



INCO-CT2004-510739

EPIC FORCE

Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt

Instrument: Specific Targeted Research Project

Thematic Priority: Specific Measures in Support of International Cooperation, Developing Countries, A.2 Rational Use of Natural resources, A.2.1 Managing humid and semi-humid ecosystems

Deliverable D21

Illustrative technical guidelines on boulder and log check dam design and use in river rehabilitation and restoration

GUÍA TÉCNICA - Obras de bajo impacto ambiental (diques de bloque y de madera) para la restauración y la corrección de torrentes

Authors: Lenzi M.A., Mao L., Rigon E., Comiti F., Andreoli A., Pecorari E., Picco L.

**University of Padova (UNIPD)
Department of Land and Agroforest Environments**

Due date of deliverable: Month 32

Actual submission date: Month 32

Start date of project: 1 February 2005

Duration: 36 months

Organisation name of lead contractor for this deliverable: University of Padova

Revision [final]

Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006)		
Dissemination Level		
PU	Public	X
PP	Restricted to other programme participants (including the Commission Services)	
RE	Restricted to a group specified by the consortium (including the Commission Services)	
CO	Confidential, only for members of the consortium (including the Commission Services)	

EPIC FORCE - UNIPD Obras de bajo impacto ambiental para la restauración de torrentes

Lenzi M.A., Mao L., Rigon E., Comiti F., Andreoli A., Pecorari E., Picco L.

SUMMARY

This document presents guidelines for stream restoration and river rehabilitation by using low-impact transversal structures made of boulders and logs, based on the positive experience gained in Italian basins. The implementation of such “naturalistic” works present many advantages over traditional methods, especially in world regions where larger, more expensive structures are either not appropriate or unfeasible. In particular, the use of wood in stream restoration projects in forested basins is becoming prominent worldwide.

The popularity recently gained by wood in stream control and restoration derives from the fact that in-channel wood has been recognized to impart a great deal of stability to degrading streams, especially when pieces are assembled in large jams spanning channels, the so-called debris or wood dams. It became evident how removing wood from steep channels caused a marked increase in sediment yield during the following years, and that boulders are fundamental in initiating and stabilizing wood accumulations. At the same time, an augmented attention to environmental (both landscape and ecological) values has spurred the adoption of low impact structures in the river control practice. Therefore, the use of logs and large rocks has started to replace the use of concrete in the construction of check dams and bed sills for the prevention of channel incision.

Such low-impact check dams can be used in wide range of field settings, but their constructive typology varies according to the degree of safety, i.e. the flood magnitude/frequency for which structure stability is no longer guaranteed, required in each environment. Also, fluvimorphological relationships derived from field observations have been implemented to seek a more “natural” character for the stream control works built with rocks and wood. The underlying assumption – unfortunately not always true – is that mimicking how nature would configure a stream reach at a given location within a watershed will lead to the best compromise between stream stability and ecological effectiveness of the interventions.

The first section of the report presents an historical perspective to the use of boulder and log check dams, started centuries ago in the European Alps, as well as a first introduction on where these works are more suitable.

The second chapter deals with boulder check dams, from their early typologies to the most modern realizations where a geomorphological approach – based on natural step pool geometries encountered in mountain channels – is adopted to design dam height and spacing. Three different types of boulder check dams, i.e. loose rocks, cemented rocks, rocks reveting a concrete structure, featuring increasing stability, are presented. A table provides information on when each of them is better suited. Summarising, the loose rocks type is adequate when a stream has channel slope up to 12-14% and predominantly rural surroundings, thus allowing a shorter safety time span (20-30 yr). In contrast, in case of urbanized landscapes, and/or steeper channels (up to 20%) with possible debris flows, a higher safety degree is required (>50 yr) and the latter typology is needed. The cemented rocks typology is used in intermediate cases.

The third section presents wooden control structures, where logs, whole trees and rocks are the constitutive elements. Several typologies are discussed, along with the practical aspects for their correct construction. Procedures for the design of structure dimensions based on both internal and external stability are also reported. The most used and reliable typology is called “box dam”, where longitudinal and transversal wood elements bound by bolts and nails form a sort of cage filled with rocks collected from the stream. The realization of artificial log steps – resembling those naturally found in forest streams – is then presented, followed by other wooden structures (e.g., groynes, walls) for bank stabilization

The fourth chapter analyses the factors influencing degradation and thus durability of wooden structures. Processes by which sunlight, rain and biological agents degrade wood are discussed. Variation of the water content in wooden structures is then analysed, and how it affects long-term durability. Products and methods for wood preservation are then presented.

The fifth chapter treats methods to evaluate the degree of conservation and performance of wooden control structures. Checklist tables are presented, involving the evaluation of the wood decay status, as well as conditions of dam body, dam crest, dam wings and foundations. Maintenance activities to prolong the duration of wooden dams are then reported.

Finally, conclusive remarks are presented in the sixth chapter, followed by the reference list.

PROLOGO

El presente documento representa el deliverable D21 preparado por el equipo de trabajo de la Universidad de Padova en el ámbito del proyecto de Cooperación Internacional financiado por la Unión Europea EPIC FORCE (Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt), liderado por el Prof. James Bathurst de la Universidad de Newcastle (UK). Este documento entiende proporcionar indicaciones técnico-prácticas sobre criterios de proyectación de obras a bajo impacto ambiental para la restauración y corrección de torrentes. En particular se reporta sobre diques de bloques y de madera, y sobre el dimensionamiento de obras transversales de corrección de cauces según criterios fluviomorfológicos. Esta memoria se integra con otra guía técnica (D22) presentada por el mismo equipo de trabajo, donde se brinda un panorama más general de las diferentes tipologías de obras de corrección de torrentes, donde se enmarcan los diques de tipo filtrante y selectivo y donde se ofrece una síntesis de los principales tipos de diques utilizados para el control de detritos leñosos.

El presente documento es la expresión de la larga experiencia del Departamento Territorio y Sistemas Agro-Forestales de la Universidad de Padova en temas de gestión y control de ríos de montaña a través de obras a bajo impacto ambiental, ya tratada en numerosas publicaciones científicas y técnicas en lengua italiana e inglesa, citadas en la Bibliografía de la presente guía.

EPIC FORCE - UNIPD Obras de bajo impacto ambiental para la restauración de torrentes

Lenzi M.A., Mao L., Rigon E., Comiti F., Andreoli A., Pecorari E., Picco L.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	LOS DIQUES DE BLOQUES	5
2.1	DIQUES DE BLOQUES PROYECTADOS SEGÚN CRITERIOS GEOMORFOLÓGICOS	13
2.1.1	STEP EN SECO	15
2.1.2	STEP ARTIFICIALES CONSOLIDADOS CON HORMIGÓN	15
3.	DIQUES DE MADERA	19
3.1	DIQUES DE POSTES DE MADERA	19
3.2	DISIPADORES	23
3.3	DIQUES A CAJÓN	25
3.3.1	CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS	25
3.3.2	ESTABILIDAD ESTRUCTURAL	31
3.3.2.1	Estabilidad externa	33
3.3.2.2	Estabilidad interna	37
3.3.3	GENERALIDADES SOBRE LOS DIQUES A CAJÓN	43
3.4	OTRAS TIPOLOGÍAS DE DIQUES DE MADERA Y DIQUES MIXTOS	45
3.4.1	EMPALIZADA A UNA PARED	45
3.4.2	DIQUE JESSER	51
3.4.3	DIQUE CONVEXO	52
3.4.4	ESPIGÓN CON UN PLANO DE DESLIZAMIENTO	53
3.4.5	OBRAS MIXTAS CON CAJÓN DE DOBLE PARED	54
3.4.6	OBRAS MIXTAS CON CAJÓN EN PARED SIMPLE	58
3.4.7	UMBRALES EN MADERA Y GRANDES ROCAS	60
3.4.8	ESPIGONES DE MADERA, PIEDRA Y ROCA	62
4	AGENTES DEGRADADORES Y MÉTODOS DE PROTECCIÓN DE LA MADERA	63
4.1	FACTORES QUE INCIDEN SOBRE LA MADERA Y SOBRE LA PROTECCIÓN SUPERFICIAL	64
4.1.1	LA ACCIÓN DEL SOL	64
4.1.2	LA ACCIÓN DE LA LLUVIA	66
4.2	CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA	67
4.3	DURABILIDAD NATURAL E IMPREÑABILIDAD	68
4.4	MÉTODOS DE PROTECCIÓN DE LA MADERA	71
4.4.1	MADERA TRATADA CON REPELENTE ULTRAWOOD	72
4.4.2	MADERA TRATADA A PRESIÓN CON REPELENTE SUPATIMBER	72
4.4.3	MADERA TRATADA A PRESIÓN CON REPELENTE PRESERVE	72
5	EVALUACIÓN DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LOS DIQUES DE MADERA	73
5.1	LA MANUTENCIÓN DE LAS OBRAS EN MADERA	79
6	CONCLUSIONES	80
7	BIBLIOGRAFÍA	81

EPIC FORCE - UNIPD Obras de bajo impacto ambiental para la restauración de torrentes

