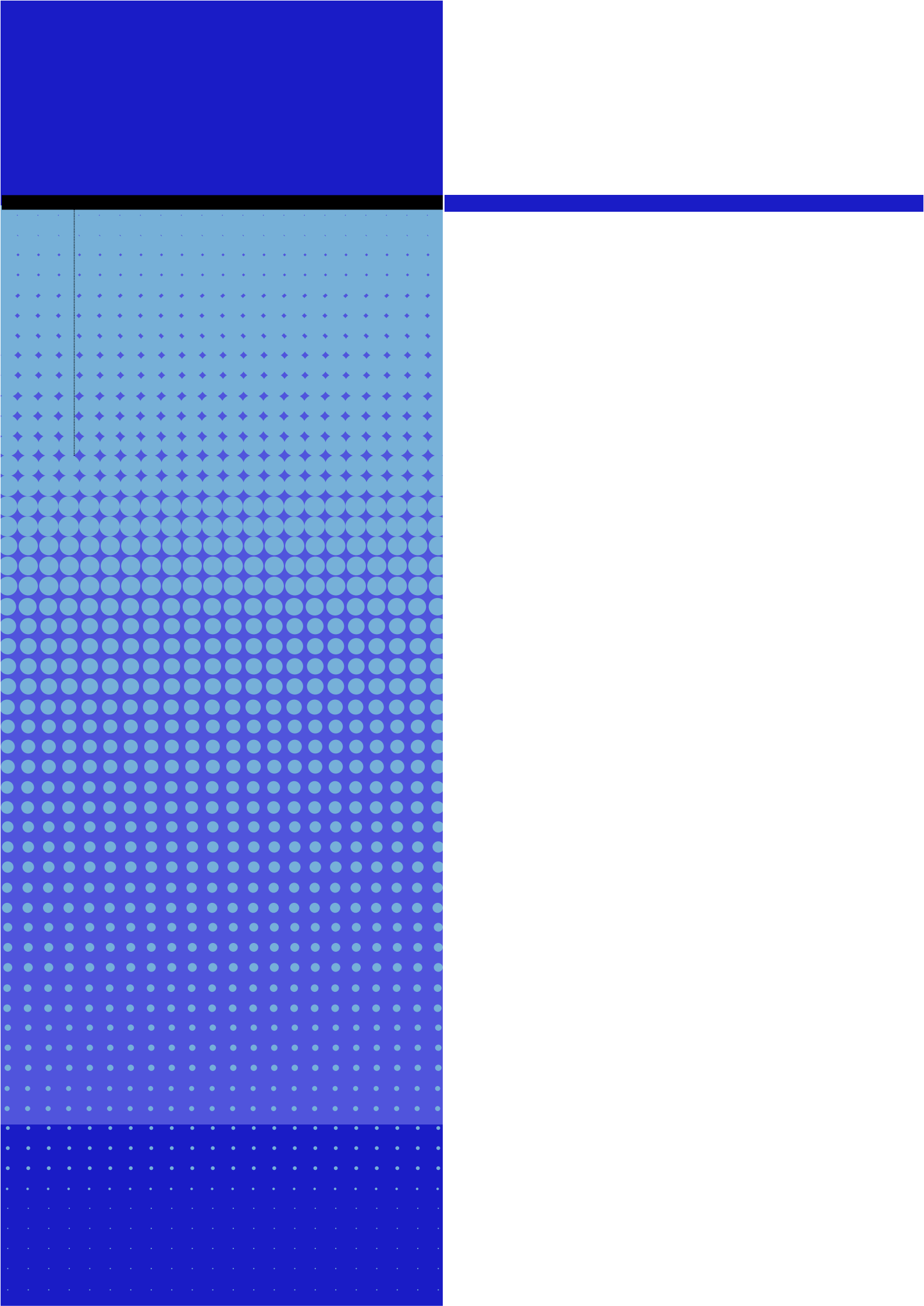




Manual de diseño y construcción de pequeñas presas

Volumen 2: Aspectos Estructurales. 2026.





Manual de diseño y construcción de pequeñas presas

Volumen 2: Aspectos Estructurales. 2026

MANUAL DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PEQUEÑAS PRESAS
VOLUMEN 2: ASPECTOS ESTRUCTURALES
2026

MINISTERIO DE AMBIENTE

MINISTRO:

Prof. Edgardo Ortuño

SUBSECRETARIO:

Ing. Agr. Óscar Caputi

DIRECTORA GENERAL DE SECRETARÍA:

Dra. Alejandra Varela

DIRECTORA NACIONAL DE AGUAS (DINAGUA):

Ing. Teresa Sastre

DIRECTOR NACIONAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL (DINACEA):

Ing. Quím. Alejandro Nario

DIRECTORA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO (DINACC):

Soc. María Fernanda Souza

DIRECTORA NACIONAL DE BIODIVERSIDAD Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS (DINABISE):

Mag. Verónica Piñeiro

FICHA TÉCNICA

PERSONAL TÉCNICO PARTICIPANTE EN EL PROYECTO

Autor

Ing. Javier Algorta

Revisores

Ing. Raúl López Pairet (Sigmaplus s.r.l.)

Dr. Ing. Adrián Morales (iPresas Risk Analysis)

DINAGUA - Ministerio de Ambiente

Ing. Mario Bustamante

Ing. Fernando Díaz

Ing. Micaela Luzardo

Ing. Ignacio Ríos

Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/manual-diseno-construccion-pequenas-presas>

Primera edición, 2026

253 pp. A4

© Ministerio de Ambiente - DINAGUA

Montevideo, Uruguay



Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas
Uruguay



Manual de diseño y construcción de pequeñas presas

Volumen 2: Aspectos Estructurales.
2026



**Ministerio
de Ambiente**

Presentación

En 2011, el entonces Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, a través de la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA), publicó el primer volumen del Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas. Aquel volumen abordó los aspectos hidrológicos, hidráulicos y de viabilidad de los emprendimientos, y se transformó rápidamente en una referencia técnica de uso extendido en el medio rural uruguayo y en la formación de profesionales.

El presente segundo volumen completa la obra abordando los aspectos estructurales: diseño conceptual y dimensionamiento del cuerpo de presa, filtros y drenajes, obras anexas, calidad de la construcción, instrumentación, gestión de la seguridad en la operación y puesta fuera de servicio. Se publica como guía técnica de buenas prácticas, en línea con el carácter del primer volumen, reconociendo la diversidad de tipologías, escalas y condiciones de emplazamiento de las presas uruguayas.

En los últimos años, el país ha avanzado progresivamente en el fortalecimiento de las capacidades técnicas e institucionales vinculadas a la gestión del agua y a la seguridad de las obras hidráulicas, mediante instancias de cooperación técnica, capacitación e intercambio entre organismos públicos, instituciones académicas y especialistas nacionales e internacionales. Este proceso ha permitido incorporar nuevas herramientas y criterios de análisis, así como promover una visión gradual e integrada de la seguridad de presas, adaptada a las particularidades productivas, ambientales e institucionales del Uruguay.

Este Manual está dirigido principalmente a las presas de materiales sueltos del medio rural del país, en su mayoría destinadas a riego, y constituye también referencia útil para presas de mayor porte que comparten esa tipología, así como para presas con destinos distintos del riego en aquellos capítulos que les correspondan.

La Dirección Nacional de Aguas reconoce el aporte profesional de quienes participaron en la elaboración del Manual, en particular de su autor, del equipo de DINAGUA y de los revisores externos nacionales e internacionales, cuyas observaciones y sugerencias contribuyeron a la calidad del documento.

Confiamos en que este Manual contribuya a elevar la calidad técnica de los proyectos de presas en el país y a fortalecer la tan necesaria cultura de seguridad de presas.

Ing. Teresa Sastre.
Directora Nacional de Aguas
Ministerio de Ambiente

Prólogo

El Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas, en sus dos volúmenes, busca ser una referencia técnica práctica para los profesionales que trabajan en el diseño, la construcción, la operación y la eventual puesta fuera de servicio de presas de pequeño y mediano porte en el Uruguay. El primer volumen, publicado por DINAGUA en 2011 como resultado de un trabajo desarrollado durante varios años por el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, abordó los aspectos hidrológicos y de viabilidad. Este segundo volumen completa la obra con los aspectos estructurales y operativos.

El Manual se publica como guía técnica de buenas prácticas, no como reglamento. Las recomendaciones se respaldan, en la medida de lo posible, en referencias internacionales reconocidas y en normativa uruguaya vigente, y cuando una recomendación queda librada al criterio del proyectista o de la Autoridad Competente, así se indica.

El alcance preciso del Manual y la articulación con el primer volumen se desarrollan en la Sección 1.1. Las observaciones, correcciones y propuestas de mejora que los profesionales formulen sobre este texto serán bienvenidas y consideradas en futuras actualizaciones.

Ing. Javier Algorta

Agradecimientos

La elaboración de este Manual contó con el aporte profesional de un conjunto de personas e instituciones a las que es justo reconocer.

En primer término, a la Ing. Teresa Sastre, Directora Nacional de Aguas, por el respaldo institucional brindado durante todo el proceso, y al equipo de DINAGUA, tanto de la Unidad Técnica de Presas como de las oficinas regionales distribuidas en el interior del país. En particular, al Ing. Mario Bustamante, a cargo de la UTP, por impulsar esta iniciativa, y a los/las ingenieros/as Micaela Luzardo, Ignacio Ríos y Fernando Díaz, cuyos aportes, observaciones y experiencia práctica contribuyeron a orientar y enriquecer el contenido del Manual. Junto con este equipo se realizaron visitas a obras en construcción y a laboratorios de suelos del medio profesional, instancias que aportaron contexto técnico y operativo a la redacción.

A los ingenieros de la comunidad profesional que fueron entrevistados en las primeras etapas del trabajo aportando experiencia práctica y observaciones técnicas: Jorge Rodríguez Guillén, Julio Patrone, Hugo Eguía, Rodrigo Gorriarán, Luis Teixeira y Raúl López Pairet.

Al ingeniero Raúl López Pairet en particular y a su equipo profesional de Sigmaplus S.R.L., por las observaciones detalladas que formularon sobre dos versiones intermedias del Manual y que contribuyeron de manera sustantiva a su contenido, alcance, coherencia y calidad final.

Al Dr. Ing. Adrián Morales, Socio Director de la consultora iPresas Risk Analysis, de España, por la revisión técnica del borrador final, cuyas observaciones contribuyeron a contrastar criterios y profundidad del texto con la práctica internacional.

Los errores u omisiones que pudieran subsistir son responsabilidad del autor.

Nota metodológica

Durante la elaboración y revisión del presente Manual se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo a tareas de edición, control de consistencia, revisión bibliográfica y documental, y mejora de redacción. La responsabilidad por los contenidos y criterios técnicos adoptados corresponde exclusivamente al autor.

Cómo usar este Manual

Este Manual se organiza siguiendo el ciclo de vida de una presa de materiales sueltos: el Capítulo 1 establece el marco legal e institucional y los principios generales de la gestión de la seguridad. El Capítulo 2 desarrolla los estudios de viabilidad y planificación. Los Capítulos 3 y 4 abordan el diseño del terraplén y de las obras anexas e hidráulicas. El Capítulo 5 cubre la construcción y el aseguramiento de la calidad. El Capítulo 6 desarrolla la operación, vigilancia y gestión de la seguridad. El Capítulo 7 trata la puesta fuera de servicio. Los Anexos amplían determinados aspectos específicos mediante ejemplos, criterios complementarios y material de apoyo. Las referencias técnicas, normativas e institucionales utilizadas se presentan al final del documento.

El Manual constituye una guía técnica de buenas prácticas, no un reglamento. Por esa razón, las recomendaciones se formulan con verbos no imperativos como "se recomienda", "resulta recomendable" o "debería", reservando el verbo "debe" para condiciones físicas o matemáticas estrictamente necesarias. Cuando la decisión queda a criterio del proyectista o de la Autoridad Competente, así se indica explícitamente.

Los criterios y recomendaciones técnicas se gradúan en función de la categoría de Daño Potencial Asociado (DPA) de la presa, evitando demandas desproporcionadas a obras de bajo potencial de daño y reforzando los criterios aplicables a aquellas cuyas consecuencias potenciales ante una eventual rotura son mayores.

El proyecto se articula con los criterios hidrológico-hidráulicos desarrollados en el Volumen 1 de este Manual.

Siglas y Acrónimos

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte)
API	Área Potencial de Inundación
ARNR	Autoridad Reguladora Nacional en Radioprotección (Uruguay)
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASDSO	Association of State Dam Safety Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials (ASTM International)
BFN	Base Fija de Nivelación
CECOED	Centro Coordinador de Emergencias Departamentales (Uruguay)
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association (Reino Unido)
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DINAGUA	Dirección Nacional de Aguas (Uruguay)
DINAMA	Dirección Nacional de Medio Ambiente (Uruguay) [organismo previo a la actual estructura del MA]
DPA	Daño Potencial Asociado
DPSH	Dynamic Probing Super Heavy (ensayo de penetración dinámica super pesada)
EM	Engineer Manual (manual técnico del U.S. Army Corps of Engineers)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FEMA	Federal Emergency Management Agency (Estados Unidos)
ICOLD	International Commission on Large Dams (Comisión Internacional de Grandes Presas)
IDEuy	Infraestructura de Datos Espaciales del Uruguay
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
MDT	Modelo Digital de Terreno
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería (Uruguay)
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (España)
NRCS	Natural Resources Conservation Service (USDA, Estados Unidos)
PADE	Plan de Acción Durante Emergencias
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens (Brasil)
PSI	Porcentaje de Sodio Intercambiable
SEED	Safety Evaluation of Existing Dams (USBR, 1983 — manual de referencia)

SINAE	Sistema Nacional de Emergencias (Uruguay)
SNAP	Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Uruguay)
SPANCOLD	Comité Nacional Español de Grandes Presas
SPT	Standard Penetration Test (Ensayo de Penetración Estándar)
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
TR	Tiempo de Retorno (período de retorno, en años)
UL	Unidades Lugeon
UNIT	Instituto Uruguayo de Normas Técnicas
USACE	U.S. Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation
USDA	United States Department of Agriculture
ZAS	Zona de Auto Salvamento

CONTENIDO

Presentación	i
Prólogo	ii
Agradecimientos	iii
Cómo usar este Manual.....	iv
Siglas y Acrónimos	v
1 INTRODUCCIÓN Y MARCO LEGAL	1
1.1 Objeto y alcance del Manual	1
1.2 Marco normativo e institucional.....	2
1.3 Clasificación por Daño Potencial Asociado (DPA).....	3
1.4 Gestión Integral de la Seguridad	7
2 ESTUDIOS DE VIABILIDAD Y PLANIFICACIÓN	11
2.1 Estudios preliminares	11
2.2 Evaluación preliminar del Daño Potencial Asociado y consideraciones de riesgo	12
2.3 Estudios hidrológico-hidráulicos	12
2.4 Topografía de precisión y modelación del almacenamiento	14
2.5 Metodología de Investigación Geológica y Geotécnica.....	15
2.6 Planificación de Programas de Ensayos según el Objetivo	21
3 DISEÑO DE LA PRESA	25
3.1 Principios generales de diseño de presas de materiales sueltos	25
3.2 Tipologías Estructurales	28
3.3 Definición Geométrica y Perfil Exterior.....	32
3.4 Elementos de Estanqueidad y Control de Filtraciones.....	37
3.5 Análisis de Estabilidad y Factores de Seguridad	51
3.6 Protección de Taludes y Revestimientos	54
3.7 Instrumentación y auscultación de la presa	63
4 OBRAS ANEXAS E HIDRÁULICAS.....	70
4.1 Introducción.....	70
4.2 Vertederos	70
4.3 Obras de descarga	87
4.4 Tomas.....	91
4.5 Conducciones enterradas	96
4.6 Válvulas y compuertas.....	103
4.7 Hidráulica en conducciones de descarga	105

4.8	Transiciones hidráulicas	106
4.9	Descarga final y disipación de energía	109
4.10	Operación, inspección y mantenimiento	112
5	CONSTRUCCIÓN Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD	113
5.1	Planificación y programación de la obra.....	113
5.2	Manejo del cauce durante la construcción	114
5.3	Preparación y tratamiento de la fundación	118
5.4	Control de Préstamos.....	122
5.5	Colocación y Compactación de Materiales	125
5.6	Obras complementarias y estructuras asociadas.....	141
5.7	Instrumentación durante la construcción	150
5.8	Organización y servicios de obra	154
5.9	Documentación Conforme a Obra.....	158
5.10	Primer llenado del embalse.....	161
6	GESTIÓN DE LA SEGURIDAD EN LA OPERACIÓN.....	165
6.1	Enfoque general	165
6.2	Vigilancia de la presa.....	166
6.3	Programa de monitoreo y control	171
6.4	Operación y mantenimiento	175
6.5	Gestión de emergencias	180
6.6	Evaluación periódica de la seguridad	184
7	PUESTA FUERA DE SERVICIO	188
7.1	Introducción.....	188
7.2	Situaciones que justifican su análisis	188
7.3	Evaluación previa (inspección de campo)	189
7.4	Definición de la alternativa.....	190
7.5	Configuración de la solución.....	191
7.6	Ejecución de las obras.....	192
7.7	Seguimiento posterior	193
	ANEXOS.....	195
	Anexo A CLASIFICACIÓN DE PRESAS POR DAÑO POTENCIAL ASOCIADO (DPA)	196
A.1	Objeto, alcance y principios generales	196
A.2	Determinación del Área Potencial de Inundación y valoración de consecuencias	197
A.3	Categorías de Daño Potencial Asociado y orientación para la clasificación	200
A.4	Tratamiento de la incertidumbre y revisión de la clasificación.....	201

A.5	Consideraciones finales	202
Anexo B MODOS TÍPICOS DE FALLO EN PEQUEÑAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS.....		204
B.1	Propósito y alcance	204
B.2	Las cuatro familias de modos de fallo típicos	205
B.3	Tabla síntesis.....	209
B.4	Referencias para profundización	210
Anexo C EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO DE UN ENROCADO		211
C.1	Alcance.....	211
C.2	Datos del ejemplo.....	211
C.3	Estimación de la altura de ola.....	212
C.4	Cálculo preliminar del tamaño de roca	212
C.5	Comparación con referencias empíricas.....	213
C.6	Análisis de sensibilidad	214
C.7	Transición entre el terraplén y el enrocado.....	214
C.8	Comentarios finales	215
Anexo D INSTRUMENTACIÓN.....		217
D.1	Medida del nivel de embalse.....	217
D.2	Medida de caudal de filtraciones, drenajes y caudal ambiental.....	218
D.3	Medida de asentamientos	222
D.4	Medida del Nivel Piezométrico	224
Anexo E HIDRÁULICA DE CONDUCCIONES DE DESCARGA.....		227
E.1	Carga hidráulica.....	227
E.2	Pérdidas de carga	227
E.3	Coeficientes	228
E.4	Estimación de caudal.....	229
REFERENCIAS		230

1 INTRODUCCIÓN Y MARCO LEGAL

1.1 Objeto y alcance del Manual

Este Manual constituye una guía técnica de buenas prácticas para el diseño, la construcción, la operación y la puesta fuera de servicio de presas en el medio rural del Uruguay.

Su foco principal son las presas de materiales sueltos destinadas a riego, en su mayoría con bajas consecuencias previsibles en caso de rotura. Esta tipología constituye la inmensa mayoría de las presas del país y da sentido al título de "pequeñas presas" heredado del Volumen 1.

El término "pequeñas presas" utilizado en el presente Manual no debe interpretarse exclusivamente en función de los criterios geométricos empleados por ICOLD para definir las "Grandes Presas". El Manual aplica, en primer lugar, a la gran mayoría de las presas rurales uruguayas que quedan fuera de dicha categoría, correspondientes principalmente a presas de materiales sueltos destinadas a riego y otros usos agropecuarios.

Asimismo, el Manual puede utilizarse como referencia técnica para determinadas presas que ICOLD clasifica como "Grandes Presas" cuando, pese a superar parcialmente alguno de los umbrales geométricos utilizados en dicha clasificación —por ejemplo alturas algo superiores a 15 m—, mantienen características, complejidad y consecuencias potenciales comparables a las de las pequeñas presas rurales predominantes en el país.

Buena parte del contenido del Manual —en particular el relativo a fundaciones, obras hidráulicas, instrumentación, gestión de la seguridad y puesta fuera de servicio— podría resultar aplicable, en los aspectos pertinentes, a otras tipologías y usos de embalses de bajas consecuencias potenciales ante rotura, incluyendo abastecimiento de agua, abrevadero de ganado, generación hidroeléctrica, laminación de crecidas, reservas contra incendios y usos recreativos o paisajísticos.

En general, las condiciones sismotectónicas del Uruguay no requieren análisis sísmicos específicos para pequeñas presas de las características contempladas en el presente Manual. No obstante, esta condición debería evaluarse en cada caso, particularmente en emplazamientos próximos a estructuras geológicas singulares o cuando las características de la obra así lo ameriten, recurriendo en tales situaciones a prácticas internacionales reconocidas en la materia, incluyendo los criterios

desarrollados por ICOLD para la selección de parámetros sísmicos y el diseño frente a movimientos sísmicos del terreno [1; 2; 3].

Asimismo, debido a las condiciones climáticas predominantes en el país, las cargas originadas por hielo no constituyen normalmente una acción de diseño relevante para las presas consideradas en este Manual, por lo que no se desarrollan criterios específicos asociados a este fenómeno.

Lo anterior no excluye la necesidad de considerar, cuando corresponda, otros factores ambientales o hidrológicos relevantes para el diseño, operación y seguridad de la presa, los cuales se abordan en distintas secciones del presente Manual y del Volumen 1 asociado.

1.2 Marco normativo e institucional.

El régimen jurídico uruguayo establece que las aguas superficiales y subterráneas integran el dominio público estatal, en el marco de lo dispuesto por el artículo 47 de la Constitución de la República [4] y su reglamentación mediante la Ley de Política Nacional de Aguas [5]. Dicho marco consagra el carácter público del recurso hídrico, su subordinación al interés general y la obligación de gestión sustentable.

El Código de Aguas [6] constituye el cuerpo normativo básico en materia de aprovechamiento y uso del recurso, estableciendo el régimen de permisos y concesiones, así como la competencia del Poder Ejecutivo para supervisar, vigilar y regular las obras relativas al estudio, captación, uso y evacuación de las aguas. En este contexto, toda obra de embalse requiere autorización administrativa previa.

En materia de riego con destino agrario, la Ley 16.858 [7] y su reglamentación establecen el marco específico para el desarrollo de obras de almacenamiento y aprovechamiento de agua con fines productivos. Las modificaciones posteriores al régimen de riego incorporaron además instrumentos orientados a facilitar emprendimientos multiprediales y esquemas asociativos de almacenamiento y distribución de agua para riego. Asimismo, el régimen de promoción de inversiones y los instrumentos asociados a la Comisión de Aplicación de la Ley de Inversiones (COMAP) han contribuido al desarrollo de infraestructura hidráulica vinculada al riego y al almacenamiento de agua.

El Decreto 123/99 [8] introdujo una clasificación de las obras de almacenamiento en función de parámetros geométricos e hidrológicos, diferenciando tajamares y represas según altura, volumen embalsado y área de cuenca de aporte. Esta clasificación tiene efectos administrativos y procedimentales, aunque no establece criterios técnicos específicos de seguridad estructural.

Asimismo, el régimen de Evaluación de Impacto Ambiental establecido por la Ley 16.466 [9] y reglamentado por el Decreto 349/005 [10] prevé la exigencia de Autorización Ambiental Previa para determinadas presas, según su capacidad de embalse u otras características del proyecto.

Por otra parte, el Decreto 368/018 [11] reglamenta la obligación de asegurar la preservación de caudales ambientales en los cursos de agua intervenidos, estableciendo condiciones técnicas que deben ser consideradas en el diseño y operación de las obras de embalse. Los criterios metodológicos para la determinación, monitoreo y gestión de los caudales ambientales se desarrollan en la Guía Metodológica de Caudales Ambientales [12] elaborada por DINAGUA.

En el ámbito institucional, el país cuenta asimismo con instancias técnicas de coordinación interinstitucional en materia de seguridad de presas, como el Comité Nacional de Seguridad de Represas [13], de carácter consultivo y no vinculante.

El marco vigente regula la autorización administrativa de las obras y la gestión del recurso hídrico, pero no establece criterios técnicos mínimos de diseño, construcción y control de seguridad estructural para pequeñas presas ni un esquema homogéneo de exigencias técnicas graduadas según consecuencias.

El presente Manual viene a subsanar parcialmente esa carencia, proponiendo criterios técnicos graduados según el Daño Potencial Asociado, adoptando como referencia estándares técnicos internacionalmente reconocidos en materia de ingeniería de presas y gestión de la seguridad, adaptándolos a la realidad productiva, institucional y ambiental del país. Su finalidad es complementar el marco existente mediante la definición de lineamientos técnicos mínimos que permitan uniformizar criterios y fortalecer la seguridad de estas obras.

1.3 Clasificación por Daño Potencial Asociado (DPA)

1.3.1 Principios y alcance conceptual

El Estado, en el ámbito del Ministerio de Ambiente, actúa como regulador y fiscalizador técnico de las presas, promoviendo que estas infraestructuras no generen consecuencias inaceptables para la sociedad, los bienes o el ambiente ante una eventual falla. A nivel internacional, uno de los principios fundamentales de la seguridad de presas es que la responsabilidad primaria por la seguridad de la obra recae en su Titular [14, Cap. 2.3]. En consecuencia, corresponde a éste asegurar que el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento se ejecuten por profesionales y equipos técnicos con las competencias necesarias.

Con el fin de adecuar el nivel de análisis y las exigencias técnicas a las consecuencias potenciales de una eventual falla, este Manual adopta la clasificación por Daño Potencial Asociado (DPA) como criterio para graduar las recomendaciones y requisitos aplicables a cada obra, conforme a lo desarrollado en los capítulos y anexos correspondientes.

El DPA se define como una clasificación basada en las consecuencias potenciales de la falla hipotética de una presa, considerando los impactos a personas, bienes, infraestructuras, servicios esenciales, actividades productivas y valores ambientales que podrían verse afectados, en línea con los criterios establecidos en la Guía Técnica de Clasificación de Presas del Ministerio para la Transición Ecológica de España [\[15\]](#).

Esta clasificación no evalúa la probabilidad de falla ni el estado actual de la estructura, y por tanto no debe confundirse con el concepto de riesgo, que en términos técnicos comprende la combinación de probabilidad de ocurrencia y magnitud de sus consecuencias. El DPA considera únicamente esta última dimensión, constituyendo una herramienta de ordenamiento inicial basada en consecuencias.

En consecuencia, una presa en excelente estado estructural puede corresponder a una categoría de DPA Alto si las consecuencias potenciales de una falla fueran significativas; del mismo modo, una presa con deficiencias constructivas podría corresponder a DPA Bajo si las consecuencias aguas abajo fueran limitadas. Ambas dimensiones deben analizarse en ámbitos técnicos distintos.

1.3.2 Categorías de Daño Potencial Asociado

Antes del diseño de detalle o de la autorización administrativa de una presa, se recomienda realizar una evaluación formal del DPA, conforme a los principios y criterios establecidos en este Manual.

Dicha evaluación debería incluir, según corresponda al nivel de análisis adoptado, la identificación y evaluación de:

- El Área Potencial de Inundación (API) aguas abajo ante un escenario de falla;
- Los elementos expuestos dentro de dicha área;
- Los posibles daños directos (afectación física de viviendas, infraestructuras, bienes, actividades productivas y recursos ambientales);
- Los posibles daños indirectos, tales como la interrupción de servicios esenciales (agua potable, energía, comunicaciones, transporte) y otras consecuencias socioeconómicas derivadas.

La evaluación debería considerar el concepto de daño incremental, entendido como la diferencia entre los daños producidos por la onda de rotura de la presa y los que ocurrirían por el paso de la misma crecida sin rotura [[15](#); [16](#)].

Posteriormente a la evaluación de los factores relevantes, la presa será clasificada en una de las siguientes categorías:

DPA Bajo: corresponde a obras cuya falla no causaría potencial pérdida de vidas humanas ni daños relevantes a infraestructuras, servicios esenciales, actividades económicas o recursos ambientales.

DPA Medio: corresponde a obras cuya falla no causaría potencial pérdida de vidas humanas, pero podría ocasionar daños de alcance local a infraestructuras, servicios, actividades económicas o recursos ambientales.

DPA Alto: corresponde a obras cuya falla causaría potencial pérdida de vidas humanas, así como daños graves a infraestructuras principales, servicios esenciales, actividades económicas relevantes o recursos ambientales significativos.

La presencia de personas potencialmente expuestas dentro del Área Potencial de Inundación constituye criterio suficiente para la asignación de la categoría de DPA Alto, aun cuando otros indicadores de consecuencias resulten limitados [[17](#); [15](#)].

La graduación de recomendaciones técnicas establecidas en el presente Manual se realizará en función de la Categoría de DPA asignada.

1.3.3 Metodología para la clasificación

Los criterios generales para la determinación y justificación del DPA se desarrollan en el Anexo A y se recomienda que sean aplicados por profesionales competentes.

En términos generales, el procedimiento comprende la estimación del Área Potencial de Inundación ante un escenario de falla, la identificación de vulnerabilidades presentes dentro de dicha área y la asignación de la categoría correspondiente conforme a los criterios definidos. La determinación del DPA puede sustentarse en distintos niveles de análisis técnico, desde procedimientos simplificados hasta estudios hidráulicos de mayor detalle, en función de las características de la obra, de las consecuencias potenciales consideradas y del grado de incertidumbre existente. En caso de duda razonable respecto de la categoría resultante, corresponde adoptar criterios conservadores o profundizar los estudios realizados.

La gestión de la seguridad de presas evoluciona continuamente incorporando nuevos enfoques para la evaluación de amenazas, vulnerabilidades y consecuencias potenciales. En particular, las metodologías de análisis tienden a considerar de forma

cada vez más integrada los posibles impactos sobre personas, bienes, actividades productivas, servicios esenciales, infraestructuras críticas y valores ambientales. Por esta razón, los criterios y ejemplos incluidos en este Manual no pretenden limitar la adopción futura de metodologías complementarias o más avanzadas que la Autoridad Competente pueda establecer mediante reglamentaciones, instructivos o lineamientos específicos.

1.3.4 Enfoque progresivo de gestión del riesgo

El enfoque moderno de seguridad de presas se basa en la gestión del riesgo, entendido como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de eventos adversos y sus consecuencias. En el presente Manual se adopta, como primer nivel de aproximación, la clasificación de las presas en función de su DPA, la cual permite ordenar el conjunto de obras y establecer criterios de exigencia acordes a la magnitud de las consecuencias potenciales.

En este sentido, la clasificación por DPA puede ser utilizada como una primera herramienta de tamizado, a partir de la cual los organismos competentes podrán focalizar y profundizar en las exigencias de diseño, construcción, operación y control, con el objetivo de reducir el riesgo en aquellas presas de mayores consecuencias potenciales.

Por su parte, los titulares de las presas podrán emplear esta clasificación como un criterio orientador para asignar recursos de manera más eficiente, priorizando intervenciones, mejoras y tareas de mantenimiento en función de la magnitud de las consecuencias asociadas a una eventual falla, y complementando, cuando corresponda, con evaluaciones más específicas de los procesos y factores que inciden en la probabilidad de falla.

En etapas posteriores, y en particular para presas de mayor relevancia o con problemáticas específicas, resulta recomendable complementar este enfoque mediante evaluaciones que consideren, al menos de forma cualitativa, la probabilidad de ocurrencia de los principales modos de fallo identificados (tales como sobrepaso, erosión interna, inestabilidad de taludes o fallas en conducciones, ver Anexo B), con el fin de priorizar acciones de intervención, mantenimiento o mejora.

Este enfoque progresivo resulta particularmente adecuado en contextos donde existe un número elevado de presas y una limitada disponibilidad de información, permitiendo avanzar de manera gradual hacia esquemas de gestión del riesgo más completos. Como criterio operativo general, el nivel de estudios técnicos, controles constructivos, vigilancia en operación, instrumentación, documentación del proyecto

y controles durante la operación y la eventual puesta fuera de servicio debería guardar una relación proporcional con la categoría de DPA asignada a la presa, evitando exigencias desproporcionadas a obras de bajo DPA y reforzando los requisitos sobre aquellas cuyas consecuencias potenciales son mayores.

Este enfoque resulta consistente con los principios internacionales de gestión informada por el riesgo (Risk-Informed Decision Making, RIDM) promovidos por organismos como USACE, USBR e ICOLD [14; 16]. Para presas de DPA Medio y Alto, así como para aquellas que presenten problemáticas específicas, resulta recomendable complementar la clasificación por DPA mediante evaluaciones más detalladas de los principales modos de fallo identificados, incluyendo metodologías tales como Potential Failure Modes Analysis (PFMA) o Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), ampliamente utilizadas en la práctica internacional de seguridad de presas [18].

1.4 Gestión Integral de la Seguridad

La seguridad de una presa debe entenderse como un proceso continuo que abarca todas las fases de su ciclo de vida, desde la planificación inicial hasta su eventual puesta fuera de servicio.

La clasificación por DPA determina la graduación de los requerimientos técnicos de cada una de estas etapas, en función de las consecuencias potenciales asociadas a una eventual falla.

En forma complementaria, y de acuerdo con lo expuesto en la Sección 1.3.4, la gestión de la seguridad podrá incorporar progresivamente consideraciones vinculadas a la probabilidad de ocurrencia de los distintos modos de fallo, con el objetivo de reducir el riesgo de manera sistemática a lo largo de todo el ciclo de vida de la presa.

1.4.1 Fases del Ciclo de Vida de una Presa

Estudios de Viabilidad y Planificación

En esta etapa se identifica la necesidad del proyecto y se evalúa su viabilidad técnica, económica, ambiental y territorial. Comprende la recopilación de antecedentes y la realización de estudios preliminares, incluyendo aspectos topográficos, hidrológicos, geológicos, geotécnicos y ambientales, que permiten definir la conveniencia y factibilidad de la obra.

Asimismo, se desarrolla una primera conceptualización del proyecto y una clasificación preliminar según su DPA, identificándose los principales condicionantes y riesgos que deberán ser considerados en las etapas posteriores.

Diseño.

Se elaboran los planos y especificaciones técnicas que definen las características de la presa y sus obras asociadas. El diseño constituye la base para la contratación y ejecución de la obra y debe justificar los criterios adoptados en términos de funcionalidad y seguridad.

En particular, los criterios de diseño se orientan a prevenir o mitigar los principales modos de fallo identificados en la etapa anterior.

Construcción

Comprende la preparación del sitio, el manejo del cauce, la ejecución del terraplén y de las obras asociadas. Durante esta etapa se implementan controles de calidad que permiten verificar el cumplimiento de las especificaciones y detectar desvíos.

El aseguramiento de la calidad resulta fundamental para evitar defectos que puedan derivar en mecanismos de falla durante la operación. La etapa culmina con el primer llenado del embalse, durante el cual se verifica el comportamiento inicial de la presa y sus obras asociadas bajo condiciones reales de funcionamiento.

Operación y mantenimiento

Comprende la operación productiva de la presa y la gestión de su seguridad operativa durante toda su vida útil. Incluye el monitoreo de su comportamiento, la ejecución de tareas de mantenimiento, la realización de inspecciones periódicas, el registro sistemático de información y la evaluación continua de sus condiciones de seguridad.

Estas actividades contribuyen a la detección temprana de condiciones que puedan incrementar la probabilidad de falla, permitiendo la adopción oportuna de medidas correctivas. En esta etapa corresponde también la implementación y mantenimiento del Plan de Acción Durante Emergencias cuando resulte aplicable.

Puesta fuera de servicio

Comprende el conjunto de actividades de planificación y ejecución destinadas a dismantelar, remover o reconvertir la presa de manera segura, minimizando impactos ambientales y riesgos para la población, los bienes y las infraestructuras.

Las alternativas de intervención deberían considerar tanto la reducción de las consecuencias potenciales como la eliminación o mitigación de los mecanismos de falla remanentes, en línea con un enfoque integral de gestión del riesgo.

El esquema conceptual del ciclo de vida¹ de la presa se presenta en la Figura 1-1.

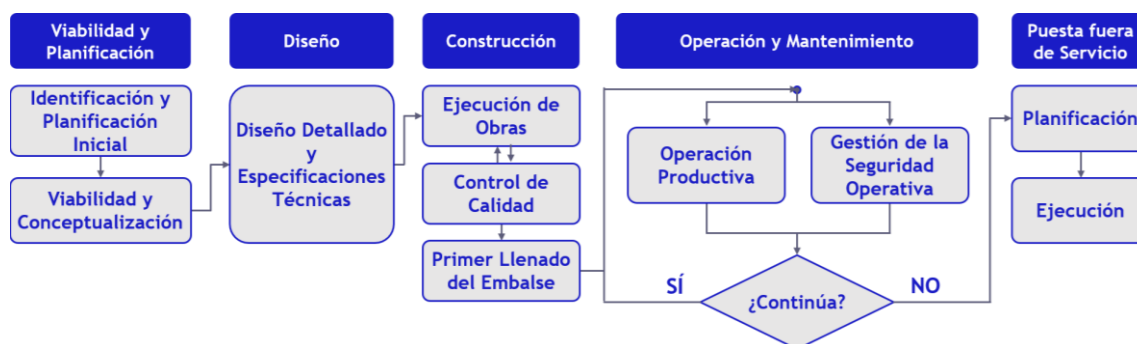


Figura 1-1. Fases del ciclo de vida de una presa

1.4.2 Contratos y responsabilidades del Titular

A los efectos del presente Manual, el término "Titular" refiere a la persona física o jurídica responsable de la presa y de su gestión ante la Autoridad Competente, independientemente del régimen de propiedad, tenencia o explotación asociado al predio o al aprovechamiento hidráulico.

Diversas guías internacionales de buenas prácticas en seguridad de presas, entre ellas las desarrolladas por el Banco Mundial [19], destacan que la responsabilidad del Titular no se limita a la construcción de la obra, sino que comprende también asegurar —en forma proporcionada a la complejidad y al DPA de la presa— condiciones adecuadas para su operación, mantenimiento, monitoreo y gestión de la seguridad durante todo el ciclo de vida. Para presas de DPA Medio y Alto el Banco Mundial también destaca las responsabilidades de la gestión en materia de seguros / cobertura de daños a terceros.

Una estrategia eficiente para lograr el adecuado desarrollo de las etapas asociadas al ciclo de vida de la presa consiste en la formalización de contratos específicos, cada uno con alcance y responsabilidades claramente definidos.

Primero, se recomienda un contrato de diseño que establezca las bases del proyecto y defina los criterios técnicos y constructivos correspondientes.

¹ El alcance administrativo de las autorizaciones, permisos y procedimientos de aprobación a lo largo de las fases del ciclo de vida —incluyendo el tratamiento institucional de la clasificación por DPA— excede el alcance del presente Volumen y se rige por el marco regulatorio vigente y los instructivos administrativos aplicables en cada caso. Eventuales esquemas escalonados de aprobación (por ejemplo, pre-clasificación previa al proyecto detallado, análoga a la usada en la Evaluación de Impacto Ambiental) pueden ser materia de futuras Resoluciones Ministeriales o instrumentos análogos.

A continuación, el contrato de obra regula la ejecución física de la presa conforme a lo proyectado, incluyendo la construcción de todas las obras previstas y la corrección de eventuales observaciones formuladas durante su recepción y puesta en servicio.

El contrato de supervisión permite el control y la verificación independiente del cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad durante la ejecución, así como la constatación de que las obras se ajustan al proyecto, a las especificaciones técnicas y a las instrucciones impartidas por la Dirección de Obra.

Antes de la finalización de la construcción se recomienda iniciar un contrato de monitoreo o de servicios post-construcción. Esto resulta fundamental para acompañar el primer llenado del embalse y asegurar la continuidad de las observaciones durante la etapa operativa, permitiendo evaluar el comportamiento de la presa y detectar tempranamente eventuales anomalías. De manera complementaria, el contrato de mantenimiento garantiza la conservación y funcionalidad de la presa a través de tareas preventivas y correctivas programadas.

Se recomienda que estos contratos incluyan cláusulas esenciales orientadas a asegurar la trazabilidad y el cumplimiento de los objetivos, tales como la responsabilidad profesional de los intervinientes, la definición precisa de entregables y certificaciones intermedias, y los procedimientos de control de calidad y garantía.

Las obligaciones del Titular ante la Autoridad Competente son las establecidas en la normativa vigente y en los instructivos administrativos aplicables en cada etapa del proyecto. Cuando corresponda, se recomienda prever también la actualización, ejercitación y mantenimiento del Plan de Acción Durante Emergencias, de modo de preservar la vigencia y efectividad de los procedimientos ante posibles incidentes.

Cuando el Titular cuente con personal técnico y equipamiento adecuados, puede asumir directamente alguna o todas las funciones asociadas a las etapas del ciclo de vida (diseño, construcción, supervisión, monitoreo y mantenimiento). En tales casos se recomienda que las funciones equivalentes a las descritas se asignen formalmente a profesionales o unidades organizativas independientes dentro de la estructura del propio Titular, preservando los mismos requisitos de trazabilidad, control de calidad y responsabilidad profesional que en el esquema de contratos a terceros. Como práctica complementaria, en función del DPA y de las consecuencias potenciales sobre terceros, se recomienda evaluar la contratación de seguros de responsabilidad civil que cubran eventuales daños derivados de una falla de la presa. La conveniencia, el alcance y los montos asegurables deberían analizarse en cada caso conforme a la categoría DPA, al entorno aguas abajo y al marco asegurador disponible en plaza.

2 ESTUDIOS DE VIABILIDAD Y PLANIFICACIÓN

2.1 Estudios preliminares

Lo primero que corresponde verificar es la viabilidad general del proyecto. Para ello se recomienda estudiar la demanda de agua, la capacidad de la cuenca para satisfacerla y las condiciones generales del sitio de emplazamiento.

Asimismo, en la etapa preliminar conviene identificar tempranamente las restricciones ambientales aplicables, verificando la eventual presencia de humedales de importancia ambiental en el área de embalse, en las zonas de préstamo o en el tramo afectado aguas abajo. Esta identificación oportuna permite evaluar posibles afectaciones y gestionar en tiempo y forma las autorizaciones y recaudos legales correspondientes, conforme al Decreto 228/025 [20].

Podrán analizarse localizaciones alternativas para la presa y el embalse, evaluando en cada caso indicadores tales como la eficiencia del sitio, entendida como la relación entre el volumen de embalse y el volumen de materiales necesarios para la presa. Al mismo tiempo, se recomienda evaluar la extensión del área a inundar, las afectaciones asociadas, una primera estimación del impacto ambiental del emprendimiento, la aptitud preliminar de los materiales del sitio como fundación de la presa, la disponibilidad de materiales de construcción en las proximidades, las características de impermeabilidad del fondo del vaso y las consecuencias potenciales ante un escenario hipotético de rotura con embalse lleno, a efectos de anticipar el posible DPA.

En la evaluación preliminar del sitio de emplazamiento corresponde verificar que el vaso del futuro embalse no se superponga con áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) [21] ni con zonas de monte nativo según la normativa aplicable (Ley 15.939 de Bosques y su reglamentación) [22]. La superposición del embalse con estas áreas puede implicar la inviabilidad del proyecto o la necesidad de autorizaciones ambientales específicas con exigencias sustantivamente mayores.

En el análisis de viabilidad del proyecto también resulta recomendable considerar la forma prevista de ejecución de la obra, en particular en lo que refiere al manejo del cauce durante la construcción. En muchas pequeñas presas del medio rural, emplazadas sobre cauces intermitentes, la estrategia constructiva puede basarse en avanzar en los sectores laterales del terraplén sin interferir con el escurrimiento natural, concentrando las tareas que requieren trabajar en seco —principalmente el cierre del valle y la ejecución de las obras en el eje— en períodos de estiaje. Este enfoque permite, en condiciones favorables, evitar la necesidad de desvíos

temporales del cauce mediante ataguías. Su viabilidad dependerá del régimen hidrológico, de la duración prevista de las obras y de una adecuada planificación constructiva; en otros casos, será necesario recurrir a soluciones de desvío convencional.

En el análisis de viabilidad económica y productiva del proyecto, resulta recomendable considerar las restricciones operativas y eventuales requerimientos de liberación de caudales ambientales establecidos por la normativa vigente, así como su posible influencia sobre la disponibilidad de agua para los distintos usos previstos, particularmente durante períodos de bajos aportes naturales.

2.2 Evaluación preliminar del Daño Potencial Asociado y consideraciones de riesgo

En la etapa de estudios preliminares resulta necesario realizar una primera aproximación al DPA, conforme a los criterios establecidos en el Capítulo 1. Esta evaluación inicial no sustituye la clasificación formal que corresponda efectuar en etapas posteriores, pero permite identificar tempranamente la posible sensibilidad del emplazamiento.

En particular, corresponde analizar la eventual presencia de poblaciones, infraestructuras relevantes, actividades productivas o servicios esenciales aguas abajo que pudieran verse afectados ante un escenario hipotético de falla. Esta revisión preliminar permite advertir situaciones en las cuales la localización propuesta podría implicar consecuencias significativas, orientando así la toma de decisiones en cuanto a la viabilidad del proyecto o la necesidad de profundizar los estudios técnicos.

Asimismo, esta instancia inicial contribuye a definir el alcance y nivel de detalle de los estudios hidrológicos, hidráulicos y geotécnicos posteriores, así como la eventual aplicación de metodologías más rigurosas para la determinación del área de potencial afectación.

2.3 Estudios hidrológico-hidráulicos

La descripción de los estudios hidrológicos e hidráulicos a realizar para la definición general del proyecto de una presa es la materia específica del Volumen 1 de este Manual [\[23\]](#). Siguiendo esos lineamientos se puede arribar a la conveniencia de construir una presa de determinada altura, en determinado lugar (a confirmar con estudios geotécnicos) para contener cierto volumen de agua entre determinadas cotas, con la previsión de que su utilización a lo largo del año abastecerá la demanda estimada media mensual de forma eficiente.

También en el Volumen 1 se dan herramientas para la adopción de una crecida de diseño y lineamientos básicos para el cálculo del ancho mínimo de un vertedero-canal que, con una cierta pendiente longitudinal, determinado tipo de protección vegetal y actuando como vertedero auxiliar, consiga evacuar el caudal laminado por el embalse sin causar erosiones significativas en el canal.

La crecida de diseño recomendada en el Volumen 1 (2011) [\[23\]](#) corresponde a un período de retorno de 100 años, considerada como referencia mínima para pequeñas presas rurales compatibles con DPA Bajo. No obstante, la práctica internacional en seguridad de presas recomienda incrementar progresivamente las exigencias hidrológicas a medida que aumentan las consecuencias potenciales asociadas a la falla de la obra.

En tal sentido, para presas compatibles con categorías de DPA Medio o Alto, se recomienda analizar eventos hidrológicos de mayor severidad, incluyendo tanto crecidas de diseño o proyecto, así como crecidas extremas de verificación frente al sobrepaso. Como referencia orientativa, distintas guías internacionales consideran para presas de mayores consecuencias, períodos de retorno del orden de cientos o miles de años, e incluso la Crecida Máxima Probable (PMF) en determinados casos [\[15; 24; 25; 26; 27\]](#).

Asimismo, resulta recomendable analizar un rango amplio de eventos hidrológicos, incluyendo crecidas frecuentes (2 a 5 años), intermedias (10 a 25 años) y eventos extremos, a efectos de evaluar el comportamiento hidráulico de la obra en distintas condiciones de operación. Las crecidas frecuentes permiten analizar procesos erosivos y condiciones habituales de funcionamiento, mientras que los eventos extremos permiten verificar márgenes de seguridad frente al sobrepaso y otras condiciones excepcionales.

En este análisis también debería tenerse presente que los valores históricos de precipitación y escurrimiento pueden subestimar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en un contexto de cambio climático. Se recomienda revisar periódicamente los criterios hidrológicos adoptados a medida que se actualicen las series de datos y se incorporen estudios de cambio climático aplicados al territorio nacional [\[28; 29\]](#).

A la fecha (2026), además de disponerse de series pluviométricas más extensas que las consideradas en la primera versión del Volumen 1 del Manual [\[23\]](#), se han realizado estudios que han permitido optimizar los coeficientes para la aplicación del Modelo Hidrológico de Témez en la estimación de escurrimientos mensuales en

cuencas no aforadas en el Uruguay, elemento clave para el balance hídrico entre oferta y demanda de agua y, por lo tanto, para el diseño del volumen óptimo del embalse y la altura de la presa. Asimismo, se cuenta con estudios actualizados y nueva normativa sobre caudales ambientales, que constituyen un insumo adicional para la definición del volumen óptimo del embalse.

2.4 Topografía de precisión y modelación del almacenamiento

Actualmente se dispone del IDEuy (Infraestructura de Datos Espaciales del Uruguay) como herramienta de información geográfica de acceso público y gratuito [30]. Uno de sus propósitos es brindar un repositorio ordenado y público de la información geográfica básica del territorio. El Visualizador de la IDE se puso en producción en 2019 y cuenta con la información geográfica oficial del Uruguay, que incluye límites administrativos, catastro, redes de transporte y vías de circulación, así como la información generada en el “Proyecto de producción y control de Ortoimágenes, Modelos Digitales de Elevación y Cartografía del territorio nacional”.

Entre otras prestaciones útiles para el diseño de pequeñas presas en Uruguay, el geoportal IDEuy permite obtener información de cuencas hidrográficas, disponible en ocho niveles jerárquicos. Estas capas fueron generadas utilizando como insumo el MDT y la hidrografía producidos en el marco del vuelo aerofotogramétrico 2017-2018.

En cuanto a la precisión del MDT de cobertura nacional (G26A2_Remesa_01), este presenta una grilla de 2,5 m × 2,5 m, con una exactitud absoluta vertical de 1,5 m al 95% de confianza y una exactitud absoluta horizontal de 1,0 m al 95% de confianza.

Se trata de una herramienta adecuada para la determinación preliminar de cuencas y análisis a nivel de anteproyecto. Sin embargo, para la elaboración del proyecto definitivo de una presa y su embalse resulta imprescindible realizar un relevamiento topográfico de precisión, al menos del área de implantación de la obra y del vaso del futuro embalse, efectuado por profesional competente.

Los relevamientos realizados mediante drones pueden constituir una herramienta útil, siempre que se asegure una adecuada calibración y procesamiento de los datos. Diferencias habituales entre relevamientos provenientes de distintas fuentes, del orden de 0,25 m a 0,50 m, pueden generar inconsistencias significativas entre el replanteo de las obras y las curvas cota-área-volumen del embalse, afectando el volumen utilizable, el rendimiento para riego, la capacidad de laminación y la verificación del funcionamiento hidráulico del vertedero proyectado.

2.5 Metodología de Investigación Geológica y Geotécnica

La caracterización del terreno y de los materiales de construcción debería seguir una secuencia lógica de complejidad creciente, procurando que la información obtenida sea representativa y suficiente para el diseño.

2.5.1 Trabajos de Campo (Prospección Directa)

Los trabajos de campo constituyen la base del modelo geológico-geotécnico del proyecto. Su finalidad es permitir la observación directa de la estratigrafía, determinar la potencia de los estratos, identificar el nivel freático y asegurar la recuperación de muestras representativas para su posterior análisis en laboratorio.

- Reconocimiento Geológico-Geotécnico

Se recomienda iniciar con una revisión exhaustiva de la cartografía geológica regional e imágenes satelitales para orientar la inspección de campo. Este reconocimiento debería derivar en una cartografía básica de superficie y en la elaboración de perfiles o mapas interpretativos preliminares que abarquen el eje de la presa, el vertedero completo incluyendo la ladera hasta el cauce aguas abajo, ambos estribos y el vaso del embalse. El objetivo es identificar formaciones rocosas, depósitos aluviales, estructuras tectónicas o zonas de inestabilidad potencial.

- Calicatas o Cateos (Excavaciones a Cielo Abierto):

En terrenos de materiales sueltos se excavarán calicatas con una retroexcavadora para verificar la composición del subsuelo, las características de los materiales y obtener muestras para laboratorio. Podrán alcanzar de 4 a 5 metros de profundidad de acuerdo con los requerimientos y el alcance de la maquinaria utilizada.

Cada calicata debería incluir una descripción detallada del perfil estratigráfico, registrando espesores, color, textura, presencia de humedad o nivel freático, y grado de compacidad o consistencia de cada horizonte. Las muestras de suelo se extraerán y prepararán de inmediato de acuerdo con las indicaciones del laboratorio, a fin de salvaguardar su integridad y sus condiciones naturales de humedad, y se enviarán con sus datos de ubicación y profundidad. Podrán ser disturbadas para caracterización y, cuando corresponda, inalteradas para ensayos mecánicos.

- Métodos Geofísicos:

Se considerará el eventual relevamiento mediante métodos geofísicos (como sísmica de refracción o tomografía eléctrica) como un complemento valioso en situaciones donde los métodos tradicionales de exploración del subsuelo resulten insuficientes, costosos o limitados por el entorno. Estos métodos aportan información continua

entre sondeos puntuales, siendo especialmente eficaces para detectar la profundidad del techo de roca, localizar paleocauces enterrados o identificar anomalías estructurales y variaciones en la humedad del subsuelo que podrían indicar trayectorias de filtración preferenciales.

2.5.2 Ensayos In Situ (Propiedades Mecánicas e Hidráulicas)

Los ensayos in situ permiten determinar las propiedades mecánicas e hidráulicas del terreno bajo sus condiciones naturales de confinamiento y humedad, constituyendo un complemento indispensable de la prospección directa.

- Sondeos Verticales (Perforaciones Mecánicas)

Se ejecutarán mediante equipos de perforación adecuados a la naturaleza del terreno, con el objetivo de definir el perfil estratigráfico en profundidad y obtener parámetros geotécnicos representativos para el diseño.

Resultan imprescindibles para caracterizar el eje de la presa y sus estribos, donde las calicatas resultan insuficientes. La profundidad de los sondeos debería ser suficiente para caracterizar los materiales que puedan influir en la estabilidad, deformabilidad y permeabilidad de la fundación, prolongándose hasta interceptar roca competente o hasta verificar que los estratos subyacentes no condicionan el comportamiento de la obra. Como orientación general para pequeñas presas, la profundidad investigada no debería ser inferior a la altura de la presa en la sección correspondiente, salvo que se intercepte roca sana de probada continuidad a menor profundidad.

El método de perforación debería permitir la recuperación adecuada de muestras y la ejecución de los ensayos que correspondan (SPT, Lefranc o Lugeon, según el caso). Cada perforación debería documentarse mediante un registro geotécnico completo, describiendo litología, color, número de golpes, nivel freático y demás observaciones relevantes.

- Ensayo de Penetración Estándar (SPT) [[31](#); [32](#)]

Es el método de referencia en sondeos mecánicos para estimar la compacidad de suelos granulares o la consistencia de suelos cohesivos. Consiste en hincar un muestreador normalizado mediante golpes de una maza de 63,5 kg desde una altura de 76 cm, registrando el número de golpes necesarios para lograr una penetración de 30 cm (valor N), corregido cuando corresponda por efectos de energía, sobrecarga y nivel freático.

El valor N constituye un parámetro empírico ampliamente utilizado para correlaciones de capacidad portante, compacidad y caracterización estratigráfica.

- Ensayo DPSH (Dynamic Probing Super Heavy) [[33](#); [34](#)]

Se recomienda como complemento, especialmente en suelos no cohesivos. Consiste en registrar el número de golpes necesarios para lograr una penetración acumulada de 20 cm del cono normalizado en el terreno (N20), utilizando una maza de 63,5 kg en caída libre desde 76 cm.

Si bien no permite recuperación de muestras, sus resultados pueden correlacionarse con valores N-SPT para densificar la información del perfil resistente a lo largo del eje.

- Ensayos de Permeabilidad

Son fundamentales para la caracterización hidráulica de la fundación y definir su tratamiento, así como para la evaluación de la estanqueidad del fondo del vaso.

— Ensayo Lefranc (Norma IRAM 10531/1988 [[35](#)])

Se ejecuta en sondeos realizados en materiales sueltos, especialmente suelos finos o mixtos, siendo adecuado para estimar la conductividad hidráulica bajo condiciones similares a las del embalse.

— Ensayo Lugeon (Norma IRAM 10532/1983 [[36](#)])

Se emplea para caracterizar la permeabilidad en macizos rocosos, particularmente en basaltos meteorizados o fracturados, frecuentes en la zona norte del país. Se ejecuta mediante obturadores que permiten aislar tramos específicos del sondeo. Los resultados se expresan en Unidades Lugeon (UL), considerándose generalmente impermeables aquellos niveles con valores inferiores a 1 UL.

No se recomienda el uso de ensayos superficiales como Porchet, Doble Anillo o Infiltrómetro de Guelph para la evaluación de la permeabilidad del fondo del vaso o de la fundación de una presa, debido a su limitada profundidad de investigación y a que no representan adecuadamente las condiciones saturadas ni las trayectorias de filtración profundas. Estos métodos pueden resultar útiles en estudios agronómicos o ambientales y para la evaluación de la infiltración aplicada al diseño de sistemas de riego, pero no son adecuados como base para el diseño geotécnico de presas.

- Determinación de Densidad y Humedad In Situ

Durante la ejecución de las obras y en la verificación de la fundación previo al inicio de los rellenos, se recomienda realizar ensayos para determinación de densidad y contenido de humedad in situ como parte del control de calidad.

— Método del Cono de Arena (Norma IRAM 10526 [37]; equivalente a ASTM D1556)

Permite determinar la densidad húmeda del suelo compactado mediante la excavación de una cavidad en el material previamente nivelado. El volumen de dicha cavidad no es conocido a priori, sino que se determina posteriormente mediante el llenado con arena calibrada de densidad conocida.

El volumen excavado suele ser del orden de 1.500 a 3.000 cm³, dependiendo del tamaño máximo del agregado y del equipo utilizado. El material extraído se pesa para obtener su masa húmeda y posteriormente se determina en laboratorio su contenido de humedad, lo que permite calcular la densidad seca correspondiente.

— Densímetro Nuclear (ASTM D6938)

Permite determinar de manera rápida y no destructiva la densidad húmeda y el contenido de humedad del suelo compactado mediante técnicas nucleares. A partir de estos valores se obtiene directamente la densidad seca del material en obra.

La densidad seca determinada en campo se comparará con la densidad seca máxima obtenida en el ensayo Proctor correspondiente, a efectos de verificar el porcentaje de compactación especificado para cada tipo de material y capa de relleno.

— Densímetro Electromagnético (Densímetro No Nuclear; Norma ASTM D7830/D7830M)

Determina la densidad y el contenido de humedad del suelo compactado a partir de la medición de propiedades dieléctricas del material, sin uso de fuentes radiactivas. Resulta particularmente útil cuando los requisitos administrativos, logísticos o de seguridad asociados al transporte y operación del Densímetro Nuclear hacen impracticable su utilización.

Así como se indicó para el Densímetro Nuclear, sus resultados se contrastan con la densidad seca máxima obtenida en laboratorio con el ensayo Proctor correspondiente, a efectos de verificar el porcentaje de compactación especificado para cada tipo de material y capa de relleno.

Ambos densímetros (nuclear y electromagnético), por tratarse de métodos indirectos requieren calibración específica para cada tipo de material y se recomienda contrastar periódicamente sus resultados utilizando como ensayo de referencia el ensayo del Cono de Arena.

2.5.3 Ensayos de Laboratorio

En materia de normas técnicas para ensayos de caracterización de materiales, este Manual adopta como criterio general la utilización de Normas UY de la Dirección Nacional de Vialidad (aprobadas por el Decreto 169/993, [38]) cuando existan para el ensayo correspondiente, complementadas por Normas UNIT del Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. En los casos en que no exista cobertura local, las referencias se remiten a normas internacionalmente reconocidas, tales como ASTM, AASHTO o IRAM. La equivalencia técnica entre normas locales e internacionales se considera razonable cuando el ensayo evalúa el mismo parámetro físico mediante procedimientos comparables; en caso de duda sobre dicha equivalencia, el laboratorio interviniente debería documentar expresamente la norma efectivamente aplicada y los criterios utilizados para establecer su correspondencia.

En la planificación de los estudios para una presa resulta importante distinguir entre los análisis agronómicos de suelos y los estudios geotécnicos. Los primeros, habitualmente orientados a la fertilidad y manejo agrícola, evalúan parámetros tales como pH, materia orgánica, nutrientes y textura. El diseño y la construcción de presas requieren, en cambio, la determinación de propiedades geotécnicas vinculadas al comportamiento mecánico e hidráulico de los materiales, tales como granulometría, límites de Atterberg, clasificación SUCS, compactación, permeabilidad, resistencia al corte y, cuando corresponda, ensayos de dispersividad o erosionabilidad interna. Por esta razón, se recomienda que los estudios sean contratados con laboratorios de geotecnia o mecánica de suelos con experiencia en obras de ingeniería civil, verificando previamente su capacidad para realizar los ensayos requeridos por el proyecto.

Los ensayos de laboratorio se realizan sobre muestras representativas obtenidas durante las etapas de investigación del terreno, explotación de préstamos y control de obra, con el fin de cuantificar las propiedades de los materiales que conformarán la fundación y el cuerpo de la presa.

- Caracterización y Clasificación:

Se utilizará prioritariamente el sistema SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) para la clasificación de los materiales. La granulometría se determinará mediante tamizado para fracciones gruesas y sedimentación para fracciones finas.

La plasticidad y la susceptibilidad a la fisuración se evaluarán mediante la determinación del Límite Líquido y el Límite Plástico (Límites de Atterberg).

El estado natural de las muestras se caracterizará mediante la determinación del contenido de humedad natural y la densidad in situ. Para el cálculo de esta última se requiere haber determinado previamente el volumen original ocupado por la muestra en el terreno.

En la práctica uruguaya, estos ensayos de caracterización básica (granulometría por tamizado, hidrometría para fracciones finas, límites de Atterberg, humedad natural, densidad in situ y clasificación SUCS) constituyen procedimientos rutinarios disponibles en la mayoría de los laboratorios geotécnicos del país, varios de los cuales atienden principalmente al sector vial. Esta amplia disponibilidad facilita el cumplimiento del programa mínimo de ensayos para pequeñas presas, sin que su costo o complejidad técnica resulten limitantes.

- Ensayos de Compactación de Materiales Granulares

Cuando corresponda, para materiales granulares no cohesivos destinados a filtros, drenes o espaldones, se determinarán en laboratorio las densidades seca máxima y mínima, con el fin de calcular la densidad relativa como parámetro de control del grado de compactación alcanzado en obra.

- Ensayos de Compactación (Proctor)

Se determinarán la Humedad Óptima y la Densidad Seca Máxima de los suelos finos mediante ensayos Proctor Estándar o Proctor Modificado. La selección del tipo de ensayo Proctor dependerá de la energía de compactación prevista en obra y de la densidad objetivo requerida para alcanzar los parámetros de resistencia y permeabilidad establecidos en el diseño.

- Ensayos de Resistencia al Corte y Compresibilidad

Mediante ensayos de Corte Directo o con ensayos Triaxiales (UU, CU o CD) se obtendrán los parámetros de resistencia al corte (cohesión c y ángulo de fricción interna ϕ), necesarios para justificar las pendientes de los taludes y verificar el cumplimiento de los factores de seguridad requeridos en los análisis de estabilidad.

El ensayo de Consolidación (Edómetro) permitirá determinar la compresibilidad y la velocidad de consolidación de suelos finos saturados, a efectos de estimar asentamientos en la fundación y en el cuerpo de la presa y definir, entre otras cosas y cuando corresponda, la contra flecha necesaria en el coronamiento.

- Ensayos de Dispersividad o Erodabilidad Interna

Se utilizan para identificar suelos finos susceptibles a la dispersión en presencia de agua, con potencial desarrollo de erosión interna (*piping*).

— Crumb Test

Ensayo cualitativo que observa el comportamiento de un terrón de suelo sumergido en agua destilada, clasificando el grado de dispersión en función de la formación de nube coloidal.

— Ensayo Pinhole

Simula el flujo de agua a través de un pequeño orificio practicado en una muestra compactada. Si el agua emerge turbia y el orificio se ensancha rápidamente bajo bajas presiones, el suelo se considera altamente dispersivo.

— Ensayos Químicos

La determinación del Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) y de las sales disueltas permite correlacionar el comportamiento físico del suelo con su composición química, complementando la evaluación de su potencial dispersivo.

Corresponde distinguir entre ensayos rutinarios para uso más habitual en proyectos de pequeñas presas (granulometría, límites de Atterberg, Proctor, cono de arena, densímetro nuclear, corte directo y triaxiales convencionales) de ensayos más especializados que pueden no estar disponibles en todos los laboratorios nacionales (Crumb Test, Pinhole, Gradient Ratio Test, ensayos de dispersividad química). Estos últimos suelen requerir laboratorios geotécnicos especializados, y su solicitud debería preverse con la antelación adecuada en la planificación del programa de ensayos.

2.6 Planificación de Programas de Ensayos según el Objetivo

La planificación del programa de ensayos debería responder a los objetivos específicos de cada etapa de estudio y a las características de las distintas zonas del proyecto. El estudio geotécnico de la zona de implantación, de los materiales disponibles en los préstamos y del fondo del embalse debería proveer información suficiente y representativa para el diseño de las obras, los cálculos de estabilidad y el análisis del régimen de filtraciones a través del terraplén y su fundación, con el objetivo de proyectar una obra estable, estanca y eficiente.

2.6.1 Zona de Implantación

Los estudios geotécnicos se centran en la caracterización del terreno de fundación y estribos, con un nivel de detalle proporcional a la categoría de la obra. Resulta importante asegurar que el terreno sobre el cual se apoya la presa:

- Sea estable bajo las condiciones de carga previstas.
- Presente una permeabilidad compatible con la estanqueidad requerida.

-
- No contenga materiales problemáticos (colapsables, expansivos, dispersivos).
 - Permita una fundación segura y durable, preferentemente sin necesidad de tratamientos complejos.

