, tamaño característico del material del lecho, distancia a la máxima profundidad de socavación, ancho de socavación, aceleración de la gravedad, densidad del agua y la densidad del sedimento.

$$Y_s = f(q, H, R, \theta', h_2, d_{50}, g, \rho_w, \rho_s)$$

- Las relación adimensional para la profundidad de socavación aguas abajo del salto en esquí, principalmente, relaciona los parámetros con la profundidad del colchón de agua.

$$\frac{Y_s}{h_2} = f\left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2}, \frac{R}{h_2}, \frac{d_{50}}{h_2}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \theta'\right)$$

- Las relación adimensional restringida para la profundidad de socavación aguas abajo del salto en esquí, involucra básicamente el caudal unitario (número de Froude), la carga y el diámetro característico del material del lecho:

$$\frac{Y_s}{h_2} = f\left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2}, \frac{d_{50}}{h_2}\right)$$

- Para el análisis de la información técnica existe se considera el número de Froude y la carga respecto a la profundidad del colchón:

$$\frac{Y_s}{h_2} = f \left(\frac{q}{\sqrt{gh_2^3}}, \frac{H}{h_2} \right)$$

- Dentro del análisis de información es importante considerar las particularidades de cada proyecto, las fórmulas obtenidas en base a datos de laboratorio generalmente representan el fenómeno particular que puede estar limitado a rangos de carga o caudal. Por tal motivo, se recomienda al momento de utilizar una formulación, establecer los rangos de aplicabilidad en función de las condiciones en las cuales fueron obtenidas.
- **CAPITULO 4**

En lo referente al análisis de la literatura técnica para las diferentes formas especiales del salto en esquí:

- De los tipos de salto en esquí, los más utilizados son los que disponen de deflectores (dentados) o con estrechamiento gradual de paredes, existiendo varios estudios relacionados con: su geometría, el foso de socavación, el alcance del chorro y la distribución de presiones. En cambio, para los saltos en esquí con deflector lateral y con umbral de altura variable, no existe suficiente investigación que permita generalizar el comportamiento de este tipo de estructuras.

En lo concerniente al análisis comparativo de la información técnica existente:

- De acuerdo al resumen que se presenta en la Tabla 8.2, se puede observar que el uso del salto en esquí con deflectores es común en presas de alturas que varían entre 60 y 135 m, mientras que los saltos con estrechamiento de paredes se han utilizado en presas más altas que oscilan entre 157 y 305 m.

Tabla 8.2: Resumen de las condiciones para el uso de los diferentes tipos de salto en esquí, según la literatura técnica recopilada

Tipo de salto en esquí especial	Años	Caudal (m ³ /s)	Alto de la presa (m)	Observaciones
Salto en esquí con deflectores (dentados)	1954-2012	1200 - 12400	60 - 135	-
Salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes	1986-2015*	3000 - 28000	157 - 305	-
Salto en esquí con estrechamiento lateral de un solo lado	1965-2012	1200 - 8100	60 - 220	Incluyen datos de las alternativas de disipación usadas en modelos (no usadas en el diseño final)
Salto en esquí con umbral de altura variable	1965-2013	1200 - 7079	36.3 - 60	Incluyen datos de las alternativas de disipación usadas en modelos (no usadas en el diseño final)

* Año de inicio de construcción del proyecto

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- De lo referente a los saltos en esquí con estrechamiento lateral de un solo lado y con umbral de altura variable, no se puede establecer un rango de aplicabilidad debido a que su uso ha sido limitado.