Lenzi M.A., Mao L., Rigon E., Comiti F., Andreoli A., Pecorari E., Picco L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Un <i>log step</i> (a la izquierda) y un <i>debris jam</i> (a la derecha).	3
Figura 2.1 -	Figura 2.1 - Evolución en el tiempo de los diques con esqueleto de hormigón armado y revestido con bloques atados y anclados (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	8
Figura 2.2 -	Figura 2.2 - Obra transversal con estructura agua arriba de hormigón y paramento aguas abajo constituido por bloques ciclópeos: detalle sobre la modalidad de anclaje de los bloques a la estructura (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	9
Figura 2.3 -	Figura 2.3 – Situación antes (izquierda) y después (derecha) de la sustitución de las obras de hormigón por obras transversales en bloques (torrente Canali, Trento) (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	9
Figura 2.4 -	Rampa de bloques de grandes piedras ancladas con micropalos realizadas agua abajo de un dique de consolidación en hormigón (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	12
Figura 2.5 -	Rampa de bloques realizada agua abajo de un dique de consolidación (torrente Fiorentina) (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	12
Figura 2.6 -	Ejemplo de un tramo de lecho en el cual se ha intervenido con la construcción de step en seco (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	15
Figura 2.7 -	Esquema de utilización de los bloques bases para la construcción de un step artificial consolidado con hormigón (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	16
Figura 2.8 -	Fases iniciales de la construcción de un step artificial con bloques simplemente consolidado con hormigón. La excavadora está abriendo una fisura sobre la ladera (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	17
Figura 2.9 -	El hormigón es transportado hasta la obra por medio de un mixer (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	17
Figura 2.10 -	Inserción del hormigón entre los agujeros presentes entre un bloque y otro (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	17
Figura 2.11 -	El hormigón es colocado en la excavación aguas arriba de la fila de los bloques (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	18
Figura 2.12 -	La trinchera aguas arriba es llenada con bloques de menores dimensiones y con tierra (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	18
Figura 3.1 -	Diques de madera (localidad Malga La Foca, La Valle Agordina, Belluno) (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	21
Figura 3.2 -	Sección de un dique en postes de madera (unidades en m). (Fuente: Aznar Fabra, 2003)	21
Figura 3.3 -	Diques de postes de madera en áreas de cárcavas activas en fase de estabilización. (Fuente: Aznar Fabra, 2003)	21
Figura 3.4 -	Vista en primer plano de diques de madera con reforzamiento posterior de sacos y relleno de tierra. (Fuente: Aznar Fabra, 2003)	22
Figura 3.5 -	Serie de diques de postes de madera en fase inicial de construcción en área de cárcavas activas con erosión muy severa. (Fuente: Aznar Fabra, 2003)	22
Figura 3.6 -	Perfil y vista lateral de dissipador.(Fuente: Aznar Fabra, 2003)	24
Figura 3.7 -	Vista general de diques de postes de madera con dissipador (1 x 0,6 m). (Fuente: Aznar Fabra, 2003)	24
Figura 3.8 -	Vista lateral de un dissipador construido con postes de pino impregnado y bolones de río. (Fuente: Aznar Fabra, 2003)	24
Figura 3.9 -	Dique a cajón en fase de construcción. (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	26
Figura 3.10 -	Dique a cajón con vertedero en cola de golondrina (a) y con vertedero trapezoidal (b). (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	26
Figura 3.11 -	Dique a cajón apenas terminado con vertedero en cola de golondrina. (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	27
Figura 3.12 -	Disposición de los elementos transversales de un cajón: a) continua y b) alternada. (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	28
Figura 3.13 -	Sección transversal esquemática de un cajón. (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	32
Figura 3.14 -	Vista de frente esquemática de un dique en correspondencia del vertedero. (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	34
Figura 3.15 -	Esquema estático para un cajón inclinado: Sección A-A de la figura 3.14. (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	34
Figura 3.16 -	Esquema de la estructuras de celdas del cajón (vista en planta). (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	38

Figura 3.17 -	a) Presiones que actúan en el interior del cajón según la teoría del silo; b) desarrollo de las presiones horizontales phz. (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	38
Figura 3.18 -	Superficies de acción de las presiones internas al cajón que actúan sobre los elementos longitudinales. (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	41
Figura 3.19 -	<i>Log step</i> recién realizado (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	43
Figura 3.20 -	Proyecto de obras tipo <i>step-pool</i> y <i>log-step</i> artificiales (dibujo Arq. Zolin, P.A.T.) (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	44
Figura 3.21 -	Pequeño dique de corrección con empalizada simple con vertedero de forma rectangular. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	48
Figura 3.22 -	Pequeño dique de corrección con empalizada simple y con vertedero a "cola de golondrina". (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	48
Figura 3.23 -	Defensa de riberas con empalizada simple reforzada con elementos incrustados en las riberas y con intervenciones de ingeniería naturalística ("empalizada viva"). (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	48
Figura 3.24 -	Defensa de riberas con empalizada y con una corriente constituida por tablas. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	49
Figura 3.25 -	Umbral con empalizada simple seguida de un contradique. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	49
Figura 3.26 -	Corrección de riberas con una empalizada recién acabada. (Rio Sacco, Val Venosta Bz) (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	50
Figura 3.27 -	Corrección de riberas con una empalizada: particular. (Rio Sacco, Val Venosta Bz) (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	50
Figura 3.28 -	Corrección de riberas con una empalizada después de un año de su construcción. (Rio Sacco, Val Venosta Bz) (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	50
Figura 3.29 -	Dique Jesser. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	51
Figura 3.30 -	Dique convexo. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	52
Figura 3.31 -	Espigón con un plano de deslizamiento. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	54
Figura 3.32 -	Vista de un sistema a cajón utilizado como defensa de riberas. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	55
Figura 3.33 -	Utilización de traviesas en una obra de cajón con doble pared. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	56
Figura 3.34 -	Dique con cajón con el paramento aguas abajo tamponado con madera. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	56
Figura 3.35 -	Dique con cajón con el paramento aguas abajo tamponado con piedras. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	56
Figura 3.36 -	Dique con cajón : a) con vertedero en forma de cola de golondrina; b) con vertedero trapezoidal; c) con dispositivo de drenaje. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	57
Figura 3.37 -	Dique con cajón y vertedero en forma de cola de golondrina. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	57
Figura 3.38 -	Consolidación del cauce: diques con cajón y con vertedero en forma de cola de golondrina. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	58
Figura 3.39 -	Dique con cajón de doble pared y con vertedero de forma trapezoidal: torrente con fuerte pendiente. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	58
Figura 3.40 -	Defensa de riberas con madera y piedra: a) cajón con una pared y con base de apoyo de tipo tradicional; b) cajón con una pared y con un ensanchamiento del lecho de fundación; c) cajón de doble pared con protección del pie con rocas. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	59
Figura 3.41 -	Defensa de riberas realizada con madera de castaño. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	60
Figura 3.42 -	Dique de madera y piedra con pared simple. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	
Figura 3.43 -	Sección de un dique de madera y piedra anclado por medio de plantas enteras. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	60
Figura 3.44 -	Umbral de madera y roca de forma arqueada. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	61
Figura 3.45 -	Umbral en madera y roca con un pequeño salto de fondo: a) Cuenca de disipación en roca; b) Cuenca de disipación con un telar en madera. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	61
Figura 3.46 -	Espigón mixto en madera y rocas. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	62
Figura 3.47 -	Obras de palos y rocas para la corrección de una erosión localizada. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	62

Figura 5.1 -	Evolución general media del estado de conservación de los diques de madera dependiendo de la edad y del número de diques (Zeller y Röthlisberger, 1987). (Fuente: Zeller y Röthlisberger, 1987)	76
Figura 5.2 -	Seguimiento real del número de diques plenamente eficientes (a) y completamente ineficientes (b) construidos en contextos desfavorables y en contextos medios (líneas continuas) realizados según su edad (Fuente: Zeller y Röthlisberger, 1987)	77
Figura 5.3 -	Seguimiento del estado de conservación de los diques introducidos en contextos favorables (Fuente: Zeller y Röthlisberger, 1987)	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 -	Esquematización de los campos de uso de las diversas tipologías de diques de bloques (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	14
Tabla 3.1 -	Tabla 3.1. - Materiales a utilizar por la construcción de un dique de postes de madera.(Fuente: Aznar Fabra, 2003)	
Tabla 3.2 -	Materiales a utilizar para la construcción de un dissipador en madera y piedra. (Fuente: Aznar Fabra, 2003)	24
Tabla 3.3 -	Máximas tensiones en medio de los elementos longitudinales del cajón para diferentes dimensiones (a, b') de las celdas y los diferentes diámetros (D) de la madera. (Fuente: Lenzi y <i>Otros</i> , 2000).	41
Tabla 3.4 -	Otras tipologías de diques de madera y diques mixtos. (Fuente: Aznar Fabra, 2003)	45
Tabla 5.1 -	Definición del estado de conservación de un dique de madera. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	74
Tabla 5.2 -	Varias intervenciones de mantenimiento necesarias garantizando la estabilidad y la eficacia de todo el sistema implantado. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	75
Tabla 5.3 -	Posibilidad de realizar los diques de madera en diversos contextos (1 =duración reducida, 2 = ambiente desfavorable). (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).	78

1 INTRODUCCIÓN

Las obras de tipo estructural para la ordenación de los cursos de agua montanos se subdividen en dos grandes categorías: las obras transversales en los cauces y las obras de defensa longitudinal de las márgenes de los ríos (muros de ribera y espigones). Ambas tipologías son utilizadas para el control de los efectos legados a la dinámica torrencial de los cursos de agua con pendiente mayor de 1%. Esta se manifiesta según la acción combinada de 3 factores:

- La erosión que una corriente encauzada puede provocar sobre un lecho aluvional;
- El transporte de los sedimentos por la corriente durante las avenidas (ya sea por transporte de fondo (*bedload*) o de masa (*debris-flows*);
- La alimentación sólida (*sediment supply*) a la red hidrográfica por parte de aquellas porciones de la cuenca que pueden considerarse como áreas surgentes de sedimentos. Estas están constituidas preferentemente por zonas inestables más directamente conectadas a la red hidrográfica (derrumbes superficiales limítrofes al retículo y erosión de orillas).