Asimismo, corresponde analizar la excavabilidad del terreno natural en las zonas donde se implantarán las obras, incluyendo conductos que atraviesen la presa, el dentellón de anclaje y el vertedero auxiliar.

En la etapa de Estudios Preliminares se ejecutarán trabajos de campo como los descritos en 2.5.1, complementados con ensayos in situ (2.5.2) y ensayos de laboratorio (2.5.3), con el fin de verificar la aptitud mecánica e hidráulica del terreno de fundación y su comportamiento frente a los esfuerzos impuestos por el terraplén y el embalse.

Se pondrá especial énfasis en detectar lentes permeables, planos de debilidad o zonas de roca meteorizada que puedan requerir tratamiento específico.

2.6.2 Permeabilidad del Vaso del Embalse

En la etapa de Estudios Preliminares se recomienda evaluar la permeabilidad natural de los estratos que conformarán el fondo del embalse, con el objetivo de analizar su incidencia en el régimen de filtraciones, la estabilidad de la fundación y el riesgo de erosión interna.

En muchas pequeñas presas del territorio nacional, las pérdidas por infiltración a través del fondo del vaso no resultan determinantes en el balance hídrico del proyecto. Sin embargo, su magnitud puede influir en el rendimiento efectivo del aprovechamiento, particularmente en embalses de reducido volumen útil o emplazados sobre materiales relativamente permeables.

En la bibliografía internacional, valores de conductividad hidráulica del orden de 10^{-5} cm/s se emplean como referencia orientativa de baja permeabilidad para suelos de fundación de embalses [39], criterio que puede tomarse como guía preliminar de aceptabilidad para el fondo del vaso en pequeñas presas rurales. Este valor no constituye un umbral normativo absoluto: el comportamiento hidráulico efectivo del embalse depende además de la geometría del vaso, de la estratigrafía bajo el fondo, de la presencia o ausencia de nivel freático regional aguas abajo y, sobre todo, de la posible existencia de trayectorias preferenciales de flujo. La verificación del proyecto en este aspecto se sustenta en un análisis combinado de balance hídrico, estabilidad hidráulica de la fundación, control de erosión interna y subpresiones, más que en el cumplimiento estricto de un valor numérico aislado.

En casos particulares podrá justificarse la ejecución de tratamientos específicos de impermeabilización, tales como incorporación de suelos adecuados, mezclas con bentonita o sistemas de geomembranas, evaluando su viabilidad técnica y económica.

2.6.3 Identificación y Ubicación de Préstamos

Se recomienda identificar en cantidad suficiente materiales cohesivos apropiados para el núcleo o cuerpo impermeable, así como materiales granulares para filtros, drenes y espaldones, según la tipología adoptada.

La caracterización de los préstamos debería basarse en un número suficiente de calicatas o sondeos que permita verificar continuidad lateral, variabilidad estratigráfica y volumen explotable. En pequeñas presas, como criterio orientativo, resulta recomendable ejecutar al menos tres puntos de exploración representativos por cada zona de préstamo, ajustándose su número en función de la heterogeneidad observada y de la categoría de la obra.

Descartada la capa vegetal y los suelos orgánicos, el producto de la excavación del canal del vertedero u otras obras auxiliares puede resultar apto como material de relleno, por lo que se recomienda analizar esta posibilidad en la fase preliminar a efectos de optimizar recursos y reducir costos.

La ubicación de préstamos dentro del vaso del embalse constituye, en general, la opción preferente desde el punto de vista ambiental y socioeconómico, siempre que no comprometa la estanqueidad ni la estabilidad del sistema.

Corresponde evaluar la remoción de material dentro del vaso bajo criterios adecuados de seguridad, verificando:

- Que no se expongan estratos permeables que comprometan la capacidad de retención del embalse.
- Que la distancia y profundidad de excavación no afecten la estabilidad de la fundación de la presa.
- Que la modificación topográfica no altere desfavorablemente las condiciones de flujo subterráneo.

En la etapa preliminar se recomienda ejecutar un plan de ensayos que permita caracterizar y cubicar la cantidad necesaria de cada tipo de material disponible, enviando muestras a laboratorio para su clasificación y evaluación mecánica e hidráulica. Estos resultados constituyen un insumo relevante para la definición de la

tipología de la presa, el diseño de su sección tipo y la estimación de los costos asociados al movimiento de suelos.

La identificación de zonas de préstamo debe considerar las restricciones legales y ambientales aplicables. En particular, no se consideran aptas para préstamos las áreas comprendidas en el SNAP [21] ni las zonas de monte nativo protegidas por la Ley 15.939 de Bosques y su reglamentación [22], ni los humedales protegidos por la normativa ambiental vigente [20] o sujetos a regímenes específicos de conservación. Cuando existan alternativas viables fuera de estas áreas, resulta recomendable priorizarlas, aun cuando ello implique mayores distancias de transporte u otros costos adicionales.

Como orientación preliminar para la evaluación de los materiales disponibles en los préstamos, la Tabla 2-1 presenta la aptitud general de distintos tipos de suelos para su utilización en presas de materiales sueltos. Esta clasificación tiene carácter orientativo y debería confirmarse mediante los ensayos geotécnicos correspondientes.

Tipo de suelo	Aptitud para núcleo o zona impermeable	Aptitud para espaldones	Observaciones
Arcillas plásticas (CL, CH)	Muy buena	Limitada	Material preferido para zonas impermeables. Controlar humedad y evitar fisuración por secado.
Limos arcillosos (ML-CL)	Buena	Buena	Aptos para terraplenes homogéneos si la plasticidad es suficiente.
Limos (ML)	Regular	Buena	Sensibles a la erosión interna y a la saturación. Requieren buen control de compactación.
Arenas limosas (SM)	Limitada	Buena	Aptos para espaldones si no contienen exceso de finos plásticos.
Arenas limpias (SP, SW)	No recomendable	Buena	Material permeable; suele utilizarse en filtros o zonas drenantes.
Gravas con arena (GW, GP)	No recomendable	Muy buena	Adecuadas para espaldones o capas drenantes.
Suelos orgánicos o turbas	No apto	No apto	Conviene retirarlos completamente.

Tabla 2-1. Tabla práctica de aptitud de materiales de préstamo para terraplenes

3 DISEÑO DE LA PRESA

El presente capítulo aborda el diseño estructural y geotécnico de la presa de materiales sueltos, partiendo de la base de que las dimensiones hidráulicas fundamentales del proyecto —altura de la presa, niveles característicos del embalse, volumen de almacenamiento y crecida de diseño— han sido previamente definidas conforme a los criterios establecidos en el Volumen 1 y en el Capítulo 2 del presente Manual.

A partir de dichas definiciones, el diseño se concentra en la configuración geométrica, la zonificación interna, el control de filtraciones y la verificación de la estabilidad, con el objetivo de materializar una estructura segura, funcional y económicamente eficiente.

3.1 Principios generales de diseño de presas de materiales sueltos

El diseño de presas de materiales sueltos se apoya en tres principios fundamentales: el control del flujo, la estabilidad estructural y la compatibilidad de deformaciones. Estos principios constituyen un marco conceptual simple y robusto para organizar los criterios de diseño y comprender la función de los distintos elementos que componen la presa [40].

Estos principios refieren al comportamiento físico de la obra y son complementarios —aunque conceptualmente independientes— de los enfoques de gestión del riesgo introducidos en los capítulos anteriores. Mientras dichos enfoques permiten priorizar intervenciones en función de las consecuencias y de la probabilidad de falla, los principios de diseño establecen las condiciones que deberían satisfacerse para lograr un comportamiento hidráulico y estructural adecuado de la presa.

En una presa de materiales sueltos, estos tres principios actúan de manera integrada. La configuración geométrica, la zonificación interna, la selección de materiales y los criterios constructivos deberían responder simultáneamente a la necesidad de controlar el flujo, asegurar la estabilidad y permitir deformaciones compatibles entre los distintos materiales y con la fundación.

3.1.1 Control del flujo

El control del flujo constituye el principio central del diseño. El agua almacenada en el embalse se infiltra a través del terraplén y su fundación, por lo que el diseño debería asegurar que estos flujos sean suficientemente reducidos y se desarrollen bajo condiciones controladas, sin inducir erosión interna ni inestabilidad hidráulica.

Este principio se materializa mediante la disposición de una zona de estanqueidad — generalmente un núcleo o cuerpo de baja permeabilidad— destinada a reducir al máximo el caudal de filtración, complementada por un sistema de filtros y drenes que permite interceptar y conducir en forma segura el flujo que inevitablemente atraviesa el terraplén y su fundación.

En pequeñas presas de riego, este principio adquiere particular relevancia en el tratamiento de la fundación, en la definición de la zonificación interna y en la resolución de discontinuidades como las conducciones a través del terraplén, donde pueden generarse trayectorias preferenciales de filtración si no se adoptan medidas adecuadas.

La Figura 3-1 ilustra este principio, mostrando la disposición conceptual de las zonas de estanqueidad y drenaje y su rol en el control del flujo a través de la presa [40].

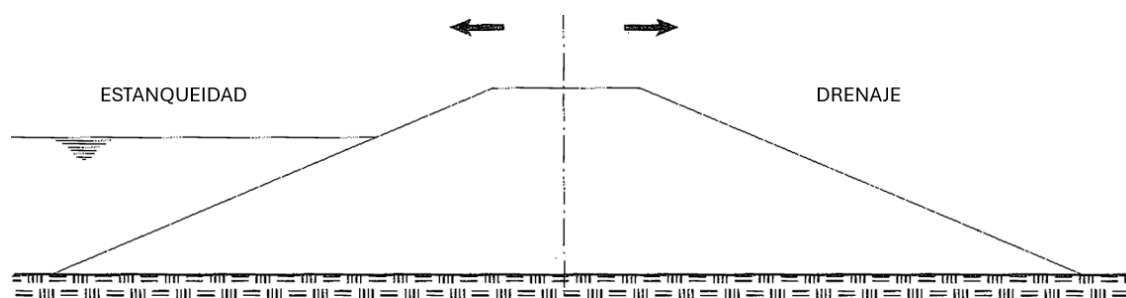


Figura 3-1. Principio de control del flujo - Tomada de (Cruz, 1996) [40]

3.1.2 Estabilidad

El principio de estabilidad refiere a la capacidad del conjunto presa-fundación para resistir las acciones actuantes sin desarrollar mecanismos de falla. Esto incluye tanto la estabilidad global del terraplén como la estabilidad local de sus taludes y la integridad de sus interfaces.

Además de las acciones internas asociadas al peso propio y a las presiones intersticiales, corresponde considerar agentes externos que afectan particularmente las superficies del terraplén, como el oleaje sobre el talud aguas arriba y la lluvia, el escurrimiento superficial y el viento sobre el talud aguas abajo. Estos procesos pueden generar erosión, pérdida de material y deterioro progresivo si no se contemplan adecuadamente en el diseño.

La estabilidad no depende únicamente de la geometría y de los parámetros resistentes de los materiales, sino también de cómo estos han sido colocados y compactados. Una misma sección puede presentar comportamientos muy distintos según la calidad de ejecución, el control de humedad y la uniformidad de la

compactación, aspectos que inciden directamente en la resistencia y en la generación de presiones intersticiales.

En pequeñas presas, este principio se traduce en la definición de taludes compatibles con los materiales disponibles, en el adecuado tratamiento de la fundación y en la verificación de la estabilidad frente a distintas condiciones de carga, incluyendo el embalse lleno y el desembalse rápido cuando corresponda.

La Figura 3-2 presenta un esquema conceptual de este principio, mostrando la organización de zonas resistentes y su interacción con la fundación [40].

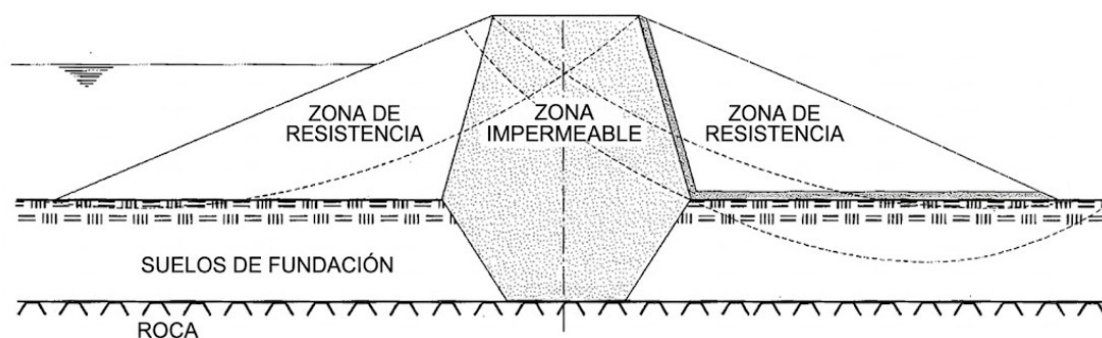


Figura 3-2. Principio de estabilidad. - Tomado de (Cruz, 1996) [40]

3.1.3 Compatibilidad de deformaciones

El principio de compatibilidad de deformaciones establece que los distintos materiales que componen la presa deben poder deformarse de manera compatible entre sí y con la fundación, sin generar concentraciones de tensiones, fisuración ni trayectorias preferenciales de flujo.

Las presas de materiales sueltos son estructuras deformables, que experimentan asentamientos durante y después de la construcción. El diseño debería prever estas deformaciones y procurar que no afecten la continuidad del sistema de control de filtraciones ni la estabilidad del conjunto.

Este principio resulta especialmente relevante en las interfaces entre materiales de distinta rigidez o comportamiento, como el contacto entre el núcleo y los espaldones, entre la presa y la fundación, y en torno a estructuras rígidas como conducciones u obras de hormigón. La compatibilidad de deformaciones se logra mediante una adecuada transición entre materiales, pero también mediante la selección de condiciones de compactación que favorezcan un comportamiento deformable y continuo del conjunto.

La Figura 3-3 ilustra este principio mediante un esquema conceptual en el que se representan zonas de distinta rigidez. Aunque el ejemplo incluye materiales de

enrocado, su interpretación debe extenderse a cualquier combinación de materiales con diferente deformabilidad, como las habituales en presas zonificadas de pequeña escala [40].

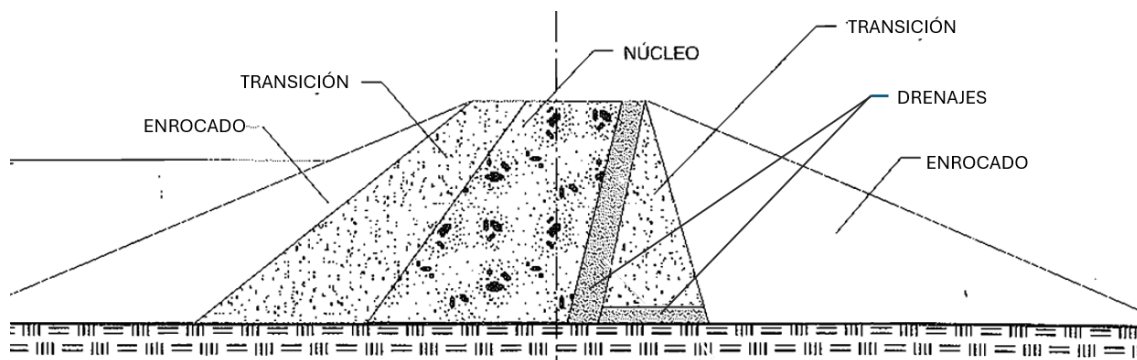


Figura 3-3. Principio de compatibilidad de deformaciones. - Tomada de (Cruz, 1996) [40]

3.2 Tipologías Estructurales

El diseño de la sección transversal de una presa de materiales sueltos debería responder de manera integrada a los principios de control del flujo, estabilidad estructural y compatibilidad de deformaciones establecidos en la Sección 3.1. En este contexto, la definición de la tipología estructural y de la zonificación interna del terraplén busca lograr un equilibrio adecuado entre estos tres aspectos, optimizando a su vez el aprovechamiento de los materiales disponibles en los préstamos.

A efectos terminológicos, se aclara que en la literatura técnica internacional —en particular en las guías de SPANCOLD [41]— el término “presas de materiales sueltos” comprende tanto las presas homogéneas y zonificadas como las presas de escollera con pantalla o núcleo impermeable.

En el contexto del presente Manual, orientado a pequeñas presas rurales en el territorio nacional, el desarrollo se concentra en presas de sección homogénea modificada y presas zonificadas, dado que las presas de escollera con pantalla o núcleo impermeable no constituyen una tipología habitual en este ámbito y requieren consideraciones constructivas específicas que exceden el alcance de este documento.

En función de la disposición interna de los materiales y de la estrategia adoptada para el control hidráulico, las presas de materiales sueltos se clasifican en este Manual en dos tipologías principales: presas de sección homogénea y presas zonificadas. La elección entre ambas dependerá de la disponibilidad y calidad de los materiales locales, la altura de la obra, la categoría de DPA y la complejidad constructiva que resulte razonable para el contexto del proyecto.

La selección de materiales para el cuerpo de presa resulta indisociable del estudio geotécnico de la zona de implantación y de la prospección de canteras y zonas de préstamo accesibles. Conceptualmente, suele resultar conveniente definir primero qué materiales existen localmente y en qué cantidad; luego, qué tipología de presa puede construirse razonablemente con esos materiales; y finalmente, qué dimensionamiento corresponde para los escenarios de carga aplicables. Invertir este orden —forzando una tipología por preferencia formal cuando los materiales disponibles sugieren otra solución— suele conducir a sobrecostos significativos y, en algunos casos, a soluciones constructivas menos robustas.

Cuando un material no se encuentra disponible en cantidades adecuadas en el predio o en sus inmediaciones —típicamente arena gradada para filtros y drenes, o roca dura para enrocados de protección—, la decisión correcta puede ser sustituirlo por una solución alternativa (filtro de geotextil en lugar de filtro granular, otra tipología de protección frente al oleaje) o aceptar el costo de transporte desde una cantera externa. Esta evaluación se realiza caso a caso, ponderando el costo de movimiento de suelos, la calidad del material disponible y las consecuencias de adoptar una u otra solución sobre la robustez del diseño y sobre el plan de mantenimiento posterior.

3.2.1 Presas de Sección Homogénea

La presa de sección homogénea utiliza predominantemente un mismo material cohesivo en el cuerpo del terraplén. Esta solución presenta simplicidad constructiva y, en muchos casos, ventajas económicas cuando los préstamos disponibles son relativamente uniformes y de baja permeabilidad.

Sin embargo, una sección estrictamente homogénea, sin dispositivos internos de drenaje, puede dar lugar a la elevación progresiva de la línea de saturación dentro del terraplén, con eventual surgencia en el talud aguas abajo y aumento del riesgo de inestabilidad o erosión interna.

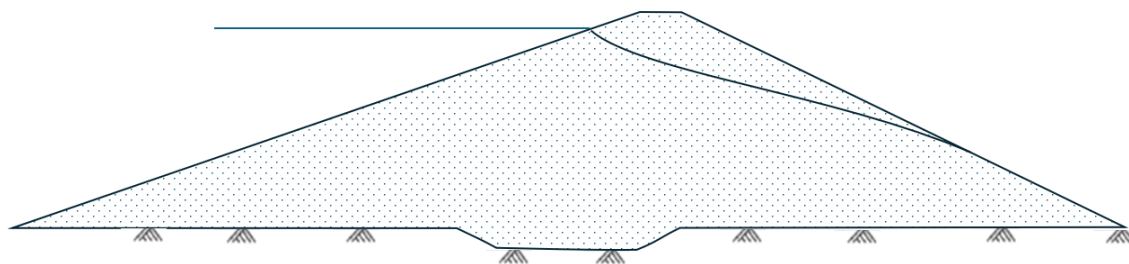


Figura 3-4. Sección homogénea de presa de materiales sueltos y desarrollo típico de la línea de saturación.

La Figura 3-4 ilustra el comportamiento hidráulico típico de una presa homogénea sin dispositivos de drenaje interno, en la cual la línea de saturación intercepta el talud de aguas abajo. Esta limitación pone de manifiesto la necesidad de incorporar elementos específicos de control del flujo, que permitan interceptar y conducir de manera segura los caudales de filtración.

La solución habitual recomendada es la denominada presa homogénea modificada, que incorpora dispositivos tales como dren chimenea, solera drenante y dren colector al pie del talud aguas abajo.

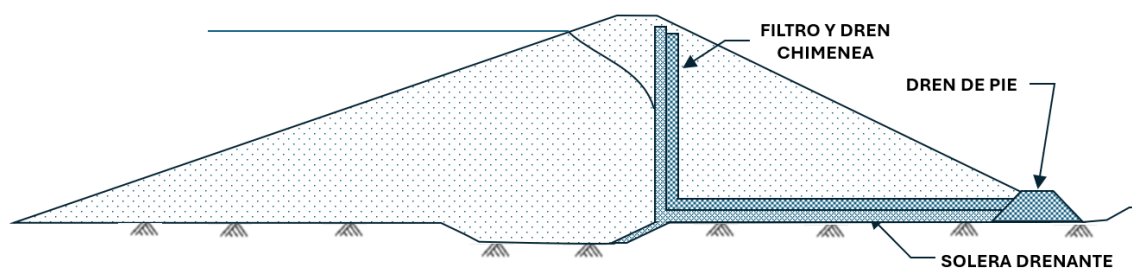


Figura 3-5. Sección homogénea modificada con dren chimenea, solera drenante y dren de pie.

La Figura 3-5 muestra un esquema típico de presa homogénea modificada con sistema interno de drenaje destinado a interceptar la línea de saturación y conducir los caudales de filtración hacia el exterior del terraplén.

La incorporación de estos dispositivos permite mantener la línea de saturación dentro del sistema de drenaje interno, reduciendo las presiones intersticiales en el talud aguas abajo y mejorando la estabilidad global del terraplén. El diseño específico de estos dispositivos se desarrolla en la Sección 3.4.4.

En el caso de pequeños tajamares o embalses rurales de altura reducida (del orden de hasta 5 m), puede adoptarse una solución simplificada consistente en solera drenante y dren de pie, siempre que las presiones de filtración estimadas y la categoría de DPA de la obra así lo permitan. Esta simplificación debería justificarse técnicamente en cada caso.

Cuando los materiales disponibles presentan variabilidad en su plasticidad o permeabilidad, podrá disponerse una organización interna que concentre los materiales más cohesivos y de menor permeabilidad hacia la zona central del terraplén, reservando los materiales más granulares para zonas externas, manteniendo siempre los dispositivos de drenaje correspondientes y verificando la compatibilidad granulométrica e hidráulica entre zonas contiguas.

3.2.2 Presas Zonificadas

Las presas zonificadas disponen internamente materiales con funciones diferenciadas. Típicamente incluyen un núcleo impermeable central, flanqueado por zonas de transición y espaldones o faldones de materiales más permeables. Complementariamente, se incorporan filtros y drenes para el control del flujo interno.

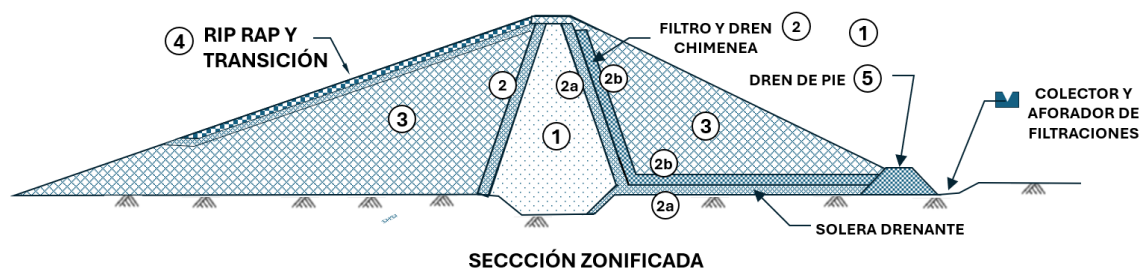


Figura 3-6. Esquema conceptual de presa de materiales sueltos zonificada y principales zonas funcionales.

La Figura 3-6 presenta un esquema conceptual de una presa zonificada, indicando las principales zonas funcionales del terraplén. A diferencia de la Figura 3-4 y Figura 3-5, en este esquema se incluye además la protección superficial del talud aguas arriba, con el fin de ilustrar una configuración más completa de la sección transversal de una presa de materiales sueltos. Esta protección también puede formar parte de presas homogéneas y homogéneas modificadas, aunque no fue representada en dichas figuras para facilitar la visualización de los elementos internos de la sección.

La zonificación responde a la necesidad de materializar en forma integrada los principios de control del flujo, estabilidad estructural y compatibilidad de deformaciones, asignando a cada zona del terraplén una función hidráulica y mecánica específica. El núcleo cumple la función de barrera impermeable, los filtros controlan la migración de partículas y los espaldones aportan estabilidad y confinamiento.

El diseño de una presa zonificada exige especial atención a la compatibilidad granulométrica entre zonas contiguas, evitando fenómenos de erosión interna, segregación o discontinuidades hidráulicas. Estos criterios se desarrollan en detalle en la Sección 3.4.

La zonificación permite, además, adaptar las exigencias de compactación a la función de cada zona. Mientras que en el núcleo impermeable corresponde aplicar un control más estricto del espesor de capa y de la energía de compactación (ver Sección 5.5.1), las zonas de espaldones o rellenos con materiales de menor exigencia funcional pueden admitir la colocación en capas de mayor espesor que el núcleo. Estos mayores espesores corresponden únicamente a sectores no críticos, con materiales adecuados

y equipos compatibles, y sus valores —orientativos— se establecen y verifican mediante el terraplén de prueba, según los criterios de la Sección 5.5.1. Análogamente, en estas zonas pueden utilizarse materiales con granulometría amplia o «todo en uno», siempre que se asegure su estabilidad mecánica y que no se comprometa la función hidráulica o estructural de las zonas adyacentes. La adopción de estas soluciones debería justificarse en el proyecto y validarse mediante terraplén de prueba (ver Sección 5.5.5).

3.3 Definición Geométrica y Perfil Exterior

La definición geométrica de la presa comprende la determinación de su altura, ancho de coronamiento, taludes y niveles característicos, y constituye una etapa clave del diseño. Estas definiciones deberían responder de manera integrada a los principios de control del flujo, estabilidad estructural y compatibilidad de deformaciones establecidos en la Sección 3.1, condicionando tanto el comportamiento hidráulico como la respuesta mecánica del conjunto presa–fundación.

3.3.1 Diseño del Coronamiento

Los criterios que se presentan a continuación se basan en recomendaciones clásicas para el diseño del coronamiento de presas de materiales sueltos, desarrolladas entre otros por el U.S. Bureau of Reclamation en *Design of Small Dams* [25], adaptadas aquí al contexto de pequeñas presas rurales.

Al diseñar el coronamiento de una presa de materiales sueltos se recomienda considerar los siguientes aspectos:

- Ancho
- Drenaje
- Contraflecha o sobre elevación
- Tratamiento superficial
- Zonificación
- Requisitos de seguridad

Los criterios aquí expuestos deberían compatibilizarse con los requerimientos de espacio y uso del coronamiento por parte de los instrumentos de auscultación, así como con las actividades de mantenimiento y operación desarrolladas en el Capítulo 6.

3.3.1.1 Ancho

El ancho del coronamiento de una presa de materiales sueltos depende de consideraciones como:

-
- la naturaleza de los materiales del terraplén y la distancia mínima de percolación admisible a través del terraplén con el nivel normal del agua en el embalse;
 - la altura e importancia de la estructura;
 - los posibles requisitos de la calzada;
 - la viabilidad constructiva.
 - la eventual necesidad de un sobreancho compensatorio cuando el talud aguas arriba no cuente con enrocado u otra protección permanente (ver Sección 3.6).

El ancho mínimo del coronamiento debería proporcionar un gradiente de filtración seguro a través del terraplén al nivel del embalse lleno. Debido a las dificultades prácticas para determinar este factor, el ancho del coronamiento se determina generalmente de forma empírica y basándose en antecedentes de obras similares.

Para pequeñas presas de materiales sueltos el USBR [25] sugiere la siguiente expresión orientativa:

$$w = h / 5 + 3$$

donde:

w = ancho del coronamiento, en metros

h = altura de la presa, en metros, medida desde el lecho del cauce.

Para facilitar la construcción con maquinaria estándar, el ancho mínimo no debería ser inferior a 3,5 m. En muchas presas el ancho final del coronamiento queda determinado por los requisitos de circulación sobre la presa. En este sentido, SPANCOLD [41] sugiere 3 m mínimo para pequeñas presas sin tránsito y 5 m para aquellas con tránsito.

Cuando el talud aguas arriba no se proteja mediante enrocado u otro revestimiento permanente, se recomienda agregar al ancho del coronamiento calculado por criterios hidráulicos y constructivos un sobreancho de seguridad del orden de 1,0 m o superior, a modo de material de sacrificio frente a la erosión por oleaje. La extensión del sobreancho a definir debería estar vinculada a la frecuencia con que se proyecte el mantenimiento del coronamiento, debiendo ser mayor cuando los intervalos de mantenimiento sean más prolongados. Este tema se desarrolla en la Sección 3.6 al tratar la protección del talud aguas arriba.

3.3.1.2 Drenaje

Se recomienda proporcionar el drenaje superficial del coronamiento inclinándolo la superficie terminada hacia aguas arriba, salvo que el talud aguas abajo disponga de una protección suficientemente robusta frente a la erosión, en cuyo caso podrá conformarse el coronamiento con pendientes hacia ambos lados.

Asimismo, se recomienda evitar la formación de charcos o zonas de agua estancada en la cresta de la presa, ya que estas favorecen la infiltración superficial y el deterioro progresivo del revestimiento.

3.3.1.3 Contraflecha o sobre elevación

Normalmente se proporciona una contraflecha o sobre elevación a lo largo del coronamiento de las presas de materiales sueltos para garantizar que el borde libre no se vea disminuido por los asentamientos de la fundación o la consolidación del terraplén.

La selección de su magnitud es necesariamente aproximada y se basa en el grado de asentamiento esperado de la fundación y del terraplén, con el objetivo de que, una vez producidos dichos asentamientos, el coronamiento conserve una ligera curvatura residual.

Los materiales cohesivos compactados con densidades cercanas al máximo Proctor pueden experimentar consolidación al quedar sometidos al peso de las capas superiores. Una parte de estos asentamientos puede desarrollarse durante la etapa constructiva; sin embargo, dependiendo del tipo de suelo, del grado de saturación y del ritmo de construcción, una fracción de los asentamientos se produce también durante los primeros meses o años posteriores a la finalización del terraplén, a medida que se disipan las presiones intersticiales generadas durante la compactación.

En presas construidas sobre fundaciones relativamente incompresibles puede adoptarse una sobre elevación del orden de 1 % de la altura de la presa, valor citado en manuales clásicos de diseño de presas de materiales sueltos. En obras pequeñas, o cuando las condiciones de fundación y los materiales del terraplén presentan mayor compresibilidad, algunos proyectistas adoptan valores más conservadores, del orden de varios puntos porcentuales de la altura, por lo que resulta recomendable justificar en cada caso la magnitud seleccionada en función de los asentamientos estimados.

Generalmente se requiere poco material adicional para generar esta sobre elevación, ya que puede lograrse inclinando levemente los taludes en las cotas superiores del terraplén.

3.3.1.4 Tratamiento superficial

Resulta recomendable disponer algún tipo de revestimiento sobre el coronamiento para protegerlo frente a daños producidos por salpicaduras y rociado de olas, lluvia, viento y tránsito cuando se utilice como camino.

El tratamiento mínimo recomendado consiste en colocar una capa de tosca o grava seleccionada compactada, de al menos 10 cm de espesor, que debería incrementarse si se prevé tránsito pesado o frecuente.

3.3.1.5 Zonificación

Una zonificación incorrecta de los materiales en el coronamiento puede conducir a un control deficiente de la construcción, pérdida de tiempo y eventualmente a fallas locales.

En presas zonificadas, la parte superior del núcleo impermeable debería extenderse hasta una altura dentro del terraplén del orden de la cota de laminación de la crecida de diseño. Esto tiene por objeto evitar la percolación a través de las zonas superiores del terraplén y a la vez contar con una protección permanente de materiales no cohesivos por arriba que evite la reducción significativa de su humedad por evaporación.

Asimismo, corresponde considerar la necesidad de disponer filtros adecuados que eviten la erosión de los finos en las transiciones entre materiales de distinta granulometría.

3.3.1.6 Requisitos de seguridad vial

En la mayoría de las pequeñas presas rurales, el coronamiento cumple únicamente funciones de camino de servicio para operación y mantenimiento, con tránsito ocasional de vehículos livianos. En estos casos, los requisitos geométricos y estructurales pueden limitarse a los necesarios para asegurar condiciones adecuadas de circulación, drenaje y conservación del terraplén.

Cuando se prevea circulación frecuente de maquinaria agrícola o tránsito operativo pesado, el diseño del coronamiento debería contemplar requisitos adicionales de seguridad vial, incluyendo ancho suficiente de calzada, capa de rodadura adecuada, drenaje superficial eficaz y demarcación o protección de bordes.

Asimismo, se recomienda evaluar la necesidad de prever zonas de cruce, áreas de estacionamiento o radios de giro adecuados en los extremos de la presa cuando el camino no tenga continuidad o cuando existan maniobras frecuentes de maquinaria.

Para el caso de circulación de maquinaria agrícola, cuyos operadores suelen tener un campo visual limitado hacia los bordes del coronamiento y equipos con trochas que pueden variar aproximadamente entre 1,50 m y 2,60 m, se recomienda prever coronamientos más anchos, con calzada del orden de 6 a 7 m, capa de rodadura granular de aproximadamente 0,20 m de espesor, pendientes transversales para drenaje y elementos de referenciación lateral que faciliten la conducción y reduzcan el riesgo de salida de calzada.

Entre los elementos de referenciación lateral más apropiados para caminos rurales sobre coronamientos de presa se incluyen delineadores verticales reflectivos, tachas reflectivas, cordones de borde u otros dispositivos equivalentes. Su altura, separación y características reflectivas deberían seleccionarse de acuerdo con buenas prácticas de seguridad vial aplicables a caminos rurales [\[42\]](#).

Cuando se prevea circulación frecuente de maquinaria pesada o tránsito operativo intenso, resulta recomendable evaluar la conveniencia de disponer un camino alternativo aguas abajo de la presa, reservando el coronamiento de la presa principalmente para tránsito liviano y tareas de operación y mantenimiento, reduciendo así las exigencias estructurales sobre el terraplén.

Cuando se considere además la utilización del coronamiento como vía habilitada al tránsito público, corresponde tener presente que este uso implica aspectos jurisdiccionales, administrativos y legales que exceden el alcance técnico del presente Manual y que deberían resolverse previamente a su habilitación formal.

3.3.2 Configuración de Taludes

La pendiente de los taludes de una presa de materiales sueltos influye directamente en su estabilidad global, en el comportamiento hidráulico del terraplén y en la facilidad de construcción y mantenimiento. En la etapa de diseño preliminar se adoptan pendientes basadas en la experiencia acumulada en obras similares y en las características generales de los materiales disponibles.

Estas pendientes constituyen una configuración inicial de diseño, que posteriormente debería verificarse mediante los análisis de estabilidad desarrollados en la Sección 3.5, considerando las distintas situaciones y condiciones de carga que pueden presentarse durante la vida útil de la presa.

En presas de pequeña altura construidas con materiales cohesivos compactados, es frecuente adoptar pendientes preliminares del orden de:

-
- Talud aguas arriba: entre 3H:1V y 2,5H:1V, siendo habituales pendientes próximas a 3H:1V cuando se desea mejorar el comportamiento frente al oleaje o facilitar las tareas de mantenimiento.
 - Talud aguas abajo: entre 2H:1V y 3H:1V, observándose en el contexto nacional numerosas presas de pequeña altura con pendientes del orden de 2H:1V, siempre que el diseño contemple adecuadamente el control de filtraciones y que la estabilidad del terraplén quede verificada mediante los análisis correspondientes.

Pendientes más tendidas pueden adoptarse cuando se desea facilitar el mantenimiento o cuando los materiales presentan menor resistencia al corte. Pendientes más empinadas solo deberían adoptarse en casos debidamente justificados por el proyectista, en función de los parámetros geotécnicos disponibles y de la categoría de DPA de la obra.

En ocasiones puede resultar conveniente disponer bermas intermedias de aproximadamente 1 a 2 m de ancho en el talud aguas abajo, con el objetivo de facilitar las tareas de inspección, mantenimiento, control de vegetación y acceso a instrumentación. La necesidad, ubicación y dimensiones de estas bermas deberán evaluarse en función de la altura del terraplén, la pendiente adoptada y los requerimientos de operación y mantenimiento previstos.

3.3.2.1 Protección de taludes

La protección de los taludes tiene como objetivo evitar la erosión superficial, preservar la estabilidad del cuerpo de la presa y mantener la funcionalidad hidráulica del embalse. Las soluciones adoptadas deberían adaptarse al clima local, al tipo de suelo, al régimen hidráulico del embalse, a la disponibilidad local de materiales adecuados y a su viabilidad económica, así como a las condiciones de mantenimiento previstas.

Los criterios de diseño y las soluciones constructivas para la protección de taludes se desarrollan en la Sección 3.6.

3.4 Elementos de Estanqueidad y Control de Filtraciones

El diseño de los elementos de estanqueidad y control de filtraciones constituye la materialización directa del principio de control del flujo establecido en la Sección 3.1. En una presa de materiales sueltos, el diseño debería procurar limitar al máximo la infiltración mediante la disposición de zonas de baja permeabilidad; sin embargo, dado que la filtración no puede ser completamente impedida, resulta necesario complementar estas zonas con sistemas de filtros y drenes que permitan interceptar,

conducir y controlar en forma segura el flujo remanente. La correcta definición de estos elementos resulta fundamental para prevenir fenómenos de inestabilidad hidráulica, tales como el sifonamiento o la erosión interna.

Para ello, la presa se organiza mediante una zonificación interna de materiales, en la cual cada zona cumple una función hidráulica y estructural específica.

Diversas guías técnicas internacionales ofrecen criterios de referencia para la definición de estas zonas. Entre ellas, la Guía Técnica N° 2 de SPANCOLD [\[41\]](#) presenta parámetros orientativos para núcleos impermeables, filtros, drenes, espaldones y zonas de transición. Estos valores deben ajustarse en cada proyecto en función de la caracterización geotécnica realizada sobre los materiales disponibles, las condiciones de fundación y la categoría de DPA de la presa.

3.4.1 Cuerpo Impermeable de la Presa

El elemento principal de control de filtraciones en una presa de materiales sueltos es el cuerpo impermeable del terraplén, que puede adoptar la forma de un núcleo central en presas zonificadas o de un macizo relativamente homogéneo en presas homogéneas modificadas.

El material utilizado en esta zona debería presentar baja permeabilidad y suficiente cohesión, de modo de limitar el flujo de agua a través del terraplén y mantener la línea de saturación dentro de zonas controladas del sistema drenante.

En presas de materiales sueltos es habitual emplear suelos finos de tipo arcilloso o limoso-arcilloso clasificados como CL, CH, SC o ML según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

En términos orientativos, los materiales utilizados en el núcleo impermeable suelen presentar las siguientes características:

- Material predominantemente arcilloso o limoso-arcilloso.
- Límite líquido LL > 30 %.
- Índice plástico IP > 15 %.
- Contenido de grava ($D > 4,75$ mm) inferior a 10 %.
- Permeabilidad objetivo del orden de $k \leq 10^{-6}$ cm/s.
- Material libre de características dispersivas, colapsables o susceptibles a degradación química.

Se recomienda confirmar estos valores mediante ensayos de laboratorio representativos de los materiales disponibles en los préstamos del proyecto (Ver Sección 2.6.3).

Asimismo, corresponde tener presente que la permeabilidad efectiva del núcleo depende en gran medida del grado de compactación alcanzado en obra, por lo que el control de la energía de compactación, el contenido de humedad y el espesor de las capas colocadas resulta determinante para el comportamiento hidráulico final del terraplén.

Además de la permeabilidad del material, el ancho del núcleo impermeable constituye un parámetro central para controlar el gradiente hidráulico y reducir el riesgo de erosión interna. Como criterio orientativo, distintas referencias internacionales recomiendan adoptar anchos del núcleo en la base del orden de $1/4$ a $1/2$ de la altura de la presa, ajustados según la permeabilidad del material disponible, las condiciones de fundación, la geometría del terraplén y el sistema filtrante y drenante previsto [25; 41; 43].

En pequeñas presas rurales del Uruguay, donde frecuentemente existe disponibilidad local de materiales arcillosos o limoso-arcillosos en volúmenes suficientes, resulta recomendable evitar diseños excesivamente ajustados del núcleo impermeable, privilegiando configuraciones robustas que faciliten la construcción, mejoren la continuidad del cuerpo impermeable y contribuyan a mantener gradientes hidráulicos moderados.

Asimismo, corresponde tener presente que los gradientes hidráulicos admisibles dependen fuertemente del tipo de material y de su susceptibilidad a erosión interna, por lo que el diseño del núcleo debería analizarse juntamente con el sistema filtrante y drenante adoptado [26]

Cuando los materiales disponibles presenten permeabilidades algo superiores a los valores orientativos indicados, el proyectista podrá adoptar distintas estrategias de diseño para mantener el control de filtraciones. Entre ellas pueden mencionarse:

- aumentar el ancho del núcleo impermeable;
- incorporar filtros y drenes de mayor capacidad para manejar un mayor caudal de filtración;
- disponer mantos impermeables aguas arriba que aumenten la longitud del camino de filtración;
- incrementar la energía de compactación del material colocado con el objetivo de reducir su permeabilidad efectiva.

La solución adoptada debería verificarse mediante el análisis del flujo y de la estabilidad hidráulica del terraplén.

3.4.2 Tratamiento de la Fundación

La fundación de la presa constituye otro componente fundamental del sistema de estanqueidad. Tanto el terreno de apoyo en profundidad como la interfaz entre el terraplén y el terreno natural pueden convertirse en vías preferenciales de filtración si no se adoptan medidas adecuadas de tratamiento.

En particular, la presencia de suelos permeables, estratos heterogéneos o macizos rocosos fracturados puede favorecer el desarrollo de filtraciones por debajo del terraplén. Por esta razón, el diseño debería considerar no solo el contacto presa-fundación, sino también las condiciones hidráulicas del terreno subyacente.

La superficie de fundación debería quedar libre de materiales orgánicos, sueltos o saturados antes de iniciar la colocación del terraplén. Asimismo, no resulta recomendable dejar capas intermedias blandas o degradables que puedan generar asentamientos diferenciales o concentraciones de flujo [44].

El objetivo del tratamiento de fundación es reducir la permeabilidad del terreno de apoyo y asegurar la continuidad hidráulica entre el terraplén y la fundación, evitando la formación de caminos preferenciales de flujo.

Entre las técnicas utilizadas para el tratamiento de fundación pueden mencionarse:

- dentellones impermeables,
- mantos impermeables aguas arriba (blankets),
- cortinas de inyección,
- muros pantalla o diafragmas.

En pequeñas presas rurales, debido a su simplicidad constructiva la solución más frecuente es el llamado “dentellón de anclaje”.

3.4.3 Dentellón de Anclaje

El dentellón es una excavación longitudinal en la fundación, ejecutada a lo largo del eje de la presa con el objetivo de mejorar la impermeabilidad de la interfaz entre la fundación y el relleno del terraplén.

Entre los criterios habituales de diseño del dentellón pueden mencionarse:

- Profundidad: hasta alcanzar un estrato suficientemente impermeable o roca sana.
- Transición en estribos: reducción progresiva de la profundidad hacia los estribos.

-
- Cota superior: presencia efectiva hasta aproximadamente 0,50 m por encima del nivel máximo operativo del embalse.
 - Ancho de base: suficiente para facilitar su excavación y la compactación adecuada del material impermeable de relleno (del orden de 3 m como mínimo).
 - Taludes de excavación: pendientes del orden de 1H:1V en suelos consistentes.

El relleno se ejecuta normalmente con arcilla compactada en capas sucesivas, controlando humedad y densidad de compactación.

En presas fundadas sobre suelos o sobre roca fracturada, el contacto aguas abajo entre el material impermeable del dentellón y la fundación puede constituir una zona donde se desarrollen gradientes hidráulicos relativamente elevados.

Por esta razón, salvo que el material de fundación presente características de permeabilidad similares a las del material impermeable del dentellón, se recomienda disponer contra el talud aguas abajo del mismo una capa de transición o filtro granular. Este filtro tiene por finalidad evitar que los finos del material arcilloso del dentellón puedan ser arrastrados por el flujo de agua hacia la fundación aguas abajo, reduciendo así el riesgo de erosión interna en esta zona.

Este elemento forma parte del sistema general de control de filtraciones de la presa, junto con los drenes y filtros internos del terraplén, tal como se ilustra en la Figura 3-5 y la Figura 3-6.

El diseño granulométrico de este material filtrante debería seguir los criterios habituales descritos en la Sección 3.4.4.

3.4.4 Sistema de Filtros

El sistema de filtros constituye una defensa esencial frente a la erosión interna o *pipiing*, uno de los mecanismos de falla más frecuentes en presas de materiales sueltos.

La aplicación de los criterios de diseño de filtros debería ser proporcional a la categoría de DPA y a la complejidad de la obra: la profundidad y el alcance de las verificaciones —granulométricas, de durabilidad y de comportamiento filtro-suelo— pueden graduarse en función de las consecuencias potenciales de una falla y de las características del proyecto, recurriendo a verificaciones más exhaustivas a medida que aumentan el DPA y la exigencia de la obra. La definición del alcance apropiado en cada caso corresponde al proyectista, con la intervención de la Autoridad Competente cuando así se requiera. El objetivo es preservar la seguridad de la presa

sin trasladar a las pequeñas presas de riego exigencias desproporcionadas respecto de su escala y su riesgo, en coherencia con el carácter de guía técnica de buenas prácticas de este Manual.

3.4.4.1 Criterios granulométricos

La función del filtro es doble: permitir el paso del agua en condiciones hidráulicas seguras y retener las partículas finas del material que protege, evitando el desarrollo de procesos de erosión interna.

Este principio de funcionamiento se ilustra en la Figura 3-7, donde se observa cómo el agua puede atravesar el material filtrante mientras las partículas finas del suelo base quedan retenidas en la interfaz entre ambos materiales.

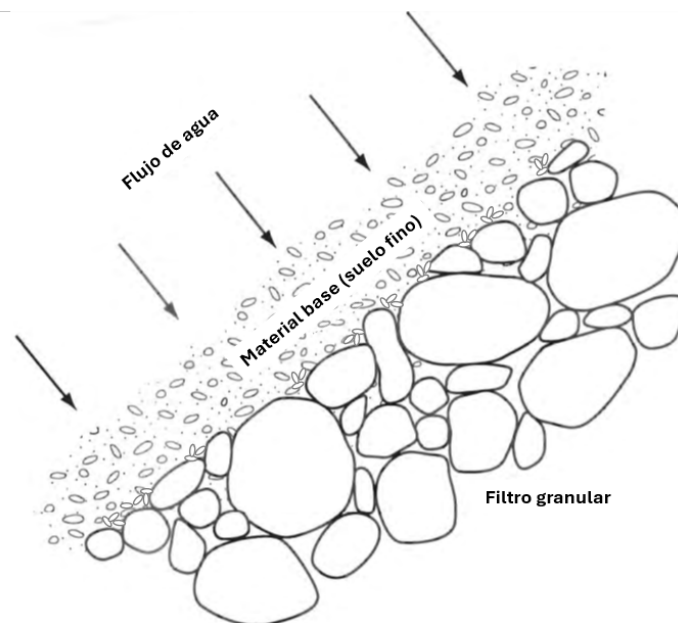


Figura 3-7. Principio de funcionamiento de un filtro granular: el agua atraviesa el filtro mientras las partículas del material base son retenidas en la interfaz. (Tomado de FEMA - Filters for Embankment Dams -2011 [45]).

Los criterios clásicos de diseño se basan en las relaciones granulométricas propuestas por Karl Terzaghi, que establecen condiciones simultáneas de retención y permeabilidad.

- Criterio de retención

$$D_{15,\text{filtro}} \leq 4 \times D_{85,\text{base}}$$

- Criterio de permeabilidad

$$D_{15,\text{filtro}} \geq 4 \times D_{15,\text{base}}$$

3.4.4.2 Criterios modernos de diseño de filtros

Los criterios anteriores constituyen la base clásica del diseño de filtros granulares y continúan siendo ampliamente utilizados para verificaciones preliminares. Sin embargo, la experiencia acumulada en presas de materiales sueltos mostró que el cumplimiento exclusivo de las relaciones granulométricas de Terzaghi no resulta suficiente en todos los casos para garantizar el adecuado comportamiento hidráulico del sistema filtrante.

En particular, se observaron casos de erosión interna asociados a:

- suelos base con contenido significativo de finos;
- materiales internamente inestables;
- segregación del propio filtro durante producción, transporte o compactación;
- y utilización de filtros con gradaciones excesivamente abiertas o con presencia de finos plásticos.

Como consecuencia, el diseño moderno de filtros evolucionó hacia criterios más completos, particularmente los desarrollados por Sherard y Dunnigan (1989), posteriormente adoptados y ampliados por USBR, USACE, NRCS e ICOLD [46].

Estas metodologías mantienen la lógica básica de retención y permeabilidad propuesta por Terzaghi, pero incorporan además:

- clasificación del suelo base según contenido de finos y susceptibilidad a erosión interna;
- criterios diferenciados para materiales cohesivos y no cohesivos;
- control de estabilidad interna y susceptibilidad a segregación del filtro;
- limitación del contenido de finos plásticos;
- y requisitos de gradación continua compatibles con las condiciones reales de construcción.

En particular, los criterios USBR/NRCS clasifican el suelo base en cuatro categorías según el porcentaje de material pasante tamiz N.º200 y el tamaño característico D85b [46][44]:

- Categoría 1: más de 85 % pasante tamiz N.º200;
- Categoría 2: entre 40 % y 85 %;
- Categoría 3: entre 15 % y 40 %;
- Categoría 4: menos de 15 %.

Esta clasificación permite ajustar los criterios de diseño del filtro según la susceptibilidad esperada del suelo base a erosión interna. En general, los materiales

con menor contenido de finos requieren filtros más controlados y criterios de retención más estrictos, mientras que los materiales más cohesivos o con mayor proporción de finos admiten relaciones granulométricas más amplias.

Asimismo, los criterios modernos procuran que el material filtrante:

- sea suficientemente fino para retener el suelo protegido;
- suficientemente permeable para evacuar el flujo interceptado;
- suficientemente estable para evitar segregación interna;
- y esencialmente no plástico.

Como parte de estos criterios complementarios, resulta habitual evaluar la forma y continuidad de la curva granulométrica del material filtrante mediante parámetros como el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura.

Coeficiente de uniformidad

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Coeficiente de curvatura

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

Las características orientativas de los materiales utilizados en filtros y drenes se resumen en la Tabla 3-1.

Zona	Parámetros recomendados	Función principal
Filtro	Diseño según criterios de retención y permeabilidad	Evitar migración de finos
	$C_u > 4$	Gradación estable
	$1 < C_c < 3$	Curva granulométrica continua
	Finos ($< 0,075$ mm) < 5 %	Evitar colmatación
	Material no plástico	Estabilidad hidráulica
Dren	Material granular limpio	Alta permeabilidad
	Finos ($< 0,075$ mm) < 3 %	Evitar colmatación
	Gradación continua	Evitar segregación
	Alta conductividad hidráulica	Conducir caudales filtrados

Tabla 3-1. Parámetros orientativos para filtros y drenes

3.4.4.3 Criterios de durabilidad del material filtrante

Además del cumplimiento de los criterios granulométricos, el agregado utilizado en filtros y drenes debería asegurar su funcionalidad durante toda la vida útil de la presa. Se recomienda verificar los siguientes criterios de durabilidad:

- Ausencia de materia orgánica, verificada por ensayo visual de colorimetría o equivalente, debido al riesgo de descomposición y generación de finos con el tiempo.
- Resistencia al desgaste por abrasión, evaluada mediante el ensayo de Los Ángeles [47; 48], con pérdida no mayor al 50 %.
- Durabilidad frente a ciclos químicos, evaluada mediante el ensayo de sanidad por sulfatos [49; 50], con pérdidas orientativas no mayores al 10 % con sulfato de sodio o al 15 % con sulfato de magnesio para el material fino de filtro; en gravas de dren más gruesas pueden admitirse pérdidas algo mayores, del orden del 12 % y 18 %, respectivamente.
- Limitación de partículas deleznales o friables (terrones de arcilla y partículas friables), con un contenido orientativo no mayor al 3 % en peso, según lo recomendado para agregados de filtros y drenes.

Estos criterios resultan particularmente relevantes para filtros y drenes, cuyo correcto funcionamiento debería sostenerse durante décadas bajo condiciones de flujo variable [46; 45; 51; 52].

3.4.4.4 Diseño de filtros de geotextil

Cuando los materiales granulares aptos para filtros no están disponibles localmente en cantidad adecuada, o cuando el costo de su obtención y de su verificación granulométrica resulta desproporcionado respecto al alcance de la obra, se contempla el uso de geotextil como filtro. Esta solución requiere considerar las siguientes salvedades:

- a) El geotextil podría tener durabilidad limitada por degradación química, abrasión mecánica y colmatación progresiva. Una vez instalado en zonas no recuperables del cuerpo de presa, su falla no es subsanable. Por esta razón, cuando exista material granular adecuado disponible, se prefiere filtro granular.
- b) El geotextil tampoco es la solución correcta cuando los gradientes hidráulicos previstos son severos, cuando hay flujo intermitente con potencial de migración de finos pulsada, o cuando los suelos a proteger son altamente dispersivos. En estos casos se recomienda filtro granular o solución mixta.

c) Cuando se opte por geotextil, su dimensionamiento debería verificar dos criterios complementarios: retención (el geotextil debería impedir la migración de los finos del suelo a proteger) y permisividad (el geotextil debería permitir el paso del agua sin generar pérdidas de carga inaceptables ni sobrepresiones).

El criterio de retención adoptado es:

$$O_{90} \leq C \cdot D_{85}$$

donde O_{90} es la abertura característica del geotextil, D_{85} es el diámetro pasante 85 % del suelo a proteger, y $C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4$ es un factor de corrección integrado que se determina como sigue:

- C_1 : 0,8 si la granulometría del suelo a proteger es uniforme; 1,0 si es bien graduada.
- C_2 : 0,8 si el suelo a proteger es blando; 1,25 si es denso y compactado.
- C_3 : 0,5 si el gradiente hidráulico previsto es menor que 5; 0,8 si está entre 5 y 20; 0,6 para flujo inverso.
- C_4 : 0,3 si la función es la de filtro drenante con flujo continuo; 1,0 si es filtro estabilizador sin flujo.

El criterio de permisividad adoptado, conservador, es:

$$\phi_{\text{geo}} \geq 10^5 \cdot k_s$$

donde ϕ_{geo} es la permisividad del geotextil (s^{-1}) y k_s la permeabilidad del suelo a proteger (m/s). El factor 10^5 corresponde a obras de alto nivel de seguridad según el Manual de Drenagem de Rodovias [53].

En presas de DPA Bajo y altura moderada, el dimensionamiento puede simplificarse adoptando geotextiles cuyos proveedores brinden ficha técnica con valores certificados de O_{90} y de permeabilidad. Donde los criterios queden en el límite, o donde el suelo a proteger sea dispersivo o de granulometría desfavorable, se recomienda ensayo específico de filtro-suelo (Gradient Ratio Test, ASTM D5101) previo a la adopción del dimensionamiento.

3.4.5 Sistema de Drenaje

Los drenes constituyen el componente del sistema de control de filtraciones encargado de interceptar, recoger y conducir hacia el exterior de la presa los caudales que atraviesan el terraplén y, cuando corresponde, la fundación, reduciendo las

presiones intersticiales y manteniendo controlada la posición de la línea de saturación.

En el diseño de sistemas de drenaje interno de presas de materiales sueltos resulta fundamental distinguir entre la función de filtro y la función de dren. El filtro tiene por objeto retener las partículas finas del material aguas arriba evitando su migración hacia el dren, mientras que el dren tiene por objeto conducir el agua filtrada hacia un punto de evacuación seguro. Cuando se utilizan geotextiles en el sistema, su función corresponde a la de filtro —y no a la de dren—, por lo que la función drenante propiamente dicha debería materializarse mediante un material granular adecuadamente graduado, con capacidad de transporte de agua, espesor suficiente y continuidad hidráulica hasta la salida.

En presas de materiales sueltos, el sistema de drenaje interno puede estar compuesto por elementos como dren chimenea, solera drenante y dren de pie, en distintas combinaciones según el tamaño, categoría de DPA y características de la obra. En cualquiera de estas configuraciones puede o no incorporarse un geotextil con función de filtro, según la disponibilidad de materiales granulares adecuados y las particularidades del proyecto.

3.4.5.1 Dren chimenea

El dren chimenea es un elemento vertical o subvertical dispuesto aguas abajo del núcleo impermeable, cuya función principal es interceptar el flujo que atraviesa el cuerpo del terraplén y controlar la posición de la línea de saturación, evitando su afloramiento en el talud aguas abajo.

3.4.5.2 Solera drenante

La solera drenante se dispone sobre la fundación, en la base del espaldón aguas abajo, y cumple una doble función. Por un lado, actúa como elemento colector que recibe y conduce hacia aguas abajo los caudales interceptados por el dren chimenea. Por otro, cuando las condiciones de fundación lo requieren, capta el flujo que se desarrolla a través del terreno de apoyo —incluyendo aquel que podría circular por debajo del dentellón de anclaje— aliviando subpresiones y evitando que dicho flujo continúe su trayectoria hacia aguas abajo con arrastre de partículas finas de la fundación.

Esta función resulta particularmente relevante en fundaciones relativamente permeables o cuando el tratamiento de estanqueidad aguas arriba no logra interceptar completamente las trayectorias de filtración profundas, en cuyo caso la

solera debería actuar simultáneamente como elemento de filtro y drenaje en la interfaz presa–fundación.

3.4.5.3 Dren de pie

El dren de pie se ubica en el extremo aguas abajo del sistema drenante y tiene como función asegurar la captación del flujo que atraviesa el terraplén, contribuyendo al descenso final de la línea de saturación y evitando su afloramiento en el talud aguas abajo. En configuraciones que incluyen solera drenante, el dren de pie constituye la continuación de la misma hacia aguas abajo, permitiendo la evacuación controlada de los caudales de filtración.

3.4.5.4 Trincheras drenantes interiores

Además de los sistemas drenantes continuos descritos anteriormente, en algunas configuraciones —especialmente en obras de pequeña escala— la captación del flujo puede resolverse mediante trincheras drenantes dispuestas longitudinalmente en el interior del terraplén, generalmente junto al pie aguas abajo del núcleo, rellenas con material granular drenante.

En ciertos casos, se dispone en el interior de la trinchera una tubería perforada que mejora la capacidad de conducción del flujo. El material granular drenante que rodea la tubería debería tener una granulometría compatible con las dimensiones de las perforaciones —de modo que no se introduzcan partículas en el interior del caño— y poseer suficiente capacidad de transporte de agua. La separación entre este material drenante y el suelo del terraplén o de la fundación debería materializarse mediante un filtro graduado —granular o de geotextil— diseñado conforme a las leyes de filtro establecidas en la Sección 3.4.4.

Estas soluciones —con o sin tubería perforada— actúan como elementos lineales de captación y conducción inicial del flujo dentro del terraplén. En determinadas configuraciones pueden emplearse junto con otros elementos de drenaje interno o constituir una solución simplificada para pequeñas presas, aunque su capacidad de interceptación resulta generalmente menor que la de los sistemas drenantes continuos de mayor desarrollo transversal.

Su capacidad de captación depende de la trayectoria de las filtraciones dentro del terraplén. Mientras que un dren chimenea constituye un elemento drenante continuo que intercepta el flujo a medida que emerge desde el núcleo en distintos niveles de la sección, una trinchera drenante concentra esa función en una zona localizada. Por ello, su eficacia para captar las filtraciones que atraviesan el núcleo depende de que éstas converjan efectivamente hacia la trinchera a través de materiales adyacentes

suficientemente permeables. Por esta razón, no necesariamente sustituyen las funciones desempeñadas por un dren chimenea o por una solera drenante. En particular, cuando resulta necesario interceptar filtraciones provenientes de la fundación o controlar la posición de la línea de saturación en una porción significativa de la sección del terraplén, los sistemas drenantes continuos suelen proporcionar un control hidráulico más efectivo.

3.4.5.5 Uso de geotextiles en sistemas drenantes

El uso de geotextiles como elemento filtrante en el cuerpo de la presa debe analizarse con cautela, dado que su inspección, mantenimiento o reemplazo dentro del terraplén resulta inviable durante la etapa operativa de la obra. En pequeñas presas rurales, donde la disponibilidad de materiales granulares adecuados para conformar filtros graduados puede ser limitada, el geotextil constituye una alternativa aceptable, siempre que:

- a. se diseñe estrictamente como filtro y no como dren, debiendo la función drenante materializarse mediante material granular con capacidad de transporte adecuada;
- b. se seleccionen adecuadamente sus propiedades, incluyendo gramaje y abertura de poro, siguiendo criterios reconocidos como los desarrollados en FEMA Filters for Embankment Dams [45];
- c. se documenten sus especificaciones, ubicación y condiciones de instalación, de modo de facilitar futuras tareas de auscultación e interpretación del comportamiento del sistema drenante.

El sistema de drenaje interno así dispuesto permite interceptar y conducir en forma segura los caudales de filtración, tanto provenientes del terraplén como, en su caso, de la fundación, manteniendo el flujo dentro de condiciones controladas.

3.4.5.6 Conducción, descarga e inspección del drenaje

La conducción de los caudales interceptados por el sistema drenante puede realizarse mediante flujo a través de medios granulares o mediante conducciones localizadas, según la configuración adoptada. En los sistemas tradicionales, la evacuación del flujo se produce a través de la continuidad del medio drenante (chimenea, solera y dren de pie), sin necesidad de elementos de conducción diferenciados. En otras configuraciones pueden emplearse tuberías, ya sea para facilitar la conducción de los caudales hacia el exterior de la presa o para aumentar la capacidad de transporte de determinados elementos drenantes.

Más allá de la configuración específica adoptada, el diseño del sistema drenante debería priorizar, en primer término, la captación y evacuación eficiente de los caudales de filtración, de modo de controlar la posición de la línea de saturación y reducir las presiones intersticiales dentro del terraplén y su fundación. Complementariamente, resulta recomendable que las descargas del sistema puedan observarse en condiciones que permitan detectar eventuales arrastres de materiales finos y, cuando sea posible, medir los caudales evacuados.

Asimismo, puede resultar conveniente complementar esta disposición básica mediante puntos de observación y medición que permitan analizar el comportamiento de distintos sectores de la presa y, en aquellas obras donde las consecuencias potenciales de una falla lo justifiquen, incorporar sistemas de registro automático de niveles o caudales. Dado que los drenajes y filtraciones constituyen uno de los indicadores más sensibles del comportamiento de las presas de materiales sueltos, la observación sistemática de estos parámetros suele proporcionar información valiosa sobre la evolución de anomalías internas, con una complejidad constructiva y un costo relativamente reducidos en relación con la claridad y evidencia obtenida para la gestión de la seguridad de la presa.

Asimismo, las filtraciones que emerjan en el pie de presa o en el terreno aguas abajo constituyen una fuente particularmente valiosa de evidencia sobre el comportamiento hidráulico de la presa y su fundación. Estas surgencias pueden originarse en trayectorias preferenciales de filtración claramente identificables o manifestarse de forma más difusa a través de sectores localmente saturados del talud aguas abajo, del pie de presa o incluso del propio sistema drenante.

Por esta razón, resulta recomendable aprovechar, en la medida de lo posible, las condiciones naturales de escurrimiento para captar y conducir estos caudales hacia puntos claramente identificables y accesibles, donde puedan observarse y eventualmente medirse antes de incorporarse al drenaje natural del terreno o reinfiltrarse. Siempre que resulte factible, conviene además mantener diferenciados los caudales provenientes de drenajes y filtraciones de los escurrimientos superficiales generados por precipitaciones o por el drenaje natural del terreno adyacente, facilitando así la interpretación de su comportamiento y la detección temprana de eventuales anomalías.

Las consideraciones relativas al diseño de sistemas de drenaje orientados a la observación y medición de filtraciones se complementan con los criterios de instrumentación y auscultación desarrollados en la Sección 3.7 y en el Anexo D. Los aspectos vinculados a la identificación de filtraciones durante el primer llenado y a su

seguimiento durante la etapa operativa se desarrollan con mayor detalle en las Secciones 5.10.1 y 6.2, respectivamente. Para mayor análisis de estos criterios se recomienda la lectura de la guía FEMA P-1032 [\[54\]](#).

3.5 Análisis de Estabilidad y Factores de Seguridad

La geometría preliminar de la presa, los materiales seleccionados y las soluciones de fundación definidas durante las etapas de estudios preliminares y prediseño deben verificarse y, cuando corresponda, ajustarse a partir de la información obtenida durante la investigación geológica, geotécnica e hidráulica del sitio. Los análisis desarrollados en esta etapa permiten optimizar la configuración final de la presa y justificar técnicamente las pendientes de los taludes, las dimensiones de los distintos elementos de la sección y los tratamientos eventualmente requeridos en la fundación.

La seguridad de una presa de materiales sueltos depende de su capacidad para resistir adecuadamente los distintos mecanismos potenciales de falla que pueden presentarse durante su construcción, primer llenado y operación. El Anexo B presenta

Dentro de ese conjunto de mecanismos, la presente sección se concentra específicamente en la estabilidad geotécnica del terraplén y de su fundación, así como en los aspectos hidráulicos que influyen directamente sobre dicha estabilidad. Otros mecanismos potenciales de falla se desarrollan en distintas secciones del Manual, incluyendo el control de filtraciones y erosión interna (Sección 3.4), el sobrepaso del coronamiento y la seguridad hidráulica de los vertederos (Capítulo 4), las conducciones y obras anexas (Capítulo 4), y los aspectos vinculados a vigilancia, auscultación y gestión de la seguridad durante la operación (Capítulo 6).