En lo que respecta a la síntesis de resultados teóricos y experimentales:

- El uso de deflectores (dientes) reduce el alcance del chorro, aumenta la superficie de impacto en el cauce y disminuye la profundidad de socavación, siendo ésta última, la ventaja frente a un salto en esquí sin estos dispositivos. Para caudales con períodos de retorno bajos, los deflectores disminuyen la trayectoria del chorro de manera más evidente. Cuando los deflectores se colocan alejados de los extremos, el flujo se expande presentando menor socavación. Finalmente, la forma transversal trapezoidal de los deflectores presenta menor posibilidad de cavitación en relación con los deflectores rectangulares.
- Para el salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes se destaca lo siguiente: la socavación del cauce se puede reducir de 1/3 a 2/3 respecto a un salto convencional, los ángulos de las napas superior e inferior varían de -10 a 45 grados, el número de Froude de aproximación puede encontrarse de 4 a 9.7, la relación de aspecto (l_c/b) es con mayor frecuencia de 1.5 a 1.8, el ángulo de contracción

(θ_c) varía de 8.5 a 13.5 grados y el valor de contracción (bc/b) es adecuado en el rango de 0.2 a 0.4, aproximadamente.

- Para el salto con estrechamiento de un solo lado (deflector lateral) se tiene lo siguiente: la finalidad principal es orientar el chorro, el ángulo del deflector ($\theta_c = 10$ a 30 grados) es la dimensión que más incide en el comportamiento del flujo (a mayor ángulo, mayor es la altura del chorro), la relación de contracción (bc/b) es mayor a 0.5 y la relación de aspecto (lc/b) es menor a 1.
 - En lo que respecta a estudios futuros por realizar, debido a la escasa disponibilidad de análisis referente a los saltos en esquí con umbral de altura variable, se recomienda la modelación física para investigar diferentes configuraciones geométricas que permitan alcanzar un mejor entendimiento del comportamiento del flujo en esta estructura.
- **CAPITULO 5**
 - El uso del salto en esquí como disipador de energía es una alternativa segura y económica, cuando las condiciones geológicas de la zona, características de la presa y características del flujo son las adecuadas, es decir, cuando el material del lecho sea roca, la presa sea alta, la pendiente de la rápida sea menor a 4V:1H, y cuando las velocidades y caudales de descarga sean altos.
 - Cuando el uso de un salto en esquí convencional no satisface todas las necesidades de disipación, es posible utilizar formas especiales del salto en esquí. La forma especial del salto en esquí dependerá tanto de la orientación del o los vertederos y de la presencia de cavitación en la estructura, como de las condiciones aguas abajo (ancho del cauce, estabilidad de las márgenes, socavación).
 - La disipación de energía se da principalmente por la interacción del chorro con el aire y por la interacción del chorro con el cauce aguas abajo. Ésta última, es la que disipa la mayor cantidad de energía ya que

el chorro impacta el colchón y seguidamente el lecho del cauce, produciendo la fractura de la roca y la consecuente socavación hasta el punto de equilibrio, en el que la potencia del chorro es menor a la necesaria para producir este fenómeno.

En lo que respecta al dimensionamiento de saltos en esquí al pie de una presa:

- Para el diseño de saltos en esquí convencionales es necesario definir principalmente: el radio del cucharón, ya que incide en la longitud del mismo y en la distribución de presiones; el ángulo de salida, ya que afecta el alcance del chorro y la profundidad de socavación; la elevación del fondo del cucharón (invert) y la elevación de la salida del salto en esquí, para prevenir que la estructura de disipación trabaje sumergida.
- Para el diseño de saltos en esquí con deflectores (dentados) es necesario definir: la forma de los deflectores, rectangular o trapezoidal; los ángulos de salida adecuados tanto del cucharón como del deflector, para disminuir posibles problemas de cavitación; las dimensiones del ancho, espaciamiento, radio, longitud y número de deflectores a utilizar.
- Para el diseño de saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes es necesario definir: el ángulo de salida tanto del cucharón como del chorro, ya que éstos definirán el alcance del mismo; el ángulo, la longitud y la relación de contracción adecuados, para evitar disturbios en el flujo; el perfil del flujo y el número de Froude para conocer las condiciones de salida del chorro.