De Horatiis (1930) hizo una clasificación de los torrentes en dos categorías fundamentales, distinguiendo los torrentes de excavación de los torrentes de transporte. En los primeros tienden evidentemente a prevalecer, durante un periodo medio-largo, la capacidad de erosión de sedimentos respecto a la alimentación sólida. En estos cursos de agua las incisiones del lecho pueden ampliarse, las pendientes se vuelven inestables por la falta de contraste en la base, el curso de agua puede tender a ensancharse y cambiar su recorrido planimétrico. Por el contrario los torrentes de transporte tienen una capacidad de transporte no vinculada a la notable alimentación sólida proveniente de aguas arriba, el fondo tiende a no levantarse o a no bajar y los valles reciben una gran cantidad de sedimentos con peligro de sobrealuvionamiento de las secciones del cauce del tramo final del torrente. Junto a esta distinción esquemática, en la naturaleza se dan situaciones de tipo mixto, en las cuales los tramos del torrente dominados por fenómenos de incisión se pueden alternar con tramos congestionados por el aporte de sedimentos.

La tradición de las obras de corrección hidráulico forestal está fuertemente ligada al uso de los materiales constructivos que pueden ser obtenidos directamente en el lugar de construcción, como la madera y la piedra. Ya Vincencio Viviani (1688), en el discurso al

Serenísimo Gran Duque de Toscana, sugería el uso de “estacas de madera fuerte de castaño o encina” y de “gaviones rellenos con piedras”. En muchos valles del arco alpino Europeo se encuentran todavía con una cierta frecuencia obras en piedras e innumerables ejemplos de obras transversales y longitudinales de madera que, no obstante la exposición prolongada a las acciones mecánicas, climáticas y biológicas, se presentan aún a más de 100 años, mas o menos íntegras (Mantovani, 1996). No obstante, junto a diques de madera bien conservados, se encuentran también obras con una edad entre 20 y 40 años cuya eficiencia aparece en parte comprometida (Zeller y Roethlisberger, 1987). Es por éste motivo que, especialmente con la aparición de la tecnología del hormigón simple y armado, ha ido surgiendo una cierta discriminación de las obras en madera y piedras, a toda ventaja de las obras en hormigón. Ésta orientación ha llevado a reducir progresivamente la necesaria corrección de los ríos torrenciales en sus porciones menos accesibles, para no encarecer las intervenciones con costos excesivos relacionados al aprovisionamiento de los materiales constructivos. Las obras de consolidación se han concentrado así en el curso medio e inferior de los torrentes, descuidando parcialmente la corrección de las inestabilidades presentes en la red hidrográfica periférica. En las primeros años del 1900 inició la coexistencia de obras en hormigón y de obras en madera y en madera y piedra, quedando éstas últimas progresivamente en segundo plano en la economía conjunta de las intervenciones. A este proceso de afirmación de las obras en hormigón y piedra y a continuación de hormigón armado han contribuido las notables mejoras conseguidas en la confección del hormigón y su indudable mayor durabilidad.

Es solo en este último decenio, gracias a una creciente sensibilidad de la opinión pública hacia el medio ambiente, que se ha dado un nuevo impulso al uso de los materiales “históricos” en las correcciones hidráulicas, tal como la madera, los bloques y las piedras. Esta tendencia ha llevado a una más cuidadosa diversificación de las soluciones de corrección de torrentes. Por ejemplo, en Europa ha iniciado a considerarse de manera meno rígida la necesidad de obtener una corrección definitiva de los cursos de agua (D’Agostino y *Otros*, 1997), que por otra parte no está garantizada ni siquiera por las obras en hormigón armado. Se ha puesto entonces mayor atención al mantenimiento de las características morfológicas del curso de agua en el respecto de su ecosistema biológico, a través de intervenciones con obras proyectadas con los criterios propios de la ingeniería naturalística. Los bloques y las maderas son además materiales que participan de forma natural a la definición del paisaje, al cual confieren también una recalificación estética (D’Ambros, 1994) y que constituyen elementos involucrados en los procesos de dinámica torrencial. Para confirmar esto es suficiente recordar

que existen unidades morfológicas constituidas de madera que se encuentran naturalmente en los ríos, como los *log steps* (Wohl y Otros, 1997) y los *debris jams* (Abbe y Montgomery, 1996). Los *log steps* son estructuras transversales constituidas por uno o dos troncos parciales o enteros que crean una retención de sedimentos aguas arriba y una socavación (*pool*) aguas abajo (Fig. 1.1). Los *debris jams* son acumulaciones transversales o longitudinales de grandes dimensiones, constituidos por un gran número de elementos leñosos entrapados alrededor de algunos elementos clave que estabilizan la acumulación (Fig. 3.1).



Figura 1.1 - Un *log step* (a la izquierda) y un *debris jam* (a la derecha).

Los pequeños diques de corrección que emplean la madera como material estructural primario encuentran su óptima colocación en el ámbito sistemático en el cual la obra de consolidación de torrentes se encuentra en fase de excavación (en particular en las redes hidrográficas de primer y segundo orden). En este caso las erosiones pueden ser corregidas recurriendo a una serie de obras que garanticen una altura contenida (≤ 3.5 m) y que puedan ser realizadas en zonas de muy difícil acceso. Más esporádico es el empleo de pequeños diques de corrección en madera con una exclusiva función de retención de sedimentos, aunque no falten ejemplos "históricos" sobre la realización de diques de este tipo de altura de 10 m.

Por lo que se refiere en cambio a la defensa de las márgenes de los cauces realizados con obras de madera, estas encuentran su máximo rendimiento y utilidad en las partes terminales de los torrentes, en el cono de deyección, y en particular, en los tramos de fondo de valle con pendiente no muy acentuada; en este caso tienen la función de mantener estables las secciones del cauce y de mejorar la conducción hidráulica aun frente al transporte sólido.

Más debatido es el empleo de los espigones en el caso de los torrentes con fuerte torrencialidad y pendiente. Si bien que una protección localizada de la ribera es siempre posible con este tipo de obras, es probable que la presencia de estas obras se encuentren aisladas, creando un cierto peligro de erosión localizada y de desprendimientos de las obras mismas. Por este motivo cuando se interviene con los espigones en torrentes con pendientes superiores a 4-5%, es oportuno que se intente realizar la corrección en ambas riberas, del modo más simétrico posible. En cambio, la utilización de espigones en tramos bajos con una menor pendiente consiste en intervenir eficazmente también de un modo localizado, consiguiendo más adelante los objetivos de protección del cauce y también la protección de las áreas de reposo y de reproducción de la fauna autóctona y la alternancia de zonas de aceleración y desaceleración de la corriente que dan al curso de agua un aspecto de mayor naturalidad.

2 LOS DIQUES DE BLOQUES

Las obras de consolidación del lecho realizadas con diques de bloques están encontrando una difusión creciente en el ámbito de la corrección hidráulica de los torrentes alpinos. Estos tipos de obras se pueden esquematizar en las siguientes cuatro categorías:

- Diques de bloques en seco;
- Diques de bloques consolidados con hormigón;
- Diques con estructura en hormigón revestida con bloques;
- Obras transversales con bloques ancladas al fondo por medio de micro palos.

Desde el final de los años '70 se ha empezado en la región italiana del Trentino la experimentación de las dos primeras tipologías constructivas, consistentes en la realización de obras con grandes bloques no escuadrados, puestos en seco o consolidados con el uso de hormigón. La proveniencia de los bloques puede ser local, siendo hallados en el área de pertenencia del torrente, o externa, cuando por ejemplo proviene de canteras de prestamos. Las técnicas constructivas usadas han sufrido una cierta evolución dictada mayormente por la crecientes capacidades operativas ofrecidas por las máquinas excavadoras.

Inicialmente el uso de grandes bloques en las sistematizaciones hidráulicas forestales era preferentemente orientado a la realización de obras longitudinales de defensa de orillas. Luego se han empezado a realizar obras transversales en zonas con un bajo grado de torrencialidad, en las cuales la sistematización se concretaba en la edificación de diques con bloques puestos en seco o ligados con hormigón. La adopción de ésta tipología de obra ha contribuido a reducir drásticamente el empleo de mano de obra y ha llevado a una disminución de los costos y a una mejor inserción ambiental de la intervención respecto a las obras más tradicionales de corrección de torrentes.

No obstante, los diques en bloque tienen un campo de trabajo más limitado. En las situaciones más problemáticas, como en los torrentes con pendientes muy elevadas (superiores al 20%) con intenso transporte sólido o donde se verifican coladas detríticas, su realización podría llevar a un parcial o total fallo de la obra. Influyen también sobre la aplicación práctica de éste tipo de obra los límites técnicos dictados por la imposibilidad de superar determinadas alturas del cuerpo de la obra, mientras la robustez de la estructura está asegurada

primariamente por las dimensiones de los bloques obtenidos en el lugar o traídos de otra parte. Otro aspecto es su duración, que parece un poco limitada respecto a aquella tradicional con hormigón. Obviamente, estos límites de aplicación y técnicos han sido, al menos en parte, superados por nuevas tipologías de obras.

El Servicio Cuencas de Montaña de la Provincia Autónoma de Trento ha realizado, a partir de 1990, obras en hormigón ligeramente armado que están ancladas, mediante cables de acero, a grandes bloques que constituyen el paramento aguas abajo y la coronación (vertedero) de la estructura. La obra resulta tener una solidez estructural comparable con una de hormigón armado, respecto a la cual ofrece la ventaja de una mejor inserción paisajística. En lo que respecta a los costos, éstos se sitúan entre los de los diques tradicionales en hormigón (armado o a gravedad) y los más elevados de las obras en hormigón revestidos con piedras. Esta tipología ha evolucionado con el tiempo, con el fin de ahorrar hormigón y buscar una mayor simplicidad constructiva. En los primeros diques se realizaba un particular trabajo de anclaje en hormigón (esqueleto), oportunamente moldeado y agujereado, sobre el cual se fijaban sucesivamente por medio de cables metálicos gruesos bloques que formaban el paramento aguas abajo y la coronación de la obra (Fig. 2.1.a). De ésta manera se tenía que realizar un propio dique tradicional, con relativos moldeados y con largos tiempos de ejecución y resultando además los bloques separados del cuerpo central en hormigón.