La identificación sistemática de modos potenciales de falla constituye una práctica cada vez más utilizada en seguridad de presas a nivel internacional. El enfoque adoptado en este Manual se encuentra alineado conceptualmente con metodologías como FMA o PFMA y se presenta de forma introductoria en el Anexo B.

En pequeñas presas de DPA Bajo suele resultar suficiente una identificación cualitativa de los principales modos de fallo plausibles. Para presas de DPA Medio y Alto puede resultar conveniente incorporar análisis más estructurados como parte de las revisiones periódicas de seguridad.

3.5.1 Situaciones de inestabilidad a considerar

Se recomienda considerar al menos las siguientes situaciones potenciales de inestabilidad:

- Inestabilidad global del terraplén.

-
- Inestabilidad de la fundación o de los contactos presa–fundación.
 - Gradientes hidráulicos elevados que puedan comprometer la estabilidad de la fundación o generar condiciones de sifonamiento.
 - Condiciones de desembalse rápido que puedan afectar la estabilidad del talud aguas arriba.
 - Cuando corresponda, acciones sísmicas y sus efectos sobre la estabilidad de la presa y su fundación.

3.5.2 Hipótesis de carga y factores de seguridad

La verificación de estabilidad de pequeñas presas debería contemplar distintas condiciones de carga representativas de su ciclo de vida:

- Fin de la construcción y primer llenado del embalse, considerando estados no drenados y ausencia de consolidación.
- Embalse lleno, como condición permanente con presiones intersticiales estabilizadas. Se considerará el nivel máximo del embalse correspondiente al vertimiento de la crecida de diseño.
- Desembalse rápido, que puede inducir gradientes inversos en el talud aguas arriba. El talud aguas arriba permanece, en general, próximo a la saturación durante períodos prolongados de embalse lleno, condicionando su respuesta ante descensos rápidos posteriores por retardo en la disipación de presiones internas.

En las pequeñas presas destinadas a riego, los descensos significativos del nivel del embalse forman parte habitual del ciclo operativo anual, asociados al uso del agua almacenada durante la temporada de riego. Estos terraplenes se construyen con frecuencia con materiales de permeabilidad relativamente baja, en los que el drenaje interno y la disipación de las presiones intersticiales se producen con lentitud. Cuando el nivel del embalse desciende con mayor rapidez que esa disipación, el espaldón aguas arriba conserva transitoriamente presiones de poro elevadas al tiempo que desaparece el efecto estabilizador de la presión del agua sobre el talud, lo que reduce su margen de estabilidad. Por esta razón, en este tipo de presas el desembalse rápido debería tratarse como una situación operativa habitual, y no como un evento accidental, y se incorpora como tal entre las condiciones de análisis de la Tabla 3-2. Este criterio resulta consistente con la normativa técnica española vigente [55, Secc. III, 11.3], y con referencias internacionales que distinguen entre desembalses operacionales y desembalses excepcionales o de emergencia [46, Cap. 4.2.4; 56, Tabla 3-1, Nota 5].

Situación de análisis	Condición de análisis	DPA Alto	DPA Medio	DPA Bajo
Transitoria controlada	Final de Construcción y Primer llenado	1,30	1,20	1,10
Normal / permanente	Embalse lleno	1,50	1,40	1,30
Transitoria frecuente	Desembalse rápido	1,50	1,40	1,30

*Tabla 3-2. Factores de seguridad para la estabilidad en presas de riego
(Adaptado de NTS2, 2021, Tabla IV [55])*

3.5.3 Métodos de cálculo

Se podrán emplear métodos de equilibrio límite (Bishop, Janbu, Spencer) para el análisis estático convencional [56, App. G], y/o métodos numéricos (elementos finitos o diferencias finitas) cuando se requiera modelar condiciones no lineales, anisotropías o acoplamiento flujo-deformación. La evaluación de presiones intersticiales y gradientes hidráulicos se realizará mediante modelos de flujo en régimen estacionario o transitorio, según corresponda. Para presas de DPA Bajo, el proyectista podrá justificar simplificaciones con base en antecedentes de obras del mismo orden construidas con materiales y condiciones similares.

3.5.4 Parámetros geotécnicos

Los parámetros de resistencia al corte utilizados en los análisis de estabilidad deberían seleccionarse en función del tipo de material y del estado de drenaje esperado:

- Para materiales arcillosos saturados y sometidos a cargas rápidas que impiden el drenaje, se utiliza la resistencia al corte no drenada (C_u), ya que la presión del agua en los poros no tiene tiempo de disiparse. Esta condición es característica de suelos de baja permeabilidad y situaciones de carga de corto plazo, donde la resistencia es una función del esfuerzo total.
- Para materiales granulares, o para arcillas en condiciones de largo plazo (estado drenado), se utilizarán el ángulo de fricción efectiva (ϕ') y la cohesión efectiva (c').

Los parámetros geotécnicos utilizados en los análisis de estabilidad deberían seleccionarse a partir de los resultados obtenidos durante el programa de investigaciones y ensayos descrito en la Sección 2.5. La determinación de valores representativos para el diseño requiere interpretar en forma integrada la información proveniente de ensayos de campo, ensayos de laboratorio y la experiencia local disponible.

Las correlaciones empíricas podrán utilizarse como herramienta complementaria, siempre que se encuentren adecuadamente justificadas y, cuando sea posible, contrastadas con resultados obtenidos directamente sobre los materiales investigados.

Ejemplo de correlación:

- Para arenas limpias: $\phi' \approx 30^\circ\text{--}38^\circ$ según densidad relativa.
- Para arcillas blandas: $C_u \approx (0,2\text{--}0,3) \times \sigma'_v$ (tensión vertical efectiva). [57].

Los criterios presentados en esta sección se apoyan en referencias técnicas internacionales ampliamente utilizadas en ingeniería de presas y geotecnia aplicada, adaptadas al contexto de pequeñas presas en Uruguay.

3.6 Protección de Taludes y Revestimientos

La protección de los taludes de una presa de materiales sueltos tiene como objetivo evitar procesos de erosión superficial, garantizar la estabilidad del terraplén y preservar la funcionalidad hidráulica del embalse a lo largo de la vida útil de la obra.

En términos generales, los mecanismos de deterioro más frecuentes son:

- la acción del oleaje sobre el talud aguas arriba,
- la erosión superficial por escurrimiento pluvial en el talud aguas abajo,
- y los procesos localizados de socavación o deterioro en zonas singulares.

Por esta razón, las estrategias de protección difieren entre ambos taludes y deben diseñarse considerando su exposición a los distintos agentes de erosión.

3.6.1 Protección del talud aguas arriba

El talud aguas arriba está expuesto principalmente a la acción del oleaje generado por el viento y a las variaciones del nivel del embalse, procesos que pueden producir erosión superficial, desplazamiento de materiales y deterioro progresivo del terraplén.

La solución técnicamente recomendada para proteger este talud consiste en un revestimiento de enrocado (*rip-rap*) dispuesto sobre una capa de transición o filtro que reduzca el riesgo de pérdida de material fino del terraplén y facilite la disipación de presiones hidráulicas bajo el revestimiento. Esta transición puede resolverse mediante una o más capas granulares filtrantes o, en determinados casos, mediante geotextiles adecuadamente seleccionados e instalados.

Sin embargo, en muchas presas rurales pequeñas el enrocado se coloca directamente sobre el material fino del terraplén, sin una transición intermedia. Esta práctica es frecuente y, en determinadas condiciones, puede resultar aceptable, particularmente en obras de pequeña escala y DPA Bajo donde los costos de ejecutar una transición completa resultan desproporcionados frente a la magnitud de la obra y donde existe capacidad razonable de mantenimiento posterior. No obstante, esta solución puede implicar un deterioro progresivo del talud y asentamientos localizados del revestimiento con el paso del tiempo, como se ilustra en la Figura 3-8 y se observa frecuentemente en pequeñas presas uruguayas.

Cuando el material del terraplén sea particularmente erosionable, la altura de ola de diseño resulte significativa, la presa presente dimensiones importantes o la obra corresponda a categorías de DPA Medio o Alto, se recomienda incorporar una capa de transición o filtro compatible con el material base, conforme a los criterios generales desarrollados en la Sección 3.4.4 (función de filtro).

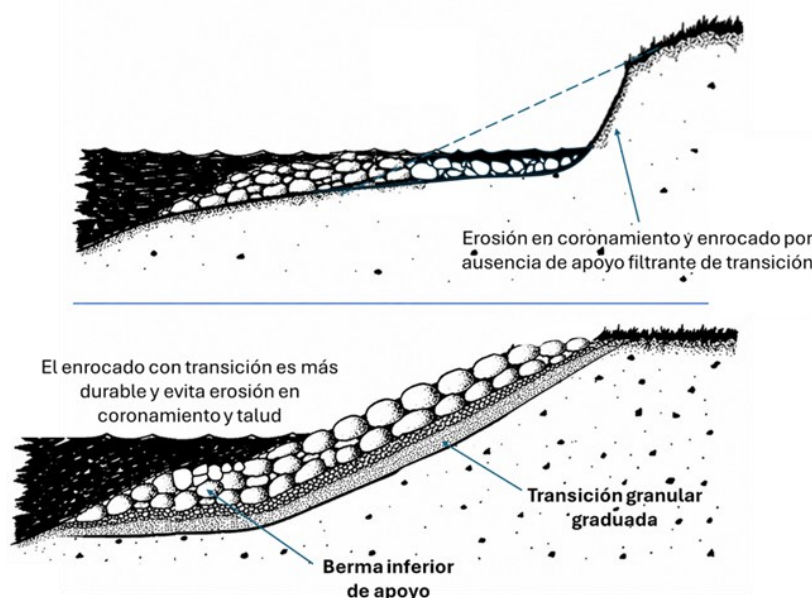


Figura 3-8. Deterioro del talud aguas arriba cuando el enrocado carece de filtro adecuado (sup), y configuración recomendada de protección, capa de transición granular y berma de apoyo (inf). (Figura adaptada de [58, [Upstream Slope Protection](#)]).

Desde el punto de vista técnico, un sistema robusto de protección del talud aguas arriba suele contemplar:

- un revestimiento resistente a la acción del oleaje;
- una transición o filtro compatible con el material del terraplén;
- y un apoyo adecuado en la base del revestimiento, mediante pie o berma de estabilidad.

El uso de geotextiles como transición constituye una alternativa válida en pequeñas presas, particularmente cuando quedan accesibles para inspección y eventual reemplazo. En estos casos, resulta recomendable verificar tanto las condiciones de retención como la capacidad de drenaje del material (permisividad).

En situaciones particulares puede adoptarse una estrategia alternativa basada en mantenimiento periódico del talud, en lugar de una protección permanente continua. En aquellos casos en que no se disponga enrocado u otro revestimiento estable, puede preverse un sobreancho adicional del coronamiento, del orden de 1 m o mayor, como margen de sacrificio frente a erosiones localizadas del borde superior del talud. La adopción de este criterio debería justificarse considerando la pendiente del talud, la altura de ola esperada, la categoría de DPA y, fundamentalmente, la capacidad de mantenimiento prevista para la obra [[25, Cap. 6](#); [59](#); [60](#)].

3.6.1.1 Extensión de la protección con enrocado

El revestimiento debería cubrir completamente la zona sometida a la acción significativa del oleaje. Como criterio orientativo, conviene extender el enrocado desde la cota correspondiente a una permanencia del orden del 65 % —es decir, el nivel que el embalse iguala o supera aproximadamente el 65 % del tiempo— hacia arriba. Según el balance hídrico y las características del embalse, puede adoptarse una permanencia algo mayor, del orden del 70 a 75 %, extendiendo la protección hacia cotas algo inferiores; rara vez resulta necesario descender por debajo de ese rango. El fundamento es que, cuando el nivel del embalse permanece por debajo de esa cota, el lago está bajo: disminuyen el fetch y la profundidad, aumenta la interferencia del fondo con el oleaje y se reduce la energía de las olas que alcanzan el talud, de modo que la exigencia de protección en las cotas inferiores es menor. Esta verificación puede apoyarse en el balance hídrico del embalse y en la curva cota-área-volumen, de modo de relacionar los volúmenes simulados con los niveles efectivos de operación. El criterio anterior constituye una orientación de diseño y no una regla rígida: la cota de inicio de la protección debería ajustarse a las particularidades de cada embalse. Un criterio análogo puede aplicarse en los extremos del dique, donde el fetch y la exposición al oleaje también son más limitados.

Asimismo, resulta recomendable prever en la base del enrocado un pie o berma de apoyo que contribuya a la estabilidad del revestimiento frente a desplazamientos locales.

El límite superior del enrocado se establece habitualmente en pequeñas presas hasta el mismo coronamiento. En proyectos de cierta complejidad o importancia, este criterio podrá complementarse mediante evaluaciones específicas del oleaje, incluyendo el análisis del runup, el setup y el resguardo adoptado, con el fin de ajustar la extensión vertical de la protección.

3.6.1.2 Viento de diseño

El dimensionamiento del enrocado de protección depende principalmente de la altura de ola esperada (función de la velocidad sostenida del viento sobre la superficie del agua y del fetch del embalse²), la pendiente del talud aguas arriba y las características físicas de la roca disponible (peso específico, granulometría, forma, resistencia y durabilidad).

Para la velocidad del viento de diseño debería utilizarse una velocidad sostenida sobre la superficie libre del agua, asociada a una duración compatible con el desarrollo del oleaje y representativa de las condiciones que razonablemente pueden ocurrir durante la vida útil de la presa.

Cuando se disponga de información meteorológica adecuada, la velocidad de diseño debería determinarse mediante análisis de valores extremos o a partir de estudios específicos desarrollados para la región del proyecto.

En ausencia de dichos estudios, y únicamente con fines de predimensionado, podrán adoptarse velocidades sostenidas de referencia del orden de 50 km/h para niveles elevados asociados a eventos de crecida y del orden de 75 km/h para niveles normales máximos de operación, ajustando estos valores cuando existan antecedentes meteorológicos regionales más representativos. Estos valores constituyen únicamente una referencia orientativa para pequeñas presas en el territorio uruguayo y no sustituyen una evaluación meteorológica específica cuando las características del proyecto así lo requieran.

Entre las posibles fuentes de información para la definición del viento de diseño se incluyen registros meteorológicos especializados, estaciones aeroportuarias, estudios desarrollados para parques eólicos, publicaciones técnicas regionales y estaciones meteorológicas de países vecinos ubicadas en zonas climáticamente comparables.

² Fetch: en forma simplificada, es la distancia máxima sobre la cual el viento actúa sobre la superficie libre del agua y genera oleaje sobre la presa.

3.6.1.3 Tamaño y espesor del enrocado

El dimensionamiento del tamaño característico del enrocado puede realizarse mediante relaciones empíricas ampliamente utilizadas en ingeniería hidráulica, tales como las fórmulas de Hudson o Iribarren [[58](#); [59](#)], así como mediante procedimientos desarrollados a partir del análisis del oleaje generado por el viento, como los incluidos en el Shore Protection Manual, en el Design Standards No. 13 del USBR y en diversas recomendaciones internacionales para presas de materiales sueltos [[61](#)][[46](#)].

La altura de ola suele estimarse mediante métodos simplificados basados en la velocidad del viento y el fetch efectivo del embalse. Una vez estimada la altura de ola de diseño, el tamaño de las unidades de roca puede calcularse mediante la fórmula de Hudson o expresiones equivalentes.

No obstante, la experiencia recogida por distintas organizaciones y autores muestra que, para muchos embalses pequeños, los tamaños obtenidos exclusivamente mediante las fórmulas de oleaje pueden resultar inferiores a los que habitualmente se adoptan en la práctica. Esto se debe a diversos factores, entre ellos la manipulación y colocación de las unidades de roca, la durabilidad frente a la meteorización, la resistencia a desplazamientos locales no asociados directamente al oleaje y las irregularidades inevitables de ejecución del talud y del propio revestimiento.

Por esta razón resulta conveniente contrastar los valores calculados con referencias empíricas derivadas de la experiencia de obras en servicio. El USBR [[25](#), [Cap. 6.22](#), [Tabla 6-9](#)] proporciona valores orientativos de espesor y granulometría para enrocados colocados a mano y para enrocados volcados mecánicamente, diferenciando además distintos rangos de fetch. Dichos valores constituyen una referencia práctica basada en la experiencia acumulada y en condiciones de oleaje implícitas asociadas al fetch considerado, por lo que no deben interpretarse como mínimos constructivos universales independientes de las condiciones hidráulicas del proyecto.

Como criterio general, el tamaño finalmente adoptado para el enrocado debería surgir de la comparación entre los resultados obtenidos mediante los métodos de cálculo del oleaje y las referencias empíricas consideradas apropiadas para el proyecto. El espesor de la capa de enrocado puede adoptarse, en primera aproximación, como $t \approx 1,5 \cdot D_{50}$, sin perjuicio de los ajustes que resulten necesarios según el método de colocación, la forma de las rocas o las condiciones particulares de exposición.

Método de colocación	Aplicabilidad típica	Espesor t de referencia	D_{50} de referencia implícito
Colocado a mano	Pequeñas presas rurales, mano de obra disponible, sin maquinaria pesada	0,30 m	0,20 m
Volcado, fetch ≤ 4 km	Presas con maquinaria pesada disponible	0,76 m	0,60 m
Volcado, fetch > 4 km	Presas con maquinaria pesada disponible	0,91 m	0,73 m

Nota: los valores corresponden a talud aguas arriba 1V:3H. Para talud 1V:2H el USBR recomienda incrementar el espesor en aproximadamente un 20%. Los valores de D_{50} indicados se derivan del peso medio de las unidades de roca tabulado por USBR (categoría 40-50% por peso), asumiendo $\gamma_r = 26 \text{ kN/m}^3$. Estos valores constituyen referencias derivadas de la experiencia acumulada por el USBR y de las prácticas constructivas habitualmente empleadas en sus proyectos, en condiciones de oleaje implícitas asociadas al fetch considerado.

Tabla 3-3. Valores de referencia USBR para espesor y granulometría del enrocado de protección (adaptado de USBR [25, Cap. 6.22, Tabla 6-9]).

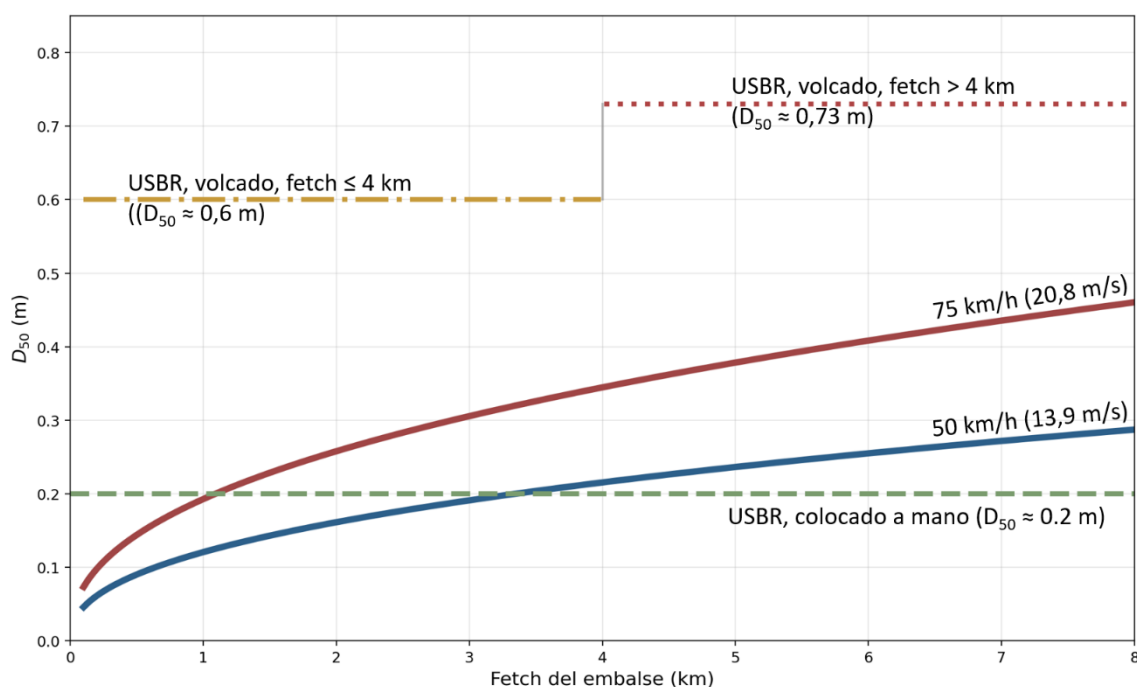


Figura 3-9. Predimensionado orientativo del enrocado para talud 1V:3H

La Figura 3-9 presenta un gráfico orientativo que permite estimar el tamaño calculado de las unidades de roca en función del fetch del embalse para distintas velocidades

de viento de diseño, y compararlo con los valores orientativos de referencia USBR indicados en la Tabla 3-3.

Para fetchs del orden de los habituales en pequeñas presas uruguayas y velocidades de viento representativas de las condiciones locales, los valores obtenidos mediante el cálculo hidráulico pueden resultar inferiores a las referencias empíricas derivadas de la experiencia constructiva. En otros casos, particularmente en embalses de mayor exposición al viento o con fetch significativo, el cálculo hidráulico puede gobernar el dimensionamiento. En consecuencia, ambos criterios deberían considerarse complementarios y evaluarse conjuntamente durante el proceso de diseño.

Los criterios precedentes corresponden principalmente a enrocados ejecutados con roca angular de cantera. La forma de las unidades de roca influye significativamente sobre la estabilidad del revestimiento, ya que las partículas angulares presentan una mayor capacidad de trabazón mutua y resistencia al desplazamiento por acción del oleaje.

Cuando se utilicen cantos rodados u otros materiales predominantemente redondeados, puede resultar necesario incrementar el tamaño de cálculo de las unidades de roca, aumentar el espesor del revestimiento o adoptar taludes más tendidos, con el fin de compensar su menor capacidad de trabazón. La conveniencia de estas medidas deberá evaluarse considerando las características del material disponible, las condiciones de exposición al oleaje y la experiencia local en obras similares.

3.6.1.4 Capa de apoyo

El enrocado debería apoyarse sobre una capa de transición granular adecuadamente diseñada o sobre un geotextil seleccionado específicamente para cumplir funciones de filtración y separación entre el revestimiento y el material del terraplén.

La transición granular o el geotextil tienen como finalidad principal impedir la migración progresiva de partículas finas hacia los vacíos del enrocado, preservando la integridad del talud protegido y la estabilidad del propio revestimiento. Adicionalmente, contribuyen a absorber pequeñas irregularidades superficiales del talud compactado y facilitan el drenaje local del agua que circula a través del enrocado.

Cuando se utilicen transiciones granulares, su diseño deberá verificar los criterios de filtro desarrollados en la Sección 3.4.4. Cuando se empleen geotextiles, deberán verificarse los criterios de retención, permisividad, resistencia mecánica y resistencia al punzonamiento indicados en la Sección 3.4.5.5.

El incremento del tamaño de las unidades de roca o del espesor del enrocado no debe considerarse, por sí solo, una medida equivalente a la función filtrante de una transición granular o de un geotextil.

En presas de DPA Bajo y en situaciones debidamente justificadas, podrá admitirse el apoyo directo del enrocado sobre el material compactado del terraplén cuando las características del suelo, la limitada exposición al oleaje, la experiencia local y las condiciones previstas de operación y mantenimiento permitan prever un comportamiento satisfactorio. En estos casos se recomienda prestar especial atención a las inspecciones periódicas del talud protegido y a la reposición de material cuando resulte necesario.

La selección final del sistema de protección debería considerar también la capacidad prevista del titular para realizar inspecciones y tareas de mantenimiento durante la vida útil de la presa. Soluciones inicialmente más económicas pueden requerir intervenciones periódicas luego de eventos severos, mientras que diseños más conservadores pueden reducir la frecuencia de mantenimiento futuro.

El Anexo C presenta un ejemplo simplificado de aplicación de estos criterios, incluyendo la estimación del oleaje de diseño, el dimensionamiento preliminar del enrocado, la comparación con referencias empíricas de uso habitual y la verificación de una solución de transición compatible con el material del terraplén.

3.6.2 Protección del talud aguas abajo

El talud aguas abajo está principalmente expuesto a procesos de erosión superficial asociados al escurrimiento pluvial.

En el contexto nacional, es habitual que estos taludes queden cubiertos con vegetación herbácea natural, favorecida por el clima templado húmedo del país. En muchas presas rurales esta cobertura se establece espontáneamente con el tiempo, a partir de la vegetación natural del entorno.

Sin embargo, desde el punto de vista técnico resulta recomendable promover una cobertura vegetal más uniforme mediante perfilado final del talud, siembra de especies adecuadas y control inicial de la erosión superficial, especialmente en suelos susceptibles al lavado. Para este propósito puede aprovecharse el suelo orgánico superficial proveniente del decapado de las áreas de fundación de la presa, del aliviadero y de las zonas de préstamo, que conserva la cobertura herbácea y el banco de semillas locales, y resulta particularmente adecuado para acelerar el restablecimiento vegetal del talud aguas abajo a bajo costo.

Durante el período inicial de implantación vegetal pueden emplearse medidas temporales de estabilización, como la aplicación de cobertura orgánica protectora o el uso de mantos biodegradables de control de erosión.

El desarrollo de vegetación leñosa o arbórea sobre el talud no es deseable debido a los riesgos asociados a sistemas radiculares profundos, posibles trayectorias preferenciales de filtración, interferencias con drenajes y dificultades para la inspección y auscultación de la presa. Por estas razones, desde la etapa de diseño conviene evitar la implantación de especies leñosas o arbóreas sobre el cuerpo de la presa y sus zonas inmediatas.

Las tareas de conservación, control de vegetación e inspección se desarrollan en el Capítulo 6.

3.6.3 Uso de gaviones, colchonetas y otras protecciones

Las colchonetas y gaviones constituyen una solución modular y flexible que puede emplearse en distintas situaciones donde se requiera una protección localizada frente a procesos erosivos.

Estos elementos consisten en cestas de malla metálica rellenas con canto rodado, que conforman estructuras permeables capaces de adaptarse a pequeños asentamientos sin perder su funcionalidad.

En presas de materiales sueltos las colchonetas y/o gaviones pueden utilizarse en:

- protecciones localizadas frente a erosión concentrada,
- obras de disipación de energía asociadas a descargas hidráulicas,
- revestimientos de canales de descarga o estructuras auxiliares.

Se recomienda disponer bajo estas estructuras una capa de transición granular o un geotextil destinado a evitar el lavado del suelo subyacente.

El dimensionamiento estructural de las cestas, su disposición y los anclajes necesarios dependen de cada situación particular y suelen definirse en conjunto con el proveedor del sistema. El diseño detallado de estas soluciones excede el alcance del presente Manual.

Además de las soluciones tradicionales basadas en enrocados, gaviones o colchonetas, existen actualmente diversos sistemas geosintéticos y soluciones compuestas que pueden resultar adecuados para determinadas condiciones hidráulicas y constructivas, particularmente en vertederos vegetados, canales excavados o sectores donde se busque reducir el volumen de material granular requerido.

Entre estas alternativas pueden mencionarse las geoceldas de confinamiento celular [62], utilizadas para estabilización superficial de taludes y canales mediante confinamiento de suelo o materiales granulares; las mantas permanentes de refuerzo vegetal (TRM, Turf Reinforcement Mats) y geomantas para control de erosión [63], destinadas a favorecer el control de erosión superficial y el establecimiento de cobertura vegetal bajo solicitaciones hidráulicas moderadas; las geogrillas de refuerzo superficial [64]; y las técnicas de bioingeniería del paisaje basadas en vegetación reforzada y control progresivo de la erosión [65].

En determinadas presas de DPA Alto o en obras donde el resguardo disponible resulte reducido frente a crecidas extremas, puede evaluarse además la incorporación de sistemas específicos de protección frente a sobrepaso controlado del terraplén. Entre las soluciones utilizadas internacionalmente se incluyen revestimientos de hormigón compactado a rodillo (RCC), bloques articulados de hormigón, geoceldas reforzadas y otros sistemas capaces de resistir escurrimientos superficiales de alta velocidad sin desarrollar erosión progresiva del terraplén [66].

Estas soluciones procuran incrementar la tolerancia de la presa frente a eventos excepcionales, particularmente cuando la geometría, el emplazamiento o las limitaciones hidráulicas del sistema de vertido dificultan aumentar significativamente el resguardo o la capacidad evacuadora. Su aplicación requiere análisis hidráulico, geotécnico y constructivo específico, por lo que su diseño detallado excede el alcance del presente Manual.

La selección de estos sistemas debería considerar las velocidades esperadas, la duración de los escurrimientos, las condiciones de mantenimiento previstas, la resistencia a erosión requerida y la experiencia disponible para su correcta instalación y conservación. El diseño específico de estas soluciones suele apoyarse en recomendaciones técnicas internacionales, ensayos normalizados de desempeño hidráulico y mecánico, y especificaciones particulares de cada fabricante o sistema constructivo.

3.7 Instrumentación y auscultación de la presa

La vigilancia del comportamiento de una presa no depende necesariamente de sistemas instrumentales complejos. En muchas pequeñas presas de DPA Bajo, el seguimiento sistemático del nivel del embalse, las precipitaciones, las filtraciones, los drenajes y las observaciones visuales periódicas puede constituir una herramienta suficiente y muy efectiva para detectar tempranamente anomalías o cambios respecto al comportamiento esperado de la obra.

En presas de mayor altura, complejidad o DPA, puede resultar recomendable complementar estas observaciones mediante instrumentación específica destinada a medir presiones intersticiales, deformaciones, asentamientos u otros parámetros relevantes [67].

En todos los casos, el sistema de auscultación debería definirse en función de:

- los modos de fallo relevantes para la presa y su fundación;
- las consecuencias potenciales asociadas;
- y la capacidad real de operación, mantenimiento y seguimiento prevista para la obra.

La instrumentación y auscultación de la presa deberían concebirse desde el proyecto como parte integrante del diseño, definiendo qué variables se observarán o medirán, con qué objetivos y en qué sectores de la obra resulta más relevante su control.

3.7.1 Objetivos de la auscultación

La auscultación tiene como finalidad general aportar información que permita evaluar el comportamiento de la presa durante su vida útil, contribuyendo a la detección temprana de situaciones que puedan afectar su seguridad.

Dependiendo de las características de la presa y de su DPA, estos objetivos pueden alcanzarse con distintos niveles de complejidad, desde esquemas simples basados en observaciones visuales y mediciones básicas, hasta sistemas instrumentales más completos.

En términos generales, la auscultación puede orientarse a:

- verificar, en forma cualitativa o cuantitativa, el comportamiento previsto en el diseño;
- observar la evolución de filtraciones, drenajes y posibles pérdidas de agua;
- registrar condiciones de carga relevantes, como el nivel del embalse y las precipitaciones locales;
- medir, cuando corresponda, presiones intersticiales, deformaciones o asentamientos;
- detectar variaciones o comportamientos que se aparten de lo esperado.

Cuando se disponga de información suficiente, el sistema de auscultación puede contribuir a establecer relaciones causa-efecto entre las condiciones de carga y la respuesta de la presa. No obstante, aun en sistemas simples, resulta igualmente válido definir umbrales o rangos de referencia para los distintos parámetros observados o medidos que permitan identificar situaciones que requieren atención.

3.7.2 Observación y medición de filtraciones y drenajes

La observación sistemática de filtraciones, drenajes y surgencias de agua constituye una de las herramientas más simples y efectivas para evaluar el comportamiento hidráulico y geotécnico de una presa de materiales sueltos durante su vida útil. En muchas pequeñas presas, la medición periódica de estos caudales proporciona una de las fuentes más valiosas de evidencia sobre el comportamiento interno del terraplén y de su fundación, permitiendo detectar cambios que no se manifiestan de otro modo.

En línea con recomendaciones internacionales [54], las salidas del sistema de drenaje deberían diseñarse de modo que permitan su inspección visual y, cuando sea posible, la medición periódica de los caudales evacuados. Asimismo, los drenajes o filtraciones que emerjan en el pie de presa o en el terreno aguas abajo deberían conducirse hacia puntos accesibles que permitan observar su comportamiento, identificar eventuales arrastres de materiales finos y registrar la evolución de sus caudales.

Cuando sea posible, resulta recomendable captar y concentrar estas surgencias mediante cunetas, drenes colectores u otras disposiciones equivalentes, conduciéndolas hacia uno o más puntos de descarga claramente identificables y accesibles para su observación y medición. En particular, puede resultar conveniente disponer canales colectores o sistemas equivalentes que permitan mantener diferenciados los caudales provenientes de drenajes y filtraciones respecto de los escurrimientos superficiales generados por precipitaciones o por el drenaje natural del terreno adyacente, facilitando así la interpretación de su comportamiento.

La observación sistemática de la transparencia del agua drenada y filtrada, la aparición de sedimentos, las variaciones de caudal o la identificación de nuevas surgencias constituye una herramienta fundamental para detectar tempranamente posibles anomalías asociadas a procesos de erosión interna, incremento de las filtraciones o cambios en las condiciones hidráulicas de la presa y su fundación.

En presas donde las consecuencias potenciales de una falla o las exigencias de gestión de la seguridad lo justifiquen, el proyectista debería prever desde la etapa de diseño la incorporación de dispositivos de medición y registro automático de niveles o caudales, así como las obras, instalaciones y equipos auxiliares necesarios para su correcta operación y mantenimiento.

A los efectos del seguimiento del comportamiento de la presa, suele resultar más importante la evolución temporal de los caudales registrados y su relación con variables como el nivel del embalse o las precipitaciones, que la determinación

extremadamente precisa de sus valores absolutos. Por este motivo, resulta recomendable que las estructuras de captación y medición sean simples, robustas y estables en el tiempo. Esta robustez resulta particularmente importante, ya que la afectación o destrucción de estas obras por efecto de la erosión, crecidas locales, torrentes generados por tormentas, actividades de mantenimiento o pisoteo de animales, así como las posteriores reconstrucciones o reparaciones, pueden alterar la configuración del área de captación de caudal, introduciendo incertidumbres que dificultan la interpretación de los registros históricos y de la evidencia obtenida sobre el comportamiento de la presa.

Como referencia técnica y teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo precedente, pueden emplearse guías específicas para la selección y dimensionamiento de estructuras de medición de caudales, como la publicación de la ex-DINAMA (2004) [\[68\]](#), que proporciona criterios para elegir el tipo de dispositivo en función del rango de caudales y las condiciones de campo.

Los dispositivos más habituales para pequeñas presas, incluyendo vertederos triangulares, métodos volumétricos y criterios para la captación y medición de filtraciones y drenajes, se describen en el Anexo E.

3.7.3 Relación con los modos de fallo

La selección del tipo, cantidad y ubicación de los instrumentos debería fundamentarse en los modos de fallo relevantes para la presa considerada [\[18; 69\]](#). En consecuencia,

Los principales modos de fallo de las presas de materiales sueltos y sus indicadores característicos se desarrollan en el Anexo B. A partir de dicha identificación, el proyectista debería definir las variables más apropiadas para el seguimiento del comportamiento de la presa, tales como niveles de agua, precipitaciones, presiones intersticiales, caudales de drenaje y filtración, asentamientos o desplazamientos.

En particular, los caudales de drenaje y filtración constituyen uno de los indicadores más sensibles del comportamiento interno de las presas de materiales sueltos, por lo que resulta recomendable prever desde la etapa de diseño las condiciones necesarias para su observación y, cuando corresponda, su medición sistemática.

Cuando se utilicen geotextiles como parte de sistemas internos de drenaje, puede resultar conveniente monitorear específicamente la posible reducción progresiva de su capacidad drenante por colmatación u otros mecanismos de deterioro. En estos casos, se recomienda prestar especial atención a una eventual reducción de los caudales de drenaje y filtración, posiblemente acompañada por un aumento de las presiones intersticiales en sectores próximos al sistema drenante.

Las consideraciones relativas a la operación, interpretación de resultados, umbrales de atención y seguimiento sistemático de la instrumentación se desarrollan con mayor detalle en el Capítulo 6.

3.7.4 Definición del sistema de instrumentación en el proyecto

El proyecto debería definir, según corresponda:

- objetivos del sistema de auscultación;
- tipos de instrumentos a utilizar;
- cantidad y ubicación en planta y sección;
- cotas de instalación y niveles de referencia;
- especificaciones técnicas de los dispositivos y sus unidades de lectura;
- requerimientos de instalación, protección y accesibilidad;
- criterios de lectura, mantenimiento y operación.

En el caso de instrumentación basada en equipos industrializados, las especificaciones podrán complementarse con las recomendaciones de los fabricantes.

Para dispositivos contruidos en obra —tales como piezómetros abiertos tipo Casagrande, freatímetros o estructuras de aforo— el proyecto debería definir criterios constructivos, materiales y configuraciones típicas, de modo de asegurar su correcto funcionamiento.

Asimismo, el proyecto debería prever y describir las soluciones para la captación, conducción y eventual medición de filtraciones, tanto en los sistemas de drenaje diseñados como en posibles surgencias que puedan aparecer durante la construcción o el primer llenado.

El diseño del sistema de auscultación debería contemplar no solamente la instalación inicial de los instrumentos, sino también su operación, mantenimiento y eventual ampliación durante la vida útil de la presa. Por este motivo, resulta recomendable prever soluciones simples, robustas y compatibles con las capacidades reales de seguimiento disponibles para la obra considerada.

3.7.5 Criterios según el Daño Potencial Asociado (DPA)

El nivel de auscultación e instrumentación previsto para la presa debería resultar coherente con su clasificación según el DPA, así como con la complejidad de la obra y las capacidades reales de operación y seguimiento disponibles.

En términos generales:

- DPA Bajo:

En pequeñas presas de DPA Bajo, suele resultar suficiente un esquema de auscultación basado en observaciones sistemáticas, registro del nivel del embalse, seguimiento de filtraciones y drenajes, control visual de asentamientos e inspecciones periódicas de la obra. Se recomienda priorizar sistemas simples, robustos, de bajo mantenimiento y compatibles con las capacidades efectivas de operación. La continuidad y calidad de las observaciones suele aportar más valor que la incorporación de instrumentación compleja difícil de mantener o interpretar adecuadamente.

El Anexo D presenta ejemplos de soluciones simples para la medición de nivel de embalse, caudales de filtración y drenaje, asentamientos y niveles piezométricos, aplicables según las características y necesidades de cada obra.

- DPA Medio o Alto:

Para presas de mayor DPA, altura o complejidad, corresponde prever sistemas de auscultación más completos, que podrán incluir además:

- piezómetros para medición de presiones intersticiales;
- medición y observación sistemática de caudales de drenaje y filtraciones;
- control de deformaciones internas;
- control de deformaciones superficiales con tecnologías especiales, incluyendo redes de puntos de referencia transversales en taludes y crestas, levantamientos periódicos con drones (LiDAR o fotogrametría) para detección de deformaciones superficiales, y otras tecnologías de auscultación geomática;
- sistemas de adquisición, registro y gestión de datos acordes al nivel de exigencia de la obra.

Cuando determinados parámetros resulten críticos para la evaluación de la seguridad de la obra —particularmente las presiones intersticiales en puntos sensibles— se recomienda prever cierto grado de redundancia o validación cruzada entre distintas tecnologías y/o sistemas de medición [18].

En todos los casos, el esquema de instrumentación y auscultación debería justificarse en función de los riesgos considerados, incorporando controles compatibles con los modos de fallo potenciales identificados y evitando la incorporación innecesaria de sistemas complejos que no aporten información útil para su gestión.

3.7.6 Integración con la construcción y la operación

El sistema de instrumentación y auscultación definido en el proyecto constituye la base para su implementación durante la construcción y su utilización posterior durante la operación de la presa.

Durante la construcción (Capítulo 5), se recomienda establecer procedimientos para la instalación, protección, verificación o contraste de su calibración y registro de las lecturas iniciales o “de referencia” de los instrumentos, así como criterios para su eventual ajuste o ampliación en función de las condiciones observadas en obra.

Durante la operación (Capítulo 6), la información obtenida será utilizada para el seguimiento del comportamiento de la presa, la detección de anomalías y la toma de decisiones vinculadas a su seguridad.

En consecuencia, resulta recomendable que el proyecto contemple desde el inicio las condiciones necesarias para la instalación, operación, mantenimiento y eventual adaptación futura del sistema de auscultación.

3.7.7 Consideraciones finales de diseño de la instrumentación

El sistema de auscultación de una presa debería concebirse como una herramienta de apoyo para el seguimiento de su comportamiento y la detección temprana de anomalías, y no como un conjunto de instrumentos aislados.

En todos los casos, el sistema de auscultación debería ser:

- pertinente en relación con los riesgos de la obra;
- proporcionado en función de su DPA;
- suficientemente definido técnicamente a nivel de proyecto;
- robusto y operable en condiciones reales;
- y compatible con las capacidades efectivas de operación, mantenimiento e interpretación de la información generada por parte del Titular.

Un sistema de auscultación adecuadamente concebido permite reducir la incertidumbre sobre el comportamiento de la presa y constituye un elemento fundamental para su gestión segura a lo largo del tiempo.

Algunas soluciones específicas de instrumentación para pequeñas presas, incluyendo dispositivos para medición del nivel del embalse, caudales de filtraciones y drenajes, asentamientos y niveles piezométricos, se desarrollan con cierto detalle en el Anexo D.

4 OBRAS ANEXAS E HIDRÁULICAS

4.1 Introducción

Las pequeñas presas destinadas al almacenamiento de agua para riego suelen incorporar diversas obras hidráulicas y auxiliares destinadas a controlar el nivel del embalse, evacuar excedentes de agua, permitir la toma y conducción del recurso hacia los usos previstos y garantizar condiciones adecuadas de seguridad y operación.

Entre las obras hidráulicas principales se encuentran los vertederos, las obras de toma y descarga, las conducciones a través de la presa y las estructuras de disipación de energía. En muchos casos estas obras se complementan con equipamientos electromecánicos, sistemas de control y monitoreo y otras instalaciones necesarias para la operación del sistema hidráulico.

El diseño de estas obras debería considerar no solamente su funcionamiento hidráulico individual, sino también su interacción con el comportamiento global de la presa y del embalse, prestando especial atención a la seguridad frente a crecidas, a la prevención de procesos erosivos y a la posibilidad de realizar tareas de operación y mantenimiento de manera segura y eficiente.

El desarrollo conceptual de las obras hidráulicas anexas presentado en este capítulo se apoya principalmente en los criterios expuestos en *Design of Small Dams del U.S. Bureau of Reclamation* [[25, Caps. 9 y 10](#)]. Dichos criterios se presentan aquí adaptados a la escala y condiciones típicas de las pequeñas presas de riego del Uruguay. Cuando corresponde, se indican referencias específicas a secciones del documento original u otras fuentes técnicas relevantes.

4.2 Vertederos

El sistema de vertido constituye uno de los componentes más importantes de la seguridad hidráulica de una presa, ya que su función es permitir la evacuación controlada de los caudales que ingresan al embalse y no son almacenados ni derivados mediante otras obras hidráulicas. En condiciones normales de operación, el vertedero puede conducir parte o la totalidad de los aportes excedentes al uso previsto del embalse. Durante eventos de crecida, además, cumple un papel fundamental en la evacuación segura de los caudales excedentes, reduciendo el riesgo de daños a la estructura y evitando el sobrepaso de la presa por el coronamiento.

En pequeñas presas de riego, el sistema de vertido puede estar constituido por uno o más dispositivos que actúan de forma complementaria. En muchos casos existe únicamente un vertedero auxiliar como vertedero canal, mientras que en otros puede incorporarse además un vertedero principal destinado a evacuar los caudales más frecuentes y reducir la frecuencia de operación del auxiliar.

La elección de la configuración más conveniente dependerá, entre otros factores, de la relación entre el volumen útil del embalse y el escurrimiento medio anual de la cuenca, de la frecuencia esperable de vertimiento, de la topografía del sitio, de la categoría de DPA y de la posibilidad de mantener adecuadamente protegidos los distintos tramos del recorrido del agua al verter.

En el contexto uruguayo, el tipo más frecuente de vertedero auxiliar es el vertedero canal excavado en terreno natural adyacente a la presa, que conduce el flujo por una ladera hasta su reincorporación al cauce natural. En consecuencia, el diseño debería prestar especial atención tanto a la capacidad hidráulica de evacuación como a la protección frente a la erosión del canal, de la ladera de descarga y del sector de reincorporación al cauce natural.

Estos procesos erosivos pueden estar asociados a velocidades de flujo superiores a las previstas en el diseño, cambios de dirección del flujo, pendientes locales no contempladas, protecciones insuficientes, deterioro progresivo por uso intensivo o falta de mantenimiento de las obras de descarga.

Del mismo modo, la insuficiencia de la capacidad de evacuación puede originarse en distintas etapas del ciclo de vida de la obra. Entre las causas más frecuentes se incluyen errores o limitaciones de diseño (ancho insuficiente, capacidad hidráulica reducida, geometría inadecuada o protecciones deficientes), desviaciones durante la construcción que modifican las dimensiones proyectadas del vertedero, y alteraciones introducidas durante la operación de la presa. Entre estas últimas, se observan con relativa frecuencia la obstrucción parcial de la sección de control por vegetación, sedimentos u otros materiales, así como modificaciones realizadas por el Titular con el objetivo de incrementar el volumen almacenado, tales como el recrecimiento del umbral del vertedero o la colocación de obstáculos que reducen su capacidad efectiva de descarga. Estas intervenciones pueden disminuir significativamente el resguardo disponible y aumentar el riesgo de sobrepaso durante eventos hidrológicos extremos.

Por esta razón, en el presente capítulo se presta especial atención tanto al dimensionamiento hidráulico como al diseño geométrico y a la protección superficial de las obras de vertido.

4.2.1 Terminología utilizada

En la práctica tradicional vinculada a las pequeñas presas en Uruguay se utilizan habitualmente las denominaciones “vertedero de mínimas” para el dispositivo que evacua los caudales más frecuentes del embalse y “vertedero de máximas” para el vertedero destinado a evacuar las crecidas de mayor magnitud.

Aunque estas denominaciones son ampliamente conocidas y utilizadas en el ámbito nacional, no forman parte de la terminología habitualmente empleada en la literatura técnica internacional. Por este motivo, en el presente Manual se adoptan las denominaciones vertedero principal y vertedero auxiliar, procurando facilitar la consulta y utilización de bibliografía técnica internacional, así como la comparación de criterios y experiencias desarrollados en otros países.

La Tabla 4-1 resume la correspondencia entre ambas terminologías.

Terminología tradicional en Uruguay	Terminología utilizada en este Manual	Terminología internacional (anglosajona)	Terminología utilizada por SPANCOLD
Vertedero de mínimas	Vertedero principal	Principal spillway / Service spillway	Aliviadero principal
Vertedero de máximas	Vertedero auxiliar	Auxiliary spillway / Emergency spillway	Aliviadero auxiliar o de emergencia

Tabla 4-1. Equivalencia de terminología utilizada para los vertederos según distintas referencias técnicas

En adelante, el presente Manual utilizará las denominaciones **vertedero principal** y **vertedero auxiliar** para describir los distintos dispositivos que integran el sistema de evacuación de excedentes del embalse.

Dependiendo de las características de la presa y de los criterios de diseño adoptados, el vertedero auxiliar podrá cumplir además funciones asociadas a la evacuación de caudales excepcionales o de emergencia. En otros casos, dichas funciones podrán asignarse a un vertedero de emergencia específico, independiente del vertedero auxiliar.

4.2.2 Sistema combinado de vertido

El sistema de vertido de una pequeña presa puede resolverse mediante un único vertedero o mediante una combinación de dispositivos que actúan de forma complementaria.

En muchas presas pequeñas el sistema está constituido únicamente por un vertedero auxiliar, dimensionado para evacuar la crecida de diseño sin provocar erosiones ni comprometer la seguridad de la obra.

Sin embargo, en presas donde surja previsible —por ejemplo a partir del balance hídrico asociado al uso del recurso— uno o más meses con algún vertimiento de agua durante varios años consecutivos, resulta recomendable incorporar un vertedero principal independiente del vertedero canal, de modo de mejorar el control hidráulico del embalse y reducir la frecuencia de operación del vertedero auxiliar.

En una configuración habitual, el vertedero principal evacúa los caudales más frecuentes del embalse mediante una estructura protegida frente a la erosión, mientras que el vertedero auxiliar permanece inactivo durante las condiciones normales de operación y comienza a descargar cuando el nivel del embalse supera la cota de su umbral. En estos casos, el vertedero auxiliar actúa principalmente durante eventos de mayor magnitud, cuando el nivel del embalse excede la diferencia de alturas prevista respecto del vertedero principal.

En presas con DPA Medio y Alto, aun cuando exista un vertedero principal capaz de participar en la evacuación de las crecidas e iniciar las descargas a niveles inferiores a los del vertedero auxiliar, resulta recomendable adoptar un criterio conservador para este último. En particular, el vertedero auxiliar debería dimensionarse de forma que pueda evacuar por sí solo, sin daños para las obras, la totalidad del caudal saliente correspondiente a la crecida de diseño.

Adicionalmente, cuando no se disponga de un vertedero de emergencia independiente, el propio vertedero auxiliar debería cumplir también dicha función, contribuyendo a evitar el sobrepaso de la presa frente a crecidas extremas superiores a la crecida de diseño adoptada. En estos casos, ambas funciones —vertedero auxiliar y vertedero de emergencia— pueden recaer sobre una misma estructura, aunque los criterios hidráulicos y de seguridad asociados a cada una de ellas sean diferentes. Para la crecida de diseño, el vertedero debería operar sin desarrollar erosiones significativas ni daños incompatibles con el funcionamiento normal de la obra. En cambio, frente a eventos de muy baja probabilidad como la crecida extrema, el objetivo principal pasa a ser asegurar la supervivencia de la presa y evitar el sobrepaso del coronamiento, pudiendo admitirse erosiones superficiales localizadas o daños reparables en el vertedero auxiliar, siempre que éstos no evolucionen hacia mecanismos regresivos capaces de comprometer la estabilidad global de la presa [60; 70; 27; 71].

La evaluación del comportamiento hidráulico del sistema de vertido se realiza a partir del hidrograma de la crecida de diseño, considerando la respuesta del embalse ante dicho evento y la activación progresiva de los distintos dispositivos de evacuación. El procedimiento consiste en aplicar un ruteo hidrológico que permita determinar, para

cada instante, el nivel del embalse y los caudales evacuados por los distintos vertederos, a partir del balance de volúmenes acumulados en el embalse y de las leyes H-Q (altura-caudal) correspondientes a cada dispositivo.

Este análisis no debería limitarse a un único escenario, sino contemplar una familia de eventos hidrológicos y distintas condiciones iniciales del embalse.

Asimismo, en pequeñas presas rurales puede resultar conveniente considerar escenarios operativos desfavorables derivados de decisiones de manejo del embalse, tales como mantener niveles elevados de almacenamiento ante pronósticos inciertos o retrasar deliberadamente el inicio del vertimiento con el objetivo de maximizar la reserva de agua disponible para riego. Estas situaciones pueden modificar significativamente las condiciones hidráulicas iniciales frente a una crecida.

Como criterio simplificado aplicable a pequeñas presas, la verificación del sistema de vertido puede realizarse mediante la evaluación de tres escenarios representativos que envuelven el conjunto de condiciones posibles:

- (i) embalse al Nivel Máximo Operativo con la crecida de diseño, que verifica el dimensionamiento hidráulico;
- (ii) embalse en nivel parcial —típicamente en torno al 75 % del volumen útil, valor orientativo que puede ajustarse según el régimen operativo previsto— con la crecida de diseño, que cuantifica el efecto de laminación; y
- (iii) embalse al Nivel Máximo Operativo con la crecida extrema, que verifica la supervivencia estructural frente al sobrepaso.

Este enfoque, coherente con la práctica internacional [[72](#); [73, 2018](#); [71, 2013](#); [24](#)], resulta adecuado para la escala de obras objeto del presente manual.

En la práctica actual uruguaya, los períodos de retorno asociados a la crecida de diseño y a la crecida extrema son establecidos por la Autoridad Competente en función de la categoría de DPA de la presa, conforme a la reglamentación vigente y los instructivos administrativos aplicables.

Como referencia técnica internacional, SPANCOLD-GT05 (Aliviaderos y Desagües) vincula la crecida extrema con la categoría de la presa: para presas de categoría A (equivalente a DPA Alto) considera la Crecida Máxima Probable (PMF) o eventos con períodos de retorno entre 5.000 y 10.000 años; para categoría B (DPA Medio), períodos de retorno entre 1.000 y 5.000 años; y para categoría C (DPA Bajo), períodos de retorno del orden de 1.000 años. ICOLD Bulletin 142 (2012) [[27](#)] adopta criterios análogos y recomienda que durante la crecida extrema no se produzca el

sobrepaso del coronamiento. Estas referencias constituyen antecedentes técnicos útiles para contextualizar los criterios de diseño empleados internacionalmente [24].

4.2.2.1 Frecuencia de uso del vertedero auxiliar

Cuando resulte necesario favorecer el establecimiento y conservación de una cobertura vegetal en el vertedero auxiliar, resulta recomendable diseñar el sistema de vertido de modo que su activación ocurra con una frecuencia relativamente baja, quedando a cargo del vertedero principal la evacuación de las crecidas menores y más frecuentes.

En distintas jurisdicciones internacionales existen criterios regulatorios orientativos que limitan la frecuencia admisible de funcionamiento de vertederos auxiliares vegetados, con el objetivo de reducir el deterioro progresivo de la cobertura superficial y preservar su capacidad resistente frente a la erosión.

A modo ilustrativo, el Ohio Administrative Code 1501:21-13-04 [74] establece como referencia frecuencias medias máximas de funcionamiento del vertedero auxiliar de:

- una vez cada 50 años para presas de DPA Alto
- una vez cada 25 años para presas de DPA Medio
- una vez cada 10 años para presas de DPA Bajo

salvo que la Autoridad Competente apruebe lo contrario.

Estos valores no constituyen criterios de diseño adoptados por el presente Manual, pero ilustran la importancia que distintas regulaciones asignan a la limitación de la frecuencia de uso de vertederos auxiliares vegetados, procurando que éstos entren en funcionamiento únicamente durante crecidas de magnitud suficiente.

4.2.3 Vertedero auxiliar

El vertedero auxiliar más frecuente en pequeñas presas de riego en Uruguay consiste en un canal excavado en terreno natural adyacente a la presa, destinado a evacuar los caudales excedentes del embalse cuando el nivel del agua supera la cota de su umbral. Dependiendo de las características de la obra, este vertedero puede cumplir además funciones asociadas a la evacuación de crecidas extremas, cuando no se dispone de un vertedero de emergencia independiente.

A diferencia de otros tipos de vertederos utilizados en presas mayores, en este caso gran parte del recorrido del flujo se desarrolla sobre terreno natural o sobre superficies protegidas mediante soluciones relativamente simples, generalmente cobertura vegetal. Por esta razón, el diseño del vertedero auxiliar debería considerar

el comportamiento hidráulico y la estabilidad de todo el recorrido del agua, desde su ingreso al canal hasta su reincorporación al cauce natural.

La experiencia nacional muestra que los aspectos más críticos de este tipo de obras suelen estar asociados a la erosión del canal, de las laderas de descarga o del punto de reincorporación al cauce, más que al dimensionamiento hidráulico de la sección de control propiamente dicha. En consecuencia, además de la verificación hidráulica tratada en el Volumen 1 de este Manual, resulta fundamental prestar especial atención al trazado del canal, a la distribución de velocidades, a la protección superficial del terreno y a la estabilidad del recorrido completo del flujo.

En el dimensionamiento hidráulico de vertederos canal sobre terreno natural o con cobertura vegetal, el criterio habitual de diseño es trabajar en régimen subcrítico (calado normal mayor al crítico), limitando la velocidad del flujo y los procesos erosivos asociados. Este criterio es el adoptado en el Volumen 1 de este Manual [23], que desarrolla el dimensionamiento hidráulico detallado del vertedero-canal manteniendo esa condición como hipótesis de diseño. El régimen supercrítico (calado menor al crítico) queda reservado para tramos específicos con protección estructural adecuada (hormigón o enrocado de tamaño suficiente), donde la mayor velocidad del agua no comprometa la integridad del canal.

4.2.3.1 Trazado del canal

Cuando el vertedero se ubica en una ladera adyacente a la presa, se recomienda mantener, en lo posible, un alineamiento recto durante una longitud suficiente, evitando curvas en su traza horizontal. Cuando se logra este alineamiento recto, el agua ingresa al canal de manera uniforme desde el embalse y se evitan concentraciones laterales de caudal que en general producen erosiones tempranas.

Cuando la topografía obligue a introducir cambios de dirección, las transiciones suaves favorecen una distribución más uniforme del flujo. Las curvas generan sobreelevaciones del nivel del agua y redistribuciones del flujo que pueden producir concentraciones de caudal y procesos erosivos localizados, particularmente cuando se combinan con pendientes elevadas o velocidades significativas.

4.2.3.2 Cota de vertido

La cota del vertedero en la sección de control debería mantenerse estrictamente constante en todo su ancho. No resulta aceptable que la cota final se obtenga como un valor máximo, mínimo o promedio entre distintos puntos del terreno. Las diferencias de nivel en el umbral generan concentraciones de flujo que provocan erosiones localizadas y un funcionamiento hidráulico inadecuado del vertedero. Por

esta razón, la sección de vertido debería definirse mediante excavación controlada, asegurando la uniformidad de la cota en toda su longitud y evitando sobre excavaciones iniciales que luego deban rellenarse.

En algunos casos particulares puede proyectarse un vertedero canal que actúe simultáneamente como vertedero principal y auxiliar, incorporando dos cotas de vertido dentro de una misma sección. En estas situaciones se distinguen claramente dos niveles de control hidráulico: una cota inferior correspondiente al vertedero principal, debidamente protegido en toda su longitud contra la erosión de caudales frecuentes, y una cota superior correspondiente al vertedero auxiliar.

4.2.3.3 Construcción del canal

Se recomienda ejecutar los vertederos canal mediante excavación del terreno natural, evitando su construcción mediante terraplenes o rellenos. La excavación directa permite obtener un canal más estable y reduce la probabilidad de erosiones localizadas asociadas a materiales de relleno heterogéneos o mal compactados.

Puede ser conveniente prever canales o zanjas de guardia alineados con el borde superior de la excavación, destinados a interceptar y desviar la escorrentía proveniente de las zonas altas de las laderas adyacentes, evitando que esa escorrentía ingrese al canal del vertedero y genere erosiones por concentración de flujo aun en situaciones donde no existe vertimiento alguno desde el embalse.

4.2.3.4 Bigotes o terraplenes guía

Es habitual contemplar terraplenes guía, o “bigotes”, que cumplen una función hidráulica importante tanto aguas arriba como aguas abajo de la sección de control.

Aguas arriba, en el canal de aducción desde el embalse, orientan y ayudan a uniformizar el flujo en su aproximación hacia la sección de control, minimizando trayectorias posteriores indeseadas del agua sobre la ladera. Aguas abajo evitan que el agua se desborde lateralmente hacia el pie de la presa o hacia sectores no protegidos de la ladera.

Su geometría debería permitir una transición suave entre el embalse, el canal excavado y la ladera aguas abajo. Asimismo, debería tenerse en cuenta que estos terraplenes laterales estarán sometidos a sollicitaciones hidráulicas asociadas al flujo contenido en el vertedero, pudiendo requerir protecciones específicas frente a la erosión hidráulica de sus taludes.

En muchos casos, especialmente cuando las velocidades esperadas son moderadas y puede lograrse una cobertura vegetal adecuada y estable, la protección mediante

empastado puede resultar suficiente. En otras situaciones, particularmente cuando existan concentraciones locales de flujo, pendientes importantes o velocidades elevadas, puede resultar recomendable incorporar protecciones adicionales mediante enrocados u otras soluciones compatibles, descritas brevemente en 4.2.3.6.

4.2.3.5 Tramo de ladera natural

Una vez finalizado el tramo excavado del canal con la pendiente de proyecto, el flujo continúa generalmente con mayores pendientes sobre la ladera natural hasta alcanzar el cauce original.

En muchos vertederos canal de pequeñas presas, este sector constituye el tramo hidráulicamente más sensible desde el punto de vista erosivo, debido a que el flujo suele incrementarse en velocidad al desarrollarse sobre pendientes mayores y geometrías menos controladas que las del tramo excavado inicial.

El diseño del vertedero debería asegurar que, también en este tramo:

- el flujo se distribuya de manera lo más uniforme posible;
- los tirantes resultantes sean suficientemente reducidos;
- la protección superficial prevista sea compatible con las velocidades del flujo.

Para reducir este riesgo, la geometría del vertedero debería favorecer una transición gradual entre el tramo excavado y la ladera natural, evitando cambios bruscos de pendiente, estrechamientos o modificaciones abruptas de dirección que puedan generar concentraciones locales de caudal, aceleraciones excesivas del flujo o redistribuciones desfavorables de velocidades y tirantes.

Cuando se prevea un ensanchamiento progresivo del canal con el objetivo de disminuir tirantes y velocidades antes del ingreso a la ladera, dicha transición debería diseñarse cuidadosamente, manteniendo continuidad geométrica y evitando separaciones del flujo o concentraciones laterales. En vertederos canal donde el flujo aguas abajo de la sección de control se aproxime al régimen crítico o supercrítico, la transición debería verificarse mediante criterios hidráulicos apropiados para flujo gradualmente variado y transiciones en canales abiertos [75].

Cuando estas transiciones no se resuelven adecuadamente, el flujo puede mantener o incluso incrementar localmente sus velocidades y tensiones tractivas sobre la ladera, especialmente en sectores con cambios abruptos de pendiente, irregularidades geométricas o concentraciones laterales de caudal. En estas situaciones no debería asumirse automáticamente que el ensanchamiento del canal

producirá una reducción efectiva de tirantes o velocidades, recomendándose verificar específicamente el comportamiento hidráulico esperado del vertedero.

Cuando las condiciones geométricas, hidráulicas o topográficas no permitan mantener solicitaciones compatibles con la protección superficial prevista, se recomienda evaluar la incorporación de protecciones adicionales, refuerzos localizados o dispositivos de disipación de energía, particularmente en sectores donde puedan desarrollarse procesos erosivos progresivos o concentraciones persistentes de flujo.

En la zona de restitución del flujo al cauce natural debería evitarse que el agua descargue en forma concentrada sobre suelos desnudos o márgenes erosionables. Aunque las erosiones localizadas aguas abajo del vertedero no siempre comprometen en forma inmediata la seguridad de la presa, pueden generar impactos ambientales, inestabilidad de márgenes, arrastre de sedimentos y procesos erosivos regresivos si no se controlan oportunamente [76, Cap. 50; 70, Cap. 51; 77, Cap. 8].

Como criterio general, la descarga debería realizarse sobre un tramo estable del cauce o mediante una transición simple que reduzca la concentración del flujo, utilizando soluciones compatibles con la escala de la obra, tales como enrocados de protección, colchonetas, gaviones, pequeñas protecciones de pie, disipadores rústicos o ensanches graduales que distribuyan el caudal antes de su ingreso al cauce [77, Cap. 8.6; 78, Cap. 3 y 6]. La necesidad y extensión de estas protecciones debería definirse considerando la velocidad del flujo, la pendiente local, la resistencia del suelo o del cauce receptor, la frecuencia esperada de funcionamiento y la posibilidad de mantenimiento.

4.2.3.6 Protección superficial y empastado

La solución de protección más frecuente en vertederos canal de pequeñas presas es el empastado, que consiste en establecer una cobertura vegetal densa y resistente capaz de soportar escurrimientos superficiales sin sufrir erosión significativa.

El desempeño de este tipo de protección depende en gran medida de la correcta implantación y consolidación de la cobertura vegetal, de su continuidad sobre toda la superficie sometida al escurrimiento y de la capacidad de mantenimiento prevista durante la etapa operativa. En particular, los primeros eventos de funcionamiento del vertedero pueden resultar críticos cuando la cobertura aún no ha alcanzado un arraigue suficiente o presenta discontinuidades locales.



Figura 4-1. Vertedero canal empastado.

El buen desempeño hidráulico y estructural de un vertedero empastado depende de la calidad, densidad y persistencia de la cubierta vegetal, así como de su adecuada adaptación a las condiciones de pendiente, suelo y régimen de escurrimiento del canal. Por esta razón, la selección de especies y el manejo de la cobertura vegetal deben considerarse como parte integrante del diseño del vertedero.

Para que esta solución funcione adecuadamente es indispensable que la protección vegetal sea continua y adecuada a la velocidad prevista en cada tramo, extendiéndose sin interrupciones desde la toma de agua en el embalse hasta la descarga en el cauce natural. Los tramos sin protección o con cobertura deficiente suelen convertirse en puntos de inicio de procesos erosivos que se propagan rápidamente aguas arriba y aguas abajo.

Especies recomendadas

Las pasturas utilizadas en vertederos empastados deberían cumplir, en lo posible, con las siguientes características:

- cobertura densa y persistente;
- resistencia al escurrimiento superficial;
- adaptación a fondos de excavación y a suelos compactados;
- establecimiento relativamente rápido;

- tolerancia a sequías estacionales y a condiciones de humedad variable.

En condiciones típicas del Uruguay se recomiendan, entre otras, las especies indicadas en la Tabla 4-2:

Tipo	Especie	Función principal
Gramínea	Festuca arundinacea	Estructura, persistencia y resistencia al escurrimiento
Gramínea	Dactylis glomerata	Cobertura y establecimiento relativamente rápido
Gramínea	Lolium perenne	Cobertura inicial y crecimiento veloz
Leguminosa	Trifolium repens	Cobertura rastrera y fijación de nitrógeno

Tabla 4-2. Especies de pasturas recomendadas para empastado de vertederos auxiliares

Las gramíneas aportan resistencia mecánica a la cobertura vegetal, mientras que las leguminosas contribuyen a mejorar la fertilidad del suelo y a mantener una cobertura más estable.