En lo que respecta al análisis preliminar de los beneficios respecto de la disipación de energía – formación de los cuencos de socavación al pie de la presa:

- El salto en esquí con deflectores comparado con un salto en esquí convencional, este último con el mismo ángulo de salida de los deflectores, presenta las siguientes características:

Tabla 8.3: Comparación de las condiciones de socavación entre un salto en esquí convencional y un salto es esquí con deflectores

Tipo de salto en esquí	Alcance	Profundidad de socavación máxima	Superficie de socavación	Volumen de socavación	Forma del foso de socavación
Salto en esquí convencional	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	Rectangular
Salto en esquí con deflectores (dentado)	Menor	Menor	Menor	Menor	Ovalado / Redondo

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- El salto en esquí con estrechamiento gradual de paredes comparado con un salto en esquí convencional, presenta una menor socavación y una forma de su foso ovalado.

• CAPITULO 6

En cuanto a las consideraciones para la selección del tipo de salto en esquí:

- El uso del salto en esquí convencional, como disipador de energía, es una alternativa económica por su facilidad constructiva y su requerimiento mínimo de mantenimiento, siempre y cuando se cumplan las siguientes características de la presa y del cauce aguas abajo de la misma: la presa debe ser alta (aproximadamente de 50m de altura), la velocidad en la rápida debe superar los 20 m/s, el nivel aguas abajo debe ser inferior al nivel del labio del cucharón, el cauce aguas abajo debe estar compuesto por roca y ser lo suficientemente ancho para captar el chorro y no afectar las laderas.
- El salto en esquí con deflectores (dientes), es conveniente cuando se requiere una mayor disipación de energía que la que se obtiene con un salto en esquí convencional. Esta alternativa de disipación, a diferencia del salto en esquí convencional, es de mayor complejidad constructiva y requiere de mantenimiento más frecuente. Su uso es adecuado cuando la presa es alta (aproximadamente de 60 a 135m de altura) y cuando el sacrificar el alcance del chorro no afecte las obras anexas.

- El salto en esquí con estrechamiento de paredes es útil para direccionar el chorro a un lugar específico. Este tipo de salto en esquí es adecuado cuando la presa es muy alta (aproximadamente 157 a 305m de altura), el cauce es estrecho, las laderas son profundas y cuando no exista limitación en la zona de incidencia longitudinal del chorro debido a la forma alargada que adquiere en su trayectoria.

En cuanto a la evaluación de la pérdida de energía según el cuenco de socavación:

- El alcance del chorro, es importante, debido a que define el sitio donde se produce de la máxima profundidad de socavación en el cauce aguas abajo. Los factores que definen y afectan el alcance vertical como horizontal son: la distancia vertical entre el labio y el nivel aguas abajo, el ángulo de salida del cucharón, la velocidad del flujo a la salida y la resistencia del aire; ésta última adquiere importancia para velocidades del chorro mayores a 20 m/s, ya que reduce el alcance.
- La profundidad de socavación en el cauce aguas abajo de una presa con salto en esquí depende principalmente de las características de la presa (altura y geometría del cucharón), condiciones de operación, caudal por unidad de ancho y de las características del cauce aguas abajo de la presa (nivel aguas abajo y tipo de estrato rocoso)
- Para obtener profundidades de socavación empíricas lo más aproximadas a las profundidades que se pueden presentar en el proyecto en estudio, es necesario aplicar las ecuaciones empíricas según su origen, es decir basadas en observaciones de prototipos o modelos. Por esta razón se presenta a continuación la clasificación de las formulaciones de acuerdo a su aplicabilidad.

Tabla 8.4: Clasificación de las formulaciones de socavación según su aplicabilidad

CLASIFICACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA SOCAVACIÓN AL PIE DE PRESAS CON SALTO EN ESQUÍ		
PROTOTIPOS	MODELOS	PROTOTIPOS Y MODELOS
<ul style="list-style-type: none"> • Veronese (1937) • Chen (1963) • Damle A (1966) • Damle C (1966) • Taraimovich (1978) • INCYTH (1981) • Mason y Arumugam (1985)- Tabla 6.5 (12) • Yildiz y Uzucek (1996) • Bureau of Indian Standards (2010)- Tabla 6.5 (18) 	<ul style="list-style-type: none"> • Damle B (1966) • Mason y Arumugam (1985)- Tabla 6.5 (11) • Ghahfarokhi et al. (2008) 	<ul style="list-style-type: none"> • Schoklitsch (1932) • Martins (1973) • Machado (1980) • Liu (2002) • Liu (2005) • Bureau of Indian Standards (2010)- Tabla 6.5 (17)

Elaborado por: Toapaxi A., Jorge.