En una segunda etapa se prefirió la puesta en obra de los bloques de piedra durante la fase de la posa del hormigón obteniendo así una mejor cohesión entre las partes y una reducción de los tiempos de ejecución. En este caso los cables de acero se anclaban a las armaduras y se cubrían con hormigón mientras el moldeo se mantenía en el paramento de aguas arriba de la obra (Fig. 2.1.b).

Más recientemente el moldeo del paramento de aguas arriba ha sido sustituido por la realización de una rudimental escollera como apoyo del frente de excavación (Fig. 2.1.c). De éste modo es necesario un menor volumen de excavación y se consigue una mayor seguridad para los obreros y una notable reducción del tiempo de realización de las obras. Terminada la fase de excavación se procede a la puesta en obra de la primera fila de bloques aguas abajo con una disposición en arco y con un espesor cerca de 20 cm. Los bloques, después de haber sido dispuestos en fila son agujereados y anclados a la armadura posterior por medio de cables de acero. De esta manera el original moldeo en madera realizado para los primeros tipos de obras, es sustituido aguas abajo por las filas de bloques y aguas arriba por una escollera.

También el sistema de anclaje de los bloques con los cables de acero ha sufrido una evolución en el tiempo. En las primeras obras los bloques eran agujereados de parte a parte mientras que ahora se prefiere realizar un agujero ortogonal a la superficie del bloque y con una profundidad limitada (20 a 30 cm). El agujero viene después rellenado con una resina química, en la cual se introduce una barra de acero con adherencia mejorada (diámetro de 20 mm). La extremidad de la barra presenta un anillo, por el cual se hace pasar el cable de anclaje (Fig. 2.2). La adopción de esta nueva metodología permite agilizar el anclaje de los bloques gracias a la reducción del tiempo de perforación y a la rapidez del endurecimiento de la resina utilizada obteniendo una notable resistencia a la rotura de la barra. La tipología constructiva descrita anteriormente es ahora la más comúnmente utilizada, permitiendo realizar obras de notable robustez y duración.

Algunas correcciones hidráulicas ejecutadas con este tipo de diques han sido ya sometidas a severas pruebas por parte de crecidas con periodos de recurrencia de 20 - 30 años e incluso a coladas detríticas. Es indicativo, por ejemplo, el evento del 14 de septiembre de 1994 en la cuenca del torrente Cismon (una subcuenca del río Brenta), que ha provocado coladas detríticas sobre algunos afluentes y grandes transportes sólidos en el colector principal. En ésta ocasión se han registrado daños en el vertedero de los diques tradicionales, mientras las obras de bloques del tipo descrito no han sufrido daños, ni siquiera los diques localizados sobre un afluente (arroyo Val Male) afectado por una colada detrítica.

Los diques de bloques consolidados con solo hormigón (Fig. 2.3) son obviamente una simplificación de la tipología ilustrada en la Fig. 2.1.c. El moldeado aguas arriba casi nunca es ejecutado y no existe ninguna armadura y/o ligadura de los bloques. Los volúmenes de conglomerado son bastante contenidos ya que el cuerpo de la obra detrás del paramento aguas arriba es reducido al mínimo necesario para conectar estructuralmente los bloques y conferir un cierto monolitismo al dique. Los volúmenes constructivos de hormigón son del orden de 2 – 4 m³ por metro cuadrado de paramento aguas abajo puesto en obra para los diques de bloques ligados, mientras disminuyen a valores de 0.5 – 1.5 m³ para las obras simplemente consolidadas con hormigón. Es oportuno precisar como las obras de bloques que prevén un esqueleto en mampostería resultan estáticamente muy abundantes, con base de apoyo con una anchura igual o superior a la altura de la obra, mientras los volúmenes de hormigón usados son superiores respecto a los requeridos para la realización de diques tradicionales (en promedio estos últimos necesitan de 2 – 2.5 m³ por metro cuadrado de paramento aguas abajo puesto en obra). La reducción de los volúmenes de conglomerado no pueden, por otra parte, reducirse

mas allá de un cierto límite constructivo, ya que las dimensiones de los bloques hace necesario, durante la fase de posa del hormigón, una cantidad no despreciable de intersticios que tienen que ser llenados.

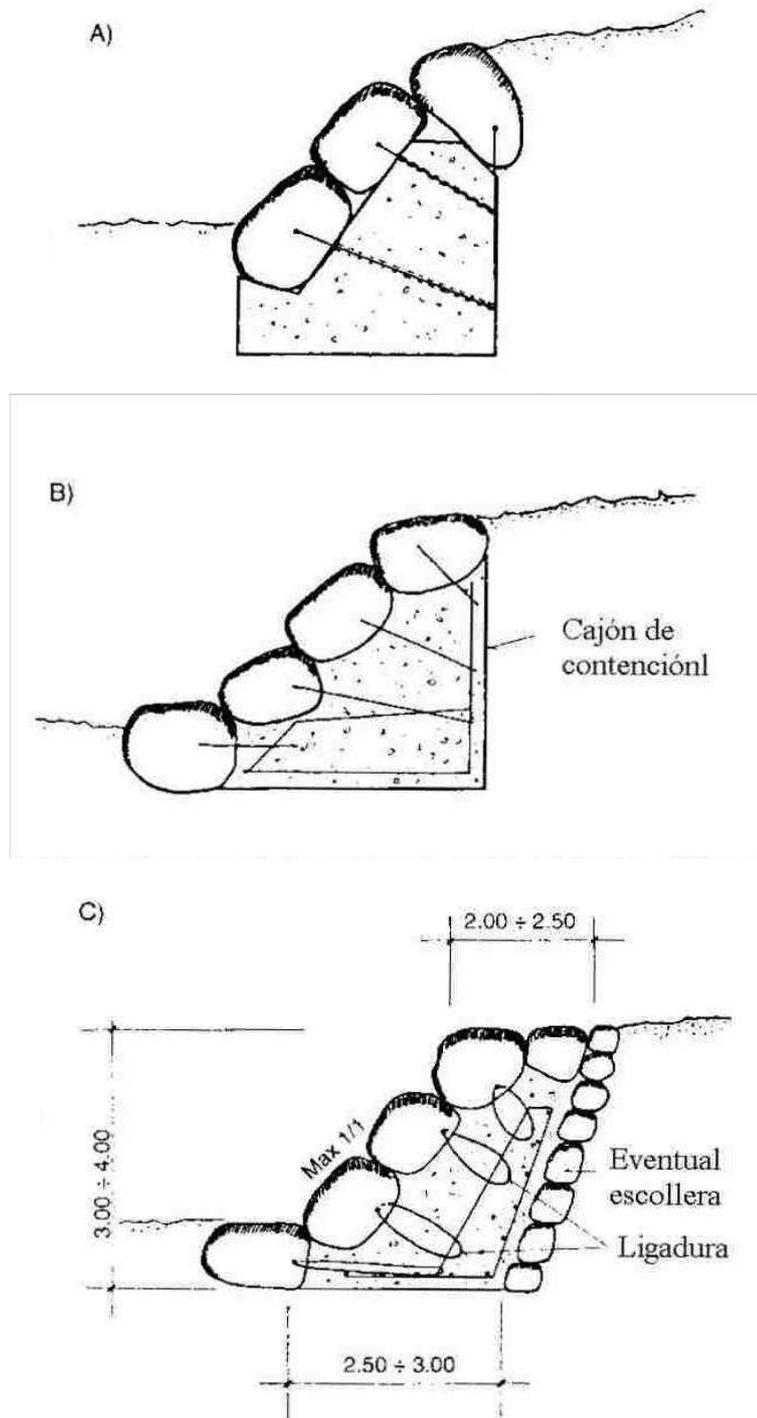


Figura 2.1 - Evolución en el tiempo de los diques con esqueleto de hormigón armado y revestido con bloques atados y anclados (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).



Figura 2.2 - Obra transversal con estructura agua arriba de hormigón y paramento aguas abajo constituido por bloques ciclópeos: detalle sobre la modalidad de anclaje de los bloques a la estructura (Fuente: Lenzi y *Otros*, 2000).



Figura 2.3 – Situación antes (izquierda) y después (derecha) de la sustitución de las obras de hormigón por obras transversales en bloques (torrente Canali, Trento) (Fuente: Lenzi y *Otros*, 2000).

Los diques de bloques ligados con hormigón están condicionados por ciertos límites de uso. Su utilización es recomendada en lechos con una cierta disponibilidad de bloques. En el caso de que en el lecho falten elementos gruesos, las obras evidencian la artificialidad de la intervención, dando lugar a un impacto visual igual o tal vez superior al de las obras tradicionales de hormigón. En este caso es también necesario la obtención de gran parte de los bloques de otras localidades con un consecuente aumento de costos. La notable cantidad de

bloques a utilizar debe, además, intentar no excederse en la extracción de bloques en el lugar, especialmente si éstos están presentes en cantidad limitada. Otro aspecto muy importante a considerar es el cuidadoso relleno de la zona posterior a la línea de bloques. Operaciones muy apresuradas o la utilización de un hormigón no adecuado pueden comprometer un buen resultado de la intervención. Un hormigón poco fluido puede inducir a una falta de llenado de los intersticios posteriores mientras, un hormigón excesivamente fluido tiende a salirse aguas abajo evidenciando, de tal manera, la artificialidad de la obra. Además, la edificación de las obras tiene un límite constructivo en la altura del cuerpo del dique que puede alcanzar 3 – 3.5 m a la cota del vertedero y no más de 5 – 5.5 m en correspondencia de las alas. Para la realización de éste tipo de intervenciones son necesarios uno o más medios mecánicos para el movimiento de tierras y para ejecutar las excavaciones de fundación. Sobre todo la posición de los bloques requiere excavadoras de particulares características operativas.