Mezclas y manejo

En general se recomienda utilizar mezclas de especies, que combinan las ventajas de cada una y mejoran la estabilidad de la cobertura vegetal frente a variaciones climáticas.

El proyectista estudiará cada caso en particular y podrá sugerir diferentes proporciones de semillas según las condiciones del sitio. La siembra suele realizarse en otoño o primavera, con densidades apropiadas (kg/ha) y preferentemente en dos pasadas cruzadas para asegurar una cobertura uniforme.

El buen comportamiento de los vertederos empastados depende también de un mantenimiento periódico adecuado, que incluya tanto el canal excavado como el tramo de ladera natural.

Entre las tareas recomendadas se incluyen:

- reparación temprana de cárcavas incipientes;
- reposición de cobertura vegetal en zonas deterioradas;
- eliminación de arbustos o árboles que puedan alterar el funcionamiento hidráulico;
- mantenimiento de la geometría del canal;
- limpieza y mantenimiento de las zanjas o canales de guardia destinados a desviar la escorrentía superficial proveniente de las laderas adyacentes.

Compatibilidad hidráulica

Las laderas donde se desarrollan vertederos empastados pueden presentar pendientes variables, que en algunos casos alcanzan valores de hasta el 5 a 6 % o incluso superiores.

El comportamiento hidráulico y la estabilidad de estas protecciones dependen no solamente de la velocidad media del flujo, sino también de factores como la pendiente longitudinal, la continuidad y densidad de la cobertura vegetal, el tipo de suelo, la frecuencia de activación del vertedero, la duración de los escurrimientos y la generación de concentraciones locales de caudal.

Como orientación general para pequeñas presas, pueden adoptarse los criterios de velocidades máximas admisibles para coberturas vegetales desarrollados en el Volumen 1 del presente Manual [23], los cuales constituyen valores orientativos asociados a distintos grados de consolidación de la cobertura vegetal. No obstante, en situaciones con pendientes importantes, cambios bruscos de geometría, coberturas poco establecidas, flujos recurrentes o concentraciones localizadas de caudal, la capacidad de protección proporcionada por la cobertura vegetal puede resultar insuficiente y requerir una evaluación específica.

Refuerzos localizados

En algunos casos, especialmente durante las primeras etapas de funcionamiento del vertedero o cuando la cobertura vegetal aún no se encuentra completamente consolidada, pueden producirse concentraciones locales de flujo capaces de generar erosiones superficiales localizadas. Estas concentraciones tienden a agravarse durante eventos sucesivos o de mayor magnitud, pudiendo desencadenar procesos erosivos progresivos que comprometan rápidamente la estabilidad de la protección superficial y modifiquen el comportamiento hidráulico previsto del vertedero.

Para reducir este riesgo pueden incorporarse refuerzos localizados, consistentes en umbrales transversales horizontales ejecutados mediante colchonetas de piedra, gaviones, elementos prefabricados, vigas de hormigón enrasadas con la solera del canal u otras soluciones equivalentes, acompañados cuando corresponda por algunos metros de protección lateral o sectores reforzados aguas arriba y aguas abajo. Estos elementos permiten limitar localmente las aceleraciones del flujo, favorecer una distribución más uniforme de tirantes y reducir la probabilidad de erosiones concentradas en sectores puntuales del vertedero.

Otra alternativa consiste en generar franjas transversales localizadas de implantación reforzada de vegetación, particularmente en terrenos recientemente excavados

donde la remoción de la capa superficial del suelo dificulta el arraigue inicial de las pasturas. Estas franjas pueden disponerse aproximadamente cada 8 a 12 m, mediante excavaciones transversales de unos 20 a 30 cm de profundidad, rellenas con material vegetal adecuado y sembradas cuidadosamente con especies adaptadas a las condiciones hidráulicas previstas. El objetivo es promover el desarrollo inicial de sectores con cobertura vegetal más robusta, capaces de favorecer posteriormente la consolidación progresiva de la pastura sobre el resto de la superficie del vertedero.

Estas soluciones permiten combinar un comportamiento hidráulico más controlado durante las primeras etapas de operación con una reducción significativa de las superficies que requieren protección estructural permanente, favoreciendo al mismo tiempo la consolidación progresiva de la cobertura vegetal sobre el resto del vertedero.

En sectores sometidos a mayores solicitaciones hidráulicas o donde existan dudas respecto a la estabilidad de la protección vegetal, puede evaluarse además la utilización de soluciones complementarias tales como geomantas reforzadas, geoceldas, geogrillas u otras técnicas de bioingeniería o refuerzo superficial equivalentes. La selección de estas soluciones debería considerar las características hidráulicas del flujo, la pendiente, el tipo de suelo, la facilidad de mantenimiento y la experiencia disponible para su correcta instalación y control.

Otros usos en la sección de control

En la mayoría de los casos la sección de control del vertedero coincide con un camino rasante que constituye la continuación del camino que atraviesa el coronamiento de la presa.

En estas situaciones se recomienda adoptar precauciones especiales desde el punto de vista hidráulico y estructural, evitando recargas posteriores del camino que puedan elevar la cota del vertedero y comprometer la seguridad de la presa al reducir el resguardo de seguridad hasta el coronamiento.

Cuando se prevea un uso relativamente frecuente del vertedero, resulta recomendable reforzar este tramo mediante pavimento de hormigón u otra protección estructural.

Asimismo, se recomienda evitar la instalación de estructuras permanentes dentro del canal vertedero o en sus márgenes inmediatos, tales como edificaciones, alambrados u otros obstáculos capaces de reducir la capacidad de descarga o modificar la distribución del flujo.

Cuando el vertedero coincida con caminos internos o sectores de circulación de ganado, resulta recomendable prever disposiciones que minimicen el deterioro localizado de la cobertura vegetal y de la geometría del canal. En particular, puede resultar conveniente evitar que el cruce habitual de animales se concentre sobre la sección de control o sobre sectores sometidos a mayores velocidades de flujo, favoreciendo en cambio zonas de paso ubicadas aguas arriba o en sectores menos sensibles desde el punto de vista hidráulico y erosivo.

4.2.4 Vertedero principal

En algunas pequeñas presas resulta recomendable incorporar un vertedero principal independiente del vertedero auxiliar, destinado a evacuar los caudales más frecuentes con tirantes reducidos y con protección estructural adecuada contra la erosión. La incorporación de este dispositivo permite mejorar el control hidráulico del embalse y reducir la frecuencia de operación del vertedero auxiliar, favoreciendo el mantenimiento de su protección superficial.

A diferencia del vertedero auxiliar, que suele desarrollarse mayoritariamente sobre terreno natural protegido mediante empastado u otras soluciones simples, los vertederos principales suelen resolverse mediante estructuras hidráulicas más robustas, que permiten controlar el vertimiento con mayor precisión y concentrar la disipación principal de energía a la salida de la conducción.

El diseño de estos vertederos debería contemplar tanto el funcionamiento hidráulico de la toma y la conducción como las condiciones de descarga aguas abajo, evitando la generación de erosiones que puedan afectar la estabilidad de la presa o de la ladera adyacente.

Como principio general, en pequeñas presas los vertederos principales se diseñan preferentemente como vertederos libres, sin compuertas, debido a su simplicidad constructiva y operativa, su menor dependencia de equipamiento electromecánico y sus menores requerimientos de operación y mantenimiento [71].

El empleo de compuertas en vertederos principales podría ser considerado solamente cuando esté justificado por necesidades específicas del proyecto (regulación fina del nivel del embalse, usos múltiples, descargas ambientales coordinadas con toma) y siempre que pueda garantizarse una operación confiable, incluyendo protocolos de mantenimiento, redundancia mecánica y disponibilidad del operador durante eventos hidrológicos.

4.2.4.1 Tipos de vertederos principales

En pequeñas presas de riego pueden encontrarse diferentes configuraciones de vertederos principales, entre las que se destacan las siguientes.

- Vvertederos con toma vertical (pozo)

En este tipo de vertedero el agua ingresa a una estructura vertical ubicada en el embalse, generalmente de sección circular o rectangular, cuya cresta define la cota de vertido. El flujo desciende por esta estructura vertical y luego se conduce mediante una tubería que atraviesa la presa en forma protegida hasta descargar aguas abajo. En la bibliografía internacional este tipo de solución suele denominarse "drop inlet spillway" y, en algunas configuraciones particulares, "morning glory".

Este tipo de vertedero concentra la descarga en un punto localizado aguas abajo de la presa. Debido al desnivel existente entre el nivel del embalse y el punto de descarga, la salida del conducto suele requerir estructuras de disipación de energía, siendo habitual el empleo de cuencos disipadores de impacto u otras soluciones equivalentes.

Cuando el proyecto lo requiera, la estructura asociada al vertedero puede integrarse con otras funciones hidráulicas, tales como la toma de agua para riego, la descarga de fondo, la liberación de caudales ambientales o la regulación del nivel del embalse, mediante la incorporación de aberturas o ventanas ubicadas a diferentes alturas y equipadas con los correspondientes órganos de control. Estas soluciones deberían diseñarse cuidadosamente para asegurar la compatibilidad hidráulica y operativa entre las distintas funciones previstas.

- Vvertederos con toma frontal o tipo alcantarilla

En este tipo de vertedero el agua ingresa al sistema a través de una abertura frontal ubicada en el paramento aguas arriba de la presa o en la ladera del embalse, a la cota correspondiente al nivel de vertido. A partir de dicha toma, el flujo se conduce mediante una tubería o conducto de pendiente reducida que atraviesa la presa hasta descargar aguas abajo. En la bibliografía internacional estas soluciones suelen agruparse dentro de los "conduit spillways" o "drop inlet spillways" con toma frontal, dependiendo de la configuración adoptada.

La descarga se produce habitualmente a una cota levemente inferior a la del nivel del embalse, por lo que el flujo conserva una energía significativa al emerger aguas abajo. En consecuencia, suele ser necesario prever un canal de descarga protegido que conduzca el agua hasta las proximidades del cauce natural sin provocar erosiones

en la ladera ni en el terreno circundante, así como una estructura de disipación de energía ubicada antes de la restitución final al cauce receptor.

Debido a que la estabilidad hidráulica de la descarga forma parte esencial del funcionamiento de este tipo de vertederos, el canal de restitución, sus protecciones y la estructura de disipación deberían considerarse como elementos integrantes del diseño del vertedero principal y verificarse conjuntamente con el conducto y la estructura de toma.

- Vertederos principales tipo canal

En algunas pequeñas presas el vertedero principal puede resolverse también como un vertedero canal excavado en tierra o conformado en roca [76], cuya sección de control se ubica sobre el camino de acceso al coronamiento de la presa, generalmente en forma de badén. Debido a que este vertedero está destinado a funcionar con frecuencia, resulta recomendable reforzar especialmente la sección de control mediante pavimento de hormigón u otra protección estructural que asegure su estabilidad.

En estos casos, el vertedero principal continúa mediante un canal excavado sobre la ladera hasta alcanzar el cauce natural. Desde el punto de vista del flujo y de las protecciones requeridas, este canal presenta características similares a las descritas para los vertederos con toma frontal o tipo alcantarilla, por lo que su diseño debería considerar conjuntamente la estabilidad hidráulica del canal, las medidas de protección contra la erosión y la disipación de energía cuando corresponda.

Este tipo de vertedero puede integrarse también con el vertedero auxiliar mediante un canal con dos cotas de vertido, donde la cota inferior actúa como vertedero principal y la cota superior como vertedero auxiliar. En estos casos, el tramo correspondiente al vertedero principal debería estar debidamente protegido contra la erosión en toda su longitud, dada la mayor frecuencia de operación prevista.

4.2.4.2 Descarga y disipación de energía

En vertederos principales con conducciones a través de la presa en niveles inferiores, la descarga del flujo aguas abajo suele requerir estructuras de disipación de energía que permitan reducir las velocidades antes de que el agua se reincorpore al terreno natural o al cauce receptor. En estos casos es frecuente el uso de disipadores de impacto, que permiten disipar gran parte de la energía del flujo en una estructura compacta ubicada inmediatamente aguas abajo de la conducción (ver Sección 4.9.2).

Aguas abajo de estas estructuras puede disponerse un canal corto de descarga protegido que conduzca el flujo hasta el cauce natural, evitando erosiones localizadas o procesos de socavación regresiva.

En otros casos, especialmente cuando la toma del vertedero principal adopta la forma de alcantarilla o conducción subhorizontal en niveles superiores, puede ser necesario prever canales de descarga previos y más extensos, con protección adecuada frente a la erosión y considerando los criterios hidráulicos y geométricos desarrollados para vertederos canal (Ver Sección 4.2.3.6). Dependiendo de la geometría de la descarga y de las velocidades resultantes, estos sistemas podrán requerir además estructuras específicas de disipación de energía antes de la restitución final al cauce receptor.

4.3 Obras de descarga

Las obras de descarga constituyen uno de los elementos fundamentales de una presa, ya que permiten descargar agua del embalse de forma controlada hacia el cauce aguas abajo. Su función principal es posibilitar la evacuación de caudales durante la operación normal del embalse y, cuando resulte necesario, permitir el descenso del nivel del agua para tareas de mantenimiento, inspección, emergencias o por razones de seguridad. Cuando la toma de la conducción se dispone en las proximidades del fondo del embalse, estas obras pueden cumplir además la función de descarga de fondo, permitiendo vaciar parcial o totalmente el embalse y facilitando determinadas tareas de operación y mantenimiento.

Desde el punto de vista hidráulico, una obra de descarga consiste en un sistema que conduce el agua desde el embalse hacia el exterior mediante una conducción controlada. El funcionamiento de este sistema depende fundamentalmente de la diferencia de nivel entre el embalse y la salida del conducto, que proporciona la energía necesaria para el movimiento del agua.

En presas pequeñas de materiales sueltos, las obras de descarga se resuelven habitualmente mediante conducciones formadas por tuberías instaladas en zanjas excavadas en la fundación y posteriormente cubiertas por el terraplén de la presa. Este tipo de solución presenta ventajas constructivas importantes, ya que puede ejecutarse con procedimientos simples y materiales de uso corriente, manteniendo un comportamiento adecuado siempre que se apliquen criterios apropiados de diseño, filtración, drenaje y construcción en torno a la conducción.

El diseño de estas obras debería considerar tanto los aspectos hidráulicos como los geotécnicos, estructurales y de seguridad. Desde el punto de vista hidráulico, resulta necesario asegurar que la conducción tenga capacidad suficiente para evacuar el

caudal previsto bajo las condiciones de carga disponibles en el embalse. Desde el punto de vista geotécnico y estructural, se recomienda prestar especial atención al correcto diseño del conducto, de la zanja, al apoyo de la tubería, así como a la reconstrucción del terraplén alrededor del conducto, a efectos de reducir el riesgo de aplastamiento de la tubería, asentamientos diferenciales, filtraciones concentradas, erosión interna o generación de caminos preferenciales de flujo a lo largo de la conducción [25, Cap. 10; 79].

En presas de mayor altura, particularmente cuando la carga de terraplén sobre la conducción resulte significativa, se recomienda prever recubrimientos o envoltentes estructurales de hormigón armado alrededor de la tubería, especialmente en conducciones flexibles o sensibles a deformaciones. Este tipo de solución contribuye a mejorar el comportamiento estructural de la conducción frente a cargas externas, reducir concentraciones de deformación y brindar una mayor protección durante la construcción y operación de la presa.

Asimismo, las obras de descarga deberían diseñarse procurando que su operación sea simple y confiable, de modo que puedan ser manejadas con facilidad por el operador del embalse y requieran un mantenimiento mínimo a lo largo del tiempo.

4.3.1 Componentes de una obra de descarga

Una obra de descarga está compuesta por un conjunto de elementos hidráulicos que permiten conducir el agua desde el embalse hasta el cauce aguas abajo de la presa de manera controlada.

En presas pequeñas, donde las descargas se realizan mediante tuberías enterradas en zanjas excavadas en la fundación natural, la obra de descarga suele constituir un sistema relativamente simple integrado por los siguientes componentes principales:

- estructura de toma
- conducción
- dispositivo de control
- estructura de salida y disipación de energía
- canal de descarga.

Cada uno de estos elementos cumple una función específica dentro del sistema hidráulico. La estructura de toma permite el ingreso del agua desde el embalse y protege la conducción frente al ingreso de materiales flotantes o sedimentos gruesos. La conducción transporta el agua a través de la fundación y del terraplén de la presa. Los dispositivos de control, tales como válvulas o compuertas, permiten regular o interrumpir la descarga. La estructura de salida y disipación de energía conduce el

flujo hacia el exterior del terraplén y reduce los riesgos de erosión en la zona cercana. Finalmente, el canal de descarga conduce el flujo hacia el cauce natural aguas abajo.

La disposición de estos componentes debería concebirse como un sistema hidráulico único, en el cual cada elemento influye en el funcionamiento de los demás. El dimensionamiento general del sistema depende principalmente de la carga hidráulica disponible en el embalse, determinada por la diferencia entre el nivel del agua en el embalse respecto a la salida de la conducción, y del caudal de descarga requerido, que depende de los objetivos de operación del embalse.

En conducciones cerradas, como las utilizadas habitualmente en presas pequeñas, la capacidad del sistema también está condicionada por las pérdidas de carga hidráulica que se producen a lo largo del recorrido del flujo. Estas pérdidas se originan principalmente en:

- la entrada del agua desde el embalse hacia la conducción
- la fricción del flujo en el interior de la tubería
- los cambios de sección o dirección del conducto
- los dispositivos de control instalados en la conducción
- la salida del flujo al exterior.

Por esta razón, el dimensionamiento de la obra de descarga no depende únicamente del diámetro de la tubería, sino también del diseño de la entrada, de las características de los dispositivos de control y de la configuración de la salida.

En consecuencia, el tamaño de los distintos componentes puede ajustarse entre sí para lograr la capacidad requerida con un diseño hidráulico adecuado. Por ejemplo, una entrada bien diseñada, con transiciones suaves, puede reducir las pérdidas de carga y permitir el uso de una conducción de menor diámetro. De forma similar, la selección adecuada de válvulas o compuertas puede influir en el régimen de funcionamiento de la descarga.

En las secciones siguientes se describen con mayor detalle los distintos componentes de estas obras de descarga y los criterios básicos que deberían considerarse en su diseño.

4.3.2 Disposición general y ubicación

La disposición general de una obra de descarga depende de diversos factores relacionados con las condiciones del sitio, los requerimientos hidráulicos del proyecto y la forma en que la obra se integra con el resto de las estructuras de la presa.

Entre los factores que influyen en la selección de la disposición se encuentran:

-
- la topografía del sitio
 - las condiciones geológicas de la fundación
 - la relación con otras estructuras hidráulicas, en particular el vertedero
 - los requerimientos de operación del embalse, incluyendo la liberación de caudales ambientales
 - los procedimientos constructivos previstos.

El proyecto debería prever los dispositivos necesarios para permitir el cumplimiento de los requerimientos de caudal ambiental que resulten aplicables durante la construcción y la operación del embalse.

En algunos casos, por ejemplo, las descargas de la obra de salida pueden integrarse con las del vertedero y utilizar un mismo sistema de disipación de energía aguas abajo. Sin embargo, en presas pequeñas es más habitual que ambas estructuras funcionen de forma independiente.

La topografía y la geología del sitio ejercen una influencia decisiva sobre la disposición adoptada. En determinados emplazamientos la única solución práctica puede ser una conducción instalada en zanja a través de la fundación, mientras que en otros casos podrían considerarse alternativas diferentes. La presencia de suelos profundos o de materiales de fundación poco favorables puede limitar las opciones de disposición disponibles.

La estructura de toma se ubica generalmente próxima al paramento aguas arriba del terraplén, a una cota que permita la descarga del volumen de agua requerido para la operación del embalse. En embalses pequeños esta toma suele situarse cerca del fondo del vaso, de modo que permita evacuar la mayor parte del volumen almacenado cuando sea necesario.

La conducción atraviesa la fundación y el terraplén siguiendo un trazado lo más recto posible, evitando cambios bruscos de dirección que puedan incrementar las pérdidas de carga o generar dificultades constructivas. Siempre que sea posible, se procura ubicar la conducción sobre materiales de fundación relativamente competentes y asegurar un apoyo uniforme de la tubería a lo largo de toda su longitud.

Los dispositivos de control pueden disponerse en diferentes posiciones dentro del sistema. En conducciones enterradas en presas de materiales sueltos es frecuente ubicarlos hacia el extremo aguas abajo del conducto, lo que facilita el acceso para operación, inspección y mantenimiento, particularmente durante eventos hidrológicos o maniobras de emergencia. En otros casos, cuando el control se ubica

aguas arriba, puede requerirse un pozo o conducto vertical de acceso que conecte el mecanismo de operación con la superficie del terraplén.

La salida de la conducción se ubica normalmente en el pie de la presa o ligeramente aguas abajo de éste, desde donde el flujo se conduce hacia el cauce natural mediante un canal de descarga. Cuando las velocidades de descarga puedan producir erosión del terreno o afectar la estabilidad del cauce receptor, el proyecto debería prever dispositivos de disipación de energía adecuados a las condiciones hidráulicas y geotécnicas del sitio, tales como cuencos disipadores, losas de protección, disipadores de impacto, enrocados u otras soluciones equivalentes.

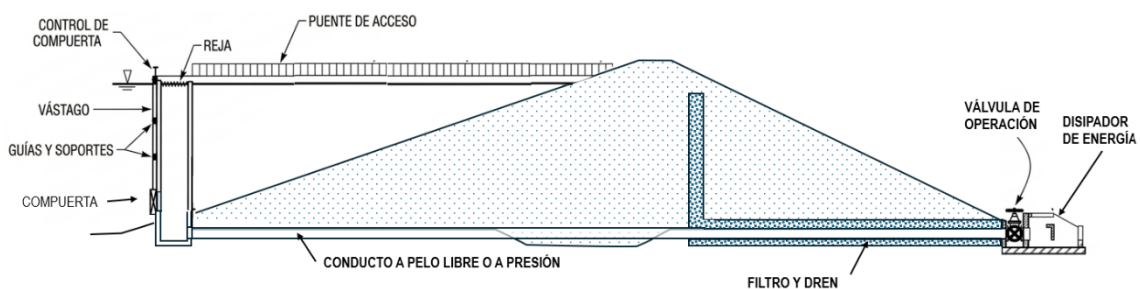


Figura 4-2. Ejemplo conceptual de conducción enterrada con toma vertical, válvula de operación y disipación de energía.

En la disposición general de estas obras se recomienda procurar que todos los elementos queden accesibles para inspección, operación y mantenimiento, evitando configuraciones que dificulten la intervención en caso de obstrucciones, fallas mecánicas o necesidad de reparación.

4.4 Tomas

La obra de toma es el elemento de la obra de descarga que permite la entrada del agua desde el embalse hacia la conducción. Su función principal es captar el flujo de manera adecuada y conducirlo hacia el conducto de descarga. En pequeñas presas destinadas a riego, estas obras suelen resolverse mediante configuraciones relativamente sencillas, en las que la boca de entrada se conecta directamente con la tubería de descarga instalada en la fundación.

El diseño de la obra de toma debería procurar que el agua ingrese a la conducción de forma uniforme y con pérdidas de carga reducidas. Para ello, se recomienda que la transición entre el embalse y el conducto sea lo más suave posible, evitando contracciones bruscas o cambios abruptos de dirección que puedan generar turbulencias o pérdidas de energía innecesarias. En tomas verticales o configuraciones con ingreso concentrado, debería evaluarse la posible formación de vórtices en condiciones de bajo nivel de agua o altas velocidades de aproximación,

ya que estos pueden inducir la entrada de aire en la conducción y afectar su capacidad hidráulica. En tales casos, puede considerarse la incorporación de dispositivos antivórtice u otras soluciones geométricas que reduzcan la rotación del flujo en la zona de ingreso [44; 25].

La ubicación en altura de la toma se define principalmente en función del nivel mínimo al cual se desea poder descargar el embalse. En presas de riego es habitual ubicarla a una cota relativamente baja, de modo de permitir el aprovechamiento de la mayor parte del volumen almacenado. Al mismo tiempo, suele preverse un volumen muerto en el fondo del embalse destinado a la acumulación de sedimentos, cuya presencia contribuye a reducir el ingreso de materiales sólidos a la conducción y a evitar interferencias en el funcionamiento de la obra de descarga.

Las obras de toma pueden incorporar ranuras para ataguías o tableros de cierre, que permiten aislar temporalmente la entrada de agua para inspeccionar o reparar la conducción o los dispositivos de control, sin necesidad de vaciar completamente el embalse. En todos los casos, el diseño debería procurar configuraciones que faciliten la operación y el mantenimiento de estos elementos.

Las tomas deberían incorporar rejas destinadas a impedir el ingreso de ramas, residuos u otros elementos flotantes que puedan obstruir la conducción o interferir con los dispositivos de control. Como orden de magnitud, el espaciamiento entre barras suele adoptarse entre 5 y 15 cm, dependiendo del diámetro de la conducción, del tipo de válvula instalada aguas abajo y de las condiciones de operación previstas. El diseño debería considerar además la velocidad de aproximación del flujo, a fin de evitar pérdidas de carga excesivas y reducir la frecuencia de obstrucción [44]. Las rejas pueden construirse en acero estructural galvanizado o acero inoxidable u otros materiales adecuados a la durabilidad y mantenimiento previstos⁶ a 7, y se recomienda disponerlas de modo que permitan su limpieza periódica en condiciones seguras, ya que la acumulación de residuos puede comprometer el funcionamiento del sistema.

Las obras de toma deberían diseñarse como estructuras robustas y durables, capaces de resistir la acción del flujo y el impacto de materiales flotantes. En el caso de pequeñas presas de riego en Uruguay, no resulta necesario considerar acciones asociadas al hielo ni solicitaciones sísmicas significativas, lo que simplifica el diseño estructural de estos elementos.

Cuando corresponda mantener caudales ambientales aguas abajo, la obra de toma o descarga podría incorporar dispositivos específicos para su erogación controlada, compatibles con las exigencias establecidas en la autorización vigente.

4.4.1 Tipos de obras de toma

En pequeñas presas de materiales sueltos con conducciones enterradas en zanja, las configuraciones utilizadas para la obra de toma pueden agruparse en unos pocos tipos básicos. Se procura en general adoptar la solución más adecuada a las condiciones del sitio y a los requerimientos de operación, privilegiando configuraciones robustas, de fácil construcción y con bajo requerimiento de mantenimiento.

4.4.1.1 Toma frontal

En este tipo de disposición la conducción se inicia directamente en el paramento aguas arriba de la presa en general junto a alguna de las laderas, mediante una boca de entrada protegida con reja. La tubería atraviesa posteriormente la fundación en la base del terraplén siguiendo el trazado previsto para la obra de descarga.

Se trata de una de las configuraciones más utilizadas en pequeñas presas de riego debido a su sencillez constructiva, bajo costo y buen comportamiento hidráulico. La toma puede ubicarse a distintas cotas según los requerimientos de operación del embalse, procurando compatibilizar el aprovechamiento del volumen almacenado con la necesidad de limitar el ingreso de sedimentos.

El diseño debería procurar una transición de entrada lo más suave posible entre el embalse y la conducción, reduciendo pérdidas de carga y evitando zonas de flujo turbulento. Asimismo, resulta recomendable prever condiciones adecuadas de acceso para la inspección, limpieza y mantenimiento de las rejillas y demás elementos de protección.

4.4.1.2 Toma vertical (drop inlet)

En esta configuración el agua ingresa directamente a un conducto vertical desde el cual pasa a la conducción horizontal que atraviesa la presa.

La disposición vertical permite eventualmente concentrar en una única estructura distintas funciones operativas, tales como captación para riego, regulación de niveles, descarga de fondo o erogación de caudales ambientales mediante aberturas ubicadas a diferentes cotas, cada una con su compuerta. Asimismo, facilita la instalación de rejillas, ataguías y otros dispositivos de aislamiento o mantenimiento.

Debido a la geometría del ingreso, el proyectista debería verificar la posible formación de vórtices, particularmente cuando se prevean altas velocidades de aproximación o bajos niveles de embalse. Cuando corresponda, podrán incorporarse dispositivos antivórtice u otras soluciones geométricas destinadas a mejorar las condiciones de captación.

4.4.1.3 Toma frontal elevada

En algunas presas se dispone una toma frontal ubicada a cierta altura sobre el fondo del embalse, conectada a la conducción que atraviesa la presa.

Esta disposición se utiliza cuando se desea reducir la captación de sedimentos, permitiendo que los materiales depositados en el fondo del embalse permanezcan por debajo de la cota de la toma.

4.4.1.4 Toma por sifón

La toma mediante sifón constituye una alternativa particularmente interesante en pequeñas presas donde se procura evitar la ejecución de conducciones a través del cuerpo del terraplén. En una toma por sifón el agua es conducida desde el embalse a través de una tubería que sobrepasa el coronamiento de la presa o una ladera adyacente, sin atravesar el terraplén. Esta solución permite reducir así los riesgos asociados a filtraciones concentradas y a procesos de erosión interna en torno a conductos que atraviesan la presa.

El funcionamiento del sifón se basa en la diferencia de nivel entre la superficie del embalse y el punto de descarga, generando en la clave del conducto presiones inferiores a la atmosférica. Esta condición impone una limitación física a la altura máxima que puede alcanzarse entre el nivel del embalse y el punto más alto del conducto. Si bien el límite teórico está dado por la presión atmosférica, en la práctica corresponde considerar la presión de vapor del agua, la altitud del sitio, la temperatura y las pérdidas de carga en la conducción.

En consecuencia, para condiciones habituales se recomienda que la elevación de la clave del sifón respecto del nivel del embalse no supere valores del orden de 6 a 7 m, adoptando valores menores cuando existan pérdidas significativas o condiciones desfavorables [58; 80]. Este valor surge del descuento sobre la presión atmosférica (10,33 m al nivel del mar) por la presión de vapor del agua ($\approx 0,3$ m a temperaturas habituales), pérdidas de carga en la conducción (1-2 m en sifones cortos) y un margen de seguridad para garantizar el cebado estable.

La operación del sifón requiere el cebado previo del sistema, es decir, el llenado completo de la conducción o la evacuación del aire contenido en su interior, de modo de establecer una columna continua de agua. Este proceso puede realizarse manualmente, mediante el llenado del conducto, o mediante sistemas auxiliares, como bombas de vacío o dispositivos de purga ubicados en la clave. Una vez cebado, el flujo se mantiene mientras no ingrese aire al sistema y se conserve una diferencia de nivel suficiente entre el embalse y la descarga. La detención del flujo se logra mediante la admisión controlada de aire en la clave, a través de válvulas de venteo o dispositivos específicos, que interrumpen la continuidad de la columna de agua.

Desde el punto de vista del diseño hidráulico, el sifón debería dimensionarse considerando la carga disponible entre el nivel del embalse y el punto de descarga, descontando las pérdidas de carga por entrada, fricción, cambios de dirección, válvulas y salida. A diferencia de otras conducciones, en este caso resulta fundamental verificar que la presión absoluta en la clave no descienda por debajo de valores admisibles respecto de la presión de vapor del agua, a fin de evitar fenómenos de cavitación o pérdida de cebado. En consecuencia, la selección del diámetro del conducto no depende únicamente del caudal requerido, sino también de la necesidad de limitar las pérdidas de carga y asegurar condiciones de operación estables [81].

La toma de un sifón en el embalse puede resolverse mediante configuraciones similares a las de otras obras de captación, incorporando rejillas u otros dispositivos de protección. En este caso, particularmente se recomienda prestar especial atención a evitar la formación de vórtices o la entrada de aire, lo cual podría comprometer su funcionamiento. En la descarga, el flujo puede requerir estructuras de protección o disipación de energía en función de la velocidad de salida y de las condiciones del terreno receptor, aplicando criterios análogos a los de otras conducciones presurizadas.

El trazado del sifón puede disponerse total o parcialmente enterrado en el entorno del coronamiento o de la ladera próxima. No obstante, la disposición de la conducción dentro del terraplén no resulta recomendable, debido a las dificultades para asegurar un comportamiento compatible con las deformaciones del relleno. En caso de adoptarse esta solución, la conducción debería disponerse en zanja excavada en la fundación, y el diseño debería contemplar criterios equivalentes a los de una conducción enterrada convencional, en particular en lo relativo a la compatibilidad de deformaciones.

En términos generales, las tomas por sifón resultan adecuadas en presas de baja altura, con requerimientos de caudal moderados y en sistemas de uso estacional,

siempre que se garantice una operación confiable, un adecuado control del cebado y la disponibilidad de mantenimiento para los dispositivos asociados. Asimismo, constituyen una alternativa especialmente útil en situaciones donde se busca evitar intervenciones en el cuerpo de la presa o simplificar las condiciones constructivas.

4.4.1.5 Tomas mediante bombeo desde el embalse

En algunos sistemas de riego, abastecimiento u otros usos, la captación del agua se realiza mediante bombeo directo desde el embalse, sin intervención de una obra de toma integrada a la presa.

Esta alternativa permite desacoplar el sistema de extracción de agua respecto de la estructura principal de la presa, evitando la ejecución de conducciones permanentes a través del terraplén y facilitando futuras modificaciones de capacidad o ubicación de los equipos.

La solución puede resultar especialmente atractiva en embalses de pequeña escala, en sistemas con demandas variables o cuando se dispone de suministro energético adecuado. No obstante, incorpora costos operativos asociados al consumo de energía y requerimientos de mantenimiento específicos de los equipos electromecánicos.

El diseño, selección y operación de los sistemas de bombeo exceden el alcance del presente Manual.

4.5 Conducciones enterradas

Las conducciones enterradas constituyen uno de los componentes principales de las obras de descarga en pequeñas presas. Su diseño requiere considerar en forma integrada aspectos hidráulicos, estructurales y geotécnicos, así como su interacción con el terraplén, la fundación y los sistemas drenantes asociados.

En las secciones siguientes se desarrollan los principales criterios de diseño aplicables a conducciones enterradas instaladas a través de presas de materiales sueltos.

4.5.1 Consideraciones generales de diseño

Las conducciones a través del cuerpo de presas de materiales sueltos constituyen uno de los elementos que con mayor frecuencia intervienen en modos de fallo asociados a erosión interna, particularmente cuando se desarrollan trayectorias preferenciales de filtración a lo largo de la interfaz conducción-terraplén [79]. Entre los principales documentos de referencia internacional sobre esta temática se encuentran FEMA P-484 (2005) Conduits through Embankment Dams [79], USACE EM 1110-2-2902 [82] e ICOLD Bulletin 164 Internal Erosion of Existing Dams [51].

Las conducciones que atraviesan presas de materiales sueltos requieren especial cuidado en el diseño de la interfaz entre la tubería, el terraplén y el sistema drenante asociado, debido a la necesidad de controlar adecuadamente las filtraciones y compatibilizar el comportamiento hidráulico y estructural del conjunto.

Las prácticas actuales priorizan el empleo de sistemas filtrantes y drenantes continuos para el control de filtraciones y erosión interna, en sustitución de soluciones discontinuas tradicionales como los collarines impermeables.

El diseño de estas conducciones debería considerar en forma integrada el comportamiento hidráulico, estructural y geotécnico del conjunto formado por la tubería, su eventual recubrimiento estructural, los materiales de apoyo, el sistema filtrante y drenante asociado y el terraplén circundante.

El trazado de la conducción debería ser preferentemente recto, evitando cambios bruscos de dirección, pendientes o sección que puedan incrementar las pérdidas de carga, dificultar la construcción o generar concentraciones localizadas de tensiones y deformaciones. En presas de materiales sueltos, las conducciones enterradas deberían disponerse preferentemente apoyadas sobre materiales de fundación relativamente competentes y no dentro del cuerpo del terraplén sin apoyo inferior continuo. El proyecto debería procurar condiciones de apoyo uniformes a lo largo de toda la conducción y verificar la compatibilidad entre los asentamientos previsibles de la fundación, los del terraplén y la capacidad de deformación admisible de la conducción y sus juntas.

Asimismo, el diseño debería prever la continuidad del sistema filtrante y drenante asociado a la conducción, de modo de interceptar y conducir en forma controlada las filtraciones que eventualmente puedan desarrollarse en torno al conducto. Las soluciones adoptadas deberían asegurar además la posibilidad de inspección y observación de las descargas drenadas aguas abajo.

Las disposiciones constructivas correspondientes a la ejecución de zanjas, recubrimientos, rellenos y sistemas filtrantes asociados se desarrollan con mayor detalle en la Sección 5.6.1

4.5.2 Materiales de las conducciones

Las conducciones de descarga podrán ejecutarse utilizando tuberías de hormigón prefabricado, acero, PVC, PEAD u otros materiales que resulten adecuados para las condiciones de servicio previstas. La selección del material debería considerar, entre otros aspectos, la presión de trabajo, las cargas externas transmitidas por el terraplén, la durabilidad requerida, las condiciones de corrosión o abrasión

esperadas, la disponibilidad de uniones apropiadas y la compatibilidad con las deformaciones previsibles del sistema.

Las tuberías de hormigón presentan elevada rigidez estructural y buena resistencia frente a las cargas externas, aunque requieren especial atención al comportamiento de sus juntas y a la compatibilidad con eventuales asentamientos diferenciales. Las conducciones metálicas ofrecen elevada resistencia mecánica y permiten resolver configuraciones complejas, pero pueden requerir medidas específicas de protección frente a la corrosión.

Las tuberías plásticas, tales como PVC o PEAD, presentan ventajas asociadas a su facilidad de instalación, resistencia química y capacidad para admitir ciertas deformaciones. No obstante, su comportamiento depende en mayor medida de las condiciones de apoyo, del confinamiento proporcionado por el relleno circundante y de la correcta ejecución de las uniones.

En el caso de tuberías metálicas corresponde evaluar la necesidad de recubrimientos protectores, revestimientos internos o sistemas de protección contra la corrosión. Para tuberías plásticas expuestas a la intemperie deberían considerarse además los efectos de la radiación ultravioleta y del envejecimiento a largo plazo del material.

4.5.3 Recubrimiento estructural y apoyo de la conducción

Se recomienda que las conducciones que atraviesen presas de materiales sueltos dispongan de una envolvente estructural de hormigón ejecutada sobre una cama de apoyo adecuadamente nivelada. Esta solución proporciona un apoyo uniforme a la conducción, mejora la distribución de las cargas transmitidas por el terraplén y contribuye a limitar deformaciones diferenciales a lo largo de la tubería.

La envolvente de hormigón constituye además una medida eficaz para proteger la conducción frente a deformaciones localizadas, aplastamiento y otros daños que pueden producirse durante la construcción y operación de la presa. Asimismo, reduce la sensibilidad del sistema frente a defectos de ejecución asociados a la compactación del relleno en los riñones de la tubería, mejora el comportamiento estructural del conjunto y facilita las tareas de supervisión y control de calidad durante la construcción.

Las superficies exteriores del recubrimiento deberían diseñarse de forma que favorezcan una adecuada colocación y compactación del material de relleno adyacente. Se recomienda evitar cambios bruscos de sección, aristas pronunciadas o superficies verticales extensas que dificulten la compactación o generen discontinuidades en el terraplén. Resulta conveniente disponer laterales inclinados y

transiciones suaves que favorezcan el contacto entre el hormigón y el material compactado circundante, como se muestra esquemáticamente en la Figura 4-3.

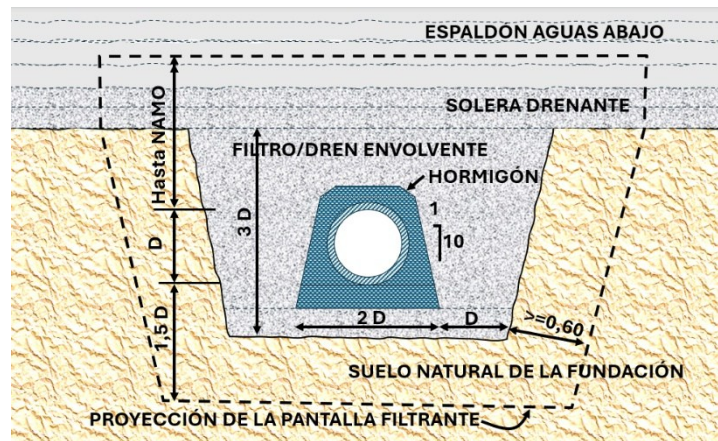


Figura 4-3. Elementos alrededor de una tubería a través de la presa. Sección bajo el espaldón aguas abajo.

En determinadas situaciones podrán adoptarse soluciones simplificadas basadas únicamente en una cama o cuna de hormigón, o incluso en apoyos especialmente preparados sin elementos estructurales de hormigón, siempre que el proyectista justifique adecuadamente su conveniencia. Esta simplificación debería limitarse a obras de DPA Bajo, con conducciones rígidas, cargas relativamente reducidas sobre la tubería y condiciones que permitan asegurar una adecuada ejecución y control de calidad de los rellenos y de la compactación circundante.

Este criterio resulta consistente con recomendaciones internacionales que destacan la importancia de proporcionar apoyo uniforme a la conducción, controlar las deformaciones diferenciales y reducir la vulnerabilidad frente a defectos constructivos o asentamientos del terraplén [79; 44; 46; 82].

La envolvente estructural no sustituye los sistemas de filtración y drenaje requeridos para el control de la erosión interna a lo largo de la conducción. Estos sistemas se desarrollan en la sección siguiente.

4.5.4 Sistemas filtrantes y drenantes asociados

Las conducciones que atraviesan presas de materiales sueltos constituyen uno de los sectores más sensibles frente al desarrollo de procesos de erosión interna. La experiencia internacional muestra que numerosas fallas históricas se han originado por filtraciones concentradas a lo largo de la interfaz conducción–terraplén o conducción–fundación, capaces de movilizar progresivamente partículas del suelo y generar mecanismos de erosión regresiva.

Por esta razón, se recomienda que las conducciones dispongan de sistemas específicos de filtración y drenaje diseñados para interceptar las filtraciones potenciales y conducirlas de manera controlada hacia puntos de descarga observables. Las soluciones actualmente recomendadas por organismos como FEMA, NRCS y USBR se basan en la incorporación de filtros-diafragma o sistemas equivalentes alrededor de la conducción, integrados con drenes capaces de captar y evacuar las filtraciones hacia el sistema drenante de la presa. La Figura 4-4 presenta esquemáticamente la integración de estos elementos dentro de una presa de materiales sueltos. Este arreglo permite interceptar filtraciones tanto en la interfaz conducción-terraplén como en el material adyacente, conduciéndolas hacia zonas de menores presiones intersticiales y permitiendo su evacuación de forma controlada [45][44][46].

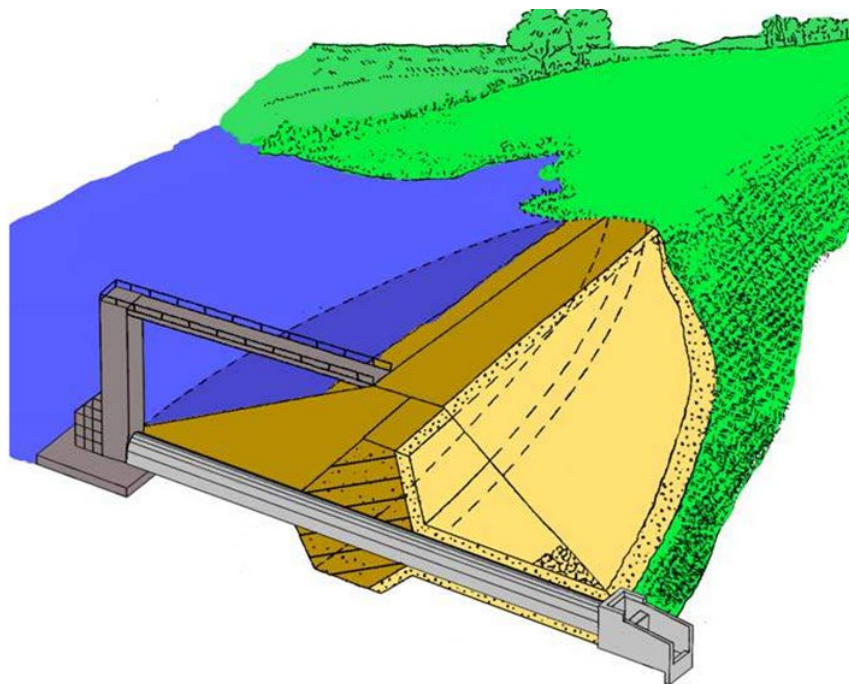


Figura 4-4. Conducto a través de una presa de materiales sueltos con sistema de drenaje aguas abajo integrado (adaptado de FEMA P-484 [79]).

En contraste, los collarines tradicionalmente utilizados para incrementar la longitud de las trayectorias de filtración han perdido protagonismo en la práctica internacional moderna. Si bien pueden contribuir a reducir gradientes hidráulicos locales, no proporcionan un mecanismo efectivo para interceptar y controlar eventuales procesos de erosión interna. Asimismo, pueden generar dificultades constructivas asociadas a la compactación del relleno en su entorno y presentar comportamientos desfavorables ante asentamientos diferenciales. Por estas razones, los sistemas filtrantes y drenantes continuos constituyen actualmente la alternativa preferida.

Siempre que sea posible, las descargas de estos sistemas deberían conducirse hacia puntos accesibles y observables que permitan verificar la presencia de filtraciones, controlar su evolución en el tiempo y detectar tempranamente cambios de caudal, turbiedad o arrastre de materiales. La observación y medición de estas descargas constituye una de las herramientas más eficaces para el seguimiento del comportamiento hidráulico de la presa durante su vida útil.

Los criterios de observación, auscultación y medición de filtraciones se desarrollan con mayor detalle en el Capítulo 6 y en el Anexo D.

4.5.5 Consideraciones hidráulicas y estructurales especiales

El diseño hidráulico de las conducciones debería considerar no solamente el caudal requerido y las pérdidas de carga del sistema, sino también las condiciones de funcionamiento previstas durante la operación normal del embalse, las maniobras de apertura y cierre de los dispositivos de control y las posibles solicitudes transitorias que puedan desarrollarse en la conducción. Los criterios hidráulicos básicos para el dimensionamiento de conducciones de descarga se desarrollan con mayor detalle en la Sección 4.7.

En particular, el análisis hidráulico debería contemplar tanto las pérdidas distribuidas por fricción a lo largo del conducto como las pérdidas localizadas asociadas a entradas, rejillas, válvulas, cambios de dirección, transiciones y descarga final. En conducciones de pequeño y mediano diámetro, las pérdidas localizadas pueden tener una incidencia comparable o incluso superior a las pérdidas distribuidas, especialmente en sistemas con múltiples accesorios o singularidades hidráulicas.

Cuando existan conducciones relativamente largas, elevadas cargas hidráulicas o maniobras rápidas de válvulas y compuertas, resulta recomendable evaluar la posible generación de sobrepresiones transitorias o fenómenos de golpe de ariete. En estos casos, el diseño podrá requerir dispositivos o configuraciones capaces de limitar las sobrepresiones y proteger tanto la conducción como sus apoyos y elementos de control.

Asimismo, en sectores donde puedan desarrollarse velocidades elevadas, cambios bruscos de sección o fuertes pérdidas localizadas de carga, se recomienda verificar el riesgo de cavitación, aireación insuficiente o vibraciones hidráulicas, especialmente en proximidad de válvulas, compuertas, entradas y descargas.

Cuando la conducción atraviese sectores sometidos a deformaciones previsibles de la fundación o del terraplén, el diseño debería prever disposiciones compatibles con dichos movimientos, tales como juntas flexibles, tramos articulados, dispositivos de

transición o cambios localizados de rigidez. En aquellos casos en que se prevean deformaciones significativas y no uniformes, podrá adoptarse además una geometría inicial de tendido que compense dichos efectos, por ejemplo mediante la incorporación de una contraflecha en la conducción o en su apoyo, de modo que bajo las condiciones finales de asentamiento se mantengan las pendientes hidráulicas previstas.

Asimismo, el trazado longitudinal de la conducción debería procurar mantener una pendiente suficiente para permitir su vaciado y despresurización cuando ello resulte necesario para inspección, mantenimiento o reparación. Al definir la pendiente de proyecto y eventuales contraflechas para compensar asentamientos previsibles, corresponde verificar distintos escenarios de comportamiento de la fundación y del terraplén, de modo de evitar tanto la formación de contracurvas permanentes que dificulten el drenaje completo de la conducción como la aparición de puntos bajos localizados donde puedan acumularse sedimentos o quedar retenidos volúmenes de agua.

Desde el punto de vista operativo, resulta recomendable que la conducción pueda aislarse hidráulicamente y despresurizarse en forma controlada para permitir tareas de inspección, mantenimiento o reparación. Cuando corresponda, el diseño debería prever elementos de cierre aguas arriba y dispositivos de ventilación o admisión de aire que faciliten estas maniobras en condiciones seguras.

Asimismo, cuando las dimensiones y características de la conducción lo justifiquen, resulta conveniente facilitar su inspección interna una vez despresurizada, permitiendo la detección temprana de defectos, daños o anomalías operativas.

Finalmente, el diseño debería procurar que todos los elementos principales del sistema —válvulas, compuertas, dispositivos de operación, puntos de inspección y descargas— permanezcan accesibles durante la etapa operativa de la presa, incluso en condiciones de crecida o durante maniobras de emergencia.

4.5.6 Aspectos constructivos generales

La experiencia demuestra que una proporción significativa de los problemas observados en conducciones instaladas a través de presas de materiales sueltos se encuentra asociada a deficiencias constructivas más que a errores de dimensionamiento hidráulico o estructural. Por esta razón, el proyecto debería considerar desde su etapa de diseño las condiciones necesarias para facilitar una ejecución adecuada y verificable de la obra.

Entre los aspectos más relevantes se incluyen la preparación y limpieza de la fundación, la correcta ejecución de las excavaciones, la conformación de la cama de apoyo, el alineamiento de la conducción, la ejecución de juntas, la colocación de filtros y drenes, la construcción del recubrimiento estructural de hormigón cuando corresponda, y la compactación controlada de los rellenos adyacentes.

Particular atención requiere la compactación del material colocado en los sectores inferiores y laterales de la conducción, donde suelen concentrarse las mayores dificultades de ejecución y control. Esta condición resulta especialmente importante cuando, por circunstancias justificadas, se adopten soluciones sin recubrimiento estructural de hormigón, ya que en tales casos el comportamiento de la conducción depende en mayor medida de la calidad del apoyo y del confinamiento proporcionado por el relleno circundante. El proyecto debería procurar configuraciones geométricas que faciliten estas tareas y permitan una adecuada supervisión de la calidad de los trabajos.

Asimismo, resulta recomendable prever la realización de pruebas de estanqueidad de la conducción y de sus juntas antes de completar los rellenos definitivos y ejecutar el recubrimiento estructural, de modo de facilitar la detección y corrección temprana de eventuales defectos de construcción.

Las etapas constructivas típicas para la instalación de conducciones enterradas a través de presas de materiales sueltos se desarrollan con mayor detalle en la Sección 5.6.1.

4.6 Válvulas y compuertas

Las obras de descarga deberían disponer de dispositivos que permitan regular o interrumpir el flujo de agua a través de la conducción, asegurando tanto el control del caudal liberado como condiciones adecuadas de operación y seguridad.

Los dispositivos de control deberían ser accesibles en condiciones seguras para su operación en todo momento, incluyendo situaciones de emergencia. En particular, se recomienda verificar que su ubicación, el sistema de accionamiento y las condiciones de acceso permitan su operación sin requerir intervenciones complejas o riesgosas [44].

En pequeñas presas de riego, el dispositivo de regulación del caudal suele ubicarse en el extremo aguas abajo de la conducción, donde resulta fácilmente accesible para su operación y mantenimiento. Habitualmente se materializa mediante una válvula que permite regular el caudal descargado y efectuar el cierre de la conducción durante la operación normal.

Desde el punto de vista de la seguridad, resulta recomendable disponer además de un dispositivo independiente de cierre aguas arriba, ubicado en la obra de toma. Este cierre, habitualmente una compuerta deslizante u otro órgano equivalente, permite aislar hidráulicamente la conducción, vaciar el conducto y realizar tareas de inspección, mantenimiento o reparación. En términos generales, se recomienda que las conducciones dispongan de ambos dispositivos: un elemento de regulación y operación accesible aguas abajo y un cierre de seguridad independiente aguas arriba.

En pequeñas presas de DPA Bajo y reducida complejidad puede admitirse, en determinados casos, la utilización de un único dispositivo de control ubicado aguas abajo, siempre que la conducción sea de longitud reducida, resulte fácilmente accesible para su inspección y mantenimiento, y la ausencia de un cierre aguas arriba no comprometa la seguridad de las personas ni de la propia presa.

Durante períodos prolongados en los que no se utilice la conducción, como puede ocurrir durante la recarga del embalse o fuera de la temporada de riego, resulta recomendable mantener cerrado el dispositivo de aislamiento aguas arriba, evitando que el conducto permanezca presurizado innecesariamente durante largos períodos.

Los dispositivos de control consisten generalmente en válvulas o compuertas, seleccionadas en función del diámetro de la conducción, la carga hidráulica y las condiciones de operación previstas.

Las válvulas, como las de compuerta, mariposa o similares, se emplean habitualmente en conducciones de pequeño y mediano diámetro para permitir la operación y el cierre del sistema. No todas las válvulas resultan adecuadas para la regulación continua del caudal, por lo que su selección debe considerar específicamente esta función cuando forme parte de los requerimientos de operación de la conducción.

Las compuertas deslizantes se utilizan principalmente como dispositivos de cierre en la obra de toma, cumpliendo funciones de aislamiento más que de regulación.

El diseño de estos dispositivos debería considerar la presión máxima de operación, las condiciones de cierre, la protección frente a la corrosión y la facilidad de acceso. En pequeñas presas se priorizan mecanismos robustos, de operación simple y mantenimiento accesible, que permitan garantizar el control del caudal y el aislamiento seguro de la conducción.

Asimismo, resulta recomendable prever la operación y ensayo periódico de estos dispositivos, particularmente de los cierres de seguridad ubicados aguas arriba, a fin de evitar su inmovilización por falta de uso y verificar su correcto funcionamiento en

condiciones reales. Esta recomendación resulta especialmente importante en órganos vinculados a la seguridad de la presa, tales como descargas de fondo, conducciones de vaciado o dispositivos de aislamiento cuya operatividad pueda resultar crítica durante situaciones de emergencia o mantenimiento.

Los criterios hidráulicos para el dimensionamiento de las conducciones de descarga se desarrollan con detalle en el Anexo E.

4.7 Hidráulica en conducciones de descarga

El dimensionamiento hidráulico de las conducciones de descarga tiene por objeto verificar que el conducto sea capaz de evacuar el caudal de diseño bajo las condiciones de carga disponibles en el embalse, considerando el conjunto de pérdidas de energía que se producen a lo largo del sistema [81].

En pequeñas presas, estas conducciones operan generalmente como conductos cerrados, pudiendo funcionar a presión o parcialmente llenos según el nivel del embalse y la ubicación de los dispositivos de control. Cuando el control se ubica aguas abajo y el nivel del embalse se encuentra por encima del eje de la conducción, el flujo se desarrolla típicamente en régimen a presión.

En conducciones que operan mediante compuertas o válvulas de control ubicadas aguas arriba, corresponde considerar la incorporación natural de aire o mediante dispositivos de ventilación (air vents) aguas abajo de estos elementos. De no incorporarse aire durante la operación, especialmente en condiciones de apertura parcial, pueden generarse presiones subatmosféricas en el tramo inmediato aguas abajo, afectando el funcionamiento hidráulico e induciendo fenómenos de cavitación, vibraciones o inestabilidad del flujo. La incorporación de un conducto de ventilación permite la entrada controlada de aire, manteniendo presiones próximas a la atmosférica y favoreciendo un régimen de flujo estable. Asimismo, estos dispositivos resultan relevantes durante operaciones de llenado o vaciado de la conducción, evitando la generación de vacíos o el atrapamiento de aire en puntos altos del sistema [81].

Para el dimensionamiento preliminar puede utilizarse una expresión simplificada basada en la carga disponible, que permite estimar el orden de magnitud del caudal. Sin embargo, en la verificación final se recomienda considerar el balance completo de energía incorporando las pérdidas distribuidas y localizadas del sistema. Los criterios de cálculo correspondientes se desarrollan con mayor detalle en el Anexo E.

En conducciones de las dimensiones habituales en pequeñas presas, las pérdidas localizadas suelen tener una incidencia significativa, en muchos casos comparable o

superior a las pérdidas por fricción. Por esta razón, el diseño hidráulico no debería centrarse únicamente en el diámetro del conducto, sino en la configuración global del sistema, incluyendo la calidad de la entrada, la disposición de válvulas y la geometría de las transiciones.

En términos operativos, las velocidades del flujo deberían mantenerse dentro de rangos razonables, evitando valores elevados que puedan generar problemas de erosión, vibraciones o cavitación. En conducciones de pequeño y mediano diámetro, valores del orden de 1 a 3 m/s suelen resultar adecuados en la mayoría de las situaciones.

Al abandonar la conducción, una parte significativa de la energía hidráulica se transforma en energía cinética, generando velocidades elevadas en la descarga. Por esta razón, el sistema debería complementarse con dispositivos de disipación de energía, tales como deflectores, pozas o disipadores de impacto, que permitan reducir la velocidad del flujo antes de su incorporación al cauce (Ver Sección 4.9).

4.8 Transiciones hidráulicas

Las transiciones hidráulicas corresponden a las zonas del sistema en las que el flujo pasa entre elementos de distinta geometría, como ocurre en la entrada del conducto desde el embalse, en las conexiones con válvulas o cámaras de control y en la salida hacia la estructura terminal. El diseño adecuado de estas transiciones permite reducir pérdidas de energía, evitar separaciones del flujo y asegurar un funcionamiento hidráulico estable de la obra de descarga.

En la entrada del conducto, la transición entre el embalse y la tubería influye directamente en la capacidad hidráulica de la obra de descarga. Las entradas con aristas vivas producen pérdidas relativamente elevadas debido a la contracción del flujo. Por esta razón se recomienda que la boca del conducto disponga de bordes redondeados, biselados o abocinados, de modo que el agua pueda ingresar a la conducción mediante una transición más gradual. En conductos ejecutados en hormigón puede adoptarse una transición troncocónica o un ensanchamiento progresivo de la sección de entrada; en tuberías prefabricadas suele recurrirse al biselado del borde de la tubería o a piezas especiales de transición.

Cuando la obra de toma incluye conductos verticales conectados a tuberías horizontales, como ocurre en ciertas tomas o en vertederos tipo pozo, se recomienda prestar especial atención a la transición situada en el fondo del conducto vertical. En este punto el flujo experimenta simultáneamente un cambio de dirección y, con frecuencia, un cambio de sección entre el conducto vertical y la tubería que atraviesa

la presa. Si la transición se resuelve mediante aristas vivas o cambios abruptos de sección, pueden generarse pérdidas localizadas importantes que reducen la capacidad hidráulica de la estructura. Por esta razón resulta recomendable que la conexión se realice mediante superficies curvadas o piezas de transición cuidadosamente diseñadas, capaces de guiar el flujo hacia la tubería con pérdidas reducidas.

4.8.1 Cambios de régimen hidráulico en tomas verticales

Las tomas verticales conectadas a conducciones horizontales pueden operar bajo distintos regímenes hidráulicos, dependiendo de la altura del agua en el embalse. A medida que aumenta la carga sobre la boca de entrada, el control del flujo puede desplazarse desde el coronamiento de la estructura hacia el interior del conducto.

En términos generales pueden distinguirse tres situaciones de funcionamiento [[25, Cap. 9.26](#)]:

1. Control en el coronamiento

Cuando el nivel del embalse apenas supera el coronamiento de la toma, el flujo se comporta de forma análoga al de un vertedero libre. En estas condiciones el caudal depende principalmente de la altura del agua sobre el coronamiento y puede expresarse mediante una relación del tipo

$$Q \propto h^{3/2}$$

2. Control en el orificio o en el conducto

A medida que el nivel del embalse aumenta y la entrada queda sumergida, el flujo pasa a comportarse como el de un orificio. En este régimen el caudal depende de la raíz de la carga hidráulica disponible:

$$Q \propto \sqrt{H}$$

3. Tubería en carga

Cuando el nivel del embalse continúa aumentando, la conducción se llena completamente y el flujo pasa a estar gobernado por las pérdidas de energía en el conducto, incluyendo pérdidas localizadas y pérdidas por fricción. En estas condiciones el comportamiento hidráulico es el de una conducción a presión.

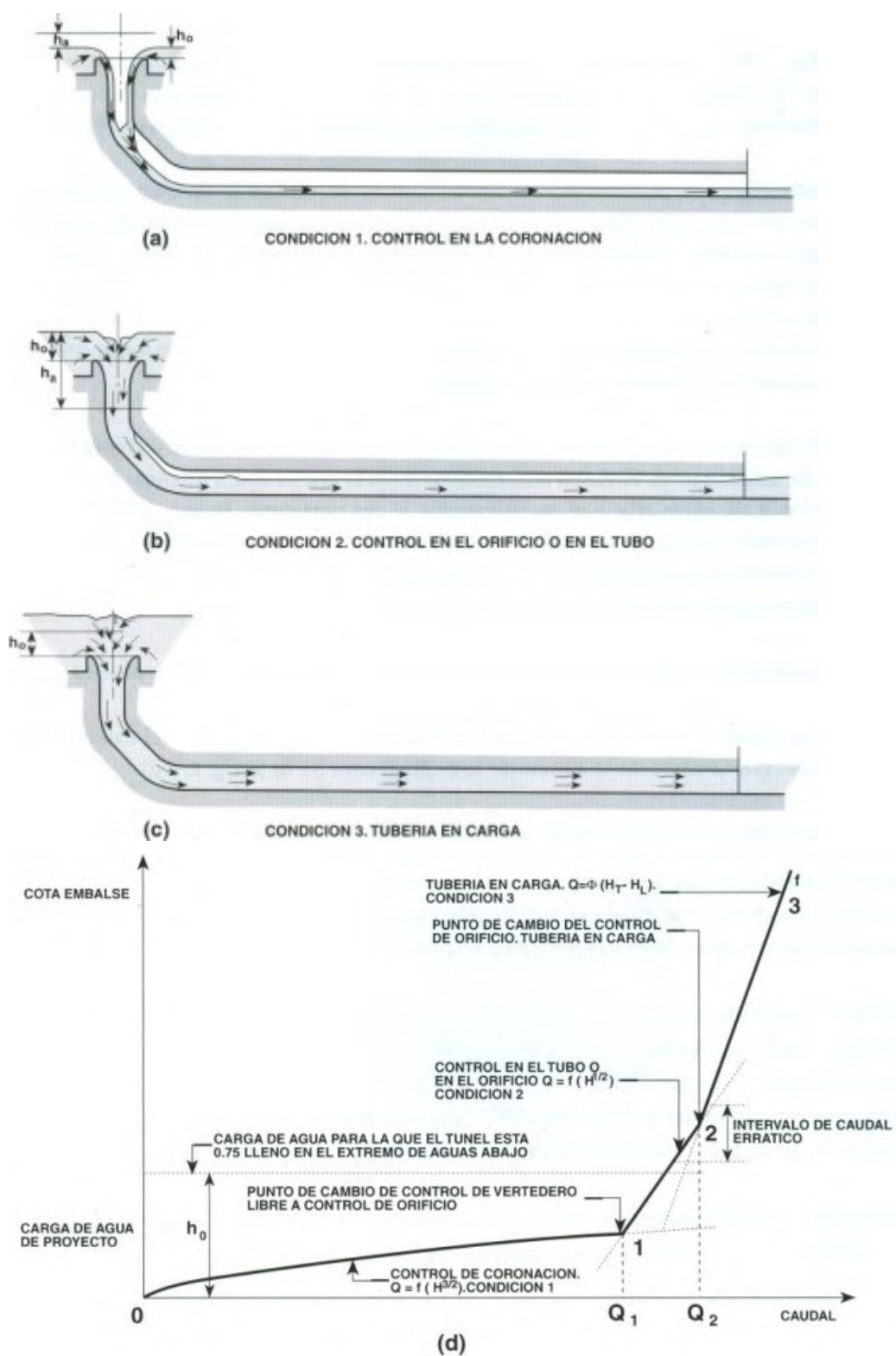


Figura 4-5. Régimen de funcionamiento de una toma vertical conectada a una conducción horizontal. Transición entre control por coronamiento, control por orificio y flujo en conducción a presión. Tomada de SPANCOLD [24, Fig. 6.9].

Este cambio progresivo del régimen hidráulico es característico de las tomas verticales conectadas a conducciones horizontales y debería tenerse en cuenta en su análisis y dimensionamiento. La transición entre los distintos regímenes puede generar intervalos de funcionamiento con variaciones importantes del caudal frente a pequeños incrementos de la carga hidráulica, por lo que resulta conveniente verificar el comportamiento de la estructura en todo el rango de niveles de operación previsto.

4.9 Descarga final y disipación de energía

La descarga de una conducción atraviesa normalmente el sistema con velocidades relativamente elevadas, debido a la transformación de la carga hidráulica disponible en energía cinética. Si el flujo se descarga directamente sobre el terreno natural pueden producirse erosiones en el pie de la presa o en el cauce aguas abajo, por lo que se recomienda prever una estructura terminal destinada a disipar parte de esa energía y a encauzar adecuadamente el flujo de salida. En particular, debería evitarse que la descarga genere procesos de socavación regresiva o erosión localizada que puedan progresar hacia la presa o comprometer la estabilidad del terreno en su entorno inmediato.

En presas pequeñas, donde los caudales de descarga suelen ser moderados y se procura limitar el uso de hormigón, las soluciones adoptadas se basan generalmente en dispositivos simples combinados con protecciones de enrocado. En estas condiciones, la obra de descarga suele consistir en un elemento que aleja o dispersa el chorro de salida, acompañado de una zona protegida donde el flujo puede disipar su energía sin provocar erosión.