- La capacidad resistente del estrato rocoso frente a la incidencia de un chorro, puede medirse con el Índice de Erodabilidad. Este índice permite comparar la potencia límite que resiste el fondo del lecho con la potencia real del chorro, es decir, mientras la potencia del chorro sea mayor al umbral de erodabilidad del lecho, existirá socavación.
- Los saltos en esquí con deflectores o dientes son eficientes en reducir la profundidad, superficie y volumen de socavación con relación al salto en esquí convencional. Para cucharas relativamente angostas ($b/R_{def} < 1$), cuando se coloca un solo diente lo más eficiente es que éste ocupe 3/5 del ancho de la cuchara, ya que comparando con un salto en esquí convencional disminuye: la profundidad en 34%, la superficie de socavación en 39 %, el volumen de socavación un 51% y el alcance del chorro solo un 35%. En el caso en que se coloquen 2 o 3 dientes, éstos deben estar alejados de los muros laterales y distribuidos de manera uniforme para garantizar la eficiencia de los mismos.
- El salto en esquí con estrechamiento de paredes es efectivo para reducir la profundidad de socavación en comparación a un salto en esquí convencional. La reducción de la profundidad de socavación

puede ser entre 33.3% y 66.6% dependiendo del grado de contracción, es decir a mayor contracción la difusión será mayor y por ende la reducción de la profundidad de socavación será mayor. Adicionalmente, el foso de socavación será más alargado cuanto mayor sea la contracción.

En cuanto al diseño del cuenco pre-excavado:

- La construcción de un cuenco pre-excavado al pie de una presa reduce la producción de material socavado y es económicamente conveniente cuando el riesgo de ocurrencia de las crecidas, durante el período de vida útil de la presa, es alto. En lo que respecta al diseño del cuenco pre-excavado, se recomienda que la forma del mismo sea similar, en forma, al foso de socavación producido por el chorro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Annandale, G. (2006). Scour Technology-Mechanics and Engineering Practice. Denver, Colorado: McGraw-Hill.

Azmathullah, H., Ghani, A., & Azazi, N. (2009). "ANIFS - Based approach to predicting scour location of spillway". Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, 399-407.

Bollaert, E., & Schleiss, A. (2003). "Scour of rock due to the impact of plunging pool high velocity jets Part 1: A state-of-art review". Journal of Hydraulic Research, 1-14.

Bollaert, E., & Sheiss, A. (2005). "Physically Based Model for Evaluation of Rock Scour due to High Velocity Jet Impact". Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 1-13.

Bridge, J., & Demicco, R. (2008). Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits. New York: Cambridge University Press.

Bureau of Indian Standards. (2010). Criteria for Hydraulic Design of Bucket Type Energy Dissipators. India.

Bureau of Reclamation. (2007). Bureau of Reclamation - Diseño de Pequeñas Presas (Traducción 3era Edición Americana ed.). (E. Martínez, P. Batanero, I. Martínez, E. Martínez, & E. Gonzáles, Trads.) Madrid: Bellisco - Ediciones Técnicas y Científicas.

Casa, E. (2012). Estudio en modelo del cuenco de socavación al pie de los vertederos de excesos en la presa Toachi, Proyecto Hidroeléctrico Toachi - Pilatón. Quito: Universidad Central del Ecuador.

Castillo, L., & Carrillo, J. (2013). Scour estimation of the Paute-Cardenillo Dam. Cartagena, España.

Castro, M. (s.f.). Introducción a la hidráulica del flujo con superficie libre. Hidráulica II. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional del Ecuador.