A los límites expuestos se contraponen por supuesto una serie de ventajas. Entre éstas se recuerdan la elevada velocidad de construcción y el alto grado de estabilidad de las obras. La reducción del tiempo de construcción disminuye la probabilidad de incurrir en una serie de inconvenientes de obras conectadas a crecidas repentinas que pueden causar notables daños si no se han dispuesto desviaciones seguras del curso de agua. No se debe olvidar, finalmente, el bajo uso de mano de obra y la óptima integración ambiental. Esta última puede ser mejorada posicionando los bloques que constituyen el paramento aguas abajo de forma un poco irregular. Se enumeran a continuación algunos detalles a tener en cuenta en la fase ejecutiva:

- La excavadora utilizada para la puesta en obra de los bloques debe ser conducida por un operador con una elevada habilidad profesional;
- Debe ser utilizada una excavadora de peso y potencia medio-alta, con características adecuadas al manejo de los bloques (carro reforzado, cuchara para escollera, dos articulaciones en el brazo, potencia superiores a los 150 HP);
- Se debe emplear hormigón con buenas características de resistencia (RCK³ 25 Mpa) y con la justa consistencia en el momento de puesta en obra;
- Es oportuno utilizar bloques de suficiente consistencia y bien lavados en la parte de aguas arriba de manera tal que favorezca una mejor adhesión del hormigón;
- Los eventuales cables de acero deben ser posicionados en la parte posterior de los mismos bloques, de manera que se puedan introducir completamente en el hormigón;

- Debe establecerse un adecuado procedimiento de trabajo (orden de servicio) para los obreros que trabajan en el rayo de acción de la excavadora;
- Una planimetría de la obra con desarrollo arqueado hacia aguas arriba y una cubeta en forma de catenaria son funcionales para mantener la corriente en el centro del lecho;
- Es preferible una inclinación del paramento próximo a la vertical, ya que un paramento aguas abajo muy inclinado acentúa la profundidad del pozo al pie de la obra;
- Cuando es posible, se debe elegir la realización de obras más frecuentes y de baja altura en lugar de una corrección con menos obras pero de mayor altura;
- Las partes más complejas para poner en obra son las alas, que deben ser bien dimensionadas y ancladas profundamente en las orillas para evitar la erosión lateral.

Otra tipología de intervención de nueva concepción, proyectada y realizada por el Servicios Forestales de Belluno (Región Veneto, Italia), es representada por las traviesas con bloques anclados al fondo por medio de micropalos. La fase ejecutiva se diversifica según la intensidad del transporte sólido en el fondo que caracteriza al torrente. Si éste último es muy elevado, se efectúan los agujeros con una barrena de campo (diámetro=100 mm) para profundidad variable generalmente de los 5 a 12 metros, en función de la consistencia y de la profundidad a la que se encuentra el estrato rocoso de base. En estos agujeros se insertan los micropalos en los cuales se introducen clavos de acero de diámetro de 18 – 20 mm, fijados mediante inyección de cemento. Los micropalos se disponen a tres bolillos sobre dos hileras paralelas de manera que cada bloque, previamente perforado (volúmenes de cerca de 1 – 2 m³), es anclado al cable usando unos ojales de acero y resinas. Se obtiene así una estructura concatenada, estable y bien anclada.

Para lechos caracterizados por un transporte sólido menos intenso, después de agujerear los bloques, éstos son unidos utilizando un único cable metálico pasante, el cual viene sucesivamente inserto en los anillos en la cabeza de dos micropalos localizados en correspondencia a las orillas. Ésta segunda tipología está indudablemente caracterizada, respecto a la anterior, por una mayor elasticidad estructural. Se considera que las obras de bloques fundadas sobre micropalos se coloquen idealmente, bajo el perfil de su estabilidad en el lecho, un poco por debajo de los diques de bloque anclados a una estructura en hormigón armado (Fig. 2.1.c) y ciertamente por encima de las obras puestas en seco o consolidadas con hormigón. Ésta tipología de obra puede ser también utilizada para la realización de rampas de

bloques. En la Fig. 2.4 se muestra el proyecto de una rampa de bloques, puesta en obra aguas debajo de un dique de consolidación para evitar la erosión al pie y el vuelco de la misma, y en la Fig. 2.5. la misma obra realizada en el torrente Fiorentina.

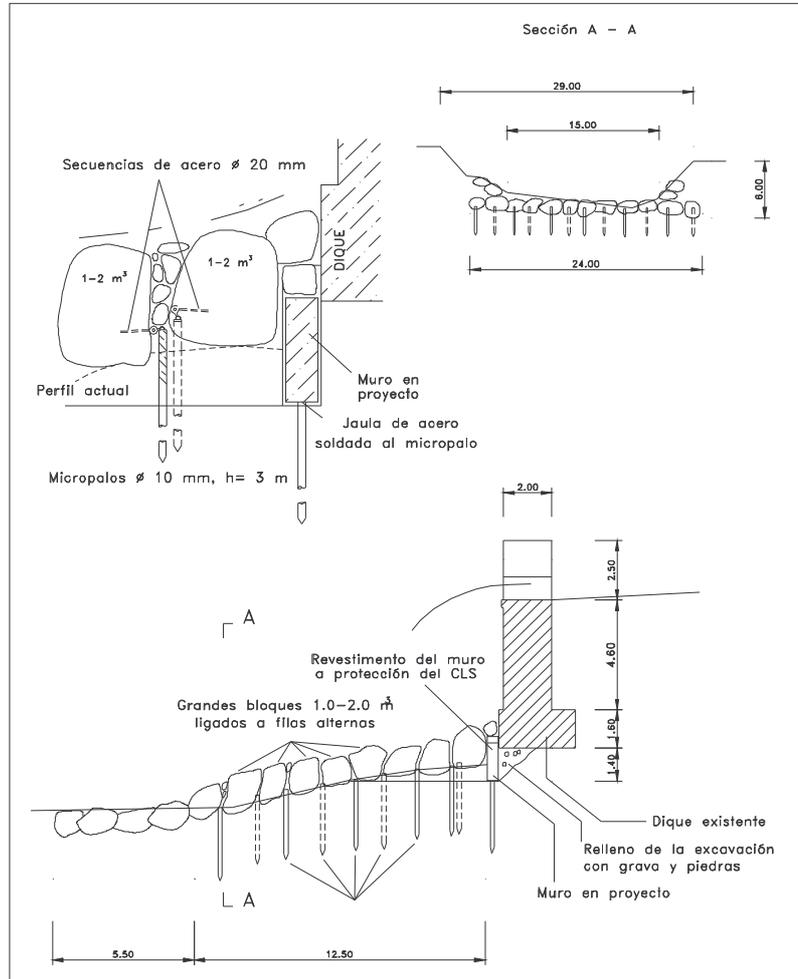


Figura 2.4 - Rampa de bloques de grandes piedras ancladas con micropalos realizadas agua abajo de un dique de consolidación en hormigón (Fuente: Lenzi y *Otros*, 2000).



Figura 2.5 - Rampa de bloques realizada agua abajo de un dique de consolidación (torrente Fiorentina) (Fuente: Lenzi y *Otros*, 2000).

2.1 DIQUES DE BLOQUES PROYECTADOS SEGÚN CRITERIOS GEOMORFOLÓGICOS

Los cursos de agua que necesitan mas intervención de corrección de pendiente y de consolidación del lecho son los torrentes de montaña con pendiente mayor de 1%. Estos cursos de agua manifiestan naturalmente una morfología muy típica caracterizada por la sucesión de tramos con una pendiente sostenida y una modesta profundidad del flujo (*riffle*) con tramos con un perfil mas llano y mayor calado (*pool*). Esta alternancia entre *riffle* y *pool* caracteriza todos los cursos de agua naturales (Leopold y Otros, 1964). Los *riffles* son cuerpos sedimentarios que pueden migrar, destruirse y reformarse, y son los elementos vitales e insustituibles para la dinámica del cauce. Cuando la pendiente de un curso de agua montano aumenta (mayor del 4%) y el lecho tiene disponible una granulometría muy gruesa y heterogénea, los *riffle* se acortan, dando lugar a una unidad morfológica mas alta (*step*). El perfil longitudinal asume en ese tramo un notable aumento de tamaño (secuencia *step* y *pool*), muy similar a lo que se obtiene con una serie de obras de consolidación. El mismo *step*, constituido por la acumulación de rocas de mayor dimensión (D_{90}) que constituyen el lecho (Lenzi, 1999; Lenzi y Otros, 2000), es asimilable a una obra de consolidación con una altura no relevante (0.3-0.2 m). Como han demostrado investigaciones, sea en campo que en laboratorio (Whittaker y Jaeggi, 1982; Lenzi, 1999) las secuencias de *step* y *pool* son estructuras estables que resisten a avenidas con recurrencia alta, hasta de 30-50 años. Con caudales más elevados estas secuencias a *step-pools* pueden destruirse para volver a reformarse en diferentes tramos de la o transformarse parcialmente. En definitiva el torrente, en caso de que subsistan las condiciones de formación de estas unidades morfológicas, tiene una capacidad intrínseca de alcanzar autónomamente un buen grado de estabilidad a través de estas estructuras a escalones (Lenzi, 1999; Lenzi y Otros, 2000).

La fase de proyecto de los diques con bloques puede ser perfeccionada teniendo en cuenta la similitud existente entre la morfología de las unidades fisiográficas de *step pool* y las obras de consolidación tradicionales. El perfil longitudinal de los tramos de *step pool*, llamado a propósito a escalones, es similar a aquel que caracteriza una serie de diques de consolidación dispuestos en secuencias. La distancia entre los escalones (*step*) de una secuencia depende de la pendiente longitudinal del torrente, de la altura de los *step*, de la granulometría del lecho y de la magnitud de las crecidas que lo han generado (D'Agostino y Lenzi, 1997; Lenzi y D'Agostino, 1998; Lenzi, 1999; Lenzi y Otros, 2000). La misma estructura del cauce con *step*

pool aparece como el punto de llegada de un proceso de evolución natural que tiende a una cierta estabilidad del torrente. Tomar como referencia y basarse en los aspectos peculiares de esta morfología significa tomar el resultado final de complejas iteraciones entre los aspectos de carácter hidráulico, sedimentológico y geomorfológico, para después aplicarlos de manera correcta en el lugar de “reconstrucción” del cauce. Tomando en cuenta lo expuesto, en la última decena han sido realizadas numerosas obras de corrección de torrentes según criterios fluviomorfológicos, que pueden ser clasificadas en 3 grupos distinguidos según tipología de realización y finalidad de la obra (Tab. 2.1).