Los criterios de diseño y selección de estos dispositivos se basan en la energía y velocidad del flujo a la salida de la conducción, y se desarrollan en diversos manuales de referencia. Asimismo, se recomienda considerar el comportamiento de la descarga en un rango amplio de condiciones de operación, incluyendo caudales parciales, descargas intermitentes y variaciones del nivel aguas abajo [83].

4.9.1 Pozo de disipación

Una de las soluciones más utilizadas para disipar la energía en descargas de conducciones consiste en disponer un pozo o poza de disipación inmediatamente aguas abajo de la válvula de operación o de la salida del conducto.

En este esquema, el chorro que emerge de la tubería se descarga en una depresión excavada o acondicionada donde la energía del flujo se disipa principalmente mediante turbulencia, aireación e impacto controlado del chorro. En algunos casos

puede disponerse una prolongación o un deflector en la boca del conducto para alejar el impacto del flujo del pie de la presa y dirigirlo hacia la zona protegida del pozo.

La superficie del pozo debería protegerse mediante enrocado de tamaño adecuado, dispuesto sobre una capa granular filtrante o geotextil, de forma de impedir que el flujo erosione el suelo subyacente y asegurar la estabilidad del revestimiento.

Este tipo de solución resulta apropiado cuando las velocidades de salida no son excesivamente elevadas y cuando el terreno receptor puede protegerse adecuadamente mediante enrocado u otros materiales resistentes a la erosión.

Como orientación para el dimensionamiento preliminar del pozo de disipación, pueden adoptarse las siguientes proporciones típicas utilizadas en protecciones de salida de conducciones hidráulicas [83]:

- profundidad mínima del pozo: del orden de 0,5 a 1,0 veces el diámetro de la tubería, no siendo en general inferior a 0,60 m;
- longitud del área protegida: del orden de 3 a 5 diámetros de la tubería;
- ancho de la protección: aproximadamente 3 diámetros de la tubería.

El tamaño del enrocado puede estimarse mediante criterios simplificados en función de la velocidad del flujo saliente, según la Tabla 4-3.

Velocidad de salida (m/s)	D ₅₀ aproximado
2 – 3	0,15 – 0,20 m
3 – 4	0,20 – 0,30 m
4 – 5	0,30 – 0,45 m
5 – 6	0,45 – 0,60 m

Tabla 4-3. Estimación preliminar del D₅₀ del enrocado de un pozo de disipación

El espesor de la capa de enrocado suele adoptarse del orden de:

$$t \approx 1,5 D_{50}$$

Estos criterios deberían verificarse en cada caso considerando el caudal descargado, la pendiente del terreno receptor y las características del material disponible.

En la Figura 4-6 se observa:

- (a) ejemplo de descarga de tubería con poza protegida con enrocado;
- (b) esquema conceptual de pozo de disipación con protección de enrocado sobre capa filtrante.

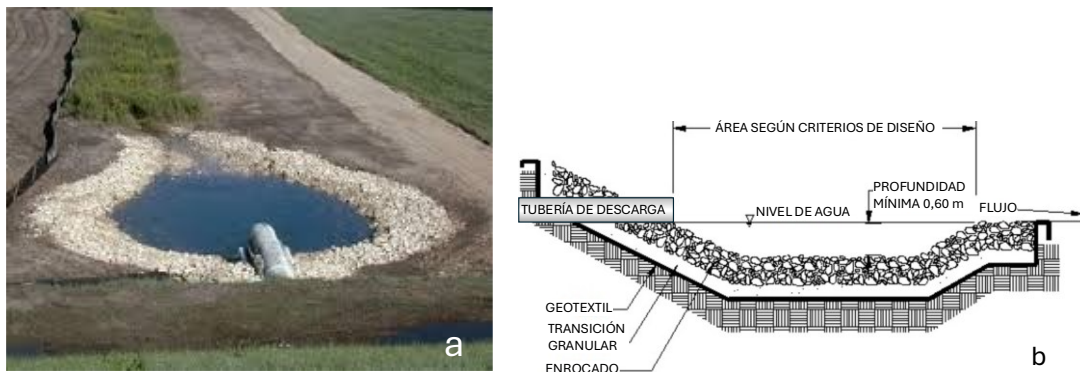


Figura 4-6. Pozo de disipación en descarga de conducción
(Adaptado de ASDSO Dam Safety Toolbox [58]).

4.9.2 Disipador de impacto

Cuando la velocidad del flujo es mayor o cuando se desea una disipación más intensa en un espacio reducido, puede utilizarse un disipador de impacto. Este dispositivo, mostrado en la Figura 4-7, consiste esencialmente en una placa o elemento deflector contra el cual se dirige el chorro descargado por la conducción, produciendo una dispersión del flujo y una rápida disipación de energía.

Según el USBR [25, Cap. 10], este tipo de disipador funciona satisfactoriamente cuando la velocidad de entrada no excede aproximadamente 15 m/s y ha sido utilizado con buenos resultados para caudales de hasta unos 11 m³/s. Para caudales mayores pueden disponerse varias unidades en paralelo.

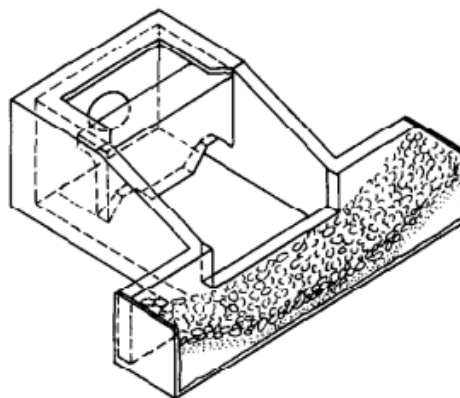


Figura 4-7. Disipador de impacto Tipo VI para descarga de conducciones a presión.
Tomado de: USBR, [25, Cap. 10]

Una ventaja importante del disipador de impacto es que su funcionamiento no depende del nivel de agua aguas abajo, a diferencia de los disipadores basados en resalto hidráulico. Sin embargo, el dispositivo debería diseñarse para resistir fuerzas dinámicas y vibraciones importantes.

En presas pequeñas destinadas a riego, las soluciones mencionadas anteriormente suelen ser suficientes para manejar los caudales habituales de las obras de descarga. En muchos casos, la combinación de prolongación o deflector de la conducción, poza de disipación y protección con enrocado o aún con disipadores de impacto, permite resolver el problema con un volumen limitado de hormigón.

En presas de mayor tamaño o con DPA Medio o Alto, puede ser necesario considerar dispositivos más robustos, tales como cuencos disipadores o estructuras de salto de esquí, ampliamente utilizados en vertederos construidos en hormigón. El diseño de estas estructuras excede el alcance del presente Manual.

En todos los casos, el diseño de la estructura terminal debería asegurar que el flujo descargado se incorpore al cauce natural o al canal de conducción sin producir socavaciones que puedan comprometer la estabilidad del terreno o de la propia presa.

Resulta recomendable prever condiciones de acceso e inspección de la zona de descarga, de forma de verificar periódicamente el estado del revestimiento, detectar posibles procesos de erosión y realizar tareas de mantenimiento cuando sea necesario.

4.10 Operación, inspección y mantenimiento

El diseño de las obras de toma, descarga y control debería facilitar su operación segura durante toda la vida útil de la presa. En particular, resulta recomendable prever condiciones adecuadas de accesibilidad para inspección y mantenimiento, posibilidad de despresurización de conducciones, ventilación cuando corresponda, protección frente a obstrucciones y disposición de elementos de maniobra que permitan operar los dispositivos de control en forma segura.

Los aspectos relacionados con la vigilancia, operación, mantenimiento e inspección periódica de estas estructuras se desarrollan en el Capítulo 6.

5 CONSTRUCCIÓN Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD

La construcción es una fase crítica en el ciclo de vida de una presa. Una ejecución deficiente puede comprometer su comportamiento hidráulico, geotécnico y estructural.

En presas de materiales sueltos, el desempeño a largo plazo depende de la correcta programación de la obra, la preparación de la fundación, la adecuada selección y colocación de los materiales y la ejecución controlada de los procedimientos constructivos.

El presente capítulo describe los aspectos fundamentales que deberían considerarse durante la construcción de pequeñas presas de materiales sueltos, incluyendo la planificación, el manejo del cauce durante la obra, la preparación de la fundación, el control de los materiales provenientes de préstamos, la colocación y compactación de los rellenos, y los procedimientos de verificación y control de calidad.

Las recomendaciones incluidas tienen por objetivo orientar la ejecución de obras seguras y durables, adaptadas a las condiciones constructivas más habituales en pequeñas presas.

5.1 Planificación y programación de la obra

La construcción de una presa de materiales sueltos requiere la coordinación de múltiples actividades interdependientes, incluyendo movimientos de suelo, explotación de préstamos, ejecución de obras hidráulicas, manejo temporal del cauce, provisión de materiales, controles de calidad y, en muchos casos, la participación de distintos contratistas o subcontratistas especializados.

Por esta razón, resulta recomendable que el proyecto incluya una planificación general de la construcción y un programa preliminar de obra que identifique las principales actividades, su secuencia lógica, sus interrelaciones y los recursos necesarios para su ejecución. Este análisis debería contemplar, entre otros aspectos, los ritmos de producción requeridos para los distintos frentes de trabajo, las necesidades de materiales y equipos, las obras temporarias, los accesos, los servicios auxiliares y las restricciones estacionales que puedan afectar el desarrollo de la obra.

La programación de la construcción adquiere particular importancia en aquellas actividades que condicionan la ejecución de otras posteriores, tales como el manejo del cauce, la construcción de conducciones, la disponibilidad de materiales de préstamo, la ejecución del vertedero y el cierre definitivo del terraplén. Una planificación insuficiente puede derivar en atrasos, interrupciones de obra,

incrementos de costo o modificaciones constructivas improvisadas que comprometan la calidad final de la presa.

Cuando la magnitud o complejidad de la obra lo justifique, el proyecto debería incluir cronogramas, diagramas de secuencia constructiva u otras herramientas equivalentes que permitan verificar la factibilidad del proceso constructivo propuesto y facilitar posteriormente el seguimiento de la ejecución.

5.2 Manejo del cauce durante la construcción

Durante la construcción de una presa resulta necesario controlar las condiciones de escurrimiento del cauce, de modo que las excavaciones de fundación, la ejecución del dentellón y la colocación del terraplén puedan realizarse en condiciones adecuadas de trabajo.

En presas pequeñas y en las condiciones habituales del Uruguay, el manejo del cauce puede resolverse mediante procedimientos relativamente simples, evitando en general la necesidad de túneles de desvío u otras obras complejas. La estrategia de construcción debería integrarse al programa de obra, considerando la hidrología del cauce, la duración prevista de cada etapa y las consecuencias que podría tener la inundación del área de trabajo.

En el contexto nacional, muchas pequeñas presas se emplazan sobre cauces intermitentes o de escurrimiento estacional, en los que se alternan períodos con caudal y períodos de estiaje. En estos casos, la estrategia constructiva suele basarse en ejecutar la mayor parte de las obras sin interferir con el escurrimiento, concentrando el avance en los sectores laterales del valle mientras el cauce permanece activo.

Las obras de desvío, ataguías, conducciones temporales u otras medidas de manejo del cauce deberían planificarse de forma compatible con los requerimientos ambientales aplicables, permitiendo en particular la continuidad del escurrimiento aguas abajo en las condiciones que establezca la normativa vigente en materia de caudales ambientales.

Las tareas que requieren trabajar en seco en el sector del cauce —particularmente la preparación final de la fundación, la ejecución del dentellón y el cierre del valle— se programan normalmente para coincidir con períodos de estiaje, en los que el escurrimiento es nulo o muy reducido, permitiendo su ejecución en condiciones controladas y en plazos acotados.

Cuando no resulte posible garantizar estas condiciones, ya sea por la duración de la obra o por la hidrología del sitio, se recomienda implementar desvíos temporales del cauce como parte del programa de obra.

5.2.1 Etapa 1: construcción inicial con el cauce en su posición natural

En la primera etapa de la construcción se ejecutan las obras sin interferir con el cauce, permitiendo que el agua continúe circulando por su trazado natural. En cauces intermitentes, esta etapa se desarrolla habitualmente en presencia de escurrimiento, concentrando el avance en los sectores laterales del valle y postergando las intervenciones en el sector central del cauce.

Durante esta etapa pueden construirse, entre otros elementos:

- los primeros tramos del terraplén avanzando desde ambas laderas
- las conducciones que atraviesan la presa
- las tomas con conductos verticales
- el vertedero auxiliar
- la mayor parte del dentellón fuera del sector ocupado por el cauce.

El nivel hasta el cual se elevan los terraplenes en esta etapa depende del programa de obra, de la evolución de las condiciones hidrológicas y de la estrategia adoptada para el cierre del valle.

La Figura 5-1 ilustra un ejemplo de esta etapa constructiva, en la cual el cauce permanece en su posición natural mientras se ejecutan diversas partes de la obra.

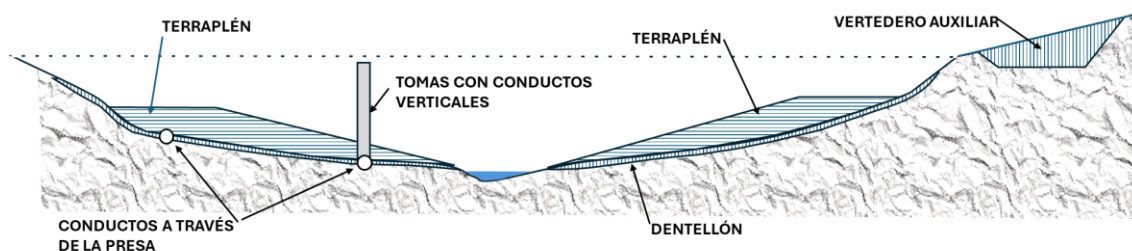


Figura 5-1. Etapa 1. Construcción con el cauce en su posición natural. En cauces intermitentes, esta etapa permite avanzar en los sectores laterales sin interferir con el escurrimiento, reservando para el estiaje las tareas que requieren trabajar en seco en el sector del cauce.

5.2.2 Etapa 2: cierre del valle

Una vez alcanzado un grado suficiente de avance en los sectores laterales, resulta necesario completar la construcción del terraplén en el sector del cauce.

En cauces intermitentes, esta etapa se programa para coincidir con períodos de estiaje, permitiendo ejecutar el cierre del valle en condiciones de cauce seco o con caudales muy reducidos. Este enfoque permite concentrar las tareas más críticas en un período relativamente corto, reduciendo la necesidad de obras auxiliares y el riesgo asociado a la interferencia con el escurrimiento.

Cuando no resulte posible garantizar condiciones de cauce seco durante esta etapa, se recomienda implementar desvíos temporales del flujo para permitir la ejecución del cierre en condiciones controladas.

5.2.3 Desvío mediante conducciones de descarga

En aquellos casos en que se requiera desviar el flujo durante la construcción, puede utilizarse la conducción prevista para la descarga de fondo o para la toma de riego como vía de desvío temporal.

Para ello, la conducción debería encontrarse completamente ejecutada y provista aguas arriba de los dispositivos de cierre necesarios para operar con seguridad. En particular, cuando el desvío se realiza a través de la descarga de fondo, los dispositivos de cierre previstos en el proyecto deberían encontrarse instalados y operativos, ya que posteriormente formarán parte de la obra definitiva.

Asimismo, se recomienda verificar que la conducción se encuentre libre de obstrucciones y protegida frente al ingreso de sedimentos o materiales arrastrados por el cauce, ya que durante esta etapa puede estar sometida a condiciones más exigentes que las previstas en operación normal. También debería verificarse, para estas condiciones, su capacidad hidráulica, su estabilidad estructural y la protección frente a la erosión en la descarga [25].

5.2.4 Desvío mediante canal lateral

Cuando no resulta conveniente utilizar las conducciones definitivas para el desvío, puede optarse por excavar un canal lateral en una de las laderas del valle.

En este caso, durante la primera etapa de la obra se excava el canal de desvío y se preparan los elementos necesarios para su operación segura y su posterior cierre estanco. De este modo, al iniciarse la segunda etapa podrá desviarse rápidamente el flujo mediante el cierre del cauce original, y cuando sea oportuno, cerrar el canal de desvío de forma rápida y estanca para concluir la construcción del terraplén con el embalse creciendo y regulado únicamente por los órganos de descarga.

La geometría y la cota de terminación de los terraplenes ejecutados en la primera etapa deberían coordinarse cuidadosamente con la del canal de desvío y con las

ataguías de cierre, a efectos de evitar sobrepasos o pérdidas de control del escurrimiento durante la transición entre etapas.

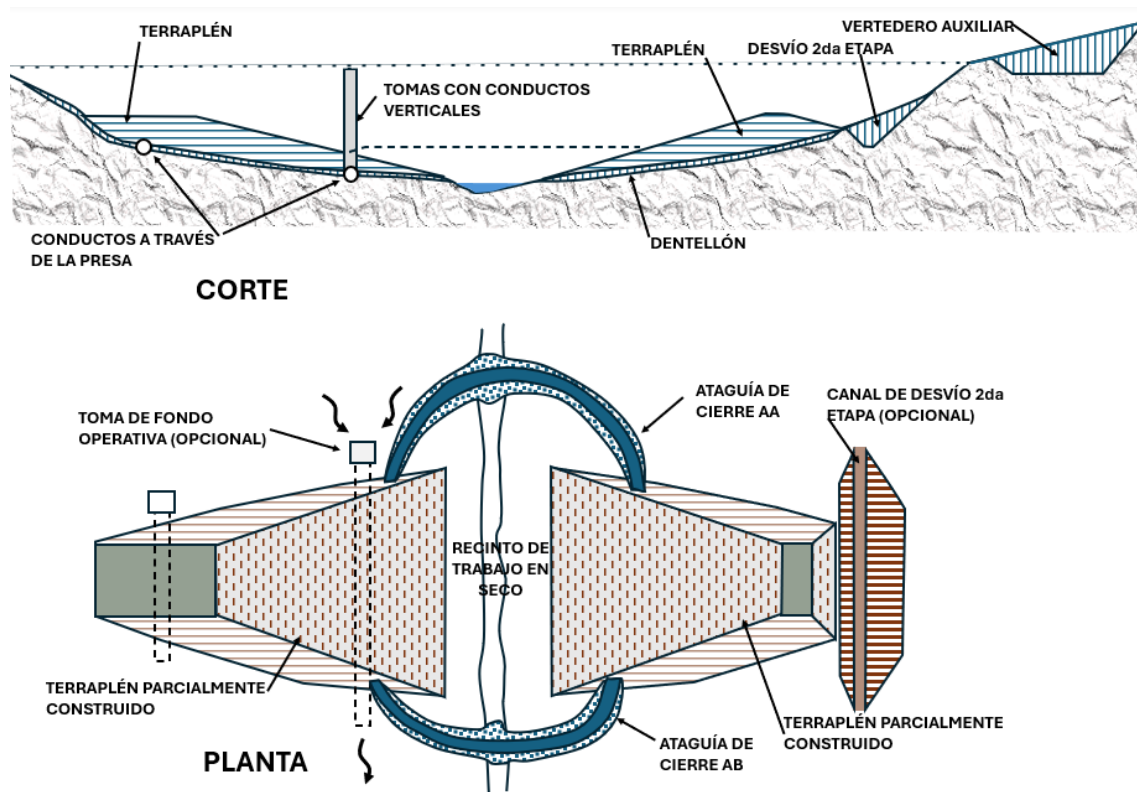


Figura 5-2. Esquema de desvío del cauce mediante ataguías y descarga de fondo o canal lateral, aplicable cuando no es posible ejecutar el cierre del valle en condiciones naturales de cauce seco.

El flujo del cauce se desvía iniciando la Etapa 2 mediante la construcción de una ataguía o dique de cierre aguas arriba del sector central aún no ejecutado. En algunos casos también se construye una ataguía aguas abajo, con el fin de aislar completamente el recinto de trabajo y permitir su desagote.

Con el recinto en seco se procede a completar en este sector las siguientes tareas:

- limpieza y preparación de la fundación
- excavación y relleno del dentellón
- construcción del tramo faltante del terraplén.

5.2.5 Interfase entre etapas del terraplén

Cuando el terraplén se construye en etapas separadas por el desvío del cauce, las superficies de contacto entre el relleno construido en la primera etapa y el material nuevo deberían prepararse cuidadosamente antes de continuar la obra.

A estos efectos se recomienda reperfilear el borde del terraplén existente mediante una pendiente suave, del orden de 1V:4H o más tendida, eliminando malezas, superficies verticales o escalones abruptos, y corrigiendo, mediante escarificación, riego u oreo, la diferencia de humedad que pudiera tener con la humedad óptima de compactación. Esta preparación favorece la trabazón entre etapas, mejora la continuidad estructural del terraplén y reduce la posibilidad de que se desarrollen caminos preferenciales de flujo a lo largo de la interfase.

5.2.6 Selección del caudal de diseño del desvío

El dimensionamiento de las obras de desvío temporales debería basarse en una evaluación del riesgo hidrológico durante el período de construcción. Para ello se adoptan caudales asociados a recurrencias menores que las empleadas para el diseño hidráulico definitivo de la presa, pero suficientes para reducir razonablemente el riesgo de inundación del recinto de obra.

La elección del caudal de diseño depende principalmente de la duración prevista de la etapa de desvío y de las consecuencias que podría tener la inundación del área de trabajo.

Como orientación preliminar puede utilizarse el criterio indicado en la Tabla 5-1.

Condición de la etapa de obra	Tiempo de exposición aproximado	Recurrencia orientativa
Trabajos preliminares o desvío muy transitorio	días a pocas semanas	2 años
Excavaciones y rellenos parciales	varias semanas	5 años
Cierre del cauce y ejecución del núcleo	varios meses	10 años

Tabla 5-1. Riesgo hidrológico orientativo para las etapas de desvío del cauce.

Estos valores son orientativos y se recomienda ajustarlos en función de estudios hidrológicos específicos cuando la importancia de la obra lo justifique.

5.3 Preparación y tratamiento de la fundación

La preparación adecuada de la fundación es esencial para garantizar la estabilidad, estanqueidad y durabilidad de una presa de materiales sueltos. Las guías técnicas internacionales coinciden en que esta etapa debería abordarse con criterios progresivos, adaptados al tipo de terreno, a las condiciones geológicas del sitio y a la escala del proyecto.

La correcta preparación de la fundación busca asegurar una buena trabazón entre el terreno natural y el terraplén, eliminar materiales inadecuados y reducir la posibilidad de que se desarrollen caminos preferenciales de filtración a lo largo del contacto presa-fundación.

5.3.1 Evaluación y limpieza

En el área donde se implantará la presa y otras estructuras auxiliares, se recomienda retirar la capa vegetal, los suelos blandos, rellenos y materiales alterados hasta alcanzar el sustrato competente. El proyectista debería estimar la profundidad de materiales a retirar, la cual podrá ser del orden de 15 a 30 cm o mayor, según las investigaciones de campo previas y la caracterización obtenida en los estudios preliminares. Esta estimación debería verificarse durante la obra y validarse por parte de la Dirección de Obra.

El material retirado debería acopiarse adecuadamente, previendo su posible reutilización en recubrimientos u otras aplicaciones y evitando su acumulación dentro del vaso.

Durante esta etapa también se recomienda identificar posibles surgencias o vertientes naturales en el área de fundación. Su tratamiento debería definirse cuidadosamente por la Dirección de Obra según su origen y ubicación.

Cuando el flujo proviene de fisuras o grietas en roca, se investigará previamente su alcance y profundidad mediante los métodos apropiados, a fin de definir el tratamiento más adecuado. En muchos casos el sellado mediante inyecciones resulta la solución más eficaz para eliminar o reducir significativamente la surgencia.

Si la surgencia se produce a través de suelos dentro de la zona prevista para el dentellón, se recomienda profundizar la excavación del mismo hasta interceptar un estrato más competente o de menor permeabilidad.

Cuando la surgencia se localiza en el área del futuro espaldón aguas abajo, puede captarse mediante un dren o filtro localizado que conduzca el flujo hacia el sistema de drenaje de la presa.

Si aparece aguas arriba de la presa, puede ser necesario cubrir la zona con material filtrante adecuado bajo la primera capa del terraplén, de modo de evitar la migración de partículas finas bajo la acción eventual de un flujo desde el terraplén hacia la fundación.

5.3.2 Tratamientos en fundaciones de suelos

En fundaciones de suelos se recomienda escarificar, nivelar y limpiar la superficie manual o mecánicamente, evitando discontinuidades que puedan comprometer el contacto con el cuerpo de la presa.

Los bajos y depresiones resultantes del retiro de materiales naturales deberían aplanarse, escarificarse, rellenarse con material del mismo tipo y posteriormente compactarse hasta alcanzar una densidad al menos equivalente a la del material de fundación circundante, utilizando el método y equipo especificados. Cuando las dimensiones superficiales de las depresiones sean reducidas, estos rellenos puntuales pueden compactarse mediante equipos manuales.

La preparación final de la superficie de fundación, inmediatamente antes de colocar la primera capa de relleno del terraplén, debería incluir el ajuste de la humedad del suelo, su compactación y la escarificación superficial necesaria para asegurar una adecuada trabazón con la primera capa del terraplén.

En suelos con humedad superior a la requerida para la compactación, puede ser necesario recurrir al oreado del material antes de continuar los trabajos. Con condiciones climáticas favorables, el empleo de rastras de discos u otros equipos de laboreo superficial suele resultar eficaz para acelerar la pérdida de humedad [[84, Cap. 6](#)].

La compactación del terreno natural expuesto así preparado debería controlarse cuidadosamente, especialmente en fundaciones constituidas por limos o arcillas plásticas.

5.3.3 Tratamientos de fisuras en fundaciones rocosas

En fundaciones rocosas, luego del retiro de los materiales sueltos superficiales, se recomienda realizar una limpieza exhaustiva de la superficie, incluyendo lavado a presión y cepillado fino [[25, Cap. 6](#)].

Las fundaciones rocosas suelen presentar fisuras o cavidades cuya importancia debería evaluarse a partir de la información obtenida en los estudios geológicos y geotécnicos del proyecto. Cuando durante las excavaciones se detecten condiciones diferentes a las previstas, la Dirección de Obra podrá disponer investigaciones complementarias que permitan definir el tratamiento más adecuado de la fundación.

Cuando el lavado a presión y el cepillado fino dejan expuestas fisuras abiertas o cavidades irregulares, especialmente en la zona de contacto con núcleos arcillosos o zonas impermeables de la presa, resulta conveniente el sellado superficial mediante

mortero de cemento o con hormigón pobre. Esta práctica mejora la continuidad del contacto, reduce la infiltración localizada, evita la migración de finos desde el material impermeable del terraplén y mejora la continuidad hidráulica en la interfase.

No se recomienda rellenar estas fisuras directamente con material arcilloso compactado, ya que la arcilla quedaría expuesta a una discontinuidad sin filtro ni sello, pudiendo ser erosionada o arrastrada con el tiempo por el flujo de agua.

Dependiendo de las condiciones observadas en obra, se evaluará la necesidad de aplicar tratamientos adicionales en la fundación rocosa, tales como inyecciones de consolidación o impermeabilización mediante lechadas cementicias o bentoníticas destinadas a reducir la conductividad hidráulica de la roca.

Sin embargo, este tipo de tratamientos requiere equipamiento y personal especializado que no siempre se encuentra disponible para obras de pequeña escala. Por esta razón, en presas pequeñas suele priorizarse el ajuste de la geometría del dentellón o la profundización de la excavación hasta alcanzar condiciones de fundación más favorables. Las soluciones mediante inyecciones deberían considerarse cuando estas medidas resulten insuficientes o cuando las condiciones geológicas así lo requieran.

5.3.4 Excavación y ejecución del dentellón

La ejecución del dentellón, cuyo diseño se desarrolla en la Sección 3.4.3, requiere atención específica a las condiciones de fundación y a la calidad del relleno colocado en la excavación. Estos aspectos constructivos se desarrollan a continuación.

La excavación del dentellón debería realizarse cuidadosamente hasta alcanzar el material competente definido en el proyecto. El fondo y los taludes de la excavación deberían limpiarse adecuadamente antes de iniciar el relleno.

El relleno del dentellón se ejecuta normalmente con material impermeable colocado y compactado en capas delgadas, siguiendo criterios similares a los utilizados para el núcleo del terraplén.

En caso de que el proyecto contemple la disposición de filtros o transiciones granulométricas asociadas al dentellón, estos deberían ejecutarse de acuerdo con las especificaciones del diseño y con el mismo cuidado que los filtros internos del terraplén.

Cuando durante la excavación se detecten condiciones de fundación distintas de las previstas en el proyecto, la geometría del dentellón podrá requerir ajustes, los que

deberían ser definidos por la Dirección de Obra con apoyo de la información geológica y geotécnica disponible.

Situación observada o probable	Riesgo asociado	Medida recomendada
Presencia de capa vegetal o suelos orgánicos	Asentamientos diferenciales y pérdida de resistencia	Retirar completamente materiales orgánicos hasta alcanzar suelo mineral competente
Superficie de fundación sin escarificar	Plano potencial de deslizamiento o filtración en la interfase presa-fundación	Escarificar y compactar la superficie antes de iniciar el terraplén
Diferencias significativas de humedad entre fundación y terraplén	Mala trabazón entre capas	Ajustar humedad del suelo de fundación cerca de la humedad óptima
Depresiones o irregularidades rellenadas sin compactación	Zonas de baja densidad o filtración localizada	Rellenar y compactar adecuadamente antes de iniciar el terraplén
Surgencias o vertientes en fundación	Desarrollo de caminos preferenciales de filtración	Investigar su origen y aplicar drenaje, sellado o profundización del dentellón según corresponda
Fisuras abiertas en roca en contacto con el núcleo	Infiltración concentrada o migración de finos	Sellado con mortero u hormigón pobre o tratamientos específicos

Tabla 5-2. Situaciones frecuentes en fundación y medidas a adoptar

5.4 Control de Préstamos

La calidad de los materiales del terraplén depende de la correcta selección, explotación y control de los préstamos. Un manejo inadecuado de estas áreas puede provocar variaciones importantes en la granulometría, en el contenido de humedad o en las propiedades mecánicas del material, afectando el comportamiento hidráulico, geotécnico y estructural de la presa.

Por esta razón, la explotación de los préstamos debería realizarse de acuerdo con un plan previamente definido en el proyecto y bajo control permanente de la Dirección de Obra. Diversos manuales de construcción de presas de materiales sueltos destacan que la correcta gestión de los préstamos constituye un factor determinante en la calidad final del terraplén [[25, Cap. 6](#); [84, Cap. 6](#); [85](#)].

Durante la explotación de los préstamos se recomienda verificar que el material extraído corresponda al previsto en el proyecto y mantenga propiedades compatibles con las especificaciones del terraplén.

5.4.1 Organización de la explotación

La explotación de los préstamos debería organizarse de manera que permita obtener un material con propiedades uniformes y compatibles con las especificaciones del terraplén. La selección de los métodos de extracción y del equipamiento depende del tipo de suelo, su grado de homogeneidad, la humedad natural y las distancias de acarreo [[84, Cap. 6](#); [85](#)].

En materiales cohesivos relativamente homogéneos, como arcillas o limos arcillosos, es frecuente el empleo de traíllas (scrapers) para realizar en forma integrada la excavación, el transporte y la descarga del material. Estos equipos resultan especialmente adecuados para distancias cortas a medias y para obras de volumen moderado, proporcionando una producción continua y uniforme.

En materiales cohesivos con cierta estratificación, la utilización de traíllas puede contribuir a la obtención de un material suficientemente homogéneo cuando la explotación se organiza de manera que el equipo corte simultáneamente varios horizontes del préstamo. A estos efectos, se recomienda disponer frentes de excavación con pendiente suave, de modo que la traílla recorra longitudinalmente distintos niveles del suelo durante la carga. Este procedimiento favorece la mezcla natural del material en la cuba del equipo y puede resultar adecuado cuando la variabilidad entre estratos no es excesiva. Si este procedimiento no permite obtener una mezcla aceptable, o si la heterogeneidad del préstamo es marcada, corresponde considerar el empleo de retroexcavadoras y camiones, de modo de extraer y mezclar los distintos horizontes con mayor control.

En materiales granulares o mezclas, la explotación se realiza habitualmente mediante retroexcavadoras y camiones, pudiendo incorporarse en determinados casos el uso de cargadoras frontales, especialmente cuando se requiere el manejo de acopios en las zonas de préstamo. En todos los casos, se recomienda prestar especial atención a evitar la segregación durante la extracción, el transporte, el acopio y la descarga.

La organización de la explotación debería prever una producción continua y compatible con el ritmo de colocación en obra, pudiendo contemplarse acopios intermedios cuando resulte necesario para mejorar el control de humedad, la homogeneidad del material o la programación de obra [[25, Cap. 6](#); [59](#)].

5.4.2 Manejo del agua en los préstamos

El manejo adecuado del agua en los préstamos es un aspecto importante para mantener condiciones favorables de explotación y evitar la degradación del material.

En general se recomienda:

- Construir zanjas de guardia alrededor del área de préstamo para evitar el ingreso de escorrentía superficial
- Mantener pendientes internas suaves que faciliten el drenaje natural del agua de lluvia
- Evitar la formación de zonas encharcadas que puedan alterar las propiedades del suelo
- Disponer sistemas simples de drenaje o bombeo cuando sea necesario.

Estas medidas permiten mejorar la transitabilidad de los equipos y contribuyen a mantener el material dentro de rangos adecuados de humedad para su posterior compactación [85; 59].

5.4.3 Control del material extraído

Durante la explotación de los préstamos se recomienda realizar controles periódicos del material utilizado en el terraplén, a efectos de detectar posibles variaciones en sus propiedades respecto a las especificaciones del proyecto.

Según la variabilidad del préstamo y la importancia de la obra, los controles pueden incluir:

- Verificación visual de cambios de color o textura
- Determinación del contenido de humedad natural
- Ensayos granulométricos
- Ensayos de plasticidad (límites de Atterberg).

La frecuencia de estos controles dependerá de la variabilidad del material y del volumen de suelo colocado en la presa.

5.4.4 Terminación y acondicionamiento de los préstamos

Una vez finalizada la explotación de los préstamos, las áreas afectadas deberían acondicionarse de manera que no representen un riesgo ambiental ni un problema de erosión o drenaje.

Cuando los préstamos quedan fuera del vaso del embalse se recomienda suavizar los taludes excesivamente inclinados, asegurar el drenaje superficial y, cuando sea posible, redistribuir la capa vegetal previamente retirada para favorecer la revegetación natural del terreno.

Cuando los préstamos se localizan dentro del vaso del embalse y quedarán permanentemente inundados, se recomienda evitar taludes demasiado inclinados y

conformar el fondo con pendientes suaves hacia el cauce natural. También se recomienda evitar la formación de depresiones profundas que puedan favorecer la acumulación localizada de sedimentos, el desarrollo de zonas con escasa circulación de agua o problemas asociados a la calidad del agua [25, Cap. 6; 85]. En estos casos, y especialmente cuando exista incertidumbre respecto a la permeabilidad del terreno expuesto, corresponde evaluar la conveniencia de disponer sobre el fondo final una o dos capas de material arcilloso compactado, a efectos de reducir la infiltración y evitar la generación de trayectorias preferenciales de flujo en el área intervenida.

En todos los casos, el acondicionamiento final del área de préstamo debería integrarse adecuadamente al entorno y evitar condiciones que puedan afectar negativamente la estabilidad de la presa, el funcionamiento hidráulico del embalse o el comportamiento de las filtraciones en su entorno.

5.5 Colocación y Compactación de Materiales

La compactación del terraplén es determinante para su estabilidad, comportamiento hidráulico y durabilidad. El control del espesor de las capas, la humedad de colocación y la energía de compactación aplicada deberían ajustarse al tipo de material, al equipo disponible y a la categoría de la obra.

5.5.1 Colocación en capas

El terraplén debería construirse mediante la colocación de materiales en capas sucesivas, extendidas en forma uniforme y con espesor controlado, de modo de asegurar que la compactación alcance los valores especificados en el proyecto.

El espesor de las capas debería definirse en función del tipo de material y del equipo de compactación utilizado, indicando claramente si corresponde al espesor en estado suelto o compactado. En general, los manuales de presas de materiales sueltos recomiendan verificar estos parámetros mediante un terraplén de prueba (ver 5.5.5), donde se ajustan el espesor de capa, el número de pasadas y el tipo de equipo hasta alcanzar la densidad requerida [25, App. G; 86, Cap. 8; 41, Cap. 5, Ch. 11].

En materiales cohesivos utilizados en zonas impermeables (núcleo o zonas equivalentes), el espesor de las capas debería limitarse de modo que la energía de compactación alcance efectivamente la totalidad del espesor colocado. El USACE [84, Cap. 5-8.c] establece explícitamente que en las especificaciones constructivas se indicará el espesor de capa en estado suelto y no compactado. Esta definición resulta particularmente útil porque el espesor suelto puede verificarse directamente en obra antes de iniciar la compactación, permitiendo realizar correcciones sencillas —por

ejemplo, agregar material cuando la capa resulte demasiado delgada— sin afectar la calidad del trabajo ejecutado.

En cuanto a los valores, el USACE [[84](#), Cap. 5-8.c] indica los siguientes rangos orientativos para materiales impermeables o semipermeables: capas sueltas de 15 a 20 cm (6 a 8 pulgadas) con 6 a 8 pasadas de rodillo pata de cabra; capas sueltas de 23 a 30 cm (9 a 12 pulgadas) con 4 pasadas de rodillo neumático de 50 toneladas; y capas sueltas del orden de 10 cm (4 pulgadas) en zonas confinadas donde deban emplearse pisonos manuales. Estos valores son coherentes con los rangos de espesor compactado reportados en USBR [[25, App. G](#)], que especifica un espesor compactado no mayor a 15 cm (6 in) para el material impermeable y capas sueltas no mayores a 30 cm (12 in) para el material permeable.

En presas pequeñas del medio local, donde es frecuente el uso de equipos de menor peso (rodillos pata de cabra livianos) o un número reducido de pasadas, el espesor de capa debería adecuarse a la energía de compactación disponible. Para materiales impermeables o semipermeables compactados con equipos livianos, se recomienda, con carácter orientativo, un espesor compactado no mayor al orden de 15 cm (capas sueltas del orden de 15 a 20 cm), salvo verificación específica que justifique otro valor, en coherencia con las especificaciones de USBR y USACE citadas precedentemente. En todos los casos, el espesor de capa es orientativo y debería fijarse y verificarse mediante el terraplén de prueba (ver Sección 5.5.5), en función del tipo de material, la energía de compactación, el equipo disponible, el número de pasadas, la humedad de colocación y los resultados de control alcanzados.

Durante la ejecución, estos parámetros deberían controlarse mediante ensayos de compactación realizados sobre las distintas capas del terraplén.

El contenido de humedad del material al momento de la compactación es un factor determinante para alcanzar la densidad especificada. En materiales cohesivos, se recomienda realizar la compactación con un contenido de humedad próximo a la humedad óptima determinada en laboratorio mediante ensayos Proctor, seleccionando el tipo de ensayo (estándar o modificado) en función de la energía de compactación disponible en obra.

Cuando el material cohesivo se encuentra seco, se recomienda adicionar agua mediante riego y mezclado; cuando se encuentra húmedo, puede resultar necesario favorecer su oreado mediante escarificación y exposición al aire hasta alcanzar condiciones adecuadas para la compactación. En zonas próximas a estructuras, conducciones, contactos con laderas rocosas o superficies inclinadas de fundación, y

en general donde puedan presentarse asentamientos diferenciales, resulta recomendable compactar el material con un contenido de humedad ligeramente superior al óptimo (del orden de 1 a 2 %) para mejorar su capacidad de deformación sin fisuración [[25, Cap. 6](#); [86, Cap. 8](#)].

En materiales granulares, como los utilizados en espaldones o zonas drenantes, pueden utilizarse capas de mayor espesor que en las zonas impermeables, siempre que se verifique mediante el terraplén de prueba que se alcanza una densificación adecuada en todo el espesor de la capa. Como referencia, USBR admite para el material permeable capas sueltas no mayores a 30 cm (12 in); podrían adoptarse espesores algo mayores solo si el terraplén de prueba verifica una densificación adecuada en todo el espesor, en función del tamaño máximo del material y del equipo de compactación empleado [[25, App. G](#)].

En materiales granulares, el contenido de humedad influye en el proceso de compactación, aunque normalmente no se controle en términos de humedad óptima como en los suelos cohesivos. Se recomienda asegurar un contenido de humedad suficiente para facilitar el reacomodo de las partículas, siendo habitual el agregado de agua mediante camión regador, especialmente en condiciones secas.

En zonas internas de los espaldones donde se utilicen materiales del tipo “todo en uno”, podrán emplearse espesores mayores, orientativamente hasta el orden de 40 a 50 cm en estado suelto, exclusivamente en sectores no críticos y previa verificación en el terraplén de prueba de que el procedimiento de compactación logra una densificación adecuada y uniforme.

El material debería distribuirse de manera uniforme, evitando acumulaciones localizadas, segregaciones o cambios bruscos dentro de una misma capa. En particular, en materiales granulares se recomienda evitar la segregación durante el extendido, mientras que en materiales cohesivos se recomienda mantener una textura homogénea.

En zonas próximas a estructuras, conducciones, laderas rocosas o superficies inclinadas de fundación, se recomienda realizar la colocación con capas más delgadas y un control más estricto, utilizando equipos de menor tamaño, compactadores manuales o procedimientos específicos que aseguren una adecuada densificación del material en los contactos. En estos sectores, una compactación deficiente favorece la formación de caminos preferenciales de filtración.

La construcción del terraplén debería progresar en forma aproximadamente horizontal, manteniendo niveles similares en toda la sección, de modo de evitar

diferencias de carga que puedan inducir deformaciones, fisuras o discontinuidades internas.

5.5.2 Equipos de compactación

La selección del equipo de compactación debería realizarse en función del tipo de material, del espesor de las capas y de la densidad requerida en el proyecto. No todos los equipos son igualmente eficaces para todos los suelos, por lo que su correcta elección resulta fundamental para lograr una compactación adecuada [[25, Cap. 6](#); [84, Cap. 6](#)].

En términos generales, los equipos de compactación pueden clasificarse según el mecanismo predominante de densificación: amasado, vibración o presión estática. Cada uno de estos mecanismos resulta más adecuado para determinados tipos de materiales.

En materiales cohesivos, la compactación se logra principalmente por amasado, siendo más eficaces los rodillos con patas (sheepsfoot o padfoot), que transmiten esfuerzos concentrados en profundidad. En materiales granulares, en cambio, la compactación se logra principalmente por vibración, siendo más adecuados los rodillos vibratorios lisos. Los rodillos neumáticos pueden utilizarse como complemento en ciertos casos, aportando una acción combinada de presión y amasado superficial.

A continuación, se presenta una síntesis orientativa de los equipos más utilizados.

Equipo	Mecanismo	Materiales	Peso típico	Observaciones
Rodillo pata de cabra (sheepsfoot / padfoot)	Amasado	Arcillas, limos arcillosos	8 – 20 t	Equipo principal para zonas impermeables. Alta eficacia en profundidad. Requiere control de humedad.
Rodillo liso vibratorio	Vibración	Arenas, gravas	10 – 25 t	Alta eficacia en materiales granulares. Requiere humedad suficiente.
Rodillo liso estático	Presión	Capas finas	5 – 15 t	Uso limitado. Terminación o ajuste.
Rodillo neumático	Presión + amasado	Mezclas, capas intermedias	10 – 25 t	Complementario. Mejora uniformidad superficial.
Compactadores manuales	Impacto / vibración	Zonas confinadas	< 1 t	Para contactos y áreas inaccesibles.

Tabla 5-3. Equipos de compactación y campo de aplicación

Debe distinguirse entre los rodillos tipo «*sheepsfoot*» (pata de cabra tradicional) y los tipo «*padfoot*». Los primeros presentan patas más delgadas y alargadas, generando mayores presiones puntuales, lo que los hace particularmente eficaces en suelos arcillosos plásticos (Figura 5-3 b). Los rodillos *padfoot*, en cambio, poseen patas más anchas y truncadas, con mayor superficie de contacto, resultando más adecuados para suelos limosos o mezclas con menor plasticidad (Figura 5-3 a). La selección entre ambos debería realizarse en función de la plasticidad del material y del comportamiento observado en el terraplén de prueba (ver 5.5.5).



Figura 5-3. Equipos principales de compactación en presas de materiales sueltos: (a) rodillo pata de cabra tipo *padfoot* (autopropulsado); (b) rodillo pata de cabra tipo *sheepsfoot* de tiro (referencia conceptual); (c) rodillo vibratorio liso para materiales granulares.

Los rodillos pata de cabra modernos pueden incorporar vibración, combinando acción de amasado y densificación dinámica. Fuente: fabricantes y material técnico de referencia.

El número de pasadas requerido y el espesor máximo de capa deberían definirse en el terraplén de prueba. En particular, los rodillos pata de cabra suelen requerir un número elevado de pasadas para lograr la densificación completa del material cohesivo, mientras que en materiales granulares la eficacia de los rodillos vibratorios depende de la energía transmitida y del contenido de humedad.

En todos los casos, se recomienda verificar que el equipo seleccionado sea capaz de alcanzar la densidad especificada en todo el espesor de la capa. El uso de equipos inadecuados o de baja energía puede requerir la reducción del espesor de las capas o el aumento del número de pasadas.

Equipos como los rodillos neumáticos o el tránsito repetido de equipos de acarreo (por ejemplo, traíllas) pueden contribuir a la compactación superficial del material, pero no aseguran por sí solos una densificación uniforme en todo el espesor de la capa, por lo que no sustituyen a los equipos de compactación específicamente destinados a esa función.

5.5.3 Procedimiento de compactación

La compactación del terraplén debería ejecutarse siguiendo un procedimiento sistemático que asegure la densificación uniforme del material en toda la superficie y espesor de cada capa.

Cada capa extendida debería compactarse mediante pasadas sucesivas del equipo, cubriendo la totalidad del ancho de trabajo. Las pasadas deberían realizarse con solapes laterales adecuados entre huellas consecutivas, de modo de evitar franjas sin compactar. Como criterio general, se recomienda un solape mínimo del orden del 20 al 30 % del ancho del rodillo.

Se recomienda realizar la compactación siguiendo trayectorias aproximadamente paralelas al eje de la presa, manteniendo un avance ordenado y evitando cambios bruscos de dirección que generen irregularidades en la superficie. En zonas amplias, puede alternarse el sentido de las pasadas entre capas sucesivas para mejorar la uniformidad.

El número de pasadas debería ser suficiente para alcanzar la densidad especificada, verificándose mediante ensayos de control. En términos orientativos, pueden considerarse del orden de 6 a 10 pasadas para materiales cohesivos compactados con rodillos pata de cabra, y de 4 a 8 pasadas para materiales granulares compactados con rodillos vibratorios, ajustándose estos valores en función del equipo utilizado, el espesor de la capa y el comportamiento observado en el terraplén de prueba, como se indica en la Sección 5.5.5 [[25, App. G](#); [84, Cap. 6](#); [41, Cap. 5](#)].

La velocidad de avance del equipo debería mantenerse uniforme y resultar adecuada al tipo de material y equipo utilizado, evitando velocidades excesivas que reduzcan la eficacia de compactación. En particular, en materiales cohesivos la acción de amasado requiere velocidades relativamente bajas para permitir la adecuada deformación del material.

En materiales granulares compactados con rodillos vibratorios, se recomienda asegurar que la vibración se aplique con condiciones apropiadas de frecuencia y amplitud, evitando la pérdida de contacto efectivo entre el rodillo y el suelo. Se recomienda realizar la compactación preferentemente desde los bordes hacia el centro en superficies confinadas, o manteniendo una progresión ordenada en superficies abiertas.

En zonas próximas a estructuras, conducciones, laderas o superficies inclinadas, la compactación debería realizarse con equipos adecuados al espacio disponible, reduciendo el espesor de las capas y aumentando el control sobre la ejecución. En

estos sectores es habitual el empleo de compactadores manuales o equipos livianos, recomendándose verificar que se alcance una densificación equivalente a la del resto del terraplén.

Durante la ejecución, la superficie de cada capa compactada debería presentar un aspecto uniforme, sin huellas profundas, zonas sueltas ni sectores saturados. La presencia de grietas, bombeo o deformaciones excesivas indica condiciones inadecuadas de humedad o energía de compactación, las cuales deberían corregirse antes de continuar con la colocación de la siguiente capa.

En todos los casos, se recomienda coordinar la compactación con el control de humedad y con los ensayos de control de densidad, a efectos de asegurar que cada capa cumpla con las especificaciones antes de avanzar con la siguiente.

En materiales granulares con contenido significativo de finos, especialmente limos, y en condiciones cercanas a la saturación, la compactación mediante rodillos vibratorios puede generar un aumento transitorio de la presión de poros que reduzca la resistencia del material. En estos casos, el suelo puede comportarse momentáneamente como una masa semifluida, perdiendo capacidad de soporte y dificultando la compactación.

Este fenómeno se asocia a la baja permeabilidad del material, que impide la disipación rápida del agua durante la vibración, generando condiciones similares a una licuefacción local.

Cuando se observen estos comportamientos en obra, se recomienda reducir el contenido de humedad del material, disminuir la energía de compactación o reconsiderar la aptitud del material para su uso en el terraplén, en función de su contenido de finos y características granulométricas.

5.5.4 Control de compactación

El control de compactación tiene por objetivo verificar que cada capa del terraplén alcance la densidad y las condiciones de humedad y uniformidad especificadas en el proyecto. Este control debería realizarse de manera sistemática durante toda la obra y constituye una herramienta esencial para asegurar la calidad de ejecución [[41, Cap. 6](#)].

Los criterios de aceptación y la intensidad del control deberían ajustarse en función de la zona de la presa y de la categoría de DPA. En presas de DPA Medio o Alto resulta recomendable incrementar la frecuencia de los controles y la trazabilidad de los

registros, especialmente en las zonas vinculadas a la seguridad hidráulica y geotécnica de la obra.

En materiales cohesivos, el control se basa en la determinación de la densidad seca del material en obra y su comparación con la densidad seca máxima obtenida en laboratorio mediante ensayos Proctor [[87](#); [88](#); [89](#); [90](#)], expresando el resultado como porcentaje de compactación. La densidad seca máxima obtenida en los ensayos Proctor es el parámetro de referencia para los controles de compactación, y equivale al término «Peso Unitario Seco Máximo (PUSM)» empleado en la práctica regional. Los valores mínimos exigibles deberían definirse en el proyecto y suelen situarse, según la zona de la presa, en el orden de:

- 90–95% del Proctor Estándar
- 95–100% del Proctor Modificado

La selección del ensayo de referencia para el control de compactación (Proctor Estándar o Proctor Modificado) debería resultar coherente con la energía de compactación que efectivamente pueda desarrollarse en obra.

En pequeñas presas del medio rural, donde con frecuencia se emplean equipos de compactación de capacidad limitada —e incluso, en algunos casos, equipos no específicamente diseñados para este fin—, el uso del Proctor Estándar como referencia resulta en general adecuado, siempre que se adopten criterios exigentes de control, incluyendo espesores de capa reducidos, adecuado control de la humedad y un número suficiente de pasadas que aseguren la densificación del material.

Cuando se disponga de equipos de compactación adecuados, tales como rodillos pata de cabra para materiales cohesivos, podrá adoptarse como referencia el Proctor Modificado, o bien exigencias equivalentes de densidad, en función del comportamiento esperado del material y de la energía efectivamente aplicada en obra.

En todos los casos, el objetivo del control de compactación no es el cumplimiento de un ensayo en sí mismo, sino asegurar que el material colocado alcance condiciones de densidad, humedad y estructura interna compatibles con la estabilidad y la estanqueidad del terraplén. El uso del Proctor Modificado como referencia no implica por sí mismo una mejor calidad de compactación si la energía aplicada en obra no es consistente con dicho ensayo.

En materiales granulares con pocos finos, el control se realiza mediante la determinación de la densidad relativa [[91](#); [92](#)]. La densidad relativa (*DR*) se calcula

a partir de la densidad seca obtenida en obra y las densidades seca máxima y mínima determinadas en laboratorio, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$DR = \frac{\gamma_d - \gamma_{d,\min}}{\gamma_{d,\max} - \gamma_{d,\min}} \times 100$$

Donde:

- DR = Densidad relativa (%)
- γ_d = densidad seca in situ
- $\gamma_{d,\max}$ = densidad seca máxima de laboratorio
- $\gamma_{d,\min}$ = densidad seca mínima de laboratorio

El valor mínimo admisible debería ser fijado por el proyectista en función del comportamiento requerido del material, y suele situarse en el orden del 70 %, dependiendo del tipo de material y de la zona del terraplén.

A diferencia de otras áreas de la ingeniería civil, como las obras viales, donde se emplea la prueba de carga para evaluar la capacidad portante o la rigidez de las capas compactadas, en presas de materiales sueltos el control de la compactación se orienta a asegurar condiciones adecuadas de densidad y contenido de humedad en todo el espesor de las capas, en función de su influencia directa sobre la permeabilidad y la estabilidad frente a filtraciones internas [[25, Cap. 5](#); [26, Cap. 6](#); [93](#); [94, Cap. 4](#)].

La prueba de carga no reemplaza los controles de compactación ni proporciona información directa sobre la densidad o el contenido de humedad del material. No obstante, la observación de deformaciones o asentamientos superficiales bajo el paso de camiones, equipos pesados o de la propia maquinaria de compactación puede constituir una herramienta práctica preliminar para identificar zonas blandas que requieran recompactación o ensayos adicionales (cono de arena, densímetro nuclear u otros).

Los métodos de control en campo más habituales son los siguientes.

5.5.4.1 Método del cono de arena

Este método consiste en determinar el volumen de un pozo excavado en la capa compactada mediante el llenado con arena calibrada, y comparar dicho volumen con el peso del material extraído. A partir del secado posterior en laboratorio de la muestra extraída, se determina su contenido de humedad y su peso seco, obteniéndose así la densidad seca in situ [[95](#); [37](#)].

En materiales granulares gruesos puede requerirse el uso de un cono de mayor tamaño que en materiales finos, a fin de mejorar la representatividad del ensayo.

Se trata de un método confiable y ampliamente utilizado, pero no brinda resultados inmediatos, ya que el secado de la muestra requiere normalmente del orden de 24 horas y la disponibilidad de horno en el laboratorio de obra.



Figura 5-4. Método del cono de arena (Fotografía: Construreyes Ingeniería)

5.5.4.2 Densímetros de lectura directa

Los densímetros permiten determinar en forma rápida la densidad y el contenido de humedad del material compactado, siendo especialmente útiles para el control continuo y de alta frecuencia durante la obra.

Entre los equipos actualmente utilizados se encuentran los densímetros nucleares (ASTM D6938 [96]) y los densímetros electromagnéticos o no nucleares (ASTM D7830/D7830M). Ambos permiten obtener resultados prácticamente inmediatos y facilitan la verificación sistemática de la compactación durante la ejecución de los rellenos.

Su principal ventaja es la rapidez del resultado, lo que permite ajustar en tiempo real el proceso constructivo. Los densímetros nucleares requieren equipamiento habilitado, personal autorizado y el cumplimiento de requisitos específicos de seguridad radiológica, mientras que los densímetros electromagnéticos eliminan dichas exigencias operativas.

Tanto los equipos nucleares como los electromagnéticos constituyen métodos indirectos de determinación de densidad y humedad, por lo que se recomienda contrastar periódicamente sus resultados mediante ensayos de referencia, como el método del cono de arena, verificando su adecuada calibración para los materiales presentes en la obra.

En el caso de los densímetros nucleares, la habilitación del equipo y la autorización del operador corresponden en Uruguay a la Autoridad Reguladora Nacional en Radioprotección (ARNR) del Ministerio de Industria, Energía y Minería.



Figura 5-5. Método del densímetro nuclear (Fotografía: UTLA - Ensayos de Laboratorio de Suelos)

5.5.4.3 Método rápido de Hilf

El método rápido desarrollado en el USBR por Jack Hilf [97] permite evaluar en forma aproximada la condición de compactación de suelos cohesivos sin necesidad de determinar directamente el contenido de humedad por secado.

El procedimiento parte de una muestra representativa obtenida de la capa compactada, sobre la cual se determina inicialmente la densidad húmeda. Luego, en laboratorio, se compactan porciones de esa misma muestra con la humedad que trae y con incrementos sucesivos y conocidos de agua, obteniéndose una relación entre agua agregada y densidad húmeda alcanzada. A partir de esa correlación, y mediante los gráficos del método, se estima la diferencia entre la humedad de la muestra original y la humedad óptima de compactación Proctor para ese material.

El método no proporciona directamente la densidad seca ni el contenido de humedad de la muestra, pero permite orientar con rapidez los ajustes necesarios en obra. Requiere trabajo de laboratorio sobre la muestra, con tiempos típicos del orden de una a dos horas y personal entrenado.

Se trata de una herramienta útil para el control operativo, que no sustituye a los ensayos de referencia, pero permite detectar en forma ágil desvíos en las condiciones de compactación.

5.5.4.4 Frecuencia y distribución de ensayos

La frecuencia de los ensayos debería ser suficiente para asegurar la representatividad del control, incrementándose en zonas críticas como las proximidades de estructuras, los contactos con laderas, los cambios de material o los sectores con dificultades de compactación. Como criterio general, se recomienda realizar al menos un ensayo por capa y por área representativa de trabajo.

Como orientación cuantitativa, el USACE [[84](#), Cap. 5-10.b.(2)] indica que un ensayo de control de rutina debería ejecutarse por cada 1.000 a 3.000 yd³ (aproximadamente 750 a 2.300 m³) de material compactado, con frecuencia incluso mayor en secciones angostas de terraplén donde un volumen reducido representa una altura significativa. Sobre la primera capa colocada directamente sobre la fundación se recomienda intensificar los ensayos, dada la relevancia estructural de ese contacto. Para los ensayos de registro —orientados a la caracterización de la resistencia al corte del relleno—, el USACE sugiere como pauta una muestra por cada 30.000 yd³ (aproximadamente 23.000 m³) de material de núcleo, y una muestra por cada 30.000 a 50.000 yd³ (23.000 a 38.000 m³) de material fuera del núcleo. En pequeñas presas, dada la escala reducida de los terraplenes, estos criterios deberían adaptarse a la obra concreta, priorizando la representatividad sobre la mera frecuencia numérica.

En materiales cohesivos con contenidos de grava superiores al 25–30 %, los ensayos Proctor pierden representatividad debido a la interferencia del esqueleto granular en la compactación de la matriz fina. En estos casos, corresponde aplicar la corrección por partículas de sobre tamaño según la norma ASTM-D4718 [[98](#)].

Las guías internacionales permiten ajustes en los grados de compactación exigidos, siempre que se garantice la estanqueidad del terraplén [[25](#), Cap. 6; [84](#), Cap. 6; [93](#)]. El control debería enfocarse en evitar la segregación y el contacto clasto-a-clasto, que podría generar una red de vacíos interconectados. Para validar el comportamiento de estos materiales “suelo-roca”, la ejecución de un terraplén de prueba (5.5.5) constituye el método más adecuado para establecer la relación entre el número de pasadas del rodillo, el espesor de capa y la permeabilidad resultante.

5.5.4.5 Criterios de aceptación

Cada capa debería ser aprobada antes de la colocación de la siguiente, verificando el cumplimiento de los criterios de densidad y contenido de humedad establecidos en el proyecto, así como la uniformidad del material y su comportamiento durante la compactación.

Como referencia general, para los controles de densidad de compactación pueden considerarse los valores orientativos indicados en la Tabla 5-4.

Tipo de material	Método de Control	Rango Orientativo
Materiales cohesivos (núcleo o zonas impermeables)	% Proctor Modificado	95 - 100 %
	% Proctor Estándar	90 - 95 %
Materiales cohesivos con alto contenido de grava (>25-30%)	% Proctor Modificado (Corregido*)	92 - 95 %
Materiales granulares (espaldones, drenes)	Densidad Relativa (D_R)	≥ 70 %

(*) Para suelos con más de 25-30% de gravas, se debe aplicar la corrección por sobre tamaño según ASTM D4718 [98].

Tabla 5-4. Valores orientativos de compactación a exigir según material

En caso de no alcanzarse los valores especificados, o de detectarse zonas con baja densidad o exceso de humedad (zonas blandas), se recomienda adoptar medidas correctivas tales como:

- ajuste del contenido de humedad
- incremento del número de pasadas
- reducción del espesor de capa
- remezclado del material

5.5.4.6 Observaciones en obra

El control instrumental debería complementarse con la observación directa del comportamiento del material durante la compactación.

En materiales cohesivos, se recomienda verificar la uniformidad del material, la ausencia de zonas blandas, huellas profundas persistentes, bombeo o fisuración.

En materiales granulares, se recomienda controlar especialmente la segregación durante el extendido y la compactación, así como la eventual pérdida de capacidad de soporte durante la acción de rodillos vibratorios en materiales con exceso de finos y elevado contenido de agua.

5.5.5 Terraplén de prueba

El Terraplén de Prueba es un terraplén especial que se ejecuta antes de la producción masiva del cuerpo de la presa para calibrar y validar el procedimiento de compactación propuesto por el constructor. No es un ensayo de control, sino de calibración del proceso constructivo.

Su ejecución es una práctica recomendada en la bibliografía internacional de presas de materiales sueltos [[25, Cap. 6](#); [84, Cap. 6](#); [41, Caps. 5 y 6](#)], donde se la reconoce como una herramienta fundamental para verificar en campo los parámetros de compactación definidos en proyecto.

5.5.5.1 Objetivos y Alcance

El objetivo principal es establecer la relación empírica entre el esfuerzo de compactación (número de pasadas, espesor de capa) y el resultado de la compactación (densidad seca, permeabilidad), para cada combinación de material (núcleo, filtro, espaldón), equipo (rodillo pata de cabra, liso, traíllas, etc.) y condición de humedad.

El Terraplén de Prueba permite a la Dirección de Obra y al constructor:

- Determinar el número mínimo y óptimo de pasadas del equipo seleccionado para cada material y espesor de capa.
- Determinar la contribución real del tránsito de equipos de acarreo (traíllas u otros camiones) a la densificación de las capas de material, cuando se proponga su utilización.
- Establecer el rango de humedad operativo y ajustar los procedimientos para acercar la humedad de los materiales en las condiciones reales de colocación en campo al contenido de humedad óptimo de laboratorio (Proctor).
- Verificar la aptitud de distintos materiales de préstamo cuando se prevea su utilización en una misma zona del terraplén.

5.5.5.2 Dimensiones y Procedimiento

El tamaño del terraplén debería ser representativo de la obra y lo suficientemente amplio para permitir la operación normal y maniobra del equipo de compactación a velocidad de trabajo. Se recomienda una superficie mínima de 300 a 500 m² por tramo, con una longitud que permita al equipo alcanzar velocidad constante antes de la zona de ensayo. También se recomienda prever la construcción de varias capas sucesivas (típicamente entre 3 y 6) en las que se ensayan distintas combinaciones de espesor, número de pasadas y condiciones de humedad.

El terraplén se construye en varias secciones o franjas. La prueba se ejecuta variando sistemáticamente el número de pasadas (ej. 4, 6, 8, 10, 12 pasadas) y/o el contenido de humedad (ej. $W_{opt} \pm 2\%$) para un espesor de capa constante. Alternativamente, pueden ejecutarse capas con espesores diferentes o incluso con espesor variable en forma controlada, a efectos de evaluar la influencia de este parámetro sobre la densificación.

En cada sección se realizan múltiples ensayos de densidad y humedad in situ (cono de arena, densímetro nuclear, densímetro electromagnético u otros métodos equivalentes), hasta caracterizar adecuadamente la densidad alcanzada y su variabilidad dentro de la capa.

En materiales granulares se recomienda evaluar la densificación, la estabilidad bajo el paso de los equipos y la eventual segregación. Asimismo, corresponde registrar observaciones relevantes, tales como la facilidad de extendido, la respuesta al riego y el comportamiento frente al vibrado o amasado, así como la aparición de fenómenos indeseables como bombeo o pérdida de capacidad de soporte.

La duración de esta etapa depende del número de materiales y combinaciones a probar, pero en presas pequeñas suele tomar entre 3 y 6 días efectivos de trabajo. Este plazo debería considerarse en la programación de la obra, ya que condiciona el inicio de la construcción del terraplén. Una ejecución adecuada reduce incertidumbres, mejora el rendimiento de los equipos y evita retrabajos, lo que impacta directamente en los costos y plazos.

5.5.5.3 Interpretación de resultados

Los resultados del Terraplén de Prueba son los elementos de decisión para la Especificación de Compactación Final. La presentación gráfica de algunas correlaciones como las mostradas en la Figura 5-6 resulta particularmente ilustrativa.

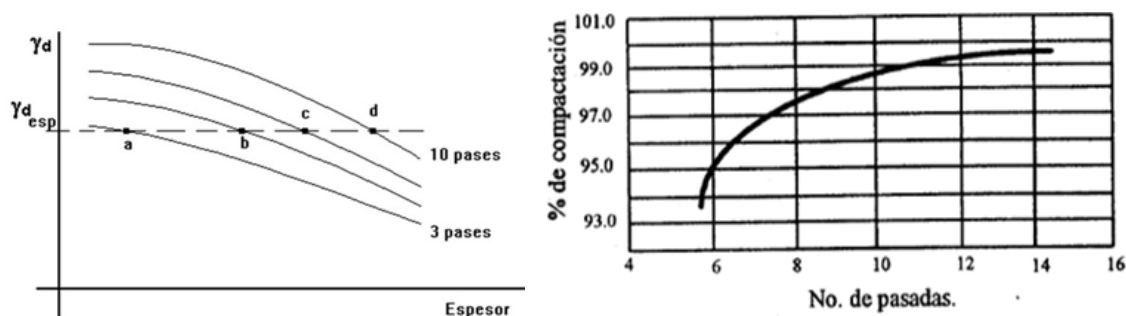


Figura 5-6. Resultados tipo de un terraplén de prueba

Algunas correlaciones que se pueden obtener son, por ejemplo:

- Densidad vs. Espesor de Capa
- Curva de Rendimiento: Densidad (o porcentaje de compactación) vs. Número de pasadas
- Curva de Humedad de Campo: Densidad (o % de compactación) vs. Desvío de humedad de la óptima

Los resultados de un Terraplén de Prueba son válidos solo para la combinación específica de material, equipo y humedad que se ensaya. Cualquier cambio en estas variables requiere una nueva calibración o una verificación complementaria que confirme la validez de los parámetros previamente adoptados.