Chanson, H. (2004). "Air-water flows in Water Engineering and Hydraulic Structures. Basic processes and metrology". En F. Yazadandoost, & J. Attari, Hydraulics of Dams and River Structures (págs. 3-15). London: Taylor & Francis Group.

Chanson, H. (1993). "Velocity measurments within high velocity air-water jets". Journal of Hydraulic Research, Vol 31, N°3 , 365-382.

Chanson, H. (2002). Hidráulica de Flujo en Canales Abiertos. Bogotá: McGRAW HILL.

ChenSheng, H., & Chen Minlin, L. G. (2004). Estructuras Hidráulicas. China: China Water Power Press.

Chow, V. T. (2004). Hidráulica de Canales Abiertos. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL.

Dávila, D. (2013). Estudio experimental sobre el alcance y la dirección del chorro a la salida de los vertederos de excesos de la presa Toachi, proyecto Toachi Pilatón. Quito: Universidad Central del Ecuador.

Depew, J. (2013). Douglas Dam releasing water due to recent heavy rains. Recuperado el 16 de 10 de 2013, de jeffersoncountypost.com: <http://jeffersoncountypost.com/?p=5553>

Dingman, S. L. (2009). Fluvial Hydarulics. New York: Oxford University Press.

Dodge, R., & Mefford, B. (1990). Hydraulic Model Study of Chilli Bar Dam Spillway Modifications. Denver-Colorado: Bureau of Reclamation, Denver Office.

Dong Jiang Slit-Bucket. (2005). Recuperado el 12 de 2013, de jpkc.ncwu.edu.cn: <http://jpkc.ncwu.edu.cn/slx/2/sltk/1302.jpg>

Douma, J. H. (1943). Discussion on open channel flow at high velocities, by L. Standish Hall, in Entrainment of air in flowing water: a symposium". Transactions, Vol 108, ASCE , 1462-1473.

Elevatorski, E. A. (1959). Hydraulic Energy Dissipators. New York, EEUU: McGRAW - HILL.

Ercicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., & Piroton, M. (2010). "Experimental investigation of the effect of flip bucket splitters on plunge pool geometry". Wasserwirtschaft, 108-110.

Ervin, D., & Flavey, H. (1987). "Behavior of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools". Paper 9123. Water Engineering Group, Proc. of Institution of Civil Engineers, Part 2 (83), 295-314.

Gago, O. (2005). Barragem Castelo Bode. Recuperado el 11 de 2013, de en.wikipedia.org: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Barragem_Castelo_Bode.JPG

George, R. (1980). Impinging Jets. Denver - Colorado: Engineering and Research Center - Water and Power Resources Service.

GFC Collection. (2013). Contra Dam With Spillways On Each Side, Arch Dam Of The Lake Lago Di Vogorno In The Valle Verzasca Valley, Ticino, Switzerland. Recuperado el 12 de 2013, de www.worldofstock.com: <http://www.worldofstock.com/stock-photos/contra-dam-with-spillways-on-each-side/BEN2552>

Ghahfarokhi, G., Van Gelder, P., & Vrijiling, J. (2008). "Probabilistic Description of Scour Hole Downstream of Flip bucket Spillway of Large Dams". ANCOLD Conference Technical Proceedings, (pág. 1). Holanda.

Golzari, F. (2004). "Effect of using dentate ski jump spillways on scouring profile". 2nd International Conference on Scour and Erosion-Singapore, 367-375.

González Fariñas, J. E. (2004). "Evaluación de trampolines con deflectores sobre la base del parámetro de socavación 'S' ". Ingeniería del Agua, Vol 11, Nº 4 , 397-409.

Guangzhao Dam in Guizhou, China. (2008). Recuperado el 11 de 2013, de en.wikipedia.org: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Guangzhao_Dam.jpg

Guo, J. (2012). "Recent Achievements in Hydraulic Research in China". China Institute of water Resources and Hydropower Research (IWHR), 485-505.

Hager, & Juon. (2000). "Flip bucket without and with deflectors". ASCE: Journal of Hydraulic Engineering. November , 841.

Hangen, N. (2000). Efficient Energy Dissipators (en Chino). Dalian: Dalian University of Technology Publishing House.