Step en seco	Step artificiales consolidados con hormigón	Diques con esqueleto de hormigón revestidos con bloques
<i>CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO A CORREGIR</i>		
<ul style="list-style-type: none"> - Pendiente hasta 12-14% - Granulometría: <ul style="list-style-type: none"> a) Muy heterogénea b) Presencia importante de bloques de piedras de grandes dimensiones. - Morfología: <ul style="list-style-type: none"> a) No alterada por intervenciones anteriores. b) Presencia de secuencias de <i>step pool</i> y/o de <i>riffle step pool</i>. - Transporte sólido: <ul style="list-style-type: none"> a) De fondo. - Abundante presencia de gruesos bloques en lugar 	<ul style="list-style-type: none"> - Pendiente hasta 18-20% - Granulometría: <ul style="list-style-type: none"> a) Bastante graduada. b) Prevalencia de gravas pero con la presencia de bloques. - Morfología: <ul style="list-style-type: none"> a) Poco alterada por intervenciones anteriores b) Presencia y/o en los afluentes de breves secuencias de <i>step pool</i> - Transporte sólido: <ul style="list-style-type: none"> a) De fondo. b) Hiper-concentrado. - Discreta disponibilidad de bloques en el lugar 	<ul style="list-style-type: none"> - Pendiente hasta 18-20% - Granulometría: <ul style="list-style-type: none"> a) Más bien uniforme. b) Prevalencia de arena, y gravas rodadas con presencia de algunos bloques. - Morfología: <ul style="list-style-type: none"> a) Ya alteradas por intervenciones anteriores. b) Cauce poco estructurado. - Transporte sólido: <ul style="list-style-type: none"> a) De fondo. b) Hiper-concentrado c) Coladas detríticas. - Media o escasa disponibilidad de bloques.
<i>AMBIENTE CIRCUNDANTE A LA CORRECCIÓN</i>		
Natural, Agrícola	Natural, Agrícola, Poco urbanizado	Urbanizado
<i>GRADO DE SEGURIDAD REQUERIDO A LA CORRECCIÓN</i>		
Tiempo de recurrencia 20 – 30 años	Tiempo de recurrencia 30 – 50 años	Tiempo de recurrencia > 50 años

Tabla 2.1. - Esquemización de los campos de uso de las diversas tipologías de diques de bloques (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

2.1.1 STEP EN SECO

En la realización de los *step* en seco resulta de notable importancia en caso de presencia, en el cauce, de bloques ciclópeos de gran volumen ($3 - 10 \text{ m}^3$), parcialmente o completamente sumergidos en el substrato. Éstos elementos pétreos pueden definirse como verdaderos y propios bloques bases sobre los cuales la obra puede ser útilmente colocada (Fig. 2.6). A fin de garantizar un buen margen de seguridad es aconsejable construir el *step* en correspondencia de por lo menos un par de éstos bloques base, mientras que para las partes restantes de la estructura se debe realizar una adecuada fundación, posando los bloques constituyentes a por lo menos 1.5 - 2 m de profundidad. La terminación del *step* consiste en un cuidadoso trabajo con la excavadora, de manera que se entrecrucen los elementos constructivos entre ellos y hacer así estable el conjunto.



Figura 2.6 - Ejemplo de un tramo de lecho en el cual se ha intervenido con la construcción de *step* en seco (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

2.1.2 STEP ARTIFICIALES CONSOLIDADOS CON HORMIGÓN

Las condiciones que predisponen la realización de los *step* artificiales en seco o consolidados con hormigón son las siguientes (Tab. 2.1):

- Campo de las pendientes del tramo a corregir típico de la secuencia de *step pool* (3- 20%);
- Suficiente disponibilidad de grandes bloques de piedra en los alrededores del torrente (Fig. 2.7);
- La posibilidad de fundar por lo menos algunas partes de éstas obras sobre bloques ciclópeos ya presentes en el cauce;

- La existencia en el curso de agua o en alguno de sus afluentes de secuencias de *step pool* bien definidas.

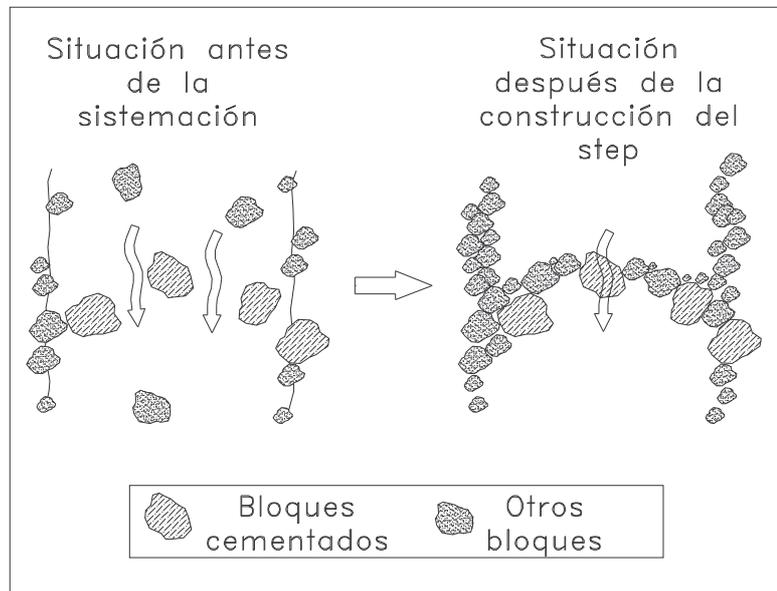


Figura 2.7 - Esquema de utilización de los bloques bases para la construcción de un *step* artificial consolidado con hormigón (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

En las figuras 2.8 - 2.12 se visualizan distintas etapas de la construcción de una secuencia de *step* artificiales con bloques simplemente consolidado con hormigón realizados en el torrente Maso di Spinelle (Trento) por la Azienda Speciale di Sistemazione Montana della Provincia di Trento. La metodología constructiva de los *step* consolidados con hormigón es parecida a la ya ilustrada para las obras en seco; la novedad está representada por el hormigón, cuya función es la de actuar como ligante entre los elementos lapídeos y ocupar los intersticios presentes entre los bloques. El hormigón, después de haber sido descargado del mixer al balde de la excavadora (Fig. 2.9), es volcado en la excavación posterior del *step* (Fig. 2.10). Durante ésta fase se aconseja la presencia de un operador dotado de una pala para compactar el conglomerado entre las fisuras de los bloques. La cantidad de hormigón usada es modesta, por cuanto no se llena toda la trinchera aguas arriba de la obra, sino solo la zona inmediatamente pegada a la fila de bloque (Fig. 2.11). El espacio remanente se llena con tierra o canto rodado de dimensiones menores (Fig. 2.12). En el caso de *step* consolidados con hormigón, las fundaciones se realizan usando dos filas verticales de bloques, de manera que se obtenga una fundación con una profundidad de por lo menos dos metros. También en éste caso, como para los *step* en seco, la eventual presencia en el cauce de grandes bloques inmóviles puede ser utilizada para obtener puntos de mejor anclaje al terreno.



Figura 2.8 - Fases iniciales de la construcción de un *step* artificial con bloques simplemente consolidado con hormigón. La excavadora está abriendo una fisura sobre la ladera (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y *Otros*, 2000).



Figura. 2.9 - El hormigón es transportado hasta la obra por medio de un mixer (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y *Otros*, 2000).



Figura 2.10 - Inserción del hormigón entre los agujeros presentes entre un bloque y otro (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y *Otros*, 2000).



Figura 2.11 - El hormigón es colocado en la excavación aguas arriba de la fila de los bloques (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y *Otros*, 2000).



Figura 2.12 - La trinchera aguas arriba es llenada con bloques de menores dimensiones y con tierra (torrente Maso di Spinelle, Trento) (Fuente: Lenzi y *Otros*, 2000).

3 DIQUES DE MADERA

Para el dimensionamiento de las obras de madera se sigue un desarrollo de proyecto más bien sumario, que tiene en gran consideración las experiencias adquiridas y la tradición en la construcción de esta tipología de obras. Asumiendo que la calidad del proyecto deba ser buscada tanto para las estructuras más complejas como para las obras de más simple concepción, se ha creído oportuno dedicar éste apartado a los métodos de proyecto y realización de las tipología de obras de maderas más comunes y hacia los cuales se está poniendo un renovado interés.

3.1 DIQUES DE POSTES DE MADERA

Los principales objetivos de los diques formados por postes de madera (Fig. 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5) son de resistir a la socavación del lecho, estabilizar la pendiente del lecho y preparar las condiciones para la plantación y siembra en cárcavas. Las características recomendadas para su proyecto son esquemáticamente resumidas en los siguientes puntos:

- Un dique representa una obra relevante en el control de erosión en zonas de cárcavas al regular el flujo hídrico y contener los sedimentos transportados. La vida útil del dique se estima superior a 10 años, siempre que se realice con postes de pino impregnados. Para el control de la erosión en cárcavas se recomienda realizar los diques en secuencia y no aislados;
- Un dique se compone de postes de pino dispuestos en sentido vertical y horizontal. Los postes verticales se colocan a intervalos de 1 m, siguiendo el perfil de las cárcavas, y a una profundidad de 40 cm. Los postes horizontales se alambran y se clavan a los verticales y en sus extremos se empotran entre 0.2 y 0.3 m a ambos lados de la cárcava;
- Considerando la resistencia a la flexión de los postes se recomienda que la altura útil de las obras sea menor a 1.5 m. Para reducir las filtraciones, la parte posterior de los postes horizontales debería cubrirse con sacos de yuta;
- Se recomienda aumentar la estabilidad de la estructura y la regulación del flujo hídrico con un muro de sacos rellenos de tierra, a posicionar en la parte posterior del dique hasta el nivel del vertedero, aproximadamente 1 m desde el dique aguas arriba. Finalmente se

compacta y se construye el canal de sacos de tierra. El dissipador tiene una superficie de 1 m² y puede realizarse con madera de pino impregnada, y bolones o estructuras gavionadas.