Se recomienda verificar que la compactación resulte uniforme en toda la capa, prestando especial atención a la densificación de los bordes y las zonas de solape de las pasadas, que constituyen puntos críticos.

En todos los casos, se recomienda ensayar los equipos de compactación que el contratista prevea utilizar en obra. Si para presas de DPA Bajo el contratista propone utilizar equipos de acarreo (como traíllas) como parte del proceso de compactación, corresponde verificar específicamente mediante el terraplén de prueba el número de pasadas y las condiciones de operación (por ejemplo, cargado o descargado) necesarias para alcanzar la densidad requerida en todo el espesor de la capa, y no únicamente en su superficie. Esta verificación resulta particularmente importante debido a que dichos equipos no están diseñados específicamente para la compactación de suelos.

El terraplén de prueba debería documentarse adecuadamente, registrando materiales, equipos, procedimientos, resultados de ensayos y criterios adoptados, de modo de asegurar la trazabilidad del proceso constructivo.

El terraplén de prueba puede ejecutarse fuera de la traza de la presa o dentro de la misma. En este último caso, se recomienda asegurar que las capas que queden incorporadas al terraplén cumplan con las especificaciones de proyecto en términos de densidad, humedad y uniformidad. En la práctica, es habitual ejecutar el terraplén de prueba dentro de los límites de la presa, evaluando distintas combinaciones de parámetros en capas sucesivas y aceptando únicamente aquellas que satisfacen los requisitos establecidos. Las capas que no cumplan con las condiciones especificadas deberían recompactarse hasta lograrlo o removerse antes de continuar con la construcción.

5.6 Obras complementarias y estructuras asociadas

Las presas de materiales sueltos requieren la ejecución de obras complementarias necesarias para su operación, control y seguridad, tales como conducciones a través del terraplén, estructuras de toma y descarga, obras de hormigón asociadas, equipamiento hidromecánico y terminaciones del coronamiento.

A diferencia del cuerpo principal de la presa, estas obras implican la interacción entre materiales de distinta naturaleza —suelos, hormigón y elementos metálicos—, por lo que su ejecución requiere especial cuidado. En particular, las interfaces entre estos materiales constituyen puntos críticos, donde se recomienda extremar los controles para evitar concentraciones de filtraciones, deformaciones diferenciales y discontinuidades en el comportamiento del conjunto.

Se recomienda prestar especial atención a la preparación de las superficies de fundación. Tanto en obras de hormigón como en conducciones apoyadas en cama de hormigón, la fundación debería limpiarse completamente, eliminando materiales sueltos o alterados.

Cuando se encuentre roca, se recomienda sanearla mediante la remoción de partes sueltas y la limpieza de fisuras; en caso necesario, podrán realizarse sellados locales con mortero u hormigón pobre para asegurar un adecuado contacto.

En este apartado se presentan criterios generales para la ejecución de estas obras, con énfasis en aquellos aspectos que pueden afectar el comportamiento hidráulico y estructural de la presa.

5.6.1 Conducciones a través de la presa

Las disposiciones constructivas correspondientes a conducciones a través de presas de materiales sueltos requieren especial cuidado en la ejecución de zanjas, apoyos, recubrimientos, filtros, drenes y rellenos adyacentes, a efectos de asegurar las condiciones previstas en el diseño hidráulico, estructural y geotécnico de la obra [[79](#); [99, Sec. 8](#)].

La Figura 5-7 muestra un esquema general de una presa zonificada con conducción a través del terraplén y sistema drenante integrado, mientras que la Figura 5-8 presenta una secuencia constructiva típica para la instalación de la conducción y su recubrimiento estructural.

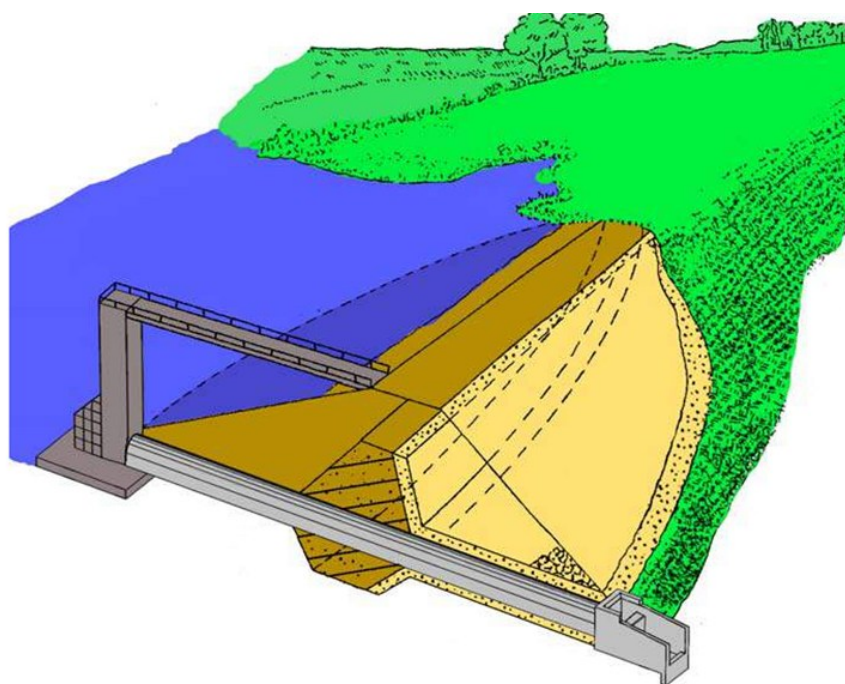


Figura 5-7. Conducto a través de una presa de materiales sueltos con sistema de drenaje aguas abajo integrado (Tomado de FEMA P-484 [79])

5.6.1.1 Ejecución de la zanja, apoyo y colocación

La zanja debería excavar-se hasta alcanzar las condiciones de fundación previstas en el proyecto, eliminando materiales sueltos, orgánicos, alterados o inadecuados para el apoyo de la conducción. En presencia de zonas blandas, materiales saturados o sectores con agua, se recomienda adoptar previamente las medidas de saneamiento, drenaje o estabilización definidas en el proyecto.

En los sectores donde el diseño contemple elementos filtrantes o drenantes asociados a la conducción, la excavación debería ejecutarse respetando cuidadosamente las geometrías previstas para alojar los distintos materiales y asegurar su continuidad hidráulica.

El fondo de la zanja debería regularizarse cuidadosamente para permitir la correcta alineación y nivelación de la conducción desde la toma hasta la descarga, evitando apoyos irregulares o concentraciones localizadas de carga.

La ejecución de camas de apoyo, bases drenantes o recubrimientos estructurales debería realizarse respetando las pendientes, geometrías y niveles definidos en el proyecto, particularmente en aquellos casos en que se hayan previsto ajustes de nivel asociados a asentamientos esperados de la fundación.

La tubería debería colocarse asegurando su correcta alineación, nivelación y estabilidad durante el montaje. Las juntas deberían limpiarse y sellarse

cuidadosamente según el tipo de unión adoptado, evitando discontinuidades, desplazamientos o defectos de montaje que puedan afectar la estanqueidad o el comportamiento hidráulico de la conducción.

El sellado de las juntas tiene por objeto asegurar la estanqueidad del conducto durante su operación, pero no reemplaza la función del sistema filtrante y drenante asociado a la conducción.

Antes de ejecutar los recubrimientos o rellenos definitivos, se recomienda verificar la estanqueidad y condiciones de funcionamiento de la conducción mediante los ensayos de recepción previstos en el proyecto.

Las pruebas neumáticas mediante aire a presión permiten detectar rápidamente fugas finas y resultan particularmente útiles durante las etapas de montaje y ajuste de juntas. Sin embargo, debido a la energía acumulada en sistemas presurizados con aire, estas pruebas requieren especiales precauciones de seguridad.

Las pruebas hidráulicas mediante llenado y control de pérdidas permiten verificar el comportamiento general y la estanqueidad de la conducción bajo condiciones más representativas de operación, aunque suelen requerir mayores tiempos de ejecución y preparación.

En muchos casos puede resultar conveniente realizar inicialmente una prueba neumática como verificación rápida de montaje y, posteriormente, una prueba hidráulica para la validación final del sistema o luego de efectuadas reparaciones o ajustes en la conducción.

5.6.1.2 Recubrimiento de hormigón

La ejecución de camas de apoyo, envolventes o recubrimientos estructurales de hormigón debería realizarse respetando las geometrías, pendientes, niveles y demás disposiciones definidas en el proyecto.

Previamente al hormigonado, debería verificarse la correcta alineación y nivelación de la conducción, así como las condiciones de apoyo previstas para su ejecución.

En sectores impermeables, las camas de apoyo y recubrimientos deberían ejecutarse sobre el fondo preparado de la zanja, procurando asegurar un contacto uniforme con el material de fundación. En sectores asociados a elementos filtrantes o drenantes, el apoyo podrá disponerse sobre bases granulares ejecutadas conforme a lo previsto en el proyecto.

Las armaduras deberían colocarse respetando las posiciones, separaciones, recubrimientos y sistemas de fijación previstos en el diseño, evitando

desplazamientos durante el hormigonado o interferencias con la correcta colocación y compactación del hormigón alrededor de la conducción.

Asimismo, se recomienda adoptar procedimientos y geometrías de ejecución que faciliten la correcta colocación y compactación de los rellenos adyacentes, evitando la formación de vacíos o zonas blandas junto a la conducción.

El hormigonado debería ejecutarse asegurando un contacto continuo con la tubería, especialmente en la zona inferior, mediante vibrado controlado que garantice una adecuada envoltura sin generar segregaciones.

Cuando el proyecto contemple juntas, nodos o tramos articulados en la conducción o en su recubrimiento, éstos deberían ejecutarse respetando las disposiciones constructivas y de sellado previstas en el diseño.

5.6.1.3 Sistema filtrante y drenante

El sistema filtrante y drenante asociado a la conducción debería ejecutarse de acuerdo con las geometrías, materiales y disposiciones previstas en el proyecto, asegurando la continuidad hidráulica entre los distintos elementos filtrantes y drenantes y evitando discontinuidades o sectores mal compactados que puedan comprometer su funcionamiento.

Cuando la conducción atravesase un terraplén provisto de dren chimenea, debería verificarse durante la ejecución que éste intercepte completamente la conducción y mantenga continuidad con los elementos drenantes ubicados aguas abajo.

En los casos en que el proyecto contemple pantallas filtrantes asociadas a la conducción, éstas deberían ejecutarse respetando cuidadosamente las dimensiones, materiales y secuencia constructiva previstas, procurando mantener la separación entre materiales cohesivos y materiales drenantes y evitando contaminación o segregación de los filtros durante la colocación.

Los materiales filtrantes y drenantes deberían colocarse en capas controladas, evitando mezclas con los materiales cohesivos adyacentes y asegurando condiciones adecuadas de compactación y confinamiento lateral.

Asimismo, se recomienda verificar durante la ejecución que las salidas del sistema drenante permanezcan libres, accesibles y correctamente conectadas con los puntos de descarga previstos para inspección u observación aguas abajo.

Este tipo de solución requiere especial cuidado durante la colocación de rellenos, la compactación alrededor de la conducción y la transición entre materiales de distintas características hidráulicas.

5.6.1.4 Rellenos

Los rellenos de la zanja alrededor de la tubería o alrededor de su recubrimiento de hormigón deberían ejecutarse utilizando materiales compatibles con las funciones hidráulicas y geotécnicas previstas para cada sector.

En sectores impermeables, se recomienda utilizar materiales cohesivos colocados y compactados con contenidos de humedad ligeramente superiores al óptimo de compactación ($\approx +1$ a $+3\%$), favoreciendo su deformabilidad y el cierre de vacíos.

Salvo que el proyecto establezca criterios más específicos, resulta recomendable emplear materiales relativamente bien graduados, con tamaño máximo reducido (≈ 40 mm), fracción fina significativa ($\approx 50\%$ pasando tamiz N°200) e índice de plasticidad moderado (≈ 10 a 30), de acuerdo con FEMA [79].

En sectores drenantes o filtrantes, deberían emplearse materiales granulares capaces de asegurar la conducción del flujo sin colmatación.

En todos los casos, la colocación y compactación debería realizarse en capas delgadas, con avance aproximadamente simétrico a ambos lados de la conducción, evitando cargas excéntricas que puedan producir desplazamientos, deformaciones o daños en la tubería o en su recubrimiento.

En estas zonas, el espesor de capa y los procedimientos de compactación deberían adaptarse a la presencia de la conducción y de las interfaces asociadas, conforme a los criterios establecidos en la Sección 5.5, procurando alcanzar condiciones de densificación uniformes y compatibles con las previstas para el resto del terraplén

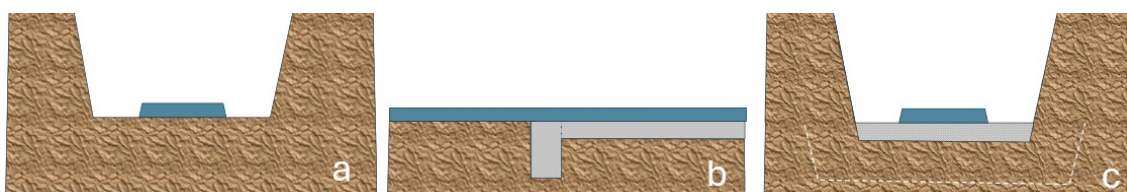
5.6.1.5 Secuencia constructiva

La Figura 5-8 presenta una secuencia constructiva típica para la instalación de la conducción y su recubrimiento.

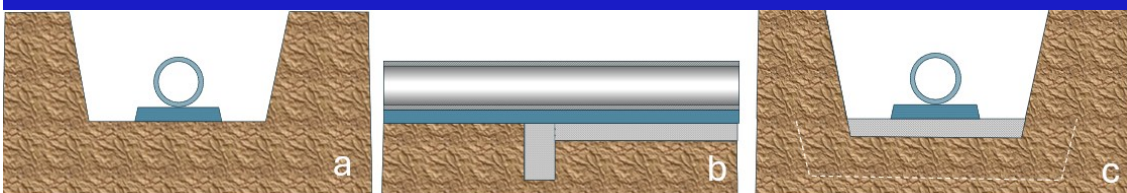
Etapa 1: Excavación de la zanja. Ejecución de la parte inferior del sistema filtrante y del material drenante aguas abajo. Hormigonado de la base de apoyo con control de niveles.

Etapa 2: Colocación firme, alineación y ensayo de la tubería.

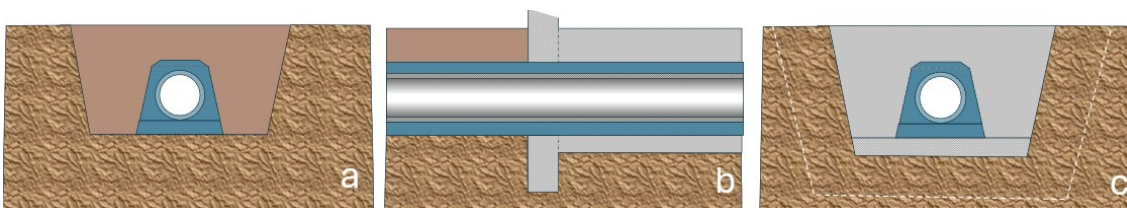
Etapa 3: Ejecución del recubrimiento de hormigón. Relleno de la zanja con material cohesivo aguas arriba y material filtrante/drenante aguas abajo, en capas delgadas con avance simétrico a ambos lados y compactación controlada, verificando que se alcance una uniformidad y densificación equivalente a la exigida para el resto del terraplén.



Etapa 1: zanja excavada, material de filtro/dren donde corresponde, y cama de hormigón armado.



Etapa 2: Tubería alineada, en condiciones de hacer prueba hidráulica y neumática.



Etapa 3: Recubrimiento completo y rellenos diferentes a ambos lados de la chimenea drenante.

Figura 5-8. Etapas constructivas típicas para instalación de una tubería y su recubrimiento de hormigón a través de la presa. Las imágenes a, b y c indican
a) En zanja por debajo de una zona de material cohesivo. Sección transversal.
b) Perfil longitudinal por el eje de la tubería. Dren chimenea (o pantalla filtrante) y tramos aledaños aguas arriba y abajo. c) En zanja, aguas abajo del dren chimenea. Sección transversal.

5.6.2 Obras de hormigón

Las obras de hormigón en presas de materiales sueltos comprenden estructuras de toma, cámaras de válvulas, descargas de fondo, disipadores de energía y elementos asociados a conducciones. Su ejecución requiere especial cuidado por la interacción entre el hormigón, los suelos del terraplén y, en muchos casos, la fundación natural, debiendo asegurarse una adecuada continuidad estructural e hidráulica en todos los contactos.

Las superficies de fundación deberían encontrarse limpias y firmes, de acuerdo con los criterios indicados en la Sección 5.3, asegurando un adecuado contacto entre el hormigón y el terreno o la roca. Los encofrados deberían ser estables, estancos y capaces de mantener la geometría prevista durante el hormigonado, evitando pérdidas de lechada y deformaciones. Las armaduras deberían colocarse conforme a planos, respetando su posición, recubrimientos y fijación mediante separadores adecuados, prestando especial atención a zonas con alta densidad de acero donde pueda dificultarse la correcta colocación del hormigón. En esta etapa se recomienda

además prever e instalar todos los elementos embebidos necesarios para etapas posteriores, tales como insertos metálicos, anclajes, pasatubos y conducciones para cables u otras instalaciones.

Antes del inicio del hormigonado, se recomienda verificar que las dimensiones, niveles y alineaciones del encofrado, así como la posición de armaduras e insertos, correspondan a lo establecido en el proyecto. El hormigón debería colocarse evitando segregación, con alturas de descarga controladas y distribución uniforme, y compactarse mediante vibrado adecuado para asegurar la eliminación de vacíos y la correcta envoltura de armaduras e insertos, evitando tanto el vibrado insuficiente como el excesivo. En elementos ejecutados en contacto con el terreno o con estructuras existentes, se recomienda asegurar la continuidad del material, evitando la formación de juntas no previstas.

Posteriormente, el hormigón debería protegerse mediante un curado adecuado que asegure el desarrollo de resistencia y durabilidad.

Las juntas de construcción deberían ejecutarse en las ubicaciones previstas en el proyecto, asegurando la limpieza y preparación de las superficies antes de continuar el hormigonado. En estructuras vinculadas a conducciones o sometidas a presión hidráulica, se recomienda prestar especial atención a la estanqueidad de las juntas. Durante la ejecución se recomienda controlar la geometría final de los elementos (dimensiones, niveles y alineaciones), la correcta ubicación de insertos y anclajes, y la ausencia de defectos tales como vacíos, segregaciones o superficies mal terminadas.

En el contacto entre el hormigón y los materiales del terraplén se recomienda asegurar la continuidad del sistema, evitando vacíos, zonas mal compactadas y cambios bruscos de rigidez. Los rellenos adyacentes deberían ejecutarse con materiales y procedimientos adecuados a cada zona: en materiales cohesivos, con capas delgadas y humedad ligeramente superior a la óptima cuando resulte conveniente para mejorar su deformabilidad; en materiales granulares de transición o drenaje, con una compactación compatible con su función hidráulica y con la necesidad de acomodar deformaciones diferenciales. En todos los casos se recomienda evitar la transmisión de esfuerzos indebidos a la estructura o al terraplén por diferencias de asentamiento.

5.6.3 Equipamiento hidromecánico

El equipamiento hidromecánico de una presa de materiales sueltos comprende válvulas, compuertas, mecanismos de accionamiento y sus elementos auxiliares,

asociados a conducciones, obras de toma, descargas de fondo y dispositivos de regulación de caudales. Incluye asimismo elementos metálicos complementarios tales como rejillas, tapas, escaleras, pasarelas y barandas vinculadas a la operación y mantenimiento de las obras.

Su correcta instalación resulta fundamental para garantizar la operatividad y seguridad de la presa, por lo que se recomienda ejecutar el montaje con especial cuidado en la coordinación entre la obra civil, el montaje electromecánico y el control de calidad.

Los equipos deberían instalarse conforme a las especificaciones del fabricante y del proyecto, verificando previamente la correcta ejecución de las estructuras de soporte. En particular, se recomienda controlar la geometría de las obras civiles, la ubicación de insertos y anclajes, y la alineación de las conducciones, a fin de evitar esfuerzos indebidos sobre válvulas, compuertas u otros dispositivos durante su montaje y operación.

El montaje debería asegurar la correcta alineación entre componentes, la adecuada fijación de pernos y anclajes, y la correcta ejecución de juntas y sellos. En válvulas y compuertas se recomienda verificar el libre movimiento de los elementos móviles, sin interferencias ni puntos duros, así como el correcto funcionamiento de los mecanismos de accionamiento, ya sean manuales, eléctricos o hidráulicos.

Una vez instalado el equipamiento, se recomienda realizar ensayos de funcionamiento que incluyan la apertura y cierre completos, la verificación de la estanqueidad en condiciones de servicio y el control del comportamiento bajo diferentes condiciones operativas. En conducciones asociadas, estos ensayos deberían coordinarse con las pruebas hidráulicas, asegurando la integridad del sistema en su conjunto.

Durante el acopio y montaje, se recomienda asegurar la adecuada protección de todos los elementos, evitando daños por golpes, corrosión o contaminación. En caso de producirse deterioros en recubrimientos, pinturas o superficies metálicas, éstos deberían repararse conforme a las especificaciones del fabricante, de modo de restituir las condiciones de protección originales antes de la puesta en servicio. Las condiciones de garantía de los equipos deberían considerarse en estas tareas, particularmente en lo relativo a intervenciones, ajustes o reparaciones realizadas en obra.

El equipamiento hidromecánico suele integrarse con otras obras complementarias, tales como plateas o bases de apoyo de equipos de bombeo, estructuras de toma,

dispositivos de control de caudales ambientales y sistemas de rejillas de protección. La correcta ejecución de estas obras y su coordinación con el montaje de los equipos resulta esencial para el funcionamiento global del sistema.

En todos los casos, se recomienda garantizar la accesibilidad para operación, inspección y mantenimiento, incluyendo la disposición adecuada de escaleras, pasarelas, barandas y elementos de seguridad.

Asimismo, se recomienda evitar que las condiciones de montaje introduzcan restricciones o desalineaciones que puedan afectar el funcionamiento en servicio.

Finalmente, se recomienda realizar un registro detallado de los equipos instalados, sus características, ensayos realizados y condiciones de montaje, como parte de la documentación conforme a obra. Cuando intervienen distintos contratistas, resulta recomendable definir claramente los alcances de suministro y responsabilidades en las interfaces entre obra civil y equipamiento, a fin de evitar incompatibilidades o interferencias durante la ejecución y puesta en servicio.

5.6.4 Coronamiento y terminaciones

El coronamiento de la presa constituye el nivel superior del terraplén y cumple funciones estructurales, operativas y de seguridad. Su ejecución debería asegurar una geometría adecuada, una superficie resistente al tránsito y condiciones que eviten la degradación por acción del agua, el viento o el uso.

La superficie del coronamiento debería ejecutarse con los anchos, pendientes transversales y cotas definidas en el proyecto, garantizando un correcto escurrimiento de las aguas superficiales. En general, se prevé una pendiente transversal que permita evacuar el agua hacia aguas arriba, evitando su concentración sobre la cresta y reduciendo el riesgo de erosión en el talud aguas abajo.

Asimismo, se recomienda asegurar la correcta materialización de la contraflecha longitudinal prevista en el proyecto, destinada a compensar los asentamientos del terraplén y de la fundación. En ausencia de una definición explícita, podrá adoptarse una sobreelevación o contraflecha progresiva del coronamiento, ajustando la geometría del tramo superior de los taludes. Este criterio, consistente con el concepto de *construction camber* utilizado en guías internacionales (USBR, USACE), permite mantener en servicio los niveles y pendientes requeridos.

Dependiendo del tipo de obra, el coronamiento puede resolverse mediante una capa de rodadura de material granular seleccionado, tratamientos superficiales

estabilizados o, en casos de mayor exigencia, mediante carpeta asfáltica o pavimento. En todos los casos, la subrasante debería encontrarse correctamente compactada y regularizada antes de la ejecución de la capa final.

En los bordes del coronamiento se recomienda prever elementos de seguridad y delimitación, tales como barandas, defensas o guardarraíles, particularmente cuando exista circulación vehicular o riesgo de caída hacia taludes pronunciados. Asimismo, pueden disponerse veredas, cordones u otros elementos que faciliten la operación y mantenimiento.

Las terminaciones superficiales deberían ejecutarse de modo de asegurar la protección del terraplén frente a la erosión, cuidando especialmente el encuentro entre el coronamiento y los taludes, evitando discontinuidades que favorezcan la concentración de escorrentía.

Cuando el proyecto lo requiera, podrán incorporarse en el coronamiento conducciones de servicios, sistemas de iluminación, señalización, así como la instalación de instrumentos de auscultación, cuya ejecución debería coordinarse con la construcción de las capas superiores del terraplén y las obras de drenaje superficial.

Finalmente, el coronamiento debería mantenerse libre de obstrucciones y en condiciones adecuadas para permitir la inspección visual de la presa, así como el acceso seguro de personal y equipos durante la operación y mantenimiento.

5.7 Instrumentación durante la construcción

Durante la construcción de la presa deberían instalarse los instrumentos de auscultación previstos en el proyecto, de modo de permitir el seguimiento del comportamiento desde su puesta en carga.

La instrumentación constituye un sistema integrado a la obra, por lo que su instalación debería planificarse y ejecutarse en coordinación con la secuencia constructiva del terraplén y de las estructuras asociadas [\[67\]](#).

5.7.1 Planificación e integración con la obra

La ubicación, cantidad y tipo de instrumentos deberían responder a lo establecido en el proyecto, en función de las características de la presa y su categoría de DPA.

Durante la ejecución, cuando las condiciones observadas lo justifiquen, la Dirección de Obra podrá:

- ajustar la ubicación o características de los instrumentos previstos

-
- incorporar dispositivos adicionales
 - definir puntos de observación o medición no previstos inicialmente

en función de las condiciones reales observadas en la fundación, en los materiales o en el comportamiento de la obra.

En particular, la Dirección de Obra podrá decidir instrumentar:

- surgencias o filtraciones detectadas durante la construcción
- puntos de descarga donde resulte conveniente medir caudales
- sectores con comportamiento hidráulico particular
- parámetros indicativos del comportamiento durante el primer llenado o el desembalse
- otros parámetros representativos del comportamiento de las obras que, a su juicio, resulte conveniente cuantificar y mantener bajo observación

5.7.2 Instalación de los instrumentos

La instalación de la instrumentación debería realizarse en forma coordinada entre el Contratista, el equipo de topografía, el especialista en auscultación (cuando corresponda) y la Dirección de Obra.

Los instrumentos más habituales en presas de materiales sueltos incluyen:

- piezómetros (de tubo abierto, eléctricos u otras tecnologías)
- dispositivos de medición de caudales de drenaje o filtraciones
- puntos para control de asentamientos
- puntos de control topográfico
- escalas de nivel del embalse

La instalación debería ejecutarse conforme a especificaciones técnicas y verificarse antes de su incorporación definitiva a la obra, considerando especialmente:

- correcta ubicación planimétrica y altimétrica
- correcta ejecución de rellenos, filtros y sellos compatibles con el material circundante
- adecuado tendido y protección de cableados de alimentación de energía y transmisión de señales

-
- correcta instalación y protección de equipos asociados (cabezales, antenas, registradores, interfaces u otros)
 - estabilidad y protección de los dispositivos durante la construcción

En el caso de instrumentos embebidos en el terraplén, su colocación debería coordinarse estrictamente con la secuencia constructiva, evitando interferencias con los equipos de extendido y compactación y asegurando su protección durante la ejecución de las capas sucesivas.

La instrumentación requiere el uso de equipos de lectura asociados (sondas para piezómetros abiertos, unidades lectoras para sensores eléctricos o de fibra óptica, dispositivos de aforo u otros), los cuales forman parte integrante del sistema de auscultación. Se recomienda verificar estos equipos al momento de su recepción en obra, incluyendo la contrastación de su calibración cuando corresponda, y mantenerlos operativos durante toda la vida útil de la presa. Su disponibilidad, identificación y correcto funcionamiento resultan indispensables para asegurar la validez de las mediciones.

Asimismo, este equipamiento debería protegerse, mantenerse y almacenarse adecuadamente desde antes de la instalación de los instrumentos, bajo responsabilidad de la Dirección de Obra o del operador designado, evitando deterioros, pérdidas o desajustes que comprometan la calidad de los registros.

En particular, se recomienda prestar especial atención a la coordinación de la instrumentación en el coronamiento, donde suelen concentrarse:

- cabezales de piezómetros
- cableados y equipos de adquisición de datos
- puntos de control topográfico para medición de desplazamientos

En aquellos casos en que el llenado del embalse pueda iniciarse antes de la completa terminación del coronamiento, se recomienda prever la instalación de puntos de control provisorios, ubicados en sectores estables del talud (preferentemente aguas abajo y en niveles ya terminados), que permitan registrar asentamientos y deformaciones desde antes del inicio del llenado. Estos puntos podrán luego integrarse al sistema definitivo de auscultación.

5.7.3 Verificación y lecturas iniciales

Una vez instalados, y antes de quedar definitivamente incorporados a la obra, los instrumentos deberían verificarse a fin de comprobar su correcto funcionamiento.

Estas verificaciones incluyen:

- comprobación de lecturas consistentes en piezómetros
- verificación de continuidad y funcionamiento en instrumentos eléctricos
- control de estabilidad y funcionamiento en dispositivos de medición

En el caso de dispositivos de aforo, corresponde verificar que las condiciones de instalación resulten compatibles con las hipótesis de funcionamiento adoptadas para el dispositivo seleccionado.

Las primeras mediciones realizadas constituyen las lecturas iniciales o de referencia, y deberían registrarse cuidadosamente, ya que servirán como base para la interpretación futura del comportamiento de la presa.

5.7.4 Protección, registro y trazabilidad

Durante la ejecución de la obra se recomienda proteger los instrumentos mediante:

- señalización adecuada
- control del tránsito de equipos en su entorno
- verificación periódica de su estado

Cualquier daño o anomalía detectada debería informarse y evaluarse antes de continuar con los trabajos en el sector afectado.

Cada instrumento instalado debería contar con un registro que incluya:

- identificación y tipo de instrumento
- ubicación planimétrica y altimétrica
- fecha y condiciones de instalación
- características del terreno o material circundante
- resultados de las verificaciones iniciales

Para el control de deformaciones o desplazamientos mediante sistemas topográficos de alta precisión, se recomienda asegurar la construcción de puntos o bases de referencia estables, ubicados fuera del área de influencia de la presa y del embalse, preferentemente fundados en roca sana o en sectores con comportamiento independiente de la obra.

La correcta definición y materialización de estos puntos de referencia resulta fundamental, ya que constituyen la base del sistema de medición. Su ubicación,

características y vinculación con la red de control deberían quedar debidamente documentadas.

Asimismo, se recomienda documentar las decisiones adoptadas durante la obra en relación con:

- modificaciones del esquema de instrumentación
- incorporación de nuevos puntos de medición
- implementación de dispositivos de aforo o control de filtraciones

La correcta instalación, protección y documentación de la instrumentación durante la construcción constituye una condición necesaria para el seguimiento del comportamiento de la presa en etapas posteriores [[16, Cap. 3](#)].

El sistema de medición deberá asegurar continuidad y confiabilidad desde su puesta en servicio, evitando soluciones que dificulten la interpretación de las lecturas en el tiempo. El análisis e interpretación de estas mediciones, así como la definición de criterios de control y actuación, se desarrollan en el Capítulo 6.

5.8 Organización y servicios de obra

La ejecución de una presa de materiales sueltos requiere una organización de obra que asegure la calidad constructiva, la continuidad de los trabajos y condiciones seguras de operación.

La planificación de los servicios de obra debería realizarse en forma previa al inicio de los trabajos, considerando la magnitud de la presa, la duración de la obra, su ubicación y su categoría de DPA.

5.8.1 Laboratorio de obra y control de calidad

El control de calidad de los materiales y de la ejecución requiere la disponibilidad de medios adecuados para la realización de ensayos y verificaciones, ya sea mediante un laboratorio instalado en obra o mediante el acceso ágil a un laboratorio externo, según la complejidad de la obra y la frecuencia requerida.

La necesidad de contar con un laboratorio permanente en obra dependerá de la escala del proyecto, la complejidad de los materiales y las distancias a centros de ensayo disponibles. En presas de mayor DPA, se recomienda disponer de un laboratorio de obra con capacidad suficiente para realizar ensayos en forma continua, mientras que en presas de bajo DPA puede admitirse el uso de laboratorios externos, siempre que se garantice la oportunidad y confiabilidad de los resultados.

En cualquier caso, se recomienda garantizar la posibilidad de realizar, con la frecuencia requerida por la obra, los siguientes ensayos:

- determinación de humedad
- ensayos Proctor (estándar o modificado)
- densidad in situ (procesamiento de muestras de cono de arena)
- granulometría por tamizado
- límites de Atterberg

En materiales granulares, se recomienda además contar con la posibilidad de determinar la densidad relativa mediante los ensayos correspondientes.

El equipamiento mínimo necesario (en obra o en laboratorio externo accesible) incluye:

- horno de secado
- balanzas calibradas
- moldes y equipos Proctor
- equipo para cono de arena o acceso a métodos equivalentes de control de densidad in situ (densímetros nucleares o electromagnéticos)
- tamices y elementos de análisis granulométrico
- dispositivos para preparación de muestras

El personal a cargo debería contar con experiencia en ensayos de suelos, en control de compactación de terraplenes y en la interpretación de sus resultados.

5.8.2 Equipamiento y apoyo a la construcción

La obra debería disponer, en forma permanente o bajo demanda, de equipamiento adecuado para asegurar la correcta ejecución de los trabajos, incluyendo:

- equipos de excavación y carga
- equipos de transporte (camiones, tráileres)
- equipos de extendido
- equipos de compactación
- camiones regadores para control de humedad

Asimismo, se dispondrá de equipos auxiliares cuando las condiciones de obra lo requieran:

-
- rastras de discos u otros implementos para oreo de materiales cohesivos
 - equipos de mezclado o reacondicionamiento de materiales
 - en obras de mayor exigencia, tolvas, cribas o sistemas de clasificación para ajuste granulométrico de materiales granulares

La disponibilidad y operatividad de los equipos resulta clave para asegurar la continuidad del proceso constructivo, especialmente en etapas críticas como la compactación de materiales cohesivos. El mantenimiento preventivo debería garantizar condiciones consistentes de funcionamiento y evitar interrupciones durante toda la obra.

La organización de los equipos debería asegurar la continuidad del proceso constructivo, coordinando en forma integrada la extracción de materiales, su transporte, el extendido, la compactación y el control de calidad. Esta coordinación resulta especialmente crítica en la ejecución del terraplén de materiales cohesivos, donde las condiciones de humedad y el ritmo de compactación condicionan directamente su calidad final.

5.8.3 Topografía y control geométrico

La obra debería contar con personal y equipamiento de topografía adecuados para:

- el replanteo de la presa y sus estructuras
- el control de cotas y alineaciones durante la ejecución
- la verificación de espesores de capa
- la medición de volúmenes ejecutados para certificación y control de avance
- la confección o actualización de planos conforme a obra

El control geométrico asegura la correcta ejecución de la obra conforme al proyecto y permite vincular los resultados de los ensayos con su ubicación. La correcta integración entre el control geométrico y los registros de calidad permite asegurar la trazabilidad de la construcción y facilita la interpretación del comportamiento futuro de la presa.

5.8.4 Instalaciones de obra

Las instalaciones de obra deberían ser acordes a la magnitud del proyecto e incluir, como mínimo:

- oficinas técnicas y administrativas
- áreas de almacenamiento de materiales y repuestos

-
- taller básico de mantenimiento
 - servicios sanitarios
 - áreas de descanso y alimentación del personal
 - servicio de primeros auxilios

En función de la escala de la obra, podrán requerirse además:

- áreas de acopio intermedio de materiales
- instalaciones para almacenamiento de combustibles
- sistemas de abastecimiento de agua

5.8.5 Organización del control y responsabilidades

El control de calidad debería mantenerse independiente de la ejecución de la obra, de modo de asegurar objetividad en la verificación del cumplimiento de las especificaciones.

La Dirección de Obra es responsable de:

- definir los criterios de aceptación
- aprobar los procedimientos constructivos
- verificar el cumplimiento de las especificaciones
- validar los resultados de los ensayos de control

El Contratista es responsable de:

- ejecutar los trabajos conforme a lo especificado
- realizar los controles operativos necesarios para la correcta ejecución de los trabajos
- colaborar con el sistema de control de calidad

La función de control puede ser ejercida directamente por la Dirección de Obra o mediante terceros, pero en todos los casos se recomienda mantener independencia respecto del Contratista. Los controles operativos realizados por el Contratista no sustituyen el control independiente requerido para la aceptación de la obra.

5.8.6 Registros de obra durante la ejecución

Durante la ejecución se recomienda generar y conservar registros completos que permitan reconstruir las condiciones de ejecución de la presa.

Esto incluye, entre otros:

-
- resultados de ensayos de control de compactación
 - registros de humedad y densidad por capa
 - trazabilidad de los materiales utilizados
 - planos conforme a obra
 - registros topográficos

En particular, durante la preparación de la fundación, se recomienda documentar en forma detallada:

- las condiciones geológicas observadas en el fondo de excavación
- la profundidad y geometría del dentellón
- la presencia de fisuras, cavidades o surgencias
- los tratamientos realizados (limpieza, sellado, inyecciones, drenajes)

Esta documentación constituye una parte importante del conocimiento adquirido durante la construcción y resulta fundamental para la evaluación del comportamiento futuro de la presa, para la interpretación de eventuales anomalías y para la preparación de la documentación conforme a obra. Se recomienda que estos registros se mantengan en formato digital, con respaldo adecuado, de modo de asegurar su conservación y disponibilidad a lo largo de la vida útil de la presa.

5.9 Documentación Conforme a Obra

5.9.1 Objeto y alcance

La documentación conforme a obra tiene por objeto consolidar, organizar y complementar la información generada durante la construcción, de modo de reflejar las características efectivamente ejecutadas y facilitar la operación, el mantenimiento y las evaluaciones de seguridad durante la vida útil de la presa.

Esta documentación debería integrar el Archivo Técnico de la presa [[100, Cap. 4](#)], entendido como el conjunto de antecedentes, registros, planos, memorias y demás información necesaria para interpretar adecuadamente el comportamiento de la obra a lo largo del tiempo. Su calidad, integridad y accesibilidad resultan determinantes para la gestión futura de la presa.

5.9.2 Responsabilidades

La responsabilidad de la elaboración de la documentación conforme a obra recae habitualmente en el Contratista, quien debería registrar en forma sistemática el

desarrollo de los trabajos. Esta documentación debería verificarse, complementarse y aprobarse por parte de la Dirección de Obra, responsable de validar su consistencia técnica y su utilidad para etapas posteriores.

5.9.3 Contenido mínimo de la documentación

La documentación conforme a obra debería permitir vincular, en forma integrada, la geometría ejecutada, los materiales utilizados, los procedimientos constructivos aplicados y los resultados de los controles realizados, asegurando su trazabilidad espacial y temporal dentro del cuerpo de la presa.

En particular, se recomienda incluir como mínimo:

- planos conforme a obra del terraplén y de todas las estructuras asociadas
- registros de avance y secuencia constructiva
- resultados de ensayos de control de compactación y de materiales
- registros de humedad y densidad por capas y sectores
- trazabilidad de los materiales utilizados (origen de préstamos y zonas de colocación)
- registros topográficos de control geométrico
- ubicación definitiva de la instrumentación instalada
- memoria técnica constructiva

La documentación conforme a obra debería incorporar los registros generados durante la ejecución relativos a la fundación, el dentellón y los tratamientos realizados. [[84, Cap. 5](#); [25, Cap. 6](#)].

Asimismo, deberían incorporarse las modificaciones introducidas durante la construcción respecto al proyecto original, incluyendo su justificación técnica cuando corresponda.

5.9.4 Instrumentación y monitoreo

En relación con la instrumentación, la documentación conforme a obra debería incluir fichas individuales de cada instrumento instalado, su ubicación planimétrica y altimétrica definitiva, las condiciones de instalación, los resultados de las verificaciones y lecturas iniciales, y la descripción de eventuales modificaciones o incorporaciones realizadas durante la obra. Esta información debería resultar consistente con la base de datos de auscultación utilizada durante la etapa operativa, a efectos de asegurar continuidad en la interpretación de las mediciones.

Asimismo, se recomienda documentar la ubicación y características de los puntos de control destinados al monitoreo de deformaciones, así como los puntos de referencia estables del sistema ubicados fuera del área de influencia de la presa.

5.9.5 Registro fotográfico y trazabilidad

Resulta fundamental llevar un registro fotográfico sistemático de la obra, que documente en forma continua las distintas etapas de ejecución y las condiciones observadas en campo. Este registro debería incluir, entre otros aspectos, el estado de la fundación antes, durante y después de su tratamiento, la ejecución del dentellón, la instalación de conducciones y drenajes, la instalación de instrumentación antes de su cobertura, la explotación de préstamos, el desarrollo de los frentes de obra, los equipos utilizados y cualquier incidente o situación no prevista. Se recomienda además que las imágenes se encuentren georreferenciadas o vinculadas a sectores específicos de la obra, cuando ello resulte posible. Este registro constituye una herramienta de gran valor para la interpretación del comportamiento futuro de la presa [17].

La documentación debería organizarse de manera tal que permita vincular cada sector de la obra con los materiales utilizados y las condiciones de ejecución correspondientes. En particular, se recomienda poder establecer la relación entre las capas colocadas, los resultados de los ensayos de control y su ubicación en planta y en sección del terraplén.

Asimismo, se recomienda registrar las condiciones relevantes durante la ejecución, tales como interrupciones significativas, eventos climáticos que hayan afectado los trabajos o cualquier situación que pueda incidir en el comportamiento futuro de la presa.

5.9.6 Archivo técnico y conservación de la información

En presas de DPA Bajo, estas recomendaciones pueden adaptarse de forma proporcional a la complejidad de la obra, priorizando la generación de un registro claro, ordenado y verificable de los aspectos más relevantes. En particular, se recomienda asegurar la documentación de:

- las tareas de limpieza y tratamiento de la fundación y del dentellón
- la ejecución de los sistemas de drenaje
- las etapas constructivas de instalación de conducciones a través de la presa
- la ejecución de tomas, válvulas y compuertas que quedarán normalmente sumergidas

Aun en estos casos, la información generada debería integrarse al Archivo Técnico de la obra y mantenerse disponible para su consulta durante la etapa operativa.

Se recomienda que la documentación conforme a obra se organice mediante un sistema de archivo que asegure su conservación, trazabilidad y consulta a largo plazo, incluyendo mecanismos adecuados de respaldo y actualización cuando corresponda. La disponibilidad de esta información resulta fundamental para la gestión de la seguridad de la presa y para la toma de decisiones durante todas las etapas de su ciclo de vida.

5.10 Primer llenado del embalse

Finalizada sustantivamente la construcción de la presa y sus obras asociadas, se recomienda verificar que la obra se encuentre en condiciones adecuadas para iniciar el llenado del embalse. Esta etapa marca la transición entre la construcción y la operación, y constituye una instancia clave para observar el comportamiento inicial de la presa bajo carga hidráulica.

En presas de pequeña escala o de DPA Bajo o Medio, estas verificaciones pueden realizarse mediante procedimientos simples, siempre que se asegure un control adecuado del proceso y la capacidad de detectar comportamientos anómalos.

5.10.1 Control del primer llenado

Previo al inicio del llenado, se recomienda comprobar que:

- el terraplén presenta una geometría suficientemente próxima a la prevista en el proyecto;
- los sistemas de drenaje se encuentran ejecutados y con descarga visible y accesible aguas abajo;
- las conducciones, válvulas y estructuras de control están operativas, habiendo verificado su funcionamiento y estanqueidad;
- los accesos permiten la inspección de la presa y de sus puntos críticos durante el llenado;
- las áreas de préstamo que quedarán comprendidas dentro del embalse han sido debidamente terminadas y acondicionadas;
- se han retirado del área a inundar aquellos elementos o materiales que no corresponda que permanezcan bajo agua;
- se ha efectuado el tratamiento previsto para la vegetación preexistente en el área a inundar.

Asimismo, se recomienda identificar previamente los sectores donde se realizará el seguimiento del comportamiento de la presa, tales como salidas de drenajes, pie de presa, contactos con estribos, zonas potencialmente críticas y demás puntos donde puedan manifestarse filtraciones, deformaciones o procesos erosivos.

Antes del inicio del llenado, se recomienda además prever una organización mínima para la respuesta ante eventuales anomalías, incluyendo la definición de responsables, la disponibilidad de contactos técnicos y operativos para intervención rápida, y la verificación de la operatividad de los órganos de descarga, de modo de permitir, si fuera factible y necesario, la detención del llenado o el descenso controlado del nivel del embalse.

El primer llenado constituye una de las etapas más importantes en la vida de una presa, ya que representa la primera oportunidad de observar la respuesta conjunta del terraplén, la fundación, las conducciones y las estructuras auxiliares frente a las sollicitaciones hidráulicas para las cuales fueron diseñadas.

Por esta razón, el llenado inicial debería realizarse, en la medida de lo posible, de forma controlada y progresiva, con incrementos graduales del nivel y períodos intermedios de observación. Estos períodos permiten verificar la evolución de filtraciones, caudales drenados, deformaciones, asentamientos, presiones intersticiales u otros indicadores relevantes antes de continuar con el ascenso del nivel del embalse.

Cuando las condiciones de operación lo permitan, resulta recomendable definir previamente criterios de alerta y umbrales de comportamiento que permitan mantener temporalmente el nivel alcanzado, intensificar las observaciones o adoptar medidas correctivas cuando se detecten anomalías significativas. En presas de mayor altura, complejidad o DPA Medio y Alto, se recomienda desarrollar procedimientos específicos de primer llenado y puesta en carga, incluyendo criterios para la velocidad de ascenso del embalse, etapas formales de observación ("hold-and-observe"), definición de umbrales cuantitativos asociados a filtraciones, asentamientos, deformaciones y niveles piezométricos, y participación activa del proyectista o de los especialistas responsables durante esta etapa crítica [[101](#); [102](#); [103](#)].

No obstante, en muchas pequeñas presas rurales emplazadas sobre cauces intermitentes o cuencas de respuesta rápida, el primer llenado suele producirse durante una única crecida significativa o en un número reducido de eventos, existiendo escasa capacidad real para controlar la velocidad de ascenso del embalse. En estas situaciones, el énfasis debería ponerse en la observación sistemática del

comportamiento de la obra, la accesibilidad a los puntos de control, la disponibilidad de medios para actuar rápidamente ante anomalías y la adecuada documentación de las condiciones observadas [[55](#), Cap. 6; [74](#)].

Durante el llenado se recomienda realizar inspecciones visuales sistemáticas, prestando especial atención a:

- aparición o incremento de filtraciones a través del sistema de drenaje o de surgencias en el pie de presa, taludes o sectores próximos aguas abajo;
- presencia de turbidez en el agua filtrada;
- zonas húmedas, surgencias o erosiones superficiales;
- fisuras, asentamientos o deformaciones no previstas.

En presas que cuenten con instrumentación, se recomienda registrar las lecturas disponibles y compararlas con los valores iniciales, prestando especial atención a la evolución de las presiones intersticiales, los caudales de drenaje y las deformaciones observadas.

Cuando sea posible, resulta recomendable construir desde el inicio dispositivos simples de aforo, suficientemente robustos, en los puntos donde se identifiquen filtraciones, ya sea provenientes del sistema de drenaje o de surgencias en la fundación, de modo de permitir un seguimiento cuantitativo de los caudales durante el llenado y posteriormente durante la etapa operativa.

La robustez de estos dispositivos resulta importante, ya que modificaciones frecuentes de su geometría o de las condiciones de captación pueden dificultar la interpretación de la evolución de los caudales medidos. Para la selección y dimensionamiento preliminar de estos dispositivos según el rango de caudales a medir, puede tomarse como referencia la guía de medición de caudales publicada por la ex-DINAMA [[68](#)].

Resulta altamente recomendable que la Dirección de Obra elabore un informe al finalizar el primer llenado, en el que se describan las condiciones en que se desarrolló el proceso, el comportamiento observado de la presa, las eventuales anomalías detectadas y las medidas adoptadas o previstas.

Este documento constituye un antecedente técnico de gran valor para el seguimiento posterior del comportamiento de la obra durante su etapa operativa, por lo que se recomienda su incorporación al Archivo Técnico de la presa junto con los registros de inspección, mediciones y observaciones efectuadas durante el llenado inicial.

5.10.2 Primer ciclo de operación (llenado y desembalse)

En presas destinadas a riego, el primer llenado del embalse da inicio a un régimen operativo caracterizado por ciclos sucesivos de llenado y desembalse, que se repetirán durante la vida útil de la obra.

Si bien el control del primer llenado resulta fundamental, el primer descenso significativo del nivel del embalse constituye también una instancia crítica, particularmente en presas homogéneas o con núcleo o fundación de materiales cohesivos. En estos materiales, el descenso del nivel del embalse puede generar condiciones desfavorables de estabilidad en el talud de aguas arriba, debido a que las presiones de poro en el interior del terraplén no se disipan con la misma rapidez que la disminución de la carga hidráulica externa. Esta condición, conocida como desembalse rápido, puede reducir transitoriamente las tensiones efectivas y el factor de seguridad del talud. [[99, Sec. 2.5.3](#); [56, Appendix G](#)]

Por este motivo, durante el primer ciclo en el que se produzca un descenso significativo del nivel del embalse — aun sin tratarse de un vaciado completo— se recomienda realizar un seguimiento cuidadoso del comportamiento de la presa, prestando especial atención a:

- nuevas fisuras o deformaciones en el coronamiento y el talud de aguas arriba
- zonas de reblandecimiento o inestabilidad superficial
- evolución de presiones intersticiales, cuando se disponga de piezómetros
- comportamiento de drenajes y filtraciones

En la medida de lo posible, se recomienda evitar descensos bruscos del nivel del embalse durante esta etapa inicial. Sin embargo, en presas de riego, el régimen de operación puede no permitir un control estricto de la tasa de desembalse, por lo que el énfasis debería ponerse en la observación del comportamiento y en la capacidad de respuesta ante eventuales anomalías.

Estas consideraciones deberían ser tenidas en cuenta tanto por la Dirección de Obra durante la etapa final de construcción como por el operador de la presa en los ciclos posteriores de explotación.

Para presas de mayor altura o con DPA Alto o cuando así lo requiera la Autoridad Competente, los procesos de primer llenado y primer desembalse deberían desarrollarse en el marco de un plan específico que incluya criterios de operación, monitoreo instrumental sistemático y procedimientos formales de actuación ante emergencias. El desarrollo de estos planes excede el alcance del presente manual.

6 GESTIÓN DE LA SEGURIDAD EN LA OPERACIÓN

6.1 Enfoque general

La seguridad de una presa no se limita a su adecuado diseño y construcción, sino que depende de manera continua de su comportamiento durante la etapa de operación. La gestión de la seguridad consiste en observar, registrar e interpretar ese comportamiento, de forma de detectar a tiempo cualquier condición que pueda incrementar la probabilidad de falla.

La experiencia internacional en seguridad de presas muestra que la detección temprana de anomalías o deficiencias —de diseño, construcción u operación— permite implementar medidas correctivas más simples, menos costosas y técnicamente más efectivas que las requeridas una vez avanzados los procesos de deterioro.

En pequeñas presas, particularmente en el contexto nacional, este enfoque adquiere una característica distintiva: la seguridad se apoya principalmente en la vigilancia activa de la obra, más que en sistemas complejos de instrumentación. La inspección visual periódica, realizada con criterios técnicos adecuados, constituye la herramienta fundamental para la detección temprana de anomalías.

La instrumentación, cuando existe, debe entenderse como un complemento de la inspección visual, orientado a reducir incertidumbres específicas sobre el comportamiento de la presa y a cuantificar variables que no pueden evaluarse adecuadamente mediante observación directa. Su utilidad depende de la continuidad en la lectura, el registro, la interpretación y el análisis de los datos obtenidos. La disponibilidad de instrumentación por sí sola no incrementa la seguridad de una presa si la información generada no es incorporada sistemáticamente al proceso de seguimiento y toma de decisiones.

La gestión de la seguridad en operación se estructura sobre la integración de tres componentes principales:

- Inspección visual sistemática, que permite identificar evidencias directas de comportamiento anómalo, tales como filtraciones, erosiones, deformaciones o deterioros en las estructuras;
- Monitoreo mediante instrumentación, en aquellos casos en que resulte justificado, orientado a cuantificar variables relevantes como niveles, presiones o caudales de filtración;

-
- Operación y mantenimiento adecuados, que aseguren el correcto funcionamiento hidráulico de la presa y la conservación de sus componentes.

Estos tres elementos deberían actuar de forma complementaria. La instrumentación no sustituye la inspección visual, ni la inspección visual reemplaza la necesidad de una operación cuidadosa y un mantenimiento sistemático. La ausencia de cualquiera de estos componentes debilita el sistema de gestión de la seguridad.

La intensidad y complejidad de este sistema deberían ajustarse a la categoría de DPA de la presa. En obras de DPA Bajo, la seguridad puede apoyarse fundamentalmente en inspecciones visuales periódicas y prácticas de mantenimiento adecuadas. En presas de DPA Medio y Alto, en cambio, puede resultar conveniente una mayor sistematización del monitoreo, la formalización de registros y la definición de procedimientos específicos de actuación ante anomalías. La forma concreta de implementar estos esquemas podrá ajustarse a los criterios y requerimientos que establezca la Autoridad Competente.

En todos los casos, el objetivo es disponer de información suficiente y confiable para comprender el comportamiento de la presa, identificar desviaciones respecto de lo esperado y actuar de manera preventiva.

6.2 Vigilancia de la presa

La vigilancia de la presa constituye la aplicación operativa del enfoque de seguridad en la etapa de operación. Su objetivo es conocer en forma sistemática el comportamiento de la obra frente a las condiciones de carga hidráulica y detectar oportunamente desviaciones respecto de lo esperado.

En pequeñas presas, la vigilancia se apoya fundamentalmente en la inspección visual periódica, complementada, cuando corresponda, con el monitoreo mediante instrumentación. Ambos enfoques deberían integrarse en un sistema único de observación y análisis, orientado a la toma de decisiones operativas y de mantenimiento [\[67\]](#).

La vigilancia no debería entenderse como una actividad ocasional, sino como un proceso organizado, con frecuencias definidas, criterios de observación claros y registros sistemáticos que permitan evaluar la evolución del comportamiento de la presa a lo largo del tiempo. La continuidad de la vigilancia resulta más importante que la intensidad puntual de los controles.

6.2.1 Inspección visual

La inspección visual es la herramienta principal de vigilancia en pequeñas presas y, en muchos casos, la más eficaz para la detección temprana de problemas. Permite identificar directamente evidencias de comportamiento anómalo que no siempre pueden ser captadas mediante instrumentación.

Las inspecciones deberían realizarse con una frecuencia acorde a la categoría de DPA, a las condiciones de operación del embalse y a la ocurrencia de eventos relevantes, como lluvias intensas o ciclos de llenado y vaciado.

Durante las inspecciones se recomienda prestar especial atención a los siguientes aspectos:

Terraplén y fundación

- Filtraciones en el talud aguas abajo, en el pie de presa o en las zonas de descarga de drenajes, observando su ubicación, caudal y, especialmente, la presencia de turbidez o arrastre de finos;
- Humedades anómalas o zonas encharcadas, que puedan indicar elevación de la línea de saturación o mal funcionamiento del sistema de drenaje;
- Cuevas, madrigueras o galerías generadas por animales en el cuerpo de la presa o en el contacto con la fundación, ya que pueden transformarse en caminos preferenciales de infiltración o favorecer procesos localizados de erosión interna;
- Erosiones superficiales en taludes y coronamiento, incluyendo surcos, cárcavas o pérdida de material;
- Deformaciones o asentamientos, tales como depresiones en el coronamiento, fisuras longitudinales o transversales, o cambios en la geometría de los taludes;
- Estado de las protecciones superficiales, incluyendo el revestimiento del talud aguas arriba y la cobertura vegetal del talud aguas abajo;
- Estado y funcionamiento de los sistemas de drenaje, incluyendo salidas visibles, cunetas y obras de conducción.

Obras anexas y equipamiento hidromecánico

- Condición de las obras anexas de hormigón, incluyendo vertedero principal, obras de toma, estructuras de control y descargas;
- Condición del vertedero auxiliar y su canal de descarga, incluyendo posibles obstrucciones, erosiones, cárcavas, pérdida de protecciones o deterioros en la ladera aguas abajo;

-
- Estado de las válvulas, compuertas y demás dispositivos de control, verificando su accesibilidad, operatividad y ausencia de deterioros visibles;
 - Estado de la zona de descarga final y ausencia de procesos de erosión asociados a la restitución de caudales.

Instrumentación y dispositivos de medición

- Estado de la instrumentación instalada, incluyendo reglas de nivel, piezómetros, aforadores, pluviómetros y otros dispositivos de medición;
- Disponibilidad, estado y operatividad de los equipos de lectura asociados cuando corresponda.
- Disponibilidad y actualización de registros de observación, lecturas instrumentales y demás antecedentes utilizados para el seguimiento del comportamiento de la presa.

La observación de estos elementos debería realizarse con criterio técnico, considerando que muchas anomalías se manifiestan inicialmente de forma sutil. Cambios progresivos en la intensidad de una filtración, en la extensión de una zona húmeda o una depresión en un talud o en el coronamiento pueden constituir indicadores tempranos de procesos que, de no ser atendidos, podrían evolucionar desfavorablemente.

Se recomienda complementar la inspección visual con registros sistemáticos, preferentemente mediante fichas de inspección que permitan documentar las observaciones realizadas y comparar su evolución en el tiempo.

En el caso de las obras de toma y descarga, resulta recomendable realizar inspecciones específicas durante períodos de bajo nivel del embalse, cuando las condiciones permitan observar directamente sectores normalmente sumergidos o de difícil acceso. Asimismo, se recomienda verificar periódicamente la operatividad de válvulas, compuertas y demás dispositivos de control mediante maniobras programadas, a fin de detectar tempranamente problemas de corrosión, obstrucción, agarrotamiento o deterioro mecánico que puedan comprometer su funcionamiento cuando efectivamente sean requeridos.

Como complemento de la inspección visual, el uso de drones equipados con cámaras de alta resolución o sensores térmicos puede facilitar la identificación de filtraciones difusas, anomalías de humedad superficial o sectores con comportamiento anómalo de la vegetación. Esta herramienta resulta particularmente útil en pequeñas presas

rurales por su bajo costo operativo y por facilitar la observación de sectores de difícil acceso.

6.2.2 Monitoreo mediante instrumentación

El monitoreo mediante instrumentación tiene como finalidad complementar la inspección visual mediante la medición de variables relevantes para la interpretación del comportamiento de la presa.

Su implementación responde a los criterios definidos durante el diseño y la construcción de la presa. En esta etapa, su utilidad depende esencialmente de la continuidad en la lectura, el registro y la interpretación de los datos, así como de la calidad de su instalación.

En pequeñas presas, la instrumentación debe ser simple, robusta y acorde a la capacidad de gestión del Titular. Sistemas complejos que no cuenten con un esquema claro de mantenimiento y análisis tienden a quedar fuera de servicio, perdiendo su utilidad.

El monitoreo podrá incluir, según corresponda:

- Medición del nivel del embalse;
- Registro de precipitaciones mediante pluviómetro;
- Medición de caudales de filtración y de drenaje en puntos definidos (drenes, pie de presa u otras salidas identificadas);
- Medición de caudales asociados al cumplimiento de caudal ambiental, cuando corresponda;
- Control de niveles piezométricos en el terraplén o la fundación, en presas de DPA Medio o Alto o en aquellas que dispongan de estos instrumentos;
- Control de asentamientos mediante referencias topográficas.

En el caso de las filtraciones y drenajes, resulta recomendable canalizar los puntos de salida en dispositivos de medición simples, tales como aforadores o vertederos calibrados, que permitan cuantificar su evolución en el tiempo. Asimismo, durante la vida útil de la presa se recomienda identificar y, en caso necesario, instrumentar nuevas filtraciones que pudieran aparecer.

La utilidad de esta información depende fundamentalmente de su continuidad en el tiempo y de su correcta interpretación en relación con las condiciones de operación del embalse y las precipitaciones registradas. La obtención de estos datos requiere el uso de equipos de lectura asociados (sondas, unidades lectoras, recipientes

calibrados u otros dispositivos), cuya disponibilidad, correcto funcionamiento y mantenimiento resultan indispensables para asegurar la validez de las mediciones.

6.2.3 Integración de la información

La vigilancia efectiva de una presa requiere integrar la información proveniente de la inspección visual y del monitoreo instrumental en un análisis conjunto que permita comprender su comportamiento global.

En particular, resulta fundamental correlacionar:

- Las observaciones de filtraciones o humedades con los niveles del embalse y las precipitaciones recientes;
- Las variaciones en los registros piezométricos con los ciclos de llenado y vaciado;
- La evolución de los caudales de filtración y drenaje con los ciclos del embalse;
- Los asentamientos observados con la edad de la presa, la compresibilidad de los materiales y su historia de cargas.

En este análisis resulta útil distinguir entre variables independientes, tales como precipitaciones y nivel del embalse, y variables dependientes, como caudales de filtración, niveles piezométricos o deformaciones. La interpretación del comportamiento de la presa debería basarse en la relación entre ambas.

El análisis también debería centrarse en la identificación de tendencias en el tiempo, más que en la evaluación de valores puntuales. Un aumento progresivo en el caudal de una filtración, una variación sostenida en los niveles piezométricos o la aparición de nuevas zonas húmedas pueden constituir señales de alerta, aun cuando los valores absolutos no resulten, en principio, elevados.

Asimismo, corresponde tener presente que, en condiciones normales, existe un retardo entre las variaciones del nivel del embalse y la respuesta de los caudales de filtración, drenaje o presiones intersticiales. Este comportamiento está asociado al tiempo que insume la propagación del flujo a través del terraplén y la fundación. La correcta interpretación de este retardo resulta fundamental para distinguir entre respuestas esperables del sistema y posibles anomalías.

La integración de esta información permite distinguir entre comportamientos normales —en los que las variables responden de manera consistente al tiempo y a las variaciones del nivel del embalse y a las precipitaciones— y desviaciones que

requieren atención o intervención, constituyendo la base para la definición de criterios de alerta y la adopción de medidas correctivas.

Cuando las desviaciones observadas sean persistentes y no atribuibles a condiciones operativas habituales, puede resultar necesario revisar las hipótesis y parámetros adoptados en los modelos geotécnicos e hidráulicos originales, eventualmente recalibrándolos o reevaluando determinadas condiciones de diseño.

6.3 Programa de monitoreo y control

El programa de monitoreo y control organiza la vigilancia de la presa, definiendo qué observar, con qué frecuencia, cómo registrar la información y bajo qué criterios evaluarla.

El programa debería asegurar que la información generada durante la operación resulte suficiente y confiable para la toma de decisiones, permitiendo identificar tendencias de comportamiento y detectar oportunamente posibles anomalías [\[67\]](#).

Asimismo, el programa debería ajustarse a la categoría de DPA de la presa, a su complejidad y a la capacidad de gestión del Titular, evitando tanto la ausencia de control como la implementación de esquemas innecesariamente complejos.

El programa de monitoreo y control debería documentarse, aun en forma simple, de modo que las tareas de vigilancia puedan sostenerse en el tiempo independientemente de las personas que las ejecuten. La estructura específica del programa, así como las frecuencias, registros o eventuales exigencias de informes y revisiones, podrán adecuarse a los criterios definidos por la Autoridad Competente.

6.3.1 Frecuencias y niveles de control

Las frecuencias de inspección y monitoreo deberían definirse considerando la categoría de DPA, las condiciones de operación del embalse y la ocurrencia de eventos relevantes.

En términos generales, podrán adoptarse los siguientes criterios orientativos:

- En presas de DPA Bajo, se priorizarán inspecciones visuales periódicas, con mayor frecuencia durante períodos de llenado o tras eventos de lluvia significativos;
- En presas de DPA Medio, se incorporará un esquema regular de monitoreo de variables clave, manteniendo registros sistemáticos que permitan evaluar tendencias;

-
- En presas de DPA Alto, el programa debería ser más estructurado, incluyendo lecturas periódicas de la instrumentación disponible, análisis de la información y procedimientos definidos de actuación.

Adicionalmente, se recomienda realizar controles específicos en situaciones particulares, tales como:

- Durante el primer llenado del embalse y los primeros ciclos de operación;
- Luego de eventos de precipitación intensa o crecidas;
- Ante la detección de anomalías en inspecciones previas.

Las frecuencias adoptadas deberían ser realistas y sostenibles en el tiempo, priorizando la continuidad del control por sobre la intensidad inicial del mismo.

6.3.2 Registro y gestión de la información

Se recomienda registrar de manera sistemática toda la información obtenida mediante inspecciones y monitoreo, asegurando su trazabilidad y disponibilidad para análisis posteriores.