Heller, V., Hager, W., & Minor, H. (2005). "Ski Jump Hydraulics". Journal of Hydraulic Engineering, 344-355.

Hermosa, D. (2013). Estudio Experimental en Modelo Físico Sobre el Desarrollo del Cuenco de Socavación al pie de la Presa Toachi. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional del Ecuador.

Huang, Z., He, X., Zhu, H., & Zhong, Y. (2006). Slit Type Bucket and Characteristics of Hydrodynamic Pressure. Guangzhou: Water Resources and Hydropower Research Institute of Guangdong Province.

Huilca Tapia, D. A. (2013). Estudio experimental sobre el flujo en los vertederos de excesos y desagües de fondo de la Presa Toachi, Aprovechamiento hidroeléctrico Toachi-Pilatón. Quito: Universidad Central del Ecuador.

Huo, G. (2011). Shuibuya Dam. Recuperado el 12 de 2013, de www.skyscrapercity.com:
<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1527044&page=3>

Kerman, J., Fathi, H., Lashkarara, B., & Haghhipour, S. (2011). "Dynamic Pressure of Flip Bucket Jets". World applied Sciences Journal 12 (9) , 1448-1454.

Khatsuria, R. (2005). Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. New York: Marcel Dekker.

Kumar, C., & Sreeja, P. (2012). "Evaluation of selected equations for predicting scour downstream of ski-jump spillway using laboratory and field data". Engineering Geology. Elsevier B.V.

Laboratorio de Hidráulica de la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos (C.P.H) de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E). (2011). Cuernavaca, México.

Manso, P. (2006). Influence of pool geometry and induced flow patterns on rock scour by high velocity plunging jets. Thèse N°3430. Suiza: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Manso, P., Bollaert, E., & Schleiss, A. (2008). "Evaluation of high velocity plunging jet issuing characteristics as a basis for plunge pool analysis". Journal of Hydraulic Research, 147-157.

Martinerie, R., Boillat, J., Schleiss, A., Parvaresh, A., & Wohnlich, A. (2007). "Experimental Study of the Gated Spillway of the Shahryar Dam in Iran". Proceedings of 32nd Congress of IAHR - Italy, Theme C.

Mason, P. J. (09 de 1993). "Practical Guidelines for the design of flip buckets and plunge pools". Water Power and Dam Construction, 40-45.

Mervine, E. (2011). Verzasca Dam 3. Switzerland, June 2010. Recuperado el 12 de 2013, de blogs.agu.org: <http://blogs.agu.org/georneys/2011/07/05/a-swiss-fold/>

Mohan Das, M. (2008). Open Channel Flow. New Delhi: Prentice-Hall.

Orlik Dam. (s.f.). Recuperado el 11 de 2013, de www.en-tv-adams.wz.cz: http://www.en-tv-adams.wz.cz/orlik_dam.html

Pacific Gas & Electric Company (PG&E). (2013). Chili Bar Dam. Recuperado el 12 de 2013, de <http://www.waterboards.ca.gov>: http://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/water_quality_cert/chilibar_ferc2155.shtml

Pagliara, S., Hager, W., & Minor, H. (2004). Plunge Pool Scour in Prototype and Laboratory. En F. Yazandoost, & J. Attari, Hydraulics of Dams and River Structures (págs. 165-172). London: Tylor & Francis.

Palomino B., J. (2003). Diseño hidráulico de una rápida para el proyecto : construcción del canal principal de Fortaleza, distrito Congas, provincia Ocros, Región Ancash. Lima - Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Pérez, F. (2005). Oleaje en el vertedero de la presa Turner, San Diego County, California. Recuperado el 29 de 10 de 2013, de won.sdsu.edu: http://won.sdsu.edu/protected128/open_channel_hydraulics_110525_lecture013.html

Pettersson, K. (2012). Damages in the concrete lining in the spillway- The Höljes Dam. Recuperado el 18 de 10 de 2013, de Design of Aerators for Prevention of Cavitation - The Höljes Dam: http://www2.lwr.kth.se/Publikationer/PDF_Files/LWR_EX_12_03.pdf

Pfister, M., Lucas, J., & Hager, W. (2011). "Effect of pre-aerated approach flow on deflector-generated jets". 34th IAHR World Congress-Balance and Uncertainty.