Con respecto a la ejecución de las obras, los materiales a utilizar son resumidos en la tabla 3.1 y las fases a seguir son las siguientes:

- Excavar los empotrados;
- Perforar los hoyos para los postes verticales y estacar los mismos;
- Colocar, alambrear y clavar los postes horizontales;
- Realizar el vertedero en los postes horizontales;
- Bloquear los sacos de juta detrás de los postes horizontales;
- Rellenar el muro de sacos de tierra detrás de los postes horizontales;
- Rellenar con tierra 1 m aguas arriba y compactarla detrás del muro de sacos anterior;
- Construir un canal con sacos rellenos de tierra;
- Construir el dissipador del dique aguas abajo.

Materiales	Cantidad	Unidad	Especificaciones
Postes	41	u	Largo: 2,40 m; Diámetro: 4"
Alambre	3,2	kg	Nº14"
Clavos	1,6	kg	Nº5"
Sacos de yute	8	u	
Sacos de malla sombra	8,7	u	60% cobertura; 60x40 cm
Grapas	0,6	kg	Nº1,5"

Tabla 3.1. - Materiales a utilizar por la construcción de un dique de postes de madera.
(Fuente: Aznar Fabra, 2003)



Figura 3.1 – Diques de madera (localidad Malga La Foca, La Valle Agordina, Belluno)
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

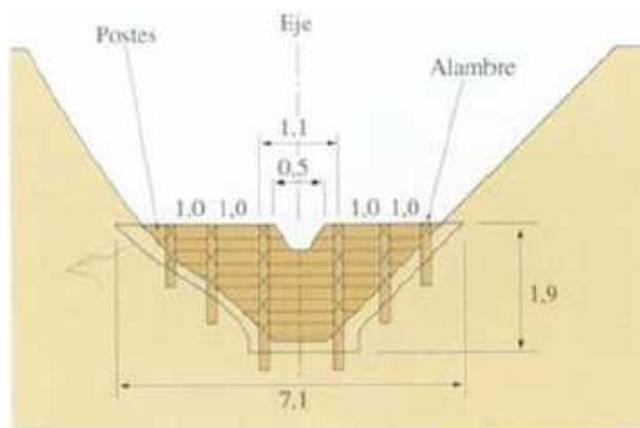


Figura 3.2 – Sección de un dique en postes de madera (unidades en m).
(Fuente: Aznar Fabra, 2003)



Figura 3.3 - Diques de postes de madera en áreas de cárcavas activas en fase de estabilización.
(Fuente: Aznar Fabra, 2003)



Figura 3.4 - Vista en primer plano de diques de madera con reforzamiento posterior de sacos y relleno de tierra. (Fuente: Aznar Fabra, 2003)

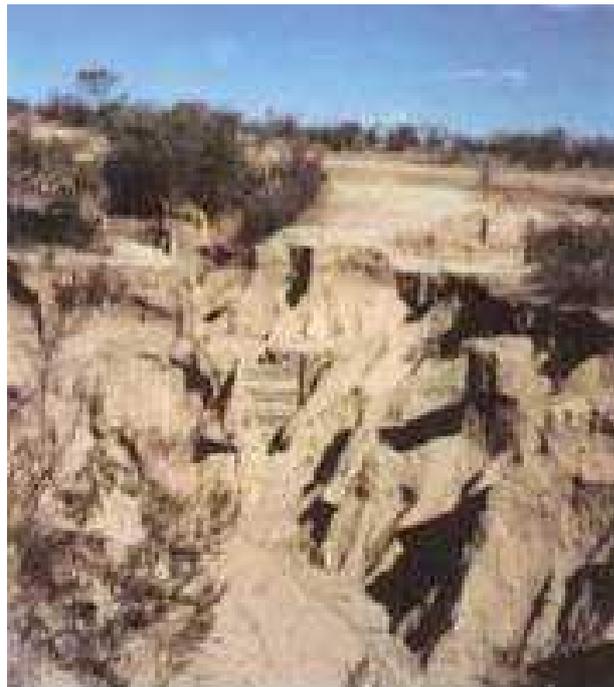


Figura 3.5 - Serie de diques de postes de madera en fase inicial de construcción en área de cárcavas activas con erosión muy severa. (Fuente: Aznar Fabra, 2003)

3.2 DISIPADORES

Los principales objetivos de los disipadores (Fig. 3.6, 3.7 y 3.8) son de amortiguar el impacto del flujo en cambios bruscos de pendiente y de disminuir la velocidad de la corriente. Las características del diseño de un disipador se pueden resumir en los siguientes puntos:

- La construcción de un disipador se debe complementar con otros tratamientos de regulación, conducción y evacuación de aguas. Evita la socavación en cauces y base de taludes, al recibir los flujos hídricos en bruscos cambios de pendiente. No es recomendable para cursos de agua con grandes descargas o caudales, excepto que se empleen estructuras gavionadas.
- Puede realizarse en dimensiones variables y el tamaño depende del caudal de proyecto. Para flujos pequeños se puede realizar en madera. En quebradas o esteros se recomienda utilizar una mezcla de bolones, gravas y ripios, cercados por una estructura de postes de pino impregnados. El cauce se excava hasta alcanzar una sección de 1 m x 1 m x 20 cm de profundidad. Se utilizan 4 postes de pino impregnados de 1 m que se estacan en los vértices de la sección, a una profundidad bajo el suelo de 25 cm. Se cerca la sección con otros postes en sentido horizontal, se clavan y se alambran en los verticales.
- La primera línea o línea en base de los postes horizontales debe quedar enterrada bajo la superficie del cauce con el objeto de aumentar la resistencia de la obra. Para disminuir la filtración se debe fijar un tejido de yuta en la parte interior de los postes. Finalmente la estructura se rellena con la mezcla de materiales inertes.

Con respecto a la ejecución de las obras, los materiales a utilizar son resumidos en la tabla 3.2 y ejecución se deberá realizar de la siguiente forma:

- Excavar la base del cauce;
- Estacar los postes verticales;
- Colocar, clavar y alambra los postes horizontales;
- Bloquear el tejido de yuta en el interior de los postes;
- Rellenar la sección con una mezcla de bolones, gravas y ripio.

Materiales	Cantidad	Unidad	Especificaciones
Postes	10	u	Largo : 2,4m ; Diámetro 4''
Estacas	2	u	Largo : 2,4m ; Diámetro 4''
Alambre	0,3	kg	Nº14
Clavos	0.03	kg	Nº5''
Bolones y ripio	9	m ³	

Tabla 3.2 - Materiales a utilizar para la construcción de un dissipador en madera y piedra.
(Fuente: Aznar Fabra, 2003)

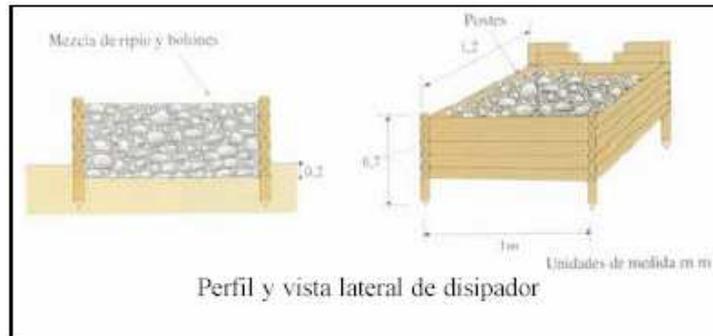


Figura 3.6 - Perfil y vista lateral de dissipador.(Fuente: Aznar Fabra, 2003)



Figura 3.7 - Vista general de diques de postes de madera con dissipador (1 x 0,6 m).
(Fuente: Aznar Fabra, 2003)



Figura 3.8 - Vista lateral de un dissipador construido con postes de pino impregnado y bolones de río.
(Fuente: Aznar Fabra, 2003)

3.3 DIQUES A CAJÓN

El cajón ha sido realizado por el hombre desde hace casi dos siglos, haciendo alarde de una larga tradición ya sea en las intervenciones de consolidación del cauce como en la intervención de estabilización de las laderas.

3.3.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

El cajón está constituido por una estructura portante de madera formada por elementos transversales (tirantes o traviesas) y por elementos longitudinales (largueros), que es sucesivamente llenado de material pétreo o de tierra (Fig. 3.9), adquiriendo así peso y una cierta rigidez. La unión entre larguero y traviesa consolidada por la introducción de clavos, tacos de madera o bulones, determina la formación de una caja que es sucesivamente estabilizada por el material de relleno, en general disponible en el lugar de construcción.

Un detalle de terminación que distingue diversas obras a cajón es representado por el cierre de los espacios vacíos del lado externo del cajón. En el caso de defensa de orillas los espacios pueden alojar estacas, fardos de ramas o bloques; en el caso de diques pueden preverse bloques cuadrados, o también madera, o como sucede frecuentemente se deja a la vista el mismo material usado para el relleno de la obra, si éste resulta del tamaño adecuado. En el grupo de los diques que entran en la tipología del cajón mixto, se pueden distinguir dos modalidades diferentes de construcción del vertedero: en cola de golondrina (Fig 3.10a y Fig. 3.11) y en sección trapezoidal (Fig 3.10b).