Se recomienda utilizar planillas de registro estandarizadas en formato digital (por ejemplo, planillas de cálculo), que permitan registrar la información de manera ordenada y consistente. Estos registros deberían contar con mecanismos de resguardo periódico (copias locales o en la nube), evitando la pérdida de información y asegurando su continuidad en el tiempo. Los registros en papel, cuando se utilicen, se recomienda digitalizarlos posteriormente.

En presas con DPA Medio o Alto, podrán emplearse sistemas específicos de gestión de datos de auscultación, que facilitan el almacenamiento, la trazabilidad y el análisis de la información, siempre que su implementación sea compatible con la capacidad de gestión del Titular.

En cualquier caso, el sistema de registro debería permitir documentar, como mínimo:

- Fecha y condiciones de la inspección o medición;
- Nivel del embalse y precipitaciones recientes;
- Observaciones relevantes de la inspección visual;
- Valores medidos de instrumentación (niveles, caudales de filtración y drenaje, asentamientos, etc.);
- Estado de los instrumentos y dispositivos de medición;
- Acciones realizadas o recomendaciones.

Siempre que sea posible, se recomienda llevar un registro sistemático y frecuente del nivel del embalse y de las precipitaciones, lo cual facilita la interpretación del comportamiento hidráulico de la presa y el análisis de retardos en la respuesta del sistema. La frecuencia de estos registros debería adaptarse a la capacidad de gestión del Titular, priorizando la continuidad en el tiempo por sobre la densidad inicial de datos.

Como práctica recomendable en presas de DPA Medio o Alto, puede adoptarse una bitácora de la presa y de las obras hidráulicas asociadas, organizada con reportes cuatrimestrales: uno al final de la zafra de riego (marzo-abril), uno durante la recarga (agosto-septiembre, cuando el embalse se aproxima al nivel máximo operativo) y uno hacia el final del invierno (noviembre, previo a la planificación de mantenimiento). Esta distribución se ajusta al ciclo productivo y climático uruguayo y facilita la detección de anomalías en los momentos más representativos del año. La Autoridad Competente podrá establecer exigencias específicas sobre este tipo de registros en función del DPA y de las condiciones particulares de cada obra.

6.3.3 Registro de eventos

El programa de monitoreo puede incorporar un registro específico de eventos, complementario a las planillas de inspección y medición, destinado a documentar situaciones no rutinarias que puedan incidir en el comportamiento de la presa o en las condiciones de medición.

Este registro puede incluir, como mínimo: incidentes observados durante inspecciones o monitoreo; anomalías significativas en filtraciones, deformaciones o funcionamiento de obras; eventos hidrológicos relevantes (precipitaciones intensas, crecidas); intervenciones realizadas (mantenimiento, reparaciones, limpieza de drenajes, recalibración de aforadores); modificaciones en la obra o en sus condiciones de operación; y resultados de las acciones adoptadas.

Cada registro debería consignar una descripción técnica del evento, su fecha o período de ocurrencia, su localización dentro de la obra, las condiciones del embalse y las precipitaciones asociadas, así como su evolución y estado final. Cuando el evento implique una intervención, se recomienda documentar las tareas realizadas y los cambios introducidos.

La trazabilidad de esta información resulta esencial para correlacionar cambios observados con acciones realizadas o eventos externos, facilitando la interpretación del comportamiento de la presa y evitando conclusiones erróneas en el análisis de tendencias.

6.3.4 Umbrales y criterios de alerta

El programa de monitoreo debería contemplar criterios que permitan identificar cuándo una observación o medición requiere atención, seguimiento o intervención.

En pequeñas presas, estos criterios se basan principalmente en la identificación de cambios respecto del comportamiento habitual de la obra, más que en la comparación con valores absolutos preestablecidos.

Podrán considerarse como señales de alerta, entre otras:

- Incrementos progresivos en caudales de filtración o drenaje;
- Aparición de nuevas filtraciones o cambios en su ubicación;
- Presencia de turbidez o arrastre de finos en el agua de filtración;
- Variaciones sostenidas en niveles piezométricos no explicadas por la operación del embalse;
- Desarrollo de grietas en el coronamiento o en la parte superior de los taludes;
- Abultamientos o sobre elevaciones en el pie del talud aguas abajo, que puedan indicar procesos de inestabilidad;
- Asentamientos diferenciales o deformaciones apreciables en la geometría de la presa;
- Reducción significativa del ancho del coronamiento por erosión del talud aguas arriba o deterioros localizados;
- Erosiones localizadas o progresivas en taludes, coronamiento o canal del vertedero auxiliar;
- Deterioros en obras anexas que puedan comprometer su funcionamiento;
- Dificultades en la operación de válvulas o compuertas, incluyendo atascamientos, imposibilidad de maniobra o funcionamiento irregular.

La interpretación de estas señales debería realizarse considerando las condiciones de operación del embalse, las precipitaciones recientes y el comportamiento histórico registrado.

En este contexto, resulta fundamental distinguir entre variaciones normales del sistema —incluyendo los efectos de retardo en la respuesta de filtraciones, drenajes y presiones intersticiales frente a cambios en el nivel del embalse— y desviaciones que indiquen una posible evolución desfavorable.

Cuando se identifique una condición anómala, el programa puede prever acciones acordes a su magnitud, tales como:

- Aumento de la frecuencia de inspección y monitoreo;
- Verificación del estado de los sistemas de drenaje;
- Evaluación técnica específica por profesional competente;
- Implementación urgente de medidas correctivas o preventivas.

La definición de estos criterios permite estructurar la respuesta ante situaciones potencialmente críticas, reduciendo la incertidumbre y mejorando la capacidad de gestión de la seguridad de la presa.

6.4 Operación y mantenimiento

La operación y el mantenimiento de la presa constituyen componentes esenciales de la gestión de la seguridad durante su vida útil. Su objetivo es asegurar que la obra funcione conforme a las condiciones previstas en el diseño, manteniendo su integridad estructural y su capacidad hidráulica.

Una operación adecuada permite controlar las condiciones de carga hidráulica del terraplén, mientras que un mantenimiento sistemático previene el deterioro progresivo de los distintos componentes de la presa y sus obras anexas [\[67\]](#).

En pequeñas presas, estas tareas deberían plantearse con criterios prácticos y sostenibles, compatibles con la capacidad de gestión del Titular, priorizando intervenciones simples y oportunas frente a acciones correctivas de mayor complejidad.

Como complemento del programa de monitoreo y control descrito en el apartado anterior, se recomienda que cada presa cuente con un Manual de Operación específico, entendido como documento técnico de la propia obra que consigna en términos operativos:

- el procedimiento de accionamiento de las obras de toma, descarga y, eventualmente, del sistema de bombeo asociado;
- el llenado y vaciado de conducciones a velocidades controladas;
- las maniobras admisibles según el nivel del embalse y las restricciones aplicables al caudal ambiental;
- las rutinas de inspección visual y los registros asociados; y
- las situaciones que ameritan consulta o intervención del proyectista o de la Autoridad Competente.

El Manual de Operación constituye un instrumento vivo, que debería actualizarse ante modificaciones de la obra, cambios en las condiciones de operación o incorporación de nueva información sobre su comportamiento, y que puede servir como antecedente técnico y registro auditable en el marco de las evaluaciones periódicas de seguridad [14; 17].

6.4.1 Operación del embalse

La operación del embalse comprende el manejo de los niveles de agua y de las estructuras de control, de forma de asegurar el cumplimiento de los objetivos del proyecto sin comprometer la seguridad de la presa.

En condiciones normales, el nivel del embalse se regula mediante las obras de toma o descarga, y en situaciones de crecida mediante el vertedero. El operador debería conocer el comportamiento hidráulico del sistema y las cotas características de la presa, incluyendo nivel normal, niveles de operación y nivel máximo previsto.

Se recomienda prestar especial atención a evitar niveles excesivos que reduzcan el borde libre disponible; verificar el correcto funcionamiento del vertedero, manteniendo libre de obstrucciones su canal de aproximación y descarga; operar adecuadamente las estructuras de toma o descarga, evitando maniobras bruscas que puedan generar condiciones desfavorables; y verificar periódicamente la operabilidad de válvulas y compuertas mediante maniobras controladas que permitan asegurar su funcionamiento en condiciones reales.

Se recomienda realizar maniobras periódicas programadas de válvulas, compuertas y demás dispositivos de control, aun cuando no sean requeridos para la operación habitual del embalse. Estas maniobras permiten detectar tempranamente procesos de corrosión, agarrotamiento, obstrucción o deterioro mecánico que podrían comprometer su funcionamiento durante una situación de emergencia o cuando resulten efectivamente necesarios.

Según el fin principal del embalse, la operación se articula en torno a distintos objetivos: el riego (con su ciclo anual característico de llenado y vaciado), el cumplimiento de las descargas ambientales asociadas al caudal ambiental regulado, y eventualmente otros fines de gestión operativa. Los tres subapartados siguientes desarrollan cada uno de estos aspectos.

6.4.1.1 Gestión del riego

En pequeñas presas destinadas principalmente al riego —uso predominante en el medio rural uruguayo— la operación del embalse queda determinada en gran medida

por el ciclo anual de la demanda de agua. Típicamente, el embalse se llena durante la temporada de recarga (otoño-invierno) y se vacía durante la zafra de riego (primavera-verano), en algunos casos hasta niveles muy bajos. Esta dinámica genera ciclos frecuentes de llenado y vaciado que afectan la respuesta del terraplén en términos de filtraciones, drenaje y presiones internas. La operación debería considerar esta respuesta, ajustando las prácticas cuando se identifiquen comportamientos no previstos o tendencias desfavorables para la seguridad. Se recomienda prestar particular atención al descenso rápido del embalse al final de la zafra, dado que puede generar condiciones transitorias de reducción del factor de seguridad del talud aguas arriba (ver Sección 3.5).

6.4.1.2 Gestión de descargas ambientales

Las presas modifican el régimen natural de los cursos de agua aguas abajo. El marco regulatorio nacional, establecido por los Decretos 368/018 y 226/025 [[11](#); [104](#)] en el marco del Código de Aguas, exige el mantenimiento de las condiciones ambientales que determine la normativa vigente para la protección de la calidad de las aguas superficiales y de los ecosistemas acuáticos asociados.

La operación del embalse debería asegurar el cumplimiento de los requerimientos de caudal ambiental establecidos en la autorización correspondiente, utilizando para ello los dispositivos previstos en el proyecto, tales como válvulas, descargas de fondo, sifones u otras obras de descarga adecuadas. Asimismo, el Titular debería registrar las descargas realizadas y reportarlas a la Autoridad Competente con la periodicidad establecida en la reglamentación vigente.

Los criterios para la determinación, monitoreo y control de los caudales ambientales se desarrollan en la Guía Metodológica de Caudales Ambientales elaborada por DINAGUA [[12](#)], la cual complementa el marco regulatorio vigente y constituye la referencia técnica específica en la materia.

Los requerimientos de caudal ambiental pueden condicionar la disponibilidad de agua para los distintos usos previstos del embalse, particularmente durante períodos de bajos aportes naturales o situaciones de sequía. Por esta razón, tanto el diseño como la operación de la presa deberían contemplar desde el inicio las condiciones establecidas por la normativa aplicable y los mecanismos previstos para su cumplimiento.

6.4.1.3 Otros fines de gestión del embalse

Además de los objetivos productivo y ambiental, la gestión del embalse puede requerir maniobras específicas por otros fines operativos o de seguridad, entre las

que se destacan: (i) el descenso preventivo del nivel del embalse ante pronósticos de crecidas extraordinarias, cuando ello sea compatible con los plazos de maniobra disponibles y las capacidades de evacuación de las obras de toma y descarga; (ii) el descenso controlado para la ejecución de inspecciones o mantenimientos en zonas del vaso o en estructuras normalmente sumergidas (obras de toma, dispositivos de descarga); (iii) el control del embalse durante el primer ciclo de operación o tras intervenciones mayores, en coordinación con los protocolos establecidos en la Sección 5.10. Se recomienda evaluar previamente estas maniobras por el profesional responsable y ejecutarlas con los debidos registros, prestando particular atención a la tasa de descenso admisible para no comprometer la estabilidad de los taludes y, cuando corresponda, a los posibles efectos ambientales aguas abajo asociados a la movilización de sedimentos acumulados en el embalse.

6.4.2 Mantenimiento de la presa

El mantenimiento constituye una de las actividades más importantes para preservar la seguridad y funcionalidad de una presa de materiales sueltos durante su vida útil. Muchas de las anomalías observadas en pequeñas presas rurales se originan o agravan por la falta de intervenciones simples y oportunas sobre elementos que inicialmente presentan deterioros menores. Por esta razón, resulta recomendable adoptar una estrategia de mantenimiento preventivo basada en inspecciones periódicas y corrección temprana de los problemas detectados.

Particular atención requiere la conservación de los taludes y de la cobertura vegetal. La presencia de una cobertura herbácea uniforme contribuye a controlar la erosión superficial y facilita las tareas de inspección visual. Por el contrario, el desarrollo de vegetación leñosa o arbórea sobre el terraplén debería evitarse mediante su eliminación temprana, antes de que alcance dimensiones significativas. Los sistemas radiculares de estos ejemplares pueden interferir con drenajes, dificultar las inspecciones y, tras la muerte o remoción de la planta, generar vacíos o trayectorias preferenciales de filtración que favorezcan procesos de erosión interna.

El mantenimiento de la cobertura vegetal puede realizarse mediante corte mecánico, pastoreo controlado u otros procedimientos equivalentes compatibles con las características de la obra. En determinadas condiciones, el uso controlado de ganado bovino puede contribuir al mantenimiento de una cobertura herbácea de baja altura y a la incorporación de materia orgánica al suelo. Cuando se utilicen equipos de corte mecánico, tales como motoguadañas, deberán adoptarse las medidas de seguridad laboral correspondientes y extremarse los cuidados para evitar daños a obras de drenaje, instrumentación, cercos u otras instalaciones asociadas a la presa.

Se recomienda planificar la ejecución de estas tareas en forma periódica e incluir, como mínimo:

- Conservación del coronamiento, asegurando su geometría, drenaje superficial y condiciones de transitabilidad;
- Control de la cobertura vegetal en el talud aguas abajo, promoviendo una cobertura uniforme y evitando el desarrollo de vegetación leñosa;
- Reparación de erosiones superficiales en taludes y coronamiento;
- Mantenimiento de las protecciones del talud aguas arriba, reponiendo materiales desplazados por el oleaje;
- Limpieza y mantenimiento de cunetas, drenes y salidas de drenaje, asegurando su correcto funcionamiento;
- Control del estado del vertedero auxiliar, incluyendo su canal de descarga y la ladera aguas abajo, eliminando obstrucciones y reparando erosiones o deterioros;
- Mantenimiento de las obras anexas de hormigón, verificando la ausencia de fisuras, socavaciones o deterioros estructurales;
- Control y mantenimiento de las obras de toma y descarga, incluyendo la limpieza periódica de rejas, la remoción de vegetación, sedimentos o residuos acumulados, la verificación del estado de válvulas y compuertas y la revisión de la zona de descarga final para detectar posibles procesos de erosión;

Se recomienda realizar estas tareas con una frecuencia acorde a las condiciones de uso y al entorno de la presa, priorizando intervenciones tempranas que eviten la evolución de daños menores hacia situaciones más complejas.

Asimismo, se recomienda conservar permanentemente accesibles las obras de toma, descarga, válvulas, compuertas, drenajes, aforadores e instrumentos de monitoreo, evitando que el crecimiento de la vegetación, la acumulación de sedimentos o el deterioro de los accesos dificulten las tareas de inspección, mantenimiento u operación.

6.4.3 Mantenimiento de la instrumentación

El mantenimiento de la instrumentación es condición necesaria para asegurar la confiabilidad de los datos utilizados en la vigilancia de la presa.

Las tareas de mantenimiento pueden incluir:

-
- Limpieza de dispositivos de medición, tales como reglas de nivel, aforadores y pluviómetros;
 - Verificación del correcto funcionamiento de los instrumentos instalados;
 - Reparación o reposición de dispositivos dañados o fuera de servicio;
 - Protección de los instrumentos frente a acciones externas que puedan afectar su integridad;
 - Mantenimiento de las contenciones, encauzamientos y conducciones que delimitan las áreas de captación de filtraciones y drenajes, asegurando que el flujo se concentre y se mida siempre en condiciones comparables.

La continuidad en el tiempo de las condiciones de captación y medición de filtraciones y drenajes resulta fundamental para la validez del análisis de tendencias. Modificaciones en la geometría de captación, obstrucciones o pérdidas de confinamiento pueden alterar significativamente los caudales medidos, dificultando su interpretación.

Asimismo, se recomienda verificar periódicamente el estado de las escalas de medición asociadas a dispositivos aforadores, en particular en vertederos calibrados, asegurando su legibilidad, estabilidad y correcta referencia respecto del nivel de medición. Cuando se detecten deterioros, deformaciones o pérdida de precisión, se recomienda recambiarlas o recalibrarlas.

En el Anexo correspondiente se presentan criterios orientativos para la disposición y diseño de estos dispositivos de medición.

En todos los casos, se recomienda verificar que los dispositivos permitan obtener datos consistentes y comparables en el tiempo, evitando cambios en las condiciones de medición que dificulten su interpretación.

La instrumentación debería mantenerse operativa en la medida en que su información resulte útil para la gestión de la seguridad; sistemas que no sean leídos, mantenidos o interpretados pierden su valor y pueden inducir a una falsa percepción de control.

6.5 Gestión de emergencias

La gestión de emergencias comprende el conjunto de acciones destinadas a responder de manera organizada y eficaz ante situaciones que puedan comprometer la seguridad de la presa y generar consecuencias aguas abajo en caso de rotura. En pequeñas presas, estas situaciones suelen asociarse a eventos hidrológicos

extremos, fallas en las obras de descarga o a la evolución de anomalías no detectadas o no atendidas oportunamente.

Ante la presencia de situaciones de riesgo de evolución incierta, la preparación previa resulta fundamental para actuar en dos frentes simultáneos: por un lado, implementar acciones tendientes a evitar la falla de la presa; por otro, reducir las consecuencias en caso de que la falla resulte inevitable. Estas consecuencias, aun en presas de DPA Bajo, implican pérdidas ambientales y económicas para el Titular y eventualmente para terceros.

La gestión de emergencias debería plantearse con criterios prácticos, claramente definidos y compatibles con la capacidad de respuesta del Titular, priorizando la simplicidad y la claridad de los procedimientos.

6.5.1 Preparación y planificación para emergencias

La preparación y planificación para emergencias comprende el conjunto de medidas destinadas a facilitar una respuesta organizada y eficaz ante situaciones que puedan comprometer la seguridad de la presa o generar consecuencias aguas abajo. Su objetivo es definir de manera anticipada las acciones a realizar, los responsables, los medios disponibles y los mecanismos de comunicación necesarios para actuar en forma rápida y coordinada.

La preparación para situaciones de emergencia constituye un componente recomendable de la gestión de la seguridad de toda presa, independientemente de su categoría de DPA. No obstante, el grado de formalización de dicha preparación debería resultar proporcional a las consecuencias potenciales de una eventual falla, a la complejidad de la obra y a los requerimientos establecidos por la Autoridad Competente. En consecuencia, mientras que en determinadas presas puede resultar apropiada la elaboración de un Plan de Acción Durante Emergencias (PADE) formal y detallado, en otras puede ser suficiente la adopción de procedimientos simplificados de actuación, integrados a la documentación operativa de la obra.

6.5.2 Plan de Acción Durante Emergencias (PADE)

Cuando se adopte un Plan de Acción Durante Emergencias (PADE), su alcance y nivel de detalle deberían ser proporcionales a la categoría de DPA de la presa, a las consecuencias potenciales de una eventual falla y a la complejidad de la obra. En presas de DPA Bajo podrá resultar suficiente la definición de procedimientos simplificados de actuación, identificación de responsables, medios de contacto y reconocimiento preliminar de las áreas potencialmente afectadas. En presas de DPA

Medio y Alto podrán requerirse análisis más detallados, incluyendo estudios específicos de inundación, delimitación del Área Potencial de Inundación (API) para distintos escenarios [105] y otros elementos de apoyo a la gestión de emergencias [106].

En pequeñas presas, el PADE puede consistir en un documento breve y operativo, que incluya como mínimo:

- Identificación de situaciones que pueden dar lugar a una emergencia, tales como crecidas excepcionales, obstrucción del vertedero, incremento anómalo de filtraciones o evidencias de inestabilidad;
- Definición de niveles de alerta o situaciones de atención creciente, en función de la evolución de los indicadores observados;
- Procedimientos de actuación, incluyendo maniobras operativas posibles (descargas, control de niveles) y medidas preventivas;
- Identificación y medios de contacto de responsables dentro de la organización del Titular;
- Identificación y medios de contacto de actores externos relevantes (CECOED, servicios de emergencia, autoridades locales y, cuando corresponda, vecinos aguas abajo);
- Identificación y medios de contacto de recursos disponibles y de empresas que puedan prestar servicios (maquinaria de movimiento de suelos, provisión de materiales, equipos de rescate, etc.).

Se recomienda coordinar previamente con los organismos intervinientes la identificación y los medios de contacto de actores externos al Titular (SINAE, CECOED, servicios de emergencia, autoridades locales, vecinos aguas abajo). En el ámbito nacional, el SINAE actúa a nivel central y el CECOED de cada departamento coordina la respuesta operativa con los servicios locales (Policía, Bomberos, OSE, ANTEL, servicios de salud). La articulación previa con el CECOED correspondiente permite que las acciones previstas en el PADE resulten consistentes con los protocolos de emergencia departamentales y que los contactos designados estén reconocidos formalmente por la estructura institucional de emergencia.

Para la elaboración de un PADE resulta necesario identificar las áreas potencialmente afectadas aguas abajo de la presa ante escenarios de emergencia compatibles con las consecuencias potenciales consideradas. A diferencia del análisis realizado para la clasificación según el DPA, cuyo objetivo principal es identificar la existencia de

vulnerabilidades potencialmente afectadas, el análisis asociado al PADE tiene una finalidad eminentemente operativa, orientada a apoyar la gestión de la emergencia. En consecuencia, según las características de la presa y de las consecuencias potenciales involucradas, podrá requerirse información adicional sobre la propagación de la onda de inundación en distintos escenarios, incluyendo tiempos de llegada, profundidades esperadas y sectores prioritarios para el aviso o la evacuación. Para ello podrán emplearse análisis hidráulicos de complejidad acorde a las características de la presa, la topografía del valle y las consecuencias potenciales asociadas, utilizando modelos unidimensionales, bidimensionales u otros procedimientos técnicamente justificados.

Dentro del API, la Zona de Auto Salvamento (ZAS) —denominación adoptada en la regulación brasileña— corresponde al área más próxima a la presa, donde los tiempos de llegada de la onda son tan breves que la autoprotección por parte de los residentes es la única medida viable, siendo inviable la intervención de los servicios de emergencia. La identificación de la ZAS resulta relevante porque permite definir qué vecinos deberían ser contactados prioritariamente y mediante qué medios.

La decisión de activar el PADE podrá basarse en dos tipos de umbrales complementarios: (i) variables cuantitativas predefinidas en el propio PADE — por ejemplo, nivel del embalse superior a una cota crítica, caudal de filtración que supera valores de referencia, aparición de turbidez en drenajes, desplazamientos o fisuras observados por instrumentación —, y (ii) el juicio técnico del operador o del profesional responsable ante situaciones no anticipadas en el plan, cuando la combinación de observaciones indique un riesgo inminente aun sin haber alcanzado un umbral cuantitativo.

Las exigencias concretas sobre preparación para emergencias, elaboración de PADE, delimitación del API, identificación de ZAS, modelación hidráulica y demás elementos asociados podrán ser establecidas por la Autoridad Competente en función de la categoría de DPA de la presa y de las condiciones particulares de cada obra. En consecuencia, el nivel de análisis y documentación requerido podrá variar significativamente entre distintas presas. Como referencia técnica para el desarrollo de estos instrumentos pueden considerarse FEMA P-64 [106], ICOLD Bulletin 154 [14], las guías de la Canadian Dam Association [107], la normativa y guías técnicas españolas sobre seguridad de presas y demás documentos internacionales reconocidos en la materia. En particular, en presas de DPA Bajo estas referencias internacionales constituyen orientación de buenas prácticas y no implican exigir

alcances de análisis, modelación o documentación propios de presas de mayor consecuencia.

Se recomienda revisar periódicamente el PADE y actualizarlo cuando se produzcan modificaciones relevantes en la presa, en las condiciones de operación, en los contactos de emergencia o en la ocupación del área potencialmente afectada aguas abajo. Asimismo, resulta conveniente verificar periódicamente la vigencia y aplicabilidad de los procedimientos previstos mediante ejercicios, simulacros o revisiones documentales acordes a la complejidad de la obra.

En el contexto de pequeñas presas rurales uruguayas, las situaciones que pueden derivar en una emergencia suelen evolucionar en escalas de tiempo relativamente breves y, en muchos casos, con recursos humanos y operativos limitados. Por ello, el PADE debería orientarse principalmente a facilitar la detección temprana de anomalías, la rápida comunicación entre el operador, el Titular y los responsables técnicos, y la adopción oportuna de medidas de respuesta previamente definidas, evitando procedimientos excesivamente complejos o dependientes de múltiples instancias de decisión.

6.6 Evaluación periódica de la seguridad

6.6.1 Niveles de evaluación periódica

La evaluación periódica de la seguridad tiene por objeto analizar, en forma integrada, el comportamiento de la presa a lo largo del tiempo, a partir de la información generada por la vigilancia, la operación y el mantenimiento, y de los antecedentes acumulados a lo largo de su ciclo de vida, según se describe en la Sección 1.4.1 de este Manual. Esta instancia permite pasar de la observación operativa a una interpretación integral del comportamiento de la obra, identificando tendencias, confirmando la validez de los supuestos de diseño y detectando posibles desviaciones que requieran acciones correctivas o preventivas.

La práctica internacional reconoce que la profundidad, la frecuencia, el alcance y la independencia de las revisiones de seguridad deberían ser proporcionales al riesgo asociado a cada presa, a su complejidad y a su antigüedad [25; 14; 108; 17]. En el marco de este Manual, ese riesgo se evalúa fundamentalmente a través del DPA. Sobre esa base, se propone organizar la evaluación periódica de la seguridad en tres niveles de creciente profundidad.

En los tres niveles, la responsabilidad de producir la ingeniería —es decir, los estudios, análisis e informes técnicos que sustentan la evaluación— recae sobre el

Titular, quien contrata para ello a profesionales con la calificación adecuada, inscriptos en el Registro de Técnicos Profesionales de Aguas [[109](#)]. El régimen administrativo y económico asociado a estas revisiones en los Niveles 2 y 3 será el que establezca la Autoridad Competente preservando en todos los casos la independencia técnica de los revisores respecto del Titular.

Los tres niveles propuestos son los siguientes:

- Nivel 1 — Evaluación rutinaria del comportamiento. Aplicable a todas las presas, independientemente de su DPA. La ingeniería contratada por el Titular elabora un Informe de estado y comportamiento, con frecuencia recomendada anual, que sintetiza la información generada durante el período por la vigilancia, la operación y el mantenimiento. No se prevé una instancia adicional de revisión independiente: el producto del Titular se presenta directamente ante la Autoridad Competente como parte del seguimiento regular. El alcance, contenido mínimo y modalidad del Informe se desarrollan en la Sección 6.6.1.
- Nivel 2 — Revisión periódica de seguridad. Recomendado para presas de DPA Medio y Alto, y en cualquier caso para aquellas en que el Nivel 1 haya identificado comportamientos anómalos o tendencias desfavorables. La ingeniería contratada por el Titular produce un informe de revisión de seguridad de mayor profundidad técnica que el Nivel 1, que es presentado a profesionales designados conforme al mecanismo que establezca la Autoridad Competente, externos al Titular y con independencia técnica respecto de él. Estos profesionales inspeccionan las obras, consideran la documentación presentada y verifican especialmente el comportamiento de la presa respecto de los principales modos de fallo identificados para la obra, tomando como referencia las tipologías y mecanismos descritos en el Anexo B. Elaboran posteriormente un informe propio con su evaluación, conclusiones y recomendaciones, dirigido al Titular y a la Autoridad Competente. Esta separación entre operador y revisor independiente es práctica internacional consolidada en seguridad de presas [[72](#); [17](#); [14](#); [19](#)]. Para el régimen periódico subsiguiente, este Manual recomienda una frecuencia entre tres y cinco años, valor consistente con los plazos de referencia internacionales —seis años en el USBR [[72](#)], cinco años para presas de categorías A y B (DPA Alto y Medio) según la normativa española [[108](#)], o periodicidades por clase según la ley brasileña [[110](#)]—.
- Nivel 3 — Revisión integral por panel de expertos independientes. Recomendado principalmente para presas de DPA Alto, así como para aquellas que hayan sido objeto de un evento significativo, hayan sufrido modificaciones estructurales relevantes, o lleven períodos prolongados de operación sin una revisión

integral previa. La ingeniería contratada por el Titular produce los estudios técnicos de una revisión integral —que abarca también los criterios de proyecto y la adaptación de la presa a las condiciones externas previsibles, incluyendo el cambio climático [73; 28]— y los presenta a un panel de dos o más expertos independientes, eventualmente internacionales, designados conforme al mecanismo que establezca la Autoridad Competente. El panel inspecciona las obras, considera la documentación disponible, analiza el comportamiento histórico de la presa y evalúa cualitativamente los principales riesgos y modos de fallo potenciales, deliberando de manera colegiada sobre la adecuación de las medidas de diseño, operación, mantenimiento y vigilancia implementadas. Como resultado, emite un informe panel con su evaluación, conclusiones y recomendaciones, dirigido al Titular y a la Autoridad Competente. La conformación colegiada y la independencia plena del panel son rasgos distintivos del nivel y se alinean con la práctica internacional para presas de alto riesgo [17; 14; 100]. Luego de esta evaluación inicial, este Manual recomienda que las revisiones periódicas se realicen con una frecuencia entre cinco y diez años, complementadas por revisiones extraordinarias ante eventos significativos.

Las auditorías de Niveles 2 y 3 no se limitan a la fase de operación: acompañan a la presa a lo largo de su ciclo de vida. La práctica internacional reconoce que el proyecto, la construcción y el primer llenado son momentos de mayor riesgo y requieren una vigilancia técnica de mayor intensidad que la fase de operación normal [25; 14]. En consecuencia, las auditorías se aplican en oportunidad de:

- la presentación del proyecto a la DINAGUA junto con la solicitud de derechos de agua para autorizar el inicio de la construcción, o en oportunidad de la renovación de dichos derechos;
- los hitos relevantes durante la construcción de la obra y en torno al período de primer llenado;
- los primeros años de operación —típicamente los tres primeros años posteriores al primer llenado—, con frecuencias decrecientes;
- el régimen periódico subsiguiente, con la frecuencia que corresponda a cada nivel.

La fijación concreta de las frecuencias de cada auditoría en cada fase del ciclo de vida, los umbrales de DPA que activan cada nivel, el alcance específico, la modalidad de designación de los revisores y el régimen administrativo de su relación con el Titular quedarán a criterio de la Autoridad Competente, mediante normativa específica o en cada caso, tomando como referencia los marcos internacionales citados.

La eficacia del conjunto de la gestión de la seguridad de la presa depende de la continuidad y coherencia entre las actividades de vigilancia, monitoreo, operación y mantenimiento, y los tres niveles de evaluación periódica descritos.

6.6.2 Informe de estado y comportamiento

El Nivel 1 aplica a todas las presas, independientemente de su DPA, y constituye el componente regular de evaluación periódica de la seguridad que podría ser exigible al universo de pequeñas presas cubiertas por este Manual. La ingeniería necesaria es contratada por el Titular y ejecutada por profesionales con calificación adecuada, inscriptos en el Registro de Técnicos Profesionales de Aguas [[109](#)].

El producto principal del Nivel 1 es un Informe de estado y comportamiento, que sintetiza la información relevante generada durante el período y debería incluir como mínimo:

- Descripción de las condiciones de operación del embalse;
- Estado de conservación de las obras y síntesis de las inspecciones visuales realizadas;
- Análisis de los registros de instrumentación disponibles;
- Identificación de tendencias en filtraciones, drenajes, niveles y asentamientos;
- Registro de eventos relevantes e intervenciones realizadas;
- Evaluación general del comportamiento de la presa.

El informe debería centrarse en la interpretación de la información —evitando la mera acumulación de datos— y destacar cualquier cambio significativo respecto de períodos anteriores.

Se recomienda que el Informe de estado y comportamiento se elabore con frecuencia anual, en las fechas que establezca la Autoridad Competente mediante normativa específica.

7 PUESTA FUERA DE SERVICIO

7.1 Introducción

La puesta fuera de servicio de una presa comprende el conjunto de acciones destinadas a eliminar o reducir a niveles aceptables los riesgos asociados a su permanencia, cuando ésta deja de cumplir su función o no puede operar en condiciones de seguridad adecuadas.

Las alternativas posibles incluyen desde intervenciones parciales hasta la remoción total de la presa, seleccionándose en función de criterios técnicos, condiciones del sitio y consecuencias potenciales aguas abajo.

A diferencia del diseño de una obra nueva, estas intervenciones se realizan sobre estructuras existentes, con niveles variables de deterioro e incertidumbre, lo que requiere un enfoque prudente, progresivo y basado en la observación.

En la experiencia internacional, la puesta fuera de servicio de presas constituye hoy una práctica técnica consolidada. Estados Unidos registra ya más de 2.000 presas removidas en las últimas décadas, y Europa ha avanzado en programas equivalentes, en general orientados por consideraciones de seguridad, obsolescencia funcional, restauración fluvial y continuidad ecológica.

Este capítulo completa el ciclo de vida de la presa desarrollado en el presente manual, abordando la etapa final de su existencia. Así como el diseño, la construcción y la operación buscan asegurar su desempeño en condiciones seguras, la puesta fuera de servicio debería garantizar que la obra deje de representar un riesgo para las personas, los bienes y el ambiente.

Cabe tener presente que, en el ámbito nacional, la puesta fuera de servicio de una presa involucra la coordinación de varias autoridades: DINAGUA en lo relativo al recurso hídrico, DINACEA en lo relativo a la calidad ambiental y a las autorizaciones ambientales aplicables, y eventualmente otras autoridades según el destino final del predio y del cauce (ordenamiento territorial, autoridades departamentales). La gestión de los sedimentos acumulados en el embalse y la restauración del sitio son aspectos con fuerte componente ambiental que requieren tratamiento específico.

7.2 Situaciones que justifican su análisis

A efectos prácticos, corresponde analizar la puesta fuera de servicio cuando se verifique una o varias de las siguientes situaciones, en línea con criterios utilizados en guías internacionales de desmantelamiento de presas [[111](#); [112](#)]:

a) Deterioro estructural significativo.

Presencia de filtraciones no controladas, erosión interna, deformaciones o daños que comprometan la estabilidad.

b) Desempeño hidráulico insuficiente.

Incapacidad del vertedero para evacuar en forma segura las crecidas de diseño.

c) Cambios en las condiciones aguas abajo.

Incremento de la exposición de personas, bienes, infraestructura o ambiente.

d) Pérdida de funcionalidad.

Cese del uso original o ausencia de beneficios asociados a la obra.

e) Condiciones legales o ambientales.

Incompatibilidad con permisos vigentes, normativa ambiental o restricciones territoriales. Se incluye también el vencimiento del plazo del derecho de aprovechamiento de agua otorgado oportunamente por la Autoridad Competente, cuando no corresponda o no se gestione su renovación.

f) Costos de rehabilitación desproporcionados.

Cuando la intervención necesaria para alcanzar condiciones aceptables de seguridad resulta inviable técnica o económicamente.

g) Incertidumbre elevada.

Falta de información o imposibilidad de caracterizar adecuadamente el comportamiento de la presa.

7.3 Evaluación previa (inspección de campo)

La evaluación debería basarse en una inspección sistemática que permita identificar condiciones críticas y orientar la definición de alternativas.

Aspectos mínimos a verificar:

- estado del terraplén: erosiones, asentamientos, grietas
- filtraciones: ubicación, caudal, arrastre de finos
- vertedero: capacidad, obstrucciones, ancho insuficiente
- resguardo: altura libre respecto al punto más bajo del coronamiento
- conducciones: estado, evidencias de filtración a lo largo de su traza
- condiciones del embalse: sedimentación, estabilidad de márgenes

- elementos aguas abajo: viviendas, infraestructura, actividades productivas

Se recomienda prestar especial atención a la presencia y proximidad de elementos vulnerables aguas abajo, en relación con el nivel de daño potencial (DPA).

7.4 Definición de la alternativa

Corresponde comparar, con criterio técnico, si resulta más conveniente intervenir la presa para reducir la probabilidad de falla, adoptar medidas para reducir las consecuencias potenciales de una eventual rotura, o ponerla fuera de servicio en forma parcial o total. Este enfoque se alinea con metodologías modernas de análisis y gestión del riesgo en seguridad de presas [[16](#); [111, Cap. 3](#)].

En algunos casos, la puesta fuera de servicio puede implicar la remoción completa del terraplén y la restitución del cauce natural.



Figura 7-1. Ejemplo de eliminación total del terraplén en Honey Suckle Creek Reservoir (Australia): condición original (izquierda) y posterior a la remoción de la presa (derecha) [[113, Fig. 6](#)].

La alternativa adoptada debería considerar:

a) Nivel de daño potencial (DPA).

Las soluciones deberían ser coherentes con las consecuencias potenciales aguas abajo.

b) Condición de la presa.

Estructuras con deterioro avanzado o comportamiento incierto requieren soluciones más robustas.

c) Tratamiento de conducciones.

Las conducciones constituyen un elemento crítico por su potencial de generar filtraciones concentradas. Su tratamiento debería definirse explícitamente, pudiendo incluir:

-
- eliminación completa
 - sellado estructural
 - rehabilitación o reemplazo

La solución adoptada debería eliminar trayectorias de flujo no controladas [[79](#); [111](#)].

d) Condiciones hidráulicas.

La configuración resultante debería permitir evacuar en forma segura las crecidas previsibles.

e) Estabilidad de la solución.

La geometría final debería ser compatible con el régimen hidráulico y resistente a procesos erosivos.

f) Sedimentos.

Los sedimentos acumulados en el embalse pueden influir significativamente en la viabilidad y los impactos de la intervención. Corresponde evaluar si su movilización durante el desembalse, la apertura de brechas o la remoción de la presa puede afectar la calidad del agua o los ambientes acuáticos aguas abajo.

La selección de la alternativa debería considerar, además de los aspectos técnicos, la viabilidad constructiva, los costos y los impactos ambientales, en línea con los criterios generales de planificación de procesos de desmantelamiento de presas [[113](#); [112](#)].

La decisión debería orientarse a lograr una condición final en la que el sistema resultante no genere riesgos no controlados, aun frente a eventos hidrológicos extremos.

7.5 Configuración de la solución

Las soluciones más habituales incluyen:

- generación de brechas en el terraplén
- rebaje del coronamiento
- remoción parcial o total de la presa

En el caso de brechas, la geometría es determinante para su estabilidad.

Las secciones amplias, con taludes tendidos y transición suave, permiten un flujo distribuido y estable. Por el contrario, las secciones angostas o con cambios bruscos de geometría tienden a concentrar el flujo y evolucionar por erosión regresiva.

La Figura 7-2 ilustra la diferencia entre configuraciones estables e inestables de brechas, destacando la importancia de evitar secciones angostas y taludes empinados.

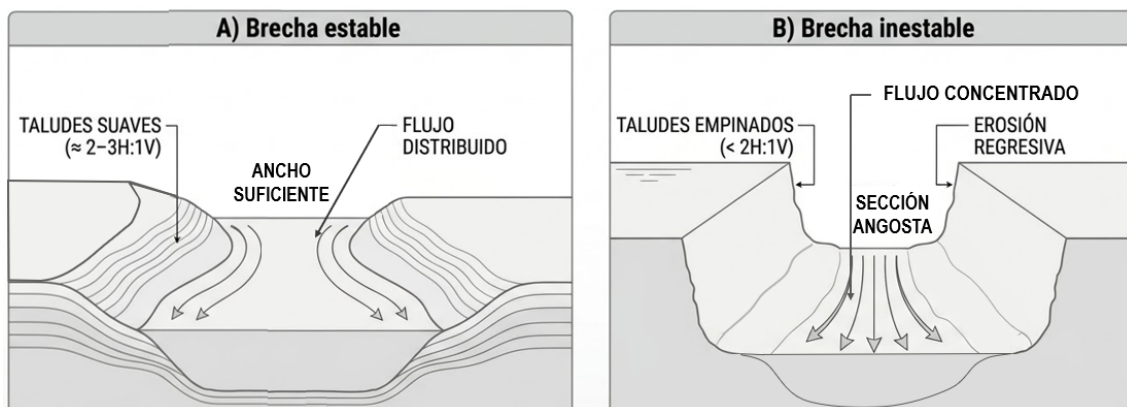


Figura 7-2. Comparación conceptual entre brecha estable (A) e inestable (B): geometrías amplias y taludes tendidos favorecen flujo distribuido, mientras secciones angostas concentran el flujo y promueven erosión regresiva.

La sección debería ser suficiente para evacuar los caudales previsibles sin generar concentraciones de flujo, y los taludes deberían ser compatibles con la estabilidad del material.

Particular atención debería prestarse a la condición final del vaso del embalse cuando los préstamos originales utilizados durante la construcción de la presa se hayan ubicado dentro del vaso. Al retirar la presa o al generarse la brecha, estas áreas quedan expuestas a la acción erosiva del agua de lluvia y del escurrimiento residual del cauce, con riesgo de procesos erosivos significativos, particularmente en zonas con pendientes pronunciadas o suelos dispersivos. La solución adoptada debería prever el acondicionamiento geomorfológico de estas áreas, con suavizado de taludes, restitución de pendientes suaves hacia el cauce natural y revegetación con especies apropiadas al ambiente local. Cuando resulte viable, parte del material del terraplén removido puede emplearse como relleno de las zonas de préstamo, cerrando el ciclo del recurso suelo y reduciendo la superficie expuesta a procesos erosivos [[114](#); [115](#)].

7.6 Ejecución de las obras

La ejecución debería desarrollarse de forma progresiva y controlada, evitando condiciones transitorias de inestabilidad.

En términos generales, la secuencia comprende:

- descenso controlado del nivel del embalse

-
- habilitación de una descarga segura
 - intervención sobre conducciones
 - apertura o modificación del terraplén
 - conformación de la sección final

Se recomienda evitar iniciar excavaciones sin haber reducido previamente el nivel del embalse o sin contar con una vía de evacuación controlada.

Durante la ejecución se recomienda prestar especial atención a:

- comportamiento del flujo en la zona intervenida
- aparición de procesos erosivos o inestabilidades
- interacción con conducciones u otras estructuras
- movilización de sedimentos acumulados, con afectación temporal de la calidad del agua aguas abajo (turbidez, materia orgánica, ecosistemas acuáticos), particularmente durante las etapas de desembalse y apertura de brechas.

Las conducciones deberían ser tratadas antes o durante la intervención, evitando su exposición o la generación de caminos preferenciales de filtración [79].

La ejecución debería poder ajustarse en función de las condiciones observadas en obra.

7.7 Seguimiento posterior

Una vez finalizada la intervención, se recomienda verificar el comportamiento de la solución adoptada.

En particular:

- estabilidad de la sección resultante
- ausencia de erosión regresiva o socavaciones
- correcto desarrollo del flujo
- comportamiento de estructuras remanentes
- evolución de la estabilización superficial

El monitoreo posterior constituye una etapa fundamental para verificar el desempeño de la solución adoptada y detectar procesos de inestabilidad no previstos.

Se recomienda mantener el monitoreo posterior hasta verificar que el sistema presenta un comportamiento estable y previsible frente a las condiciones hidráulicas relevantes [[111](#); [112](#)].

Como criterio orientativo, el monitoreo posterior puede mantenerse con frecuencia anual durante los primeros tres a cinco años, y posteriormente reducirse a una frecuencia menor (típicamente cada tres años) una vez verificada la estabilización del sistema. La responsabilidad del seguimiento recae en el Titular —o en sus sucesores en el predio— hasta que la Autoridad Competente, conforme a la normativa aplicable, determine la finalización del período de vigilancia post-puesta fuera de servicio.

ANEXOS

Anexo A CLASIFICACIÓN DE PRESAS POR DAÑO POTENCIAL ASOCIADO (DPA)

A.1 Objeto, alcance y principios generales

El presente Anexo desarrolla los criterios generales para la clasificación de presas según su Daño Potencial Asociado (DPA), aplicables principalmente a pequeñas presas de materiales sueltos destinadas al almacenamiento de agua para riego y otros usos rurales.

La clasificación por DPA constituye una herramienta técnica orientada a estimar las consecuencias potenciales que podría generar una eventual falla o mal funcionamiento de una presa, permitiendo graduar las exigencias de diseño, construcción, operación, vigilancia y gestión de la seguridad de acuerdo con la magnitud de dichas consecuencias.

El concepto de DPA se basa exclusivamente en la evaluación de consecuencias potenciales y no considera la probabilidad de ocurrencia de la falla. Por esta razón, no debe confundirse con el concepto de riesgo. Mientras que el riesgo incorpora simultáneamente la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de las consecuencias, el DPA constituye una clasificación basada únicamente en esta última dimensión [[15](#); [16](#)].

En consecuencia, una presa en excelente estado de conservación puede corresponder a una categoría de DPA Alto si las consecuencias potenciales de una falla resultaran significativas. Del mismo modo, una presa con deficiencias constructivas o de mantenimiento podría corresponder a DPA Bajo si las consecuencias potenciales aguas abajo fueran limitadas. Ambas dimensiones deben analizarse mediante herramientas técnicas diferentes y complementarias.

La clasificación por DPA requiere identificar el Área Potencial de Inundación (API) asociada a un escenario de falla, así como los elementos vulnerables que podrían resultar afectados dentro de dicha área y, cuando corresponda, otras consecuencias derivadas de la pérdida de capacidad de almacenamiento o regulación del embalse. Entre ellas pueden incluirse personas, infraestructuras, servicios esenciales, actividades productivas, recursos ambientales, afectaciones al abastecimiento de agua, al riego y otros usos dependientes del recurso hídrico.

La evaluación debería considerar el concepto de daño incremental, entendido como la diferencia entre las consecuencias producidas por la falla de la presa y aquellas

que se producirían por el paso de una crecida natural equivalente sin rotura de la obra. Este criterio permite concentrar el análisis en los efectos atribuibles a la presencia de la presa y constituye una práctica ampliamente utilizada en la evaluación de consecuencias potenciales.

Como principio general, la clasificación debería realizarse utilizando información razonablemente representativa de las condiciones existentes y aplicando criterios prudentes en la interpretación de los resultados. Cuando existan incertidumbres relevantes respecto de la extensión del área afectada o de la magnitud de las consecuencias potenciales, corresponde adoptar criterios conservadores o profundizar los estudios realizados hasta alcanzar un nivel de certeza compatible con la importancia de la decisión.

La clasificación resultante constituye un instrumento de ordenamiento inicial y de apoyo a la toma de decisiones. A partir de ella, la Autoridad Competente podrá graduar exigencias técnicas y administrativas, mientras que los titulares de las presas podrán orientar de manera más eficiente las actividades de diseño, construcción, operación, vigilancia, mantenimiento y mejora de sus obras.

A nivel regional existen antecedentes de clasificación inicial y análisis de riesgo de pequeñas presas que resultan de interés como contexto. A nivel nacional, se han desarrollado análisis de riesgo de presas de riego en Uruguay [\[116\]](#). A nivel regional, la Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) ha desarrollado una metodología simplificada de clasificación inicial en el marco de la Política Nacional de Segurança de Barragens de Brasil [\[117\]](#), de particular interés por la similitud hidrológica y productiva con el estado de Río Grande do Sul. Estos antecedentes se mencionan únicamente a título de contexto y no constituyen la metodología adoptada en el presente Manual.

A.2 Determinación del Área Potencial de Inundación y valoración de consecuencias

La determinación del Área Potencial de Inundación (API) constituye uno de los insumos fundamentales para la clasificación de una presa según su Daño Potencial Asociado. Su objetivo es identificar las áreas que podrían verse afectadas por una eventual rotura o mal funcionamiento de la presa, permitiendo evaluar las consecuencias potenciales sobre personas, bienes, actividades y recursos expuestos.

La delimitación del API puede realizarse mediante distintos procedimientos técnicos, cuyo nivel de complejidad debería resultar consistente con las características de la

obra, las condiciones topográficas e hidráulicas del valle, el objetivo del estudio y la importancia de las consecuencias potenciales involucradas.

Entre las herramientas que pueden emplearse para este propósito se encuentran la interpretación de curvas de nivel, modelos digitales de terreno e imágenes satelitales; formulaciones empíricas derivadas de roturas históricas de presas; modelos hidráulicos unidimensionales o bidimensionales; metodologías desarrolladas en guías internacionales reconocidas; y otros procedimientos técnicamente justificados.

La selección de la metodología corresponde al proyectista, quien deberá justificar su adecuación al caso analizado y al nivel de detalle requerido para sustentar la clasificación propuesta. En términos generales, el nivel de detalle de los estudios debería resultar consistente con la complejidad del caso y con la necesidad de sustentar adecuadamente la clasificación propuesta. No obstante, cuando la presencia de personas o de elementos claramente vulnerables permita concluir de manera evidente que la presa corresponde a una categoría elevada de DPA, no resulta necesario desarrollar estudios de mayor complejidad únicamente para confirmar dicha clasificación.

En aquellos casos en que existan embalses, presas u otras estructuras de regulación ubicadas aguas abajo, corresponde evaluar razonablemente la posible influencia de estas obras sobre la propagación de la onda de inundación y sobre las consecuencias potenciales resultantes. Dependiendo de las características del sistema, estas estructuras podrán atenuar, modificar o amplificar los efectos de una eventual falla.

Una vez delimitada el Área Potencial de Inundación, corresponde identificar los elementos vulnerables potencialmente expuestos. Esta evaluación debería considerar tanto las consecuencias directas asociadas a la inundación como aquellas derivadas de la interrupción de servicios o usos dependientes del embalse.

Entre los aspectos que normalmente corresponde considerar se incluyen:

- la posible afectación de personas presentes de forma permanente o transitoria dentro del área potencialmente afectada, así como de las viviendas asociadas;
- la afectación de establecimientos productivos, edificaciones de uso público e infraestructuras de transporte;
- la afectación de servicios esenciales tales como abastecimiento de agua potable, energía, telecomunicaciones u otros servicios críticos;
- los impactos sobre actividades económicas relevantes ubicadas dentro del área potencialmente afectada por la inundación;

- la afectación de áreas ambientalmente sensibles, ecosistemas de interés o recursos naturales protegidos;
- y las consecuencias derivadas de la pérdida de la capacidad de almacenamiento, regulación o abastecimiento asociada al embalse.

La valoración de estos elementos requiere necesariamente el ejercicio del criterio profesional. Por esta razón, la clasificación por DPA no debe interpretarse como el resultado de una fórmula única ni de un procedimiento estrictamente automático, sino como una evaluación técnica integral de las consecuencias potenciales asociadas a la obra.

Como orientación para pequeñas presas rurales, la Tabla A-1 presenta ejemplos de niveles crecientes de consecuencias potenciales en tres dimensiones habitualmente consideradas en la evaluación del DPA: daños ambientales, daños socioeconómicos o productivos y afectación de servicios esenciales. Estos criterios tienen carácter meramente orientativo y no sustituyen el juicio profesional ni los criterios que pueda establecer la Autoridad Competente para la clasificación de una presa determinada.

Nivel	Daños ambientales	Daños socioeconómicos / productivos	Servicios esenciales
0	Área degradada o sin valor ambiental relevante. Daños equivalentes a eventos frecuentes	Sin afectación relevante	Sin afectación
1	Ambientes rurales o naturales sin protección específica	Área rural con uso productivo sin ocupación permanente, incluyendo producción pecuaria extensiva. Caminos secundarios, accesos locales, instalaciones rurales menores.	Afectación indirecta o parcial de servicios
2	Áreas con protección ambiental específica, alto valor ecológico, o áreas comprendidas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) o de monte nativo según la Ley 15.939 de Bosques.	Infraestructura o actividad productiva cuya afectación tenga impacto territorial relevante, incluyendo concentraciones significativas de ganado (tambos, feedlots, establecimientos de cría intensiva) o cultivos bajo riego permanente.	Afectación directa de servicios esenciales

Tabla A-1. Ejemplos orientativos de consecuencias potenciales para pequeñas presas rurales.

A.3 Categorías de Daño Potencial Asociado y orientación para la clasificación

La clasificación por Daño Potencial Asociado se estructura en tres categorías: DPA Bajo, DPA Medio y DPA Alto. La asignación de una categoría determinada debería surgir de la evaluación integral de las consecuencias potenciales asociadas a una eventual falla o mal funcionamiento de la presa, considerando tanto la inundación aguas abajo como otras afectaciones relevantes derivadas de la pérdida de funcionalidad del embalse.

A.3.1 DPA Bajo

Corresponde a presas cuya falla o mal funcionamiento no produciría pérdida potencial de vidas humanas y cuyas consecuencias sobre infraestructuras, servicios, actividades económicas o recursos ambientales resultarían limitadas y de alcance local.

En esta categoría suelen encontrarse presas ubicadas en áreas rurales con escasa ocupación, sin presencia habitual de personas en el área potencialmente afectada y sin infraestructuras o servicios cuya afectación pueda generar consecuencias significativas.

A.3.2 DPA Medio

Corresponde a presas cuya falla o mal funcionamiento no produciría pérdida potencial de vidas humanas, pero podría ocasionar daños relevantes sobre infraestructuras, actividades productivas, servicios o recursos ambientales, o afectar sectores donde exista presencia ocasional de personas.

Corresponden típicamente a esta categoría las presas cuya falla podría afectar caminos secundarios, instalaciones productivas, servicios locales, viviendas deshabitadas en forma permanente u otros elementos vulnerables cuya afectación resulte relevante, sin alcanzar la gravedad característica de las presas clasificadas como DPA Alto.

A.3.3 DPA Alto

Corresponde a presas cuya falla o mal funcionamiento podría producir pérdida potencial de vidas humanas o daños graves sobre infraestructuras principales,

servicios esenciales, actividades económicas relevantes o recursos ambientales de especial valor o sensibilidad.

La mera posibilidad razonable de pérdida de vidas humanas constituye un criterio suficiente para clasificar una presa como DPA Alto, independientemente de las restantes consecuencias potenciales identificadas.

Asimismo, podrán corresponder a esta categoría aquellas presas cuyas consecuencias económicas, sociales, ambientales o sobre servicios esenciales alcancen una magnitud particularmente significativa.

La clasificación debería basarse en el análisis conjunto de todos los elementos vulnerables identificados, evitando depender exclusivamente de un único indicador o de una valoración automática de las consecuencias potenciales.

Como apoyo a la clasificación preliminar, la Tabla A-1 presenta criterios orientativos aplicables a pequeñas presas rurales. Su finalidad es facilitar una primera valoración de las consecuencias potenciales asociadas a la obra, sin sustituir el análisis técnico integral requerido para la clasificación definitiva.

La interpretación de estos criterios deberá realizarse considerando las particularidades de cada caso. La Autoridad Competente podrá establecer orientaciones, procedimientos o requisitos adicionales para la determinación y revisión de la categoría de DPA.

A.4 Tratamiento de la incertidumbre y revisión de la clasificación

La clasificación por DPA debería sustentarse en información razonablemente representativa de las condiciones existentes al momento de realizar la evaluación. Sin embargo, en la práctica pueden existir incertidumbres asociadas a la delimitación del Área Potencial de Inundación, a la identificación de elementos vulnerables o a la magnitud de las consecuencias potenciales consideradas.

Cuando dichas incertidumbres puedan influir significativamente sobre la categoría resultante, se recomienda adoptar criterios conservadores o desarrollar estudios complementarios que permitan reducirlas hasta alcanzar un nivel de confianza compatible con la importancia de la decisión. Entre estos estudios podrán incluirse relevamientos de campo adicionales, análisis topográficos más detallados, modelaciones hidráulicas u otros procedimientos técnicamente justificados.

La clasificación por DPA no constituye una condición permanente e inmutable de la presa. Las consecuencias potenciales asociadas a una eventual falla pueden modificarse con el tiempo como consecuencia de cambios en la ocupación del territorio, la construcción de nuevas infraestructuras, la aparición de viviendas, el desarrollo de actividades productivas o la incorporación de nuevos servicios dentro del Área Potencial de Inundación.

Por esta razón, resulta recomendable revisar la clasificación de DPA cuando se identifiquen cambios significativos en las condiciones de exposición existentes aguas abajo de la presa, así como en el marco de las evaluaciones periódicas de seguridad que correspondan.

La clasificación resultante debe entenderse como una herramienta de apoyo para la gestión de la seguridad de presas y para la graduación de exigencias técnicas y administrativas. La Autoridad Competente podrá establecer criterios complementarios, requerir estudios adicionales o revisar la categoría asignada cuando las circunstancias particulares de la obra así lo justifiquen.

A.5 Consideraciones finales

La clasificación por Daño Potencial Asociado constituye una herramienta fundamental para orientar la gestión de la seguridad de presas, permitiendo adecuar las exigencias de diseño, construcción, operación, vigilancia e instrumentación a las consecuencias potenciales asociadas a una eventual falla de la obra.

La categoría de DPA asignada a una presa no debe interpretarse como una medida de su estado de conservación, de su calidad constructiva ni de la probabilidad de ocurrencia de una falla. Su finalidad consiste exclusivamente en caracterizar la magnitud de las consecuencias potenciales y servir como base para la adopción de medidas proporcionales a dichas consecuencias.

La metodología y los criterios presentados en este Anexo procuran proporcionar una orientación práctica para la clasificación de pequeñas presas en el contexto nacional. No obstante, la diversidad de situaciones posibles impide sustituir el juicio profesional requerido para evaluar adecuadamente cada caso particular.

En situaciones de especial complejidad, cuando existan incertidumbres significativas o cuando las consecuencias potenciales resulten particularmente relevantes, corresponde complementar los criterios aquí expuestos mediante estudios específicos y procedimientos de análisis acordes a las características de la obra y de su entorno.

La Autoridad Competente podrá establecer criterios, procedimientos o requisitos complementarios para la determinación, revisión o actualización de la clasificación de DPA, así como requerir estudios adicionales cuando las características particulares de la presa o de las áreas potencialmente afectadas así lo justifiquen.

Anexo B MODOS TÍPICOS DE FALLO EN PEQUEÑAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

B.1 Propósito y alcance

El presente Anexo ofrece al proyectista, constructor, inspector y Titular un mapa conceptual de los modos de fallo típicos en pequeñas presas de materiales sueltos, en lenguaje accesible y con remisiones explícitas a las secciones del Manual donde se desarrollan los criterios técnicos correspondientes. No pretende ser un tratado sobre el tema —para lo cual existe una literatura internacional abundante, referenciada en la Sección B.4—, sino una herramienta operativa de uso corriente [69].

Para presas de Daño Potencial Asociado (DPA) Bajo, este Anexo es suficiente como base de identificación cualitativa de modos de fallo, de orientación para la inspección visual periódica, y de apoyo al Titular para entender el comportamiento de su obra. Para presas de DPA Medio y Alto, el Anexo constituye un punto de partida que debería complementarse con un análisis sistemático aplicado a la presa específica, en el marco de las revisiones periódicas de seguridad (Sección 6.6).

La organización del presente Anexo se inspira en los enfoques de análisis de modos de fallo utilizados internacionalmente en seguridad de presas, particularmente mediante metodologías como Failure Modes Analysis (FMA) o Potential Failure Modes Analysis (PFMA). Estas metodologías procuran identificar de forma sistemática los mecanismos plausibles de falla de una presa, reconocer sus señales de advertencia y orientar las medidas de prevención, monitoreo o mitigación correspondientes. El presente Anexo no desarrolla dichas metodologías en detalle, pero adopta su lógica conceptual como herramienta práctica para la identificación de modos de fallo relevantes en pequeñas presas de materiales sueltos.

Se han organizado los modos de fallo en cuatro familias, correspondientes a los mecanismos que explican la inmensa mayoría de los incidentes históricos en presas pequeñas de materiales sueltos: sobrepaso del coronamiento, erosión interna y de fundación, inestabilidad de taludes, y fallas en obras anexas y conducciones. La tabla síntesis de la Sección B.3 sirve como índice operativo del Anexo y como hoja de ruta para la inspección.

B.2 Las cuatro familias de modos de fallo típicos

B.2.1 Sobrepaso del coronamiento

El sobrepaso ocurre cuando el nivel del agua en el embalse supera la cota del coronamiento y el agua comienza a verter sobre el cuerpo de la presa, fuera de los dispositivos previstos para ese fin. En presas de materiales sueltos, el sobrepaso es particularmente peligroso porque el flujo desciende por el talud aguas abajo y, salvo que dicho talud cuente con protección específica, genera erosión progresiva que puede conducir a la rotura del cierre. Es uno de los dos modos de fallo más frecuentes en presas pequeñas de materiales sueltos, junto con la erosión interna.

Las causas inmediatas del sobrepaso son la insuficiencia de capacidad del vertedero frente a la crecida que efectivamente ocurre, la pérdida de resguardo por asentamientos no previstos del coronamiento, y la obstrucción del vertedero por arrastres (troncos, ramas, sedimentos). En presas chicas, la obstrucción es una causa frecuente y rara vez prevista en proyecto: el material vegetal arrastrado durante una crecida puede reducir significativamente la capacidad efectiva del vertedero.

Signos típicos de detección temprana. Reducción progresiva del resguardo durante el desarrollo de una crecida, asentamientos locales del coronamiento detectados por inspección o por mojones, daños incipientes en el talud aguas abajo por escorrentía del agua de lluvia sobre el coronamiento o por la propia oscilación del oleaje durante eventos extremos. La aparición de señales de erosión en el talud aguas abajo después de un evento de crecida importante debe motivar una inspección detallada.

Principales medidas preventivas. En diseño, el dimensionamiento del vertedero según la crecida de proyecto correspondiente al DPA de la presa (Sección 4.2), la definición del resguardo con verificación de sus componentes (ascenso por crecida, oleaje, asentamiento post-construcción) (Sección 3.3.1), y la previsión de un sistema de descarga complementario (vertedero auxiliar o fusible plug) cuando el DPA y la geometría del valle lo justifican. En construcción, el control de la compactación del coronamiento y la verificación de la cota terminada con tolerancia adecuada (Sección 5.4). En operación, la inspección visual periódica del coronamiento y del vertedero, especialmente antes de la temporada de crecidas, y la inspección obligatoria post-evento extremo (Sección 6.2). El mantenimiento del vertedero —limpieza de vegetación, remoción de sedimentos en el canal de entrada y de salida— es una tarea recurrente del Titular de bajo costo y alto impacto preventivo.

B.2.2 Erosión interna y de fundación

La erosión interna es el proceso por el cual el agua que filtra a través del cuerpo de la presa o de su fundación arrastra partículas finas del suelo, generando con el tiempo un camino preferencial de filtración que puede conducir al colapso de la obra. Es, junto con el sobrepaso, uno de los dos modos de fallo más frecuentes en presas de materiales sueltos. En presas pequeñas con fundaciones sedimentarias —situación frecuente en buena parte del territorio uruguayo—, la atención al control de filtraciones es especialmente crítica.

Existen varios mecanismos de iniciación de la erosión interna: erosión regresiva, erosión por concentración de filtraciones en fisuras o conductos preexistentes, erosión de contacto entre suelos de granulometrías muy distintas, y sufusión interna. A los efectos del proyecto, la construcción y la operación de pequeñas presas, lo relevante es que todos ellos comparten un mismo conjunto de medidas preventivas y un mismo conjunto de signos de detección temprana. Para profundizar en los mecanismos físicos específicos puede consultarse ICOLD Bulletin 164.

Signos típicos de detección temprana. El más característico y más alarmante es la aparición de un *hervidero*, es decir un manantial con surgencia visible de agua —frecuentemente alejado del pie del talud— acompañado por arrastre detectable de finos: turbidez del agua que sale, depósito de partículas alrededor del punto de surgencia, formación de un pequeño cono sedimentario. Cualquier filtración con arrastre de material debe tratarse como anomalía y motivar acción inmediata, independientemente del caudal. Otros signos relevantes son el aumento sostenido del caudal de los drenes sin ascenso del nivel del embalse, la aparición de zonas de filtración nuevas en el pie aguas abajo, y los asentamientos locales no previstos. Conviene distinguir la filtración con arrastre —siempre anómala— de la filtración sin arrastre, que puede ser comportamiento normal de proyecto cuando el caudal es bajo y estable.

Principales medidas preventivas. En diseño, el sistema de filtros y drenes correctamente dimensionado (Sección 3.4.4), el dren chimenea (Sección 3.4.5), el tratamiento adecuado de la fundación con dentellón de anclaje (Sección 3.4.3), y el detalle constructivo cuidadoso en el entorno de las conducciones embebidas (Sección 4.5.6) son las medidas centrales. En construcción, el control sistemático de la granulometría de filtros y de la compactación, especialmente en la primera capa sobre fundación tratada, son las prácticas críticas (Sección 5.4). En operación, la vigilancia visual periódica del pie aguas abajo y la observación sistemática del agua

Ante la detección de un *hervidero* con arrastre o de filtración con turbidez creciente, las medidas escalonadas son: registro intensivo del fenómeno (caudal, turbidez, ubicación, evolución), reducción del nivel del embalse hasta umbral seguro, colocación de filtro invertido localizado sobre el punto de salida como medida de emergencia, y reparación definitiva según diagnóstico ingenieril. Para presas de DPA Medio o Alto, estos escenarios deberían estar previstos en el PADE (Sección 6.5).