Potter, M., & Wiggert, D. (2002). Mecánica de Fluídos. México D.F.: Thomson.

Republic of China Water Industry Standard. (2005). Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319 — 2005 (En chino). China.

Ripken, J., & Dahlin, W. (1972). Hydraulic Model Studies for the Gury Hydroelectric Project - Report on spillway cavitation damage. Minnesota: University of Minnesota.

Savic, L., Kuzmanovic, V., & Milovanovic, B. (2010). "Ski Jump Design". Water Management, 163 (WM10), 523-527.

Schleiss, A. (2002). "Scour evaluation in space and time - the challenge of dam designers". International Workshop on Rock Scour.

Schmocker, L., Pfister, M., Hager, W., & Minor, H.-E. (2008). "Aeration Characteristics of Ski Jump Jets". Journal of Hydraulic Engineering - ASCE, 90-97.

Shou-du, H., Han-sheng, L., & Han-gen, N. (2012). "Hydraulic calculation of slit type flip bucket with straight line sidewalls". Advances in Science and Technology of Water Resources. Vol 32 No.2. , 54.

Shuguang, L., & Zhengxiang, L. (1988). "Gravity-Affected Potential Flows Past Spillway Flip Bucket". Jornal of Hydraulic Engineering , 114 (4), 409-427.

Sotelo Ávila, G. (1999). Hidráulica General. México: Limusa S.A.

Sotelo, G. (2002). Hidráulica de Canales. México D.F.: UNAM - Facultad de Ingeniería.

Sotelo, G., & Valdez, I. I. (2004). "Régimen crítico en canales rectangulares de fondo curvo y sus aplicaciones". Ingeniería. Investigación y Tecnología. , V (3), 213-226.

Tropea, C., Yarin, A. L., & Foss, J. F. (2007). "Example of cavitation damage on a spillway. Part C/15 - Hydraulics". En C. Tropea, A. L. Yarin, & J. F. Foss, Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics (pág. 960). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.

U.S. Army Enginner Waterways Experiment Station. (1959). Prototype tests of spillway crest and flip bucket Pine Flat Dam, Kings RiverCalifornia. Mississippi: Corps Of Enginners.

United States Department of de Interior Bureau of Reclamation. (1953). Hydraulic studies of the ski-jump spillway for the Cleveland Dam - Greater Vancouver Water District - Vancouver, British Columbia, Canadá. Vancouver: Engineering Laboratories Branch.

Uribe, L. (s.f.). Características Presa Ralco. Recuperado el 11 de 2013, de www.siagua.org:

<http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/CaracteristicasPresasRalco.pdf>

Vischer, D. L., & Hager, W. H. (1995). Energy Dissipators. Rotterdam: A. A. Balkema.

Vista del aliviadero de la presa Longyang. (2013). Recuperado el 12 de 2013, de www.khl.com.cn:

<http://www.khl.com.cn/skhlgc/jsyy/webinfo/2013/06/1368581876357013.htm>

Waterways Experiment Station. (1988). Hydraulic Design Criteria (Vol. 1). Vicksburg-Mississippi, EEUU: Corps of Engineers.

Wen-ping, W., Zhang, X.-h., Zhang, H.-l., & Tian, J.-n. (2006). "Shock action of the jet flow from slit-type buckets on the bottom of the trough". Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics (CCSH).

Whittaker, J., & Schieiss, A. (1984). "Scour related to energy dissipators for high head structures". Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie and Galziologie, N°73 .

Wilhelms, S. G. (2005). "Bubbles and waves description of self-aerated spillway flow". Journal of Hydraulic Research, Vol.43, No. 5., 523.

ANEXOS

**ANEXO 1: HOJA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE SALTOS EN
ESQUÍ**