B.2.3 Inestabilidad de taludes

La inestabilidad de los taludes de una presa de materiales sueltos puede manifestarse como deslizamiento de una porción del cuerpo, abombamiento del talud, o aparición de grietas longitudinales en el coronamiento o en los taludes. Las hipótesis de carga relevantes son la condición de embalse lleno permanente, la condición de construcción (fin de obra, con presiones intersticiales constructivas no disipadas), y la condición de desembalse rápido. Esta última merece consideración específica en presas de riego, donde el vaciado sustancial del embalse es una condición operativa recurrente (Sección 3.5).

La inestabilidad raramente ocurre de forma súbita en presas correctamente diseñadas y construidas. Lo habitual es la aparición progresiva de signos —grietas, asentamientos locales, abombamientos— que dan tiempo a la intervención si la vigilancia es adecuada. La excepción son las fallas asociadas a licuefacción de fundación o del cuerpo bajo carga sísmica, no relevantes para el contexto uruguayo en términos generales, pero que pueden tener importancia local en presas asentadas sobre fundaciones arenosas saturadas.

Signos típicos de detección temprana. Grietas longitudinales en el coronamiento o en los taludes, asentamientos diferenciales detectables por mojones o por inspección visual, abombamientos del talud aguas abajo, escarpes incipientes en la berma intermedia o al pie. Las grietas longitudinales paralelas al eje de la presa son particularmente significativas y deben ser objeto de seguimiento topográfico inmediato.

Principales medidas preventivas. En diseño, la verificación de la estabilidad para todas las hipótesis de carga aplicables, con factores de seguridad acordes a la práctica internacional y a las condiciones operativas del embalse (Sección 3.5), la definición de taludes compatibles con los materiales disponibles (Sección 3.3.2), y el

B.2.4 Fallas en obras anexas y conducciones

Las obras anexas —vertedero, obra de toma, conducciones de descarga, válvulas y compuertas— concentran una proporción significativa de los incidentes en presas pequeñas. Las fallas en este grupo pueden producir consecuencias graves por dos vías: una vía directa, cuando la obra anexa pierde su función (un vertedero obstruido que no descarga, una válvula que no abre durante una emergencia), y una vía indirecta, cuando el daño en la obra anexa compromete el cuerpo de la presa (por ejemplo, erosión interna a lo largo de una conducción embebida).

La conducción a través del cuerpo de la presa merece consideración especial. Es uno de los caminos preferentes de iniciación de erosión interna en pequeñas presas, por la dificultad práctica de garantizar el contacto perfecto entre el relleno y la conducción y por la concentración de gradientes hidráulicos a lo largo del eje longitudinal de la tubería. Cuando es técnicamente viable, es recomendable adoptar conducciones exteriores excavadas en ladera; cuando esto no es posible, el diseño debe incorporar un sistema filtrante específico envolviendo la conducción en su tramo crítico (Sección 4.5).

La inoperabilidad de válvulas y compuertas es otra causa recurrente de incidentes. La causa habitual no es la falla mecánica intrínseca, sino la falta de operación periódica: una válvula que no se mueve durante años puede quedar inmovilizada por corrosión, por sedimentos depositados, o por deterioro de juntas. La operación periódica documentada de todos los dispositivos hidromecánicos es una práctica de bajo costo y alto valor preventivo (Sección 4.6, Sección 6.4).

Signos típicos de detección temprana. Filtración con arrastre alrededor del punto de salida de una conducción, asentamientos locales del relleno sobre conducciones embebidas, deterioro visible de revestimientos de canales, dificultad creciente para operar válvulas o compuertas, obstrucción del vertedero por arrastres vegetales o sedimentarios, daños en estructuras de hormigón por erosión hidráulica o cavitación.

Principales medidas preventivas. En diseño, el detalle cuidadoso de la transición entre obras de hormigón y rellenos circundantes, el sistema filtrante envolviendo conducciones embebidas, la previsión de doble válvula en obras de descarga (válvula de seguridad y válvula de control) cuando el DPA lo justifica (Sección 4.6). En construcción, la compactación cuidadosa del relleno alrededor de conducciones y la verificación del contacto sin vacíos (Sección 5.6). En operación, la inspección periódica de las obras anexas, la maniobra documentada de válvulas al menos una

vez al año, y la limpieza preventiva de vertederos antes de la temporada de crecidas (Sección 6.2, Sección 6.4).

B.3 Tabla síntesis

La tabla siguiente resume los modos de fallo desarrollados en la Sección B.2, con el signo clave de detección temprana y la remisión a las secciones del Manual donde se desarrollan los criterios de diseño, construcción y operación correspondientes. Funciona como índice operativo del Anexo y como ayuda de memoria para la inspección de campo.

Modo de fallo	Signo clave de detección	Diseño	Construcción	Operación / Inspección
Sobrepaso del coronamiento	Reducción de resguardo durante crecida; daños en talud aguas abajo por agua de escorrentía	Cap. 3.3.1 (resguardo); Cap. 4.2 (vertederos)	Cap. 5.4 (compactación de coronamiento)	Cap. 6.2 (inspección durante y post-crecida)
Erosión interna en el cuerpo	Filtración con arrastre de finos; turbidez en drenajes; hervidero al pie aguas abajo	Cap. 3.4.4 (filtros); Cap. 3.4.5 (drenes)	Cap. 5.4 (granulometría de filtros; compactación)	Cap. 6.2 (vigilancia visual del pie)
Erosión interna en fundación	Hervideros alejados del pie; manantiales nuevos; turbidez sostenida	Cap. 3.4.3 (dentellón); Cap. 3.4 (manto impermeable)	Cap. 5.3 (tratamiento de fundación)	Cap. 6.2 (inspección del entorno aguas abajo)
Erosión a lo largo de conducciones	Filtración con arrastre alrededor de salida de conducción; asentamiento local	Cap. 4.3.3 (diafragma filtrante)	Cap. 5.7 (relleno alrededor de conducciones)	Cap. 6.2 (inspección de salida)
Inestabilidad de taludes (estática)	Grietas longitudinales; abombamientos; movimientos visibles	Cap. 3.5 (estabilidad); Cap. 3.3.2 (taludes)	Cap. 5.4 (compactación; control de humedad)	Cap. 6.2 (inspección visual de taludes)
Inestabilidad por desembalse rápido	Grietas o movimientos asociados al ciclo de vaciado	Cap. 3.5 (FS desembalse rápido)	Cap. 5.4 (compactación uniforme)	Cap. 6.2 (inspección post-vaciado)
Falla por inoperabilidad de válvulas / compuertas	Imposibilidad de maniobra; obstrucción; falla mecánica	Cap. 4.6 (válvulas y compuertas)	Cap. 5.7 (instalación)	Cap. 6.4 (operación periódica documentada)

Tabla B-1. Tabla de síntesis.

B.4 Referencias para profundización

Las publicaciones que se indican a continuación constituyen referencias técnicas ampliamente utilizadas para el análisis de modos de fallo, erosión interna, filtraciones, conducciones a través de terraplenes y evaluación de la seguridad de presas. Su consulta puede resultar de interés durante revisiones de seguridad, estudios específicos o evaluaciones de presas de DPA Medio o Alto.

- Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations (ICOLD Bulletin 164) [[51](#)]
- Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion (FEMA P-1032) [[54](#)]
- Conduits through Embankment Dams (FEMA P-484) [[79](#)]
- Guía Técnica de Seguridad de Presas N.º 2 — Criterios para Proyectos de Presas y sus Obras Anexas (SPANCOLD) [[41](#)]
- Seepage Analysis and Control for Dams (USACE EM 1110-2-1901) [[26](#)]
- Design Standards N.º 13 — Embankment Dams (USBR) [[46](#)]
- Design of Coastal Revetments, Seawalls, and Bulkheads (USACE EM 1110-2-1614)

Anexo C EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO DE UN ENROCADO

C.1 Alcance

El presente Anexo desarrolla un ejemplo simplificado de aplicación de los criterios de diseño de enrocados presentados en la Sección 3.6.1 "Protección del talud aguas arriba". Su finalidad es ilustrar el procedimiento general de estimación del oleaje, cálculo preliminar del tamaño de roca y comparación con referencias empíricas de uso habitual.

El ejemplo tiene carácter exclusivamente didáctico y no sustituye la evaluación específica que corresponde realizar en cada proyecto. Los valores adoptados responden a hipótesis simplificadas y se utilizan únicamente para mostrar la secuencia de cálculo.

C.2 Datos del ejemplo

Se considera una pequeña presa de materiales sueltos ubicada en el departamento de Tacuarembó, con un talud aguas arriba protegido mediante enrocado colocado a mano.

Para ilustrar la aplicación de los criterios presentados en este Manual se adopta un fetch efectivo de 1,5 km y una velocidad sostenida de diseño de 75 km/h (20,8 m/s), representativa de un nivel normal máximo de operación.

Los parámetros adoptados se resumen en la Tabla C-1:

Parámetro	Valor adoptado
Ubicación de referencia	Tacuarembó
Velocidad sostenida de diseño	75 km/h (20,8 m/s)
Fetch efectivo	1,5 km
Talud aguas arriba	1V:3H
Método de colocación	Colocado a mano
Peso específico de la roca	26 kN/m ³
Densidad relativa de la roca (Sr)	2,65
Coefficiente de estabilidad de Hudson (KD)	2

Tabla C-1. Datos adoptados para el ejemplo de dimensionamiento.

C.3 Estimación de la altura de ola

La altura significativa de ola puede estimarse mediante expresiones simplificadas derivadas del método SMB (Sverdrup–Munk–Bretschneider), ampliamente utilizadas para el predimensionamiento de obras de protección frente al oleaje en embalses.

Aplicando las expresiones descritas anteriormente para una velocidad sostenida de diseño de 20,8 m/s y un fetch efectivo de 1,5 km, se obtiene:

$$H_s \approx 0,69 \text{ m}$$

Este valor representa la altura significativa de ola utilizada posteriormente para el cálculo preliminar del tamaño de las unidades de enrocado.

La Figura C-1 muestra la ubicación del caso analizado dentro del gráfico orientativo de predimensionamiento presentado en la Sección 3.6.1.

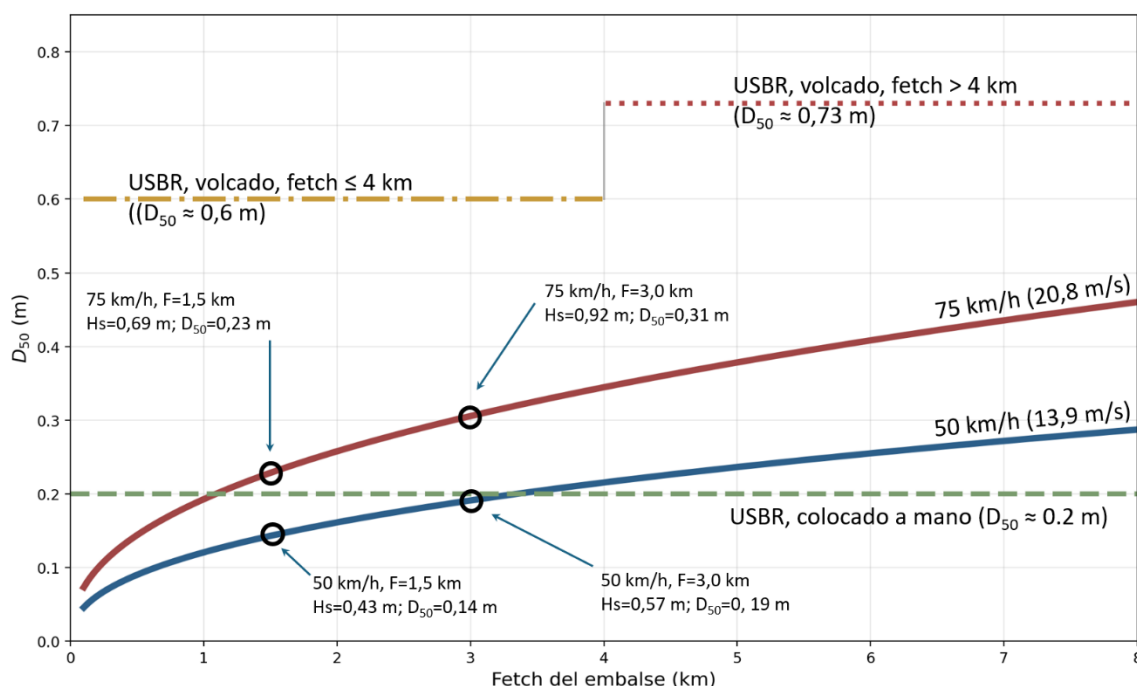


Figura C-1. Ubicación del ejemplo de Tacuarembó sobre el gráfico orientativo de predimensionamiento del enrocado para talud 1V:3H

C.4 Cálculo preliminar del tamaño de roca

A partir de la altura significativa de ola obtenida y aplicando la ecuación de Hudson para un talud 1V:3H, utilizando un coeficiente de estabilidad $KD = 2$, una densidad relativa de la roca $S_r = 2,65$ y un peso específico $\gamma_r = 26 \text{ kN/m}^3$, se obtiene:

$$D_{50} \approx 0,23 \text{ m}$$

Este valor representa el diámetro nominal correspondiente a una unidad de roca de tamaño medio capaz de resistir la acción del oleaje considerado en las hipótesis de cálculo adoptadas.

Aplicando la relación orientativa:

$$t \approx 1,5 \cdot D_{50}$$

se obtiene un espesor de revestimiento del orden de:

$$t \approx 0,35 \text{ m}$$

Estos resultados corresponden exclusivamente al cálculo hidráulico y no contemplan consideraciones constructivas, operativas o de durabilidad.

C.5 Comparación con referencias empíricas

La Tabla C-2 compara los resultados obtenidos mediante el cálculo hidráulico con los valores orientativos derivados de la experiencia recogida por el USBR para enrocados colocados a mano y volcados mecánicamente.

Criterio	D ₅₀ (m)	Espesor t (m)
Cálculo SMB + Hudson	0,23	0,35
Referencia USBR, colocado a mano	0,20	0,30
Referencia USBR, volcado (fetch ≤ 4 km)	0,60	0,76

Tabla C-2. Comparación entre el cálculo hidráulico y referencias empíricas de diseño

Puede observarse que el tamaño calculado resulta ligeramente superior a la referencia USBR para enrocado colocado a mano y significativamente inferior a la correspondiente a enrocado volcado mecánicamente. Para una pequeña presa ejecutada con enrocado colocado a mano, ambos criterios conducen a órdenes de magnitud similares y compatibles entre sí.

Considerando la disponibilidad habitual de roca, la necesidad de adoptar una granulometría práctica de ejecución y un margen adicional frente a las incertidumbres propias del predimensionado, se adopta:

$$D_{50} = 0,25 \text{ m}$$

$$t = 0,40 \text{ m}$$

Estos valores proporcionan un margen razonable respecto del cálculo hidráulico y mantienen coherencia con las referencias empíricas consideradas.

C.6 Análisis de sensibilidad

La influencia del viento de diseño y del fetch del embalse puede apreciarse mediante los casos resumidos en la Tabla C-3.

Viento (km/h)	Fetch (km)	Hs (m)	D ₅₀ calculado (m)
50	1,5	0,43	0,14
75	1,5	0,69	0,23
50	3,0	0,57	0,19
75	3,0	0,92	0,31

Tabla C-3. Sensibilidad del tamaño calculado del enrocado frente a variaciones del viento de diseño y del fetch.

Los resultados muestran que el tamaño calculado aumenta tanto con la velocidad del viento como con el fetch efectivo del embalse. Sin embargo, para rangos de fetch representativos de muchas pequeñas presas uruguayas, las referencias empíricas de uso habitual continúan constituyendo una verificación relevante durante el proceso de diseño.

C.7 Transición entre el terraplén y el enrocado

El correcto desempeño del enrocado no depende únicamente del tamaño de las unidades de roca. Resulta igualmente importante evitar la migración progresiva de partículas finas del terraplén hacia los vacíos del revestimiento, fenómeno que puede producir asentamientos locales, pérdida de apoyo y deterioro gradual de la protección.

Por esta razón, el enrocado debería apoyarse sobre una capa de transición granular o sobre un geotextil adecuadamente seleccionado para cumplir funciones de filtración y separación.

En el presente ejemplo se adopta una transición granular, cuyo diseño debe verificar los criterios de filtro indicados en la Sección 3.4.4. A modo ilustrativo, se considera una capa de material granular intermedia entre el suelo compactado del terraplén y el enrocado de protección, dimensionada de forma que satisfaga simultáneamente los requisitos de retención y permeabilidad.

La Figura C-2 muestra la verificación granulométrica del material de transición disponible respecto del material base del terraplén y el cumplimiento de los criterios de filtro adoptados.

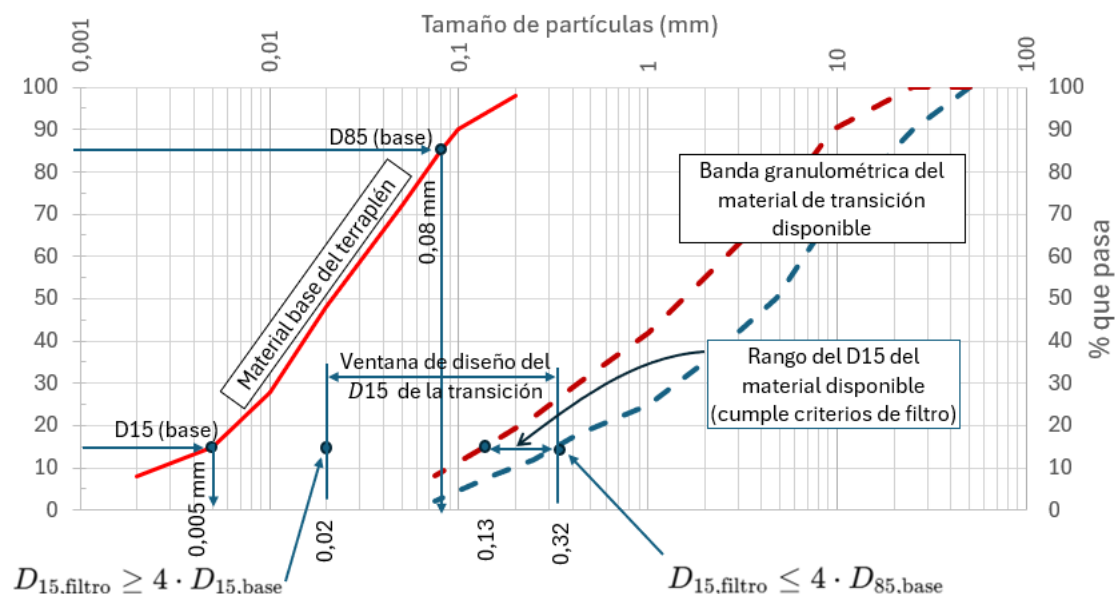


Figura C-2. Verificación granulométrica del cumplimiento de los criterios de filtro del material de transición disponible respecto del material base del terraplén

Cuando las condiciones del proyecto lo justifiquen, la transición granular podrá sustituirse por un geotextil adecuadamente especificado, verificando los criterios de retención, permisividad, resistencia mecánica y resistencia al punzonamiento correspondientes.

El incremento del tamaño de las unidades de roca o del espesor del enrocado no constituye, por sí solo, una medida equivalente a la función filtrante proporcionada por una transición granular o un geotextil.

C.8 Comentarios finales

El procedimiento desarrollado permite estimar, en forma preliminar, el tamaño de las unidades de roca necesarias para proteger el talud aguas arriba frente a la acción del oleaje generado por el viento.

En el ejemplo analizado, la aplicación de los métodos de estimación del oleaje y de la ecuación de Hudson conduce a un tamaño característico de roca del orden de 0,23 m. Este resultado es compatible con las referencias empíricas habitualmente utilizadas para enrocados colocados a mano y confirma que, para fetchs

representativos de muchas pequeñas presas uruguayas, el cálculo hidráulico y la experiencia constructiva suelen conducir a órdenes de magnitud similares.

La adopción final del tamaño de roca y del espesor del revestimiento debe considerar, además del cálculo hidráulico, aspectos vinculados a la disponibilidad de materiales, método de colocación, forma y durabilidad de la roca, capacidad de mantenimiento del titular y características particulares del proyecto.

Asimismo, el adecuado desempeño del sistema de protección requiere contemplar conjuntamente el enrocado y la transición subyacente, ya sea granular o geosintética, de forma de asegurar tanto la estabilidad superficial frente al oleaje como el control de la migración de finos desde el terraplén.

El ejemplo presentado tiene carácter ilustrativo y no sustituye la evaluación específica que corresponde realizar para cada presa.

Anexo D INSTRUMENTACIÓN

Los criterios técnicos generales para la selección, instalación y operación de los instrumentos descritos a continuación y de otros específicos para casos más complejos, se desarrollan en detalle en la guía técnica del U.S. Army Corps of Engineers [67].

D.1 Medida del nivel de embalse

Las reglas limnimétricas constituyen el dispositivo más simple y confiable para la medición del nivel del embalse. Se recomienda su instalación en sectores protegidos del oleaje y con pendiente suficiente, de modo que el punto de lectura se mantenga próximo a la orilla en todo el rango de variación del nivel, mejorando así la precisión de la medición.

Las escalas deberán fijarse rígidamente a un elemento estable (estaca metálica, estructura de hormigón u otro soporte indeformable), rigurosamente niveladas, asegurando que su posición no se vea afectada por asentamientos o movimientos locales del terreno. Es altamente recomendable que las escalas estén vinculadas al mismo cero de referencia del proyecto, de modo de interpretar las mediciones en términos absolutos sin necesidad de transformaciones. En caso contrario, debería asegurarse su correcta vinculación a un punto de referencia conocido, que permita convertir las lecturas a la cota del sistema del proyecto.



Figura D-1. Obsérvese la ubicación de las escalas en zona de baja pendiente, condición que reduce la precisión de la lectura y que se recomienda evitar en el diseño de la instalación

Cuando se disponga de una torre de toma u otra estructura de hormigón accesible, resulta recomendable fijar la escala directamente sobre dicha estructura. En estos

casos, puede complementarse la medición mediante un caño vertical adosado (tipo tubo piezométrico), que permite realizar lecturas con sonda eléctrica. Este sistema no proporciona una lectura visual inmediata, pero resulta particularmente útil en condiciones de oleaje o baja visibilidad.

En sistemas más complejos, podrán incorporarse sensores automáticos de nivel (presión, cuerda vibrante, capacitivos u otros), los cuales deberán contar con un método de verificación independiente mediante lectura directa de la escala.

Cuando el seguimiento del nivel del embalse constituya una variable relevante para la interpretación de filtraciones, presiones intersticiales o desempeño operativo, se recomienda mantener registros sistemáticos de las lecturas, vinculados a la fecha y condiciones hidrológicas observadas.

D.2 Medida de caudal de filtraciones, drenajes y caudal ambiental.

La medida de caudales en pequeñas presas comprende tanto los flujos asociados a filtraciones y drenajes como, cuando corresponda, los caudales liberados por razones operativas o ambientales. En todos los casos, el objetivo principal es disponer de mediciones consistentes en el tiempo que permitan verificar condiciones de funcionamiento y detectar variaciones o tendencias.

Los dispositivos y métodos que se presentan a continuación resultan aplicables a estos distintos tipos de flujo, siempre que se aseguren condiciones de captación y medición adecuadas.

D.2.1 Vertederos de pared delgada

La medida de pequeños caudales puede realizarse mediante vertederos de pared delgada, siendo los vertederos triangulares (en V) una de las soluciones más adecuadas.

En estos dispositivos, el caudal se relaciona con la carga hidráulica medida aguas arriba del vértice de la escotadura. Para vertederos triangulares de 90°, puede utilizarse la siguiente expresión simplificada:

$$Q \approx 1,4 \cdot h^{(5/2)}$$

donde:

Q es el caudal (L/s)

h es la carga sobre el vértice (m)

Esta expresión, si bien simplificada respecto de formulaciones más completas como la de la Guía para Medición de Caudales de DINAMA (2004) [68], resulta suficiente para los fines del control del comportamiento de pequeñas presas, donde interesa principalmente la consistencia de las mediciones y la detección de variaciones o tendencias en el tiempo, más que la precisión absoluta del valor instantáneo. En la guía referenciada precedentemente o bien en otras publicaciones técnicas y académicas se puede encontrar las expresiones $Q \approx f(h)$ para vertederos triangulares de otros ángulos o de placas rectangulares.

La correcta medida del caudal requiere asegurar condiciones hidráulicas adecuadas, entre las que se destacan:

- Flujo tranquilo y uniforme en el canal de aproximación;
- Ausencia de obstrucciones, sedimentos o vegetación en las proximidades;
- Descarga libre, sin influencia del nivel aguas abajo;
- Correcta ubicación del punto de medición de h , aguas arriba de la escotadura y fuera de la zona de aceleración del flujo.

La Figura D-2 presenta un vertedero triangular correctamente dimensionado y operando dentro de su rango de medición, junto con el esquema de una escala diagonal. Este tipo de escala permite mejorar significativamente la precisión de lectura visual, ya que extiende el desplazamiento horizontal del punto de cruce del nivel de agua con la escala graduada. Asimismo, el uso de placas con escotaduras de ángulos menores a 90° puede aumentar la sensibilidad del dispositivo para caudales bajos, aunque en estos casos deberán emplearse las expresiones de cálculo correspondientes.

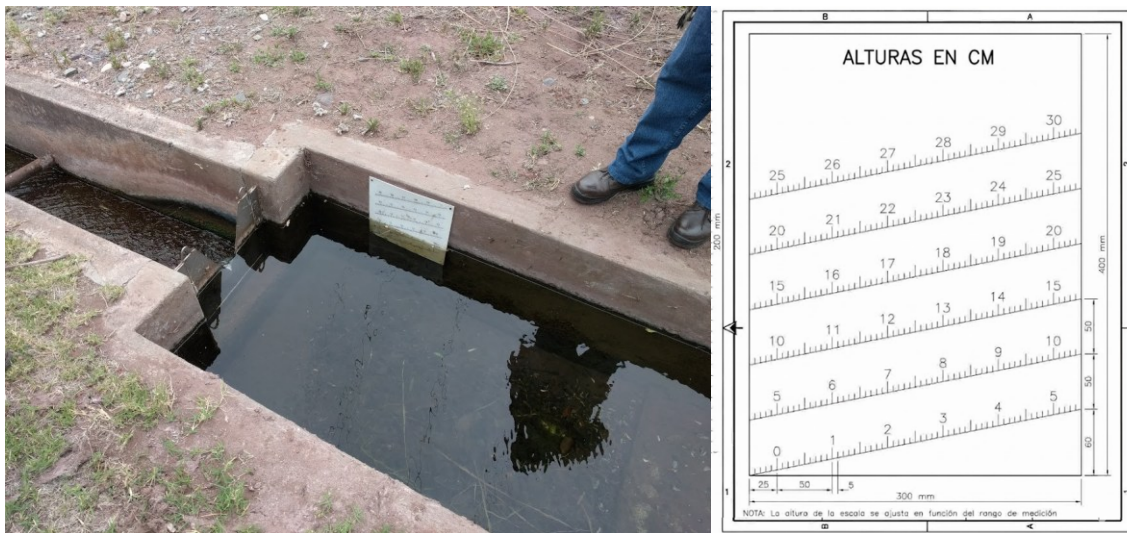


Figura D-2. Vertedero triangular robusto y diseño de su escala diagonal, que permite mejorar la precisión de lectura visual

Asimismo, resulta fundamental que las condiciones de captación y encauzamiento de las filtraciones o drenajes se mantengan constantes en el tiempo. La continuidad del área de aporte y de las condiciones de medición es esencial para asegurar la validez del análisis de tendencias. Modificaciones en estas condiciones pueden generar variaciones en el caudal medido que no reflejan cambios reales en el comportamiento de la presa.



Figura D-3. Vertedero triangular con condiciones de funcionamiento inadecuadas. El nivel aguas abajo alcanza a interferir con la descarga

Desde el punto de vista constructivo, se recomienda emplear soluciones robustas y permanentes (hormigón, chapa metálica adecuadamente protegida u otros materiales durables), evitando dispositivos precarios o temporales que puedan deformarse o deteriorarse con el tiempo.

Finalmente, la Figura D-4 ilustra una alternativa de medición de la carga hidráulica mediante el principio de vasos comunicantes, que permite trasladar el nivel a un punto seco y accesible, mejorando las condiciones de lectura sin alterar el funcionamiento del vertedero.

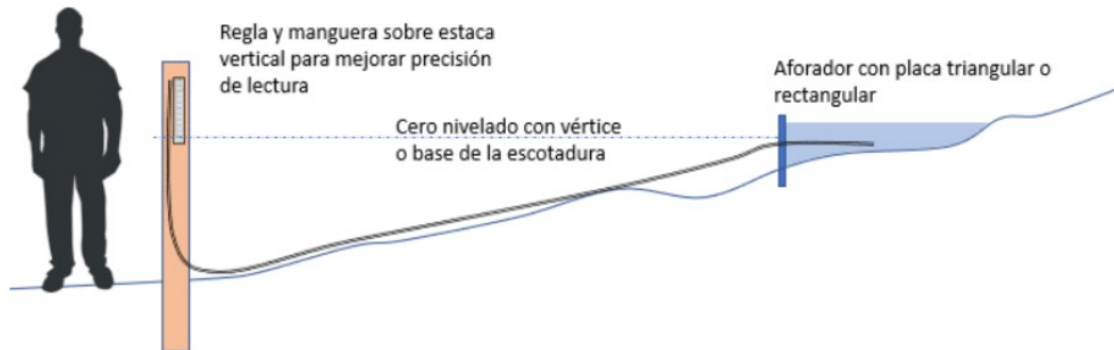


Figura D-4. Medición mediante el principio de vasos comunicantes, que permite realizar la lectura de la carga hidráulica en un punto seco y accesible.

D.2.2 Método volumétrico

El método volumétrico se emplea para la medición de caudales pequeños en puntos de descarga localizada y controlada, tales como salidas de sistemas de drenaje, conducciones que evacúan filtraciones colectadas o descargas concentradas.

El caudal se determina como:

$$Q = V / t$$

donde:

- Q es el caudal (L/s)
- V es el volumen recogido (L)
- t es el tiempo de llenado (s)

La medición puede realizarse mediante cualquiera de las siguientes modalidades:

- Cronometrar el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido;
- Medir el volumen recogido durante un intervalo de tiempo preestablecido.

A efectos de lograr una precisión adecuada, se recomienda seleccionar la combinación de volumen y tiempo de medición de modo que el tiempo de llenado no sea inferior a 15 segundos. Cuando el tiempo de medición supere aproximadamente 60 segundos, resulta recomendable reducir el volumen colectado para mantener la

practicidad del procedimiento. La Figura D-5 presenta rangos orientativos de capacidad de recipientes y tiempos de medición recomendados.

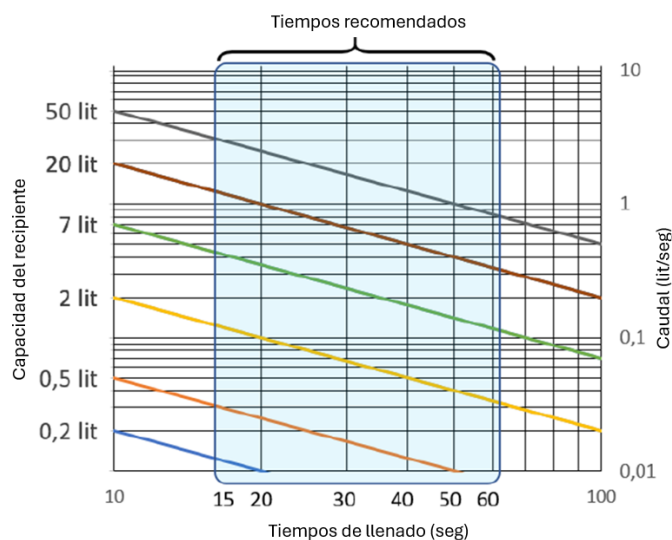


Figura D-5. Capacidad de recipientes y rango de tiempos recomendados para medir pequeños caudales con el método volumétrico

Asimismo, el punto de medición debería contar con acceso seguro y condiciones adecuadas para realizar la medición en forma cómoda y repetible por una sola persona.

Cuando los caudales sean muy variables o pulsantes, se recomienda realizar varias mediciones consecutivas y adoptar un valor promedio representativo.

El método no resulta adecuado para la medición directa de filtraciones difusas. En estos casos, se recomienda concentrar previamente el flujo mediante dispositivos de captación que permitan definir un punto de descarga controlado y reproducible.

D.3 Medida de asentamientos

El control de asentamientos del terraplén se realiza mediante la nivelación de precisión de puntos de control materializados en el coronamiento y, cuando corresponda, en otros sectores de la presa. Estas mediciones se refieren a una Base Fija de Nivelación (BFN), ubicada fuera de la zona de influencia de la presa preferentemente fundada en roca o en sectores no afectados por la presa ni por las variaciones del nivel del embalse.

La Figura D-6 presenta el esquema general del procedimiento, donde se determinan las diferencias de nivel entre puntos mediante nivelaciones sucesivas, permitiendo evaluar la evolución de los asentamientos a lo largo del tiempo.

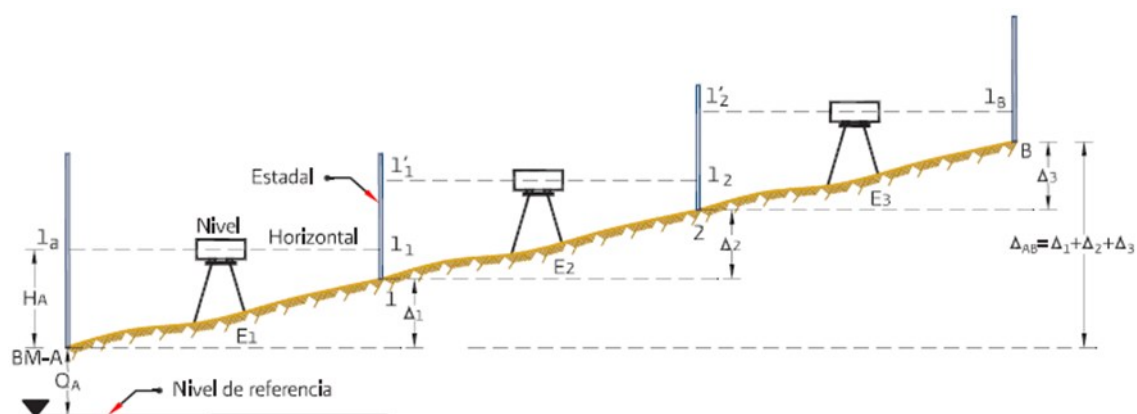


Figura D-6. Esquema de la nivelación de precisión de ida y vuelta, con las miras sobre los puntos de control y el nivel aproximadamente en el punto medio de cada tramo.

El procedimiento de medición se basa en ubicar sucesivamente el instrumento (nivel) aproximadamente a igual distancia entre dos miras consecutivas, a fin de minimizar errores sistemáticos, tomando las lecturas “atrás” y “adelante”. Las mediciones se realizan en circuitos de ida y vuelta, comenzando y terminando en un mismo punto, es decir, recorriendo los puntos en un sentido y repitiendo el recorrido en sentido inverso.

El primer punto donde se apoya la mira corresponde a la BFN, que será también el punto de cierre del circuito. En caso de ser necesario, podrán encadenarse varios circuitos, procurando que cada uno de ellos no supere aproximadamente los 600 a 700 metros de longitud.

La cota final de cada punto de control se obtiene como el valor medio de las determinaciones de ida y vuelta, lo que permite controlar la calidad de la medición y reducir errores.

En pequeñas presas, se recomienda:

- Utilizar una BFN claramente identificada, estable y externa a la presa;
- Materializar puntos de control firmes y durables (clavos, pernos o placas) en el coronamiento;
- Repetir siempre el mismo circuito y procedimiento de medición.
- Describir con detalle el procedimiento de medición de modo que sea auditable y repetible por otro operador.

Las mediciones deberán realizarse en condiciones climáticas favorables, evitando viento fuerte, altas temperaturas o condiciones de inestabilidad atmosférica que puedan afectar la precisión de las lecturas.

En la actualidad, existen métodos basados en sistemas de posicionamiento satelital (GNSS) que permiten medir desplazamientos con alta precisión y en forma continua, incluso del orden de milímetros. Estos sistemas presentan ventajas como la automatización de las mediciones y la posibilidad de monitoreo remoto.

No obstante, su implementación requiere equipamiento específico, condiciones adecuadas de instalación y procesamiento especializado de la información, por lo que su aplicación se limita generalmente a presas de mayor entidad o a sistemas de monitoreo instrumentados.

En el contexto de pequeñas presas, la nivelación de precisión continúa siendo el método más simple, robusto y confiable para el control de asentamientos.

D.4 Medida del Nivel Piezométrico

La medición piezométrica constituye una de las herramientas más útiles para verificar el comportamiento hidráulico del terraplén y de la fundación. El conocimiento de la presión intersticial o la presión de poros permite evaluar las condiciones de flujo dentro del terraplén y la fundación, así como estimar la posición de la superficie freática o línea de saturación.

De forma general, puede distinguirse entre piezómetros abiertos y piezómetros cerrados, los cuales presentan comportamientos y ámbitos de aplicación diferentes.

Los piezómetros abiertos (de tubo) permiten medir el nivel del agua en el interior del tubo, representativo de la presión en el punto donde se ubica el filtro. Su principal ventaja radica en su simplicidad y confiabilidad operativa, al no contar con componentes susceptibles de fallas. Estos dispositivos requieren que el agua pueda ingresar y salir del tubo con relativa facilidad, por lo que se adaptan mejor a materiales permeables, tales como zonas de drenaje, fundaciones permeables o sectores del terraplén con mayor conductividad hidráulica.

Los piezómetros cerrados, por su parte, miden la presión intersticial mediante sensores (por ejemplo, de cuerda vibrante u otras tecnologías), sin necesidad de movilizar un volumen de agua. Esto les permite responder en forma más adecuada en materiales de baja permeabilidad, como núcleos arcillosos o presas homogéneas, donde los sistemas abiertos presentan respuestas muy lentas o directamente no resultan operativos. Adicionalmente, estos sistemas permiten la automatización y telemedición de las lecturas.

En algunos casos, cuando el nivel piezométrico supera la cota de boca del tubo un piezómetro abierto puede pasar a ser cerrado mediante la conexión de un manómetro u otro dispositivo de medición de presión.

En piezómetros de tubo abierto, la lectura se realiza mediante sonda (eléctrica o cinta graduada con sensor), determinando la profundidad desde un punto de referencia fijo en la boca del tubo hasta el nivel del agua. A partir de esta medición se obtiene la cota piezométrica, la cual debería estar referida al mismo sistema de cotas del proyecto.

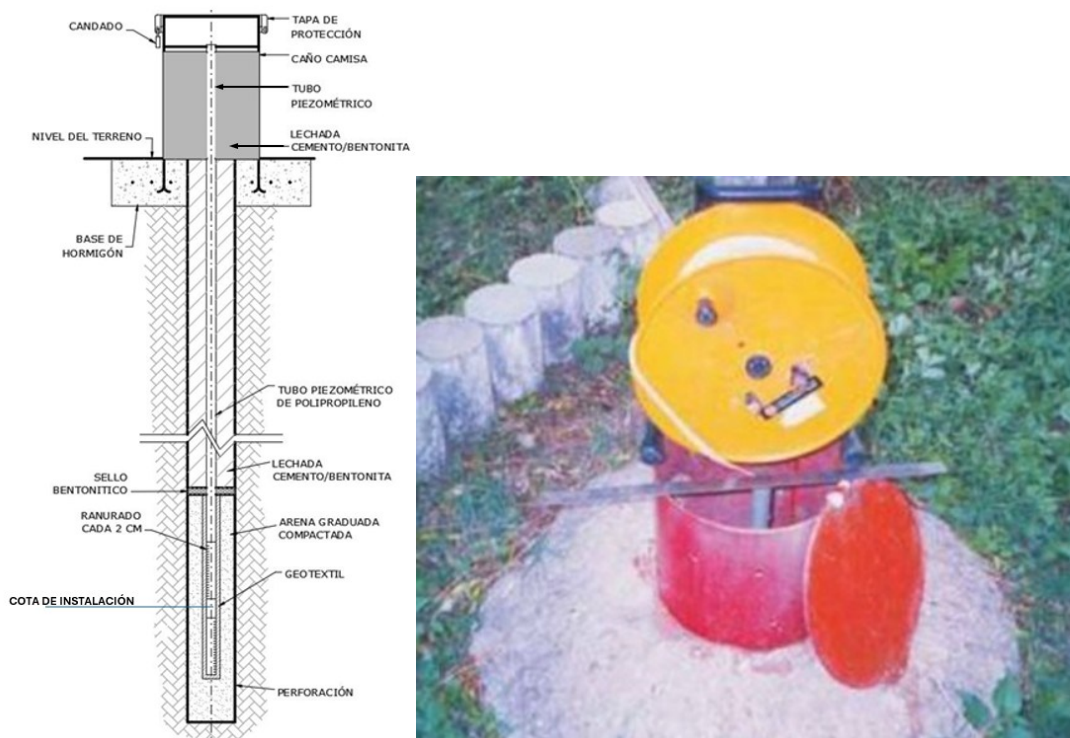


Figura D-7. Esquema de instalación de piezómetro de tubo abierto (detalle de filtro, sello y protección superficial) y caso real con sonda eléctrica

D.4.1 Criterios de uso e interpretación

Las mediciones piezométricas deben interpretarse en relación con el nivel del embalse, la ubicación del instrumento y su evolución en el tiempo.

Es esperable que los niveles piezométricos respondan a las variaciones del nivel del embalse, generalmente con cierto retardo, dependiendo de la permeabilidad de los materiales y de la distancia al punto de medición.

La interpretación debería centrarse en la identificación de tendencias, tales como incrementos progresivos no asociados a variaciones del embalse, cambios en la

velocidad de respuesta frente a ciclos de llenado y vaciado, o diferencias de comportamiento entre sectores comparables.

Para asegurar la validez de las mediciones, se deberá mantener los tubos limpios y accesibles para la lectura, así como verificar periódicamente la integridad del punto de referencia de medición.

D.4.2 Otras tecnologías de sensores piezométricos

Dentro de los piezómetros cerrados, existen diversas tecnologías para la medición de presión de poros o presión intersticial, entre las que se incluyen sensores neumáticos, hidráulicos, piezorresistivos, capacitivos, de cuerda vibrante y de fibra óptica, así como sistemas integrados en redes de adquisición de datos.

Estas tecnologías permiten, en general, mediciones continuas, alta resolución y transmisión remota de la información, siendo utilizadas principalmente en presas de mayor entidad o en sistemas de auscultación más completos.

Sin embargo, su implementación suele requerir equipamiento específico, instalación especializada, suministro de energía y sistemas de adquisición y procesamiento de datos, lo que excede el nivel de complejidad y las necesidades habituales de las pequeñas presas objeto del presente Manual.

En este contexto, los piezómetros abiertos y los piezómetros cerrados de configuración simple constituyen soluciones suficientes, robustas y adecuadas para el control del comportamiento hidráulico de este tipo de obras.

Anexo E HIDRÁULICA DE CONDUCCIONES DE DESCARGA

El presente anexo resume los criterios hidráulicos básicos utilizados en el dimensionamiento de conducciones de descarga en pequeñas presas, como complemento de lo desarrollado en el Capítulo 4.

Su objetivo es proporcionar herramientas de cálculo y órdenes de magnitud que permitan verificar la capacidad hidráulica de las conducciones bajo distintas condiciones de operación.

El análisis hidráulico puede abordarse mediante el balance de energía del sistema, considerando la carga disponible y las pérdidas de energía a lo largo del conducto.

E.1 Carga hidráulica

La carga hidráulica disponible está dada por la diferencia de nivel entre la superficie del embalse y el punto de descarga aguas abajo:

$$H = z_1 - z_2$$

donde:

H = carga hidráulica disponible

z_1 = cota de la superficie del embalse

z_2 = cota del punto de descarga

La energía disponible se consume a lo largo del sistema debido a pérdidas distribuidas y pérdidas localizadas asociadas al flujo.

E.2 Pérdidas de carga

Las pérdidas distribuidas, debidas a la fricción del flujo con las paredes del conducto, pueden estimarse mediante la expresión de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

donde:

h_f = pérdida de carga por fricción

f = coeficiente de fricción

L = longitud del conducto

D = diámetro hidráulico

V = velocidad media del flujo
 g = aceleración de la gravedad

Las pérdidas localizadas se asocian a singularidades del sistema, tales como entradas, válvulas, cambios de dirección y salida del conducto, y pueden estimarse mediante:

$$h_l = K \frac{V^2}{2g}$$

donde K es un coeficiente adimensional característico de cada elemento.

El balance de energía del sistema puede expresarse como:

$$H = V^2/2g + \Sigma hf + \Sigma h_l$$

lo que permite verificar si un conducto de determinado diámetro es capaz de transportar el caudal requerido bajo las condiciones de carga disponibles.

E.3 Coeficientes

En la tabla siguiente se presentan valores típicos de coeficientes de pérdida localizada para distintos elementos habituales en conducciones de descarga:

Elemento hidráulico	Coeficiente K típico
Entrada de conducto con arista viva	0.5
Entrada de conducto con transición suave	0.2
Reja limpia	0.1 – 0.3
Reja parcialmente obstruida	0.5 – 1.0
Válvula totalmente abierta	0.2 – 0.5
Compuerta deslizante totalmente abierta	0.2 – 0.4
Codo de 90° radio corto	0.8 – 1.5
Codo de 90° radio largo	0.2 – 0.4
Salida libre del conducto	1.0

Nota: Los valores indicados corresponden a estimaciones típicas utilizadas en cálculos preliminares. En el diseño final deben adoptarse valores específicos según el tipo de accesorio o información del fabricante.

Tabla E-1. Coeficientes de pérdida localizada K en conducciones de descarga

Para el cálculo de las pérdidas por fricción es necesario estimar la rugosidad del conducto. En la práctica se utilizan valores típicos como los siguientes:

Tipo de conducción	Rugosidad absoluta aproximada $k(\text{mm})$	Coefficiente n de Manning (aproximado)
Tubería de acero	0.045	0.011 – 0.013
Tubería de hormigón prefabricado	0.3 – 1.0	0.012 – 0.015
Conducto de hormigón ejecutado in situ	0.6 – 1.5	0.013 – 0.016
Tubería plástica estructural	0.001 – 0.01	0.009 – 0.011

Tabla E-2. Rugosidad absoluta y coeficientes hidráulicos orientativos para conducciones

Nota: En conducciones de pequeño y mediano diámetro, las pérdidas localizadas suelen tener una incidencia comparable o superior a las pérdidas por fricción, especialmente en sistemas con múltiples accesorios o cambios de dirección.

E.4 Estimación de caudal

Para estimaciones preliminares del caudal puede utilizarse la expresión clásica de descarga a través de un orificio sometido a una carga H :

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2gH}$$

donde:

Q = caudal

C = coeficiente de descarga

A = área de la sección del conducto

H = carga hidráulica disponible

La expresión corresponde a la descarga libre desde un orificio sumergido bajo carga H , asumiendo conducción corta donde las pérdidas distribuidas son despreciables frente a las pérdidas localizadas. Para conducciones largas (longitud relevante frente al diámetro), la expresión debe complementarse considerando las pérdidas distribuidas por fricción (ecuaciones de Darcy-Weisbach o Manning), tal como se desarrolla en E.2 y E.3 de este Anexo. La carga H se mide entre el nivel del embalse y el plano de descarga.

En todos los casos, el dimensionamiento hidráulico debería integrarse con los criterios de diseño estructural, control de filtraciones, compatibilidad frente a asentamientos diferenciales y condiciones de operación previstas para la obra de descarga.

REFERENCIAS

- [1] ICOLD (1989). *Selecting seismic parameters for large dams. Bulletin 72. Comité de Aspectos Sísmicos de Diseño de Presas, París.*
- [2] ICOLD (2001). *Design features of dams to effectively resist seismic ground motion. Bulletin 120. Comité de Aspectos Sísmicos de Diseño de Presas, París.*
- [3] ICOLD (2010). *Selecting seismic parameters for large dams: Guidelines. Bulletin 148. Comité de Aspectos Sísmicos de Diseño de Presas, París.*
- [4] *Constitución de la República Oriental del Uruguay (1967, con reformas posteriores). Artículo 47 — derecho al agua y al medio ambiente sano (incorporación por reforma constitucional de 2004).*
- [5] *Ley 18.610 de Política Nacional de Aguas (2009). República Oriental del Uruguay. Establece los principios rectores de la gestión sustentable del recurso hídrico.*
- [6] *Código de Aguas. Decreto-Ley 14.859 de 15 de diciembre de 1978. Régimen de aprovechamiento y uso del recurso hídrico en Uruguay.*
- [7] *Ley 16.858 de Riego con Destino Agrario y modificativas (1997). República Oriental del Uruguay. Régimen aplicable a obras de riego con destino agrario, derechos de uso de agua para riego y obligaciones del titular.*
- [8] *Decreto 123/999. Reglamento sobre clasificación administrativa de presas. Poder Ejecutivo, República Oriental del Uruguay (1999).*
- [9] *Ley 16.466 de Evaluación de Impacto Ambiental (1994). República Oriental del Uruguay. Reglamentada por el Decreto 349/005.*
- [10] *Decreto 349/005. Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental y Autorizaciones Ambientales. Poder Ejecutivo, República Oriental del Uruguay.*
- [11] *Decreto 368/018. Reglamentación de la preservación del caudal ambiental. Poder Ejecutivo, República Oriental del Uruguay.*
- [12] *DINAGUA (2026). Guía metodológica de caudales ambientales. Dirección Nacional de Aguas, Ministerio de Ambiente, Uruguay. Versión preliminar.*
- [13] *Decreto 209/019. Creación del Comité Nacional de Seguridad de Represas. Poder Ejecutivo, República Oriental del Uruguay (2019).*
- [14] ICOLD (2017). *Dam Safety Management: Operational Phase of the Dam Life Cycle. Bulletin 154.*

-
- [15] Ministerio de Medio Ambiente de España (2011). *Guía Técnica para la Clasificación de Presas y Embalses en función del Riesgo Potencial*.
- [16] SPANCOLD. *Guía Técnica Nº 8 — Análisis de Riesgo aplicado a la Gestión de Seguridad de Presas y Embalses*. Disponible en: https://www.spancold.org/wp-content/uploads/2016/10/GT08_Monografia_Analisis_Riesgos.pdf.
- [17] FEMA (2023). *Federal Guidelines for Dam Safety (FEMA P-93)*. Disponible en: <https://www.fema.gov/emergency-managers/risk-management/dam-safety/federal-guidelines>.
- [18] Membrillera Ortuño, M. G. y Gómez Arruche, J. (2010). *El análisis de potenciales modos de fallo y los sistemas de auscultación: aspectos básicos*. IX Jornadas Españolas de Presas, Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD).
- [19] World Bank Group (2020). *Safety of Dams and Downstream Communities — Good Practice Note on Dam Safety. First Edition, October 2020*.
- [20] Decreto 228/025. *Declaración de humedales de importancia ambiental. Reglamentación del artículo 159 del Código de Aguas (Decreto-Ley 14.859, en la redacción dada por la Ley 19.670)*. Poder Ejecutivo, República Oriental del Uruguay (2025).
- [21] Ley 17.234. *Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP)*. República Oriental del Uruguay.
- [22] Ley 15.939. *Ley de Bosques*. República Oriental del Uruguay.
- [23] Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente — DINAGUA (2011). *Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas. Volumen 1: Aspectos Hidrológicos e Hidráulicos*. Montevideo, Uruguay. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/manual-diseno-construccion-pequenas-presas>.
- [24] SPANCOLD. *Guía Técnica Nº 5 — Aliviaderos y desagües de fondo*. Disponible en: https://www.spancold.org/wp-content/uploads/2018/12/GT_05-Aliviaderos_y_Desagues.pdf.
- [25] U.S. Bureau of Reclamation (1987). *Design of Small Dams, 3rd Edition*. Disponible en: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/dams.html>.

-
- [26] U.S. Army Corps of Engineers (1993). *EM 1110-2-1901 — Seepage Analysis and Control for Dams*. Disponible en: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1901.pdf
- [27] ICOLD (2012). *Safe Passage of Extreme Floods*. Bulletin 142.
- [28] IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [29] Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) (2016). *Cuarta Comunicación Nacional a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático (SNRCC)*, Uruguay.
- [30] Infraestructura de Datos Espaciales del Uruguay (IDEuy). *Plataforma oficial de información geográfica del Estado uruguayo de acceso público y gratuito, coordinada por AGESIC*. Disponible en: <https://www.ideuy.gub.uy>
- [31] IRAM 10517:2023. *Mecánica de suelos: Ensayo de penetración normal (SPT)*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- [32] ASTM International. *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. ASTM D1586.
- [33] IRAM 10616. *Mecánica de suelos: Ensayo de penetración dinámica Super Heavy (DPSH)*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- [34] International Organization for Standardization (2005, Amd 1:2011). *Geotechnical investigation and testing — Field testing — Part 2: Dynamic probing*. ISO 22476-2.
- [35] IRAM 10531:1988. *Mecánica de suelos: Método de determinación de la permeabilidad in situ por la técnica Lefranc*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- [36] IRAM 10532:1983. *Mecánica de suelos: Método de determinación de la absorción de agua de un terreno, por la técnica de Lugeon*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- [37] IRAM 10526. *Mecánica de suelos: Método del volumenómetro para la determinación de la densidad in situ*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

-
- [38] Decreto 169/993. Aprobación de las Normas UY de ensayos de la Dirección Nacional de Vialidad. Poder Ejecutivo, República Oriental del Uruguay (1993).
- [39] Casagrande, A. y Fadum, R.E. (1940). Notes on Soil Testing for Engineering Purposes. Soil Mechanics Series No. 8, Publication No. 268, Harvard University Graduate School of Engineering, Cambridge, Massachusetts.
- [40] Cruz, P. T. (1996). 100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. Oficina de Textos, São Paulo.
- [41] SPANCOLD. Guía Técnica Nº 2 — Criterios para Proyectos de Presas y sus Obras Anejas. Tomo 2: Presas de Materiales Suelos (PPMMSS). Disponible en: <https://www.spancold.org/producto/guia-tecnica-de-seguridad-de-presas-no-2-criterios-para-proyectos-de-presas-y-sus-obras-anejas-tomo-ii-presas-de-materiales-suelos/>.
- [42] ANSV Administración Nacional de Seguridad Vial, Argentina. Guía de Seguridad Vial en Caminos Rurales. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ansv_guia_caminos_rurales.pdf
- [43] ICOLD (1994). Embankment Dams — Granular Filters and Drains. Bulletin 95.
- [44] NRCS (2022). Conservation Practice Standard — Pond (Code 378).
- [45] FEMA (2011). Filters for Embankment Dams — Best Practices for Design and Construction.
- [46] U.S. Bureau of Reclamation (2011). Design Standards No. 13: Embankment Dams, Chapter 5 — Protective Filters. Disponible en: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/designstandards-datacollectionguides/finalds-pdfs/DS13-5.pdf>.
- [47] ASTM International. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM C131.
- [48] UY A 23 — Resistencia al desgaste de agregados gruesos por la máquina de Los Ángeles. Norma de Vialidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, República Oriental del Uruguay.
- [49] ASTM International. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. ASTM C88.

-
- [50] UY A 25 — Durabilidad de agregados por inmersión en sulfato de sodio. Norma de Vialidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, República Oriental del Uruguay.
- [51] ICOLD (2015). *Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations*. Bulletin 164.
- [52] NRCS (2007). *National Engineering Handbook, Part 628 — Dams, Chapter 45: Filter Diaphragms*. NEH 628.45.
- [53] DNIT — Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). *Manual de Drenagem de Rodovias*. 2ª edição, Publicação IPR-724, Rio de Janeiro, Brasil.
- [54] FEMA (2015). *Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion (FEMA P-1032)*. Disponible en: <https://www.fema.gov/media-library-data/1436889238781-1b63946bfc27bab5d85f7f95a66ce35/FEMAP1032.pdf>.
- [55] Normas Técnicas de Seguridad para Presas y Embalses. Real Decreto 264/2021, España (2021). Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2021/04/14/pdfs/BOE-A-2021-5867.pdf>
- [56] U.S. Army Corps of Engineers (2003). EM 1110-2-1902 — Slope Stability. Disponible en: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1902.pdf.
- [57] Naval Facilities Engineering Command (1986). *Soil Mechanics. Design Manual 7.1*. NAVFAC P-7.1, Department of the Navy, USA.
- [58] Association of State Dam Safety Officials. *Dam Safety Toolbox*. Disponible en: <https://damtoolbox.org>. Consultado en junio de 2026.
- [59] FAO (2010). *Manual on Small Earth Dams: A Guide to Siting, Design and Construction*. FAO Irrigation and Drainage Paper 64. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i2951e/i2951e.pdf>.
- [60] NRCS (2019). *Technical Release 60 — Earth Dams and Reservoirs*. Disponible en: <https://directives.nrcs.usda.gov>.
- [61] U.S. Army Corps of Engineers (1984). *Shore Protection Manual*. Disponible en: <https://erdc-library.erdc.dren.mil>.

-
- [62] McCullah, J. y Gray, D. (2005). *Environmentally Sensitive Channel- and Bank-Protection Measures*. NCHRP Report 544. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. Disponible en: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/>
- [63] Federal Highway Administration (2005). *Design of Roadside Channels with Flexible Linings*. Hydraulic Engineering Circular No. 15 (HEC-15), Publication No. FHWA-NHI-05-114. Washington, DC. Disponible en: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/>
- [64] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *M 288: Standard Specification for Geosynthetic Specification for Highway Applications*. Washington, DC. Edición M 288-21 (2021).
- [65] NRCS (1996). *National Engineering Handbook, Part 650: Engineering Field Handbook, Chapter 16: Streambank and Shoreline Protection*. Washington, DC (con actualizaciones posteriores). Disponible en: <https://directives.nrcs.usda.gov>
- [66] FEMA (2014). *Technical Manual: Overtopping Protection for Dams (FEMA P-1015)*. FEMA / U.S. Bureau of Reclamation.
- [67] U.S. Army Corps of Engineers (2020). EM 1110-2-1908 — *Instrumentation of Embankment Dams and Levees*. Disponible en: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineManuals/EM_1110-2-1908.pdf.
- [68] Dirección Nacional de Medio Ambiente (2004). *Guía para la medición de caudales*. Montevideo, Uruguay. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/guia-medicion-caudales>.
- [69] Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2025). *Talleres de Identificación de Modos de Fallo: Documentos de Apoyo a la Aplicación de la Guía. Catálogo para presas de laminación, riego e hidroeléctricas*. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/talleres-de-identificacion-de-modos-de-fallo-guia-metodologica>
- [70] NRCS (1997). *National Engineering Handbook, Part 628 (Dams), Chapter 51: Earth Spillway Erosion Model*. Washington, DC. Disponible en: https://www.irrigationtoolbox.com/NEH/Part628_Dams/Chapter%2051.pdf

-
- [71] FEMA (2013). *Selecting and Accommodating Inflow Design Floods for Dams* (FEMA P-94).
- [72] U.S. Bureau of Reclamation (1983). *Safety Evaluation of Existing Dams (SEED Manual)*.
- [73] ICOLD (2018). *Flood Evaluation and Dam Safety. Bulletin 170*.
- [74] Ohio Administrative Code. (2024). Rule 1501:21-13-04 | Pipe conduit spillways, general requirements. [Ohio Laws](#).
- [75] U.S. Army Corps of Engineers (1991, rev. 1994). *Engineering and Design — Hydraulic Design of Flood Control Channels. Engineer Manual EM 1110-2-1601*. Disponible en: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1601.pdf
- [76] NRCS (2014). *National Engineering Handbook, Part 628 — Dams, Chapter 50: Earth Spillway Design. NEH 628.50*.
- [77] CIRIA, CUR & CETMEF (2007). *The Rock Manual — The Use of Rock in Hydraulic Engineering*. Disponible en: <https://www.ciria.org>.
- [78] Charman, J. et al. (2001). *Small Dams and Weirs in Earth and Gabion Materials. AGL/MISC/32/2001. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome*. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/12c05c1a-477e-4846-99a0-338c5413bfa7/content>
- [79] FEMA (2005). *Technical Manual: Conduits through Embankment Dams (FEMA 484)*. Disponible en: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema484_conduits_embankment_dams.pdf.
- [80] NRCS . *National Engineering Handbook, Part 650, Chapter 8 — Small Reservoirs*.
- [81] U.S. Army Corps of Engineers (1980). *EM 1110-2-1602 — Hydraulic Design of Reservoir Outlet Works*.
- [82] U.S. Army Corps of Engineers (2020). *EM 1110-2-2902 — Conduits, Pipes, and Culverts Associated with Dams and Levee Systems*. Disponible en: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2902.pdf.

-
- [83] FHWA (2006). *Hydraulic Engineering Circular No. 14 — Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels*. Disponible en: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/06086/06086.pdf>.
- [84] U.S. Army Corps of Engineers (1995). *EM 1110-2-1911 — Construction Control for Earth and Rock-Fill Dams*. Disponible en: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1911.pdf.
- [85] NRCS. *National Engineering Handbook, Chapter 11 — Ponds and Reservoirs*. Disponible en: <https://directives.nrcs.usda.gov>.
- [86] U.S. Army Corps of Engineers (2004). *EM 1110-2-2300 — General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams*. Disponible en: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2300.pdf.
- [87] ASTM International. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (Proctor estándar)*. ASTM D698.
- [88] UY S 15 — *Ensayo de compactación (Proctor estándar)*. Norma de Vialidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, República Oriental del Uruguay.
- [89] ASTM International. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (Proctor modificado)*. ASTM D1557.
- [90] UY S 17 — *Ensayo de compactación (Proctor modificado)*. Norma de Vialidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, República Oriental del Uruguay.
- [91] ASTM International. *Standard Test Methods for Maximum Index Density of Soils Using a Vibratory Table*. ASTM D4253.
- [92] ASTM International. *Standard Test Methods for Minimum Index Density of Soils and Calculation of Relative Density*. ASTM D4254.
- [93] NRCS . *National Engineering Handbook, Part 628 — Dams, Chapter 5*. United States Department of Agriculture.
- [94] SPANCOLD. *Guía Técnica Nº 3 — Estudios Geológico-Geotécnicos y de Prospección de Materiales*. Comité Nacional Español de Grandes Presas. Disponible en: <https://www.spancold.org/producto/guia-tecnica-de-seguridad-de-presas-no-3-estudios-geologicos-geotecnicos-y-de-prospeccion-de-materiales/>

-
- [95] ASTM International. *Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method*. ASTM D1556.
- [96] ASTM International. *Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil by Nuclear Methods*. ASTM D6938.
- [97] Hilf, J. W. (1961). *A Rapid Method of Construction Control for Embankments of Cohesive Soil*. USBR Engineering Monograph No. 26. Disponible en: https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/hydraulics_lab/pubs/EM/EM26.pdf.
- [98] ASTM International. *Standard Practice for Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles*. ASTM D4718.
- [99] U.S. Bureau of Reclamation (2012). *Design Standards No. 13: Embankment Dams, Chapter 2 — Embankment Design*. Disponible en: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/designstandards-datacollectionguides/finalds-pdfs/DS13-2.pdf>.
- [100] SPANCOLD. *Guía Técnica Nº 1 — Seguridad de presas y embalses*. Disponible en: <https://www.spancold.org/producto/guia-tecnica-de-seguridad-de-presas-no-1-seguridad-de-presas/>.
- [101] ICOLD (2021). *Dam Safety Management: Pre-operational Phases of the Dam Life Cycle*. Bulletin 175.
- [102] FEMA (2015). *Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management (FEMA P-1025)*. FEMA, United States.
- [103] U.S. Bureau of Reclamation (2001). *Standing Operating Procedures Guide for Dams, Reservoirs, and Power Facilities*.
- [104] Decreto 226/025 (20/10/2025). *Reglamentación de los artículos 144 a 148 del Código de Aguas (Ley 14.859) sobre prevención de la contaminación y calidad de las aguas*. Poder Ejecutivo, República Oriental del Uruguay.
- [105] FEMA (2013). *Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures*. FEMA P-946. Department of Homeland Security, United States. Disponible en: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_dam-safety_inundation-mapping-flood-risks.pdf
- [106] FEMA (2013). *Federal Guidelines for Dam Safety: Emergency Action Planning for Dams (FEMA P-64)*. Disponible en:

https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/eap_federal_guidelines_fema_p-64.pdf

- [107] Canadian Dam Association (2013). *Dam Safety Guidelines 2007 (2013 Edition)*. Canadian Dam Association, Toronto.
- [108] MITECO (2021). *Guía Técnica de Clasificación de Presas en función del Riesgo Potencial*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, España.
- [109] Ley 19.438, artículo 95. *Registro de Técnicos Profesionales de Aguas*. República Oriental del Uruguay.
- [110] Lei 14.066/2020. *Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)*. República Federativa do Brasil.
- [111] ICOLD (2018). *Dam Decommissioning — Guidelines*. Bulletin 160.
- [112] Province of British Columbia (2019). *Dam Decommissioning Guidelines*. Disponible en: <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/water/dam-safety>.
- [113] State of Victoria, Australia (2024). *Decommissioning and Repurposing Dams*. Disponible en: <https://www.water.vic.gov.au>.
- [114] ICOLD (2012). *Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River Systems*. Bulletin 147.
- [115] ASCE Geomorphology and Sediment Transport Task Committee (2011). *Sediment Management at Dam Removal Sites*. American Society of Civil Engineers.
- [116] Canavese, N. y Oleaga, E. (2012). *Análisis de Riesgo de Presas de Riego en Uruguay. Proyecto Final de Carrera*. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.
- [117] Menescal, R.A. et al. (2025). *Metodologia ANA para Classificação de Barragens*. XXXV Seminário Nacional de Grandes Barragens (Damsweek 2025), Comitê Brasileiro de Barragens, Porto Alegre, 25-26 de agosto de 2025.