Figura 3.9 - Dique a cajón en fase de construcción. (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

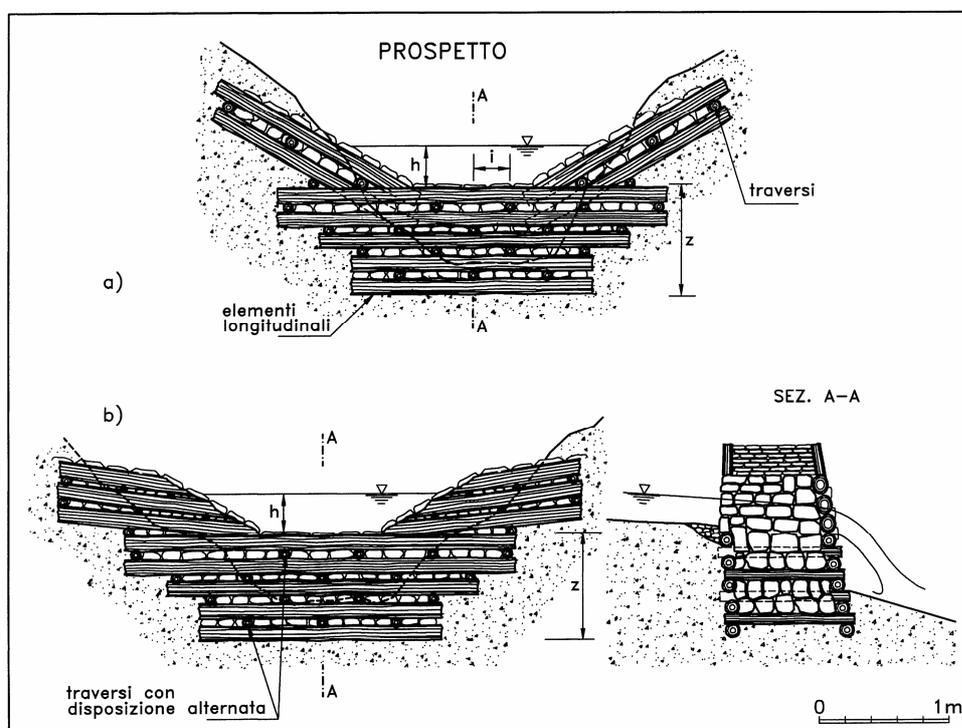


Figura 3.10 - Dique a cajón con vertedero en cola de golondrina (a) y con vertedero trapezoidal (b). (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

La tipología con vertedero en cola de golondrina se adapta a cauce caracterizados por orillas con mucha pendiente y favorece el tránsito de corriente cargadas de material sólido. En éste caso, siendo el ancho del flujo sobre el vertedero un poco inferior a la del cauce, es buena norma prever una consolidación de las orillas con escollera o por lo menos con estaca de especies arbustivas. En un dique de madera la parte más expuesta a daño es la sección activa, particularmente expuesta a la acción abrasiva del transporte sólido en ocasión de los eventos de crecida. Para evitar este problema es buena norma prever un revestimiento del vertedero de la obra con bloques o, especialmente para las obras con vertedero de sección trapecial, al revestimiento del vertedero con tronquitos de madera fijados con el eje mayor paralelo a la dirección de la corriente.



Figura 3.11 - Dique a cajón apenas terminado con vertedero en cola de golondrina.
(Fuente: Lenzi y *Otros*, 2000).

Las fases constructivas siguen un procedimiento ya consolidado en el tiempo. Una vez quitada la corteza de los troncos de madera a emplear, se procede a la excavación de la fundación, teniendo cuidado de preparar el plano de apoyo con una pequeña pendiente hacia aguas arriba (de aproximadamente 4 – 10%). La excavación debe alcanzar el terreno estable y un nivel al cual aparezcan eventuales filtraciones de agua. En esta situación es útil, para garantizar la estabilidad y por lo tanto mayor duración de la obra, captar el agua que mana mediante la construcción de la obra con tuberías (de 100 – 130 mm de diámetro) agua arriba del primer tronco longitudinal. Para que el sistema de drenaje sea eficiente, hay que garantizar una pendiente de descarga de por lo menos el 3 – 5%. Sucesivamente se procede a la puesta de

troncos longitudinales (ortogonales a la dirección de la corriente en el caso de diques y paralelos para las defensas de orillas), posicionándolos de manera que apoyen sobre el terreno en todas sus longitudes y favorezcan una distribución uniforme de las cargas. En algunos tipos de diques se recomienda construir una especie de plataforma continua de fundación, posicionando una serie de elementos de base longitudinales. Para mejorar el anclaje al terreno pueden ser fijados pilotes de apoyo en madera o en hierro (vigas en forma de T, de doble T, rieles y tronquitos), que tienen que alcanzar por lo menos 1,5 m de profundidad y que, si se posicionan atrás de la viga longitudinal interna, aumentan considerablemente en anclaje entre la obra y el terreno. A seguir, se colocarán las vigas transversales y se fijarán a los troncos longitudinales a través de clavos, bulones y grampas. Para aumentar la estabilidad de la estructura se realizan, además, entalladuras, que permiten un mayor encastre entre los elementos estructurales y que permiten un clavado con una mayor profundidad de penetración.

Un par de elementos longitudinales, puestos a la misma altura en correspondencia a las paredes aguas arriba y aguas abajo del cajón, y las vigas transversales adyacentes constituyen una fila. La obra estará entonces formada por la unión de más filas en función de la altura de proyecto. Los elementos transversales de las varias filas pueden ponerse en obra con continuidad sobre una misma línea vertical (traviesas en disposición continua, Fig. 3.12a) o pueden venir desfasado de manera que los elementos transversales que se encuentran sobre la misma línea vertical estén separados por una fila entera (traviesas en disposición alternada, Fig. 3.12b). En el primer caso a igualdad de distancia entre los elementos transversales (que usualmente está comprendida entre 1 y 2 m), la obra resultará más rígida y robusta, mientras en el segundo caso estará caracterizada por una mayor elasticidad.

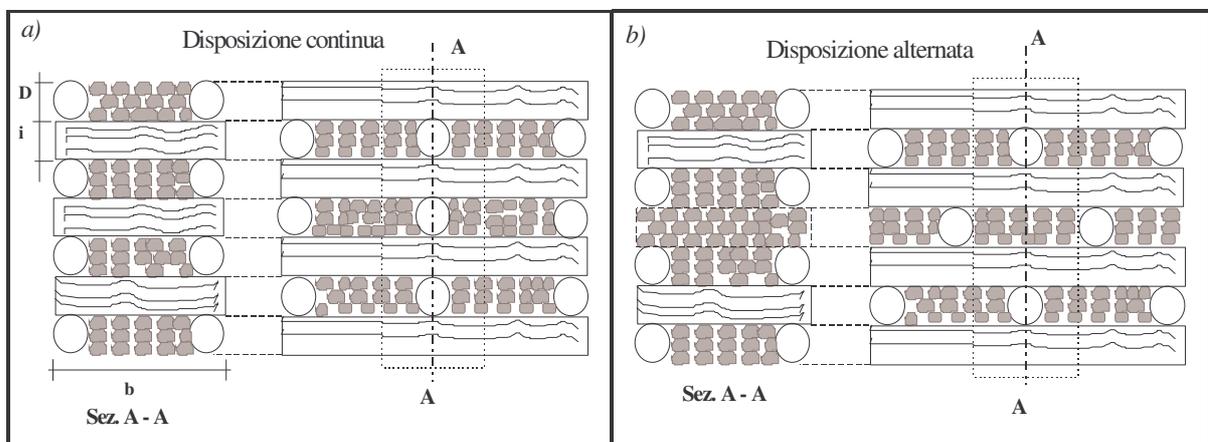


Figura 3.12 - Disposición de los elementos transversales de un cajón: a) continua y b) alternada. (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

Durante la construcción, y más raramente solo al final de la misma, se procede a rellenar la jaula de madera, con el cuidado de colocar las piedras más gruesas en correspondencia de los espacios vacíos del paramento aguas abajo. Se quiere así evitar el vaciamiento del dique debido a la migración del material de relleno a causa del agua que puede filtrar a través de la estructura. Trabajado con mas cuidado y poniendo en orden el material de relleno adyacente a la pared aguas abajo, se consigue también conferir a la obra un mejor aspecto estético.

El material usado por el relleno del cajón es principalmente constituido por piedras recogidas en el mismo lugar de construcción y sedimentos del cauce. En caso de falta de este material se puede utilizar también tierra (caso más común por las obras de consolidación de laderas). El relleno confiere a la obra una buena capacidad de drenaje, cosa que influye también en la estabilidad de la estructura. Particular atención se debe poner en la elección del material del relleno, ya que su dimensión no tiene que ser demasiado reducida. El diámetro óptimo está comprendido entre los 15 y 20 cm, ya que el cajón puede ser vaciado por el agua que filtra por la estructura. Una compactación excesiva del relleno lleva también a una drástica disminución de la capacidad filtrante del cajón y por lo tanto a una mayor sollicitación del dique. A veces, en el caso de falta total de material pétreo de adecuadas dimensiones, se usan geotextiles posicionados en el lado interno del cajón para ayudar la contención del material de relleno. En el caso de un relleno con presencia de una fuerte componente granulométrica limoso-arcillosa, existe también la posibilidad de que la obra resulte excesivamente impermeable. Para obviar éste inconveniente se pueden prever drenajes en la base, envueltos de geotextil y colocados entre los elementos de apoyo y el material del relleno, o se pueden introducir sobre el plano de fundación, ramas de plantas con función de drenaje. La importancia de una buena permeabilidad de la obra se explica en la reducción del empuje hidrostático actuante aguas arriba y consecuentemente en la menor vulnerabilidad de la misma. A veces, siempre para evitar el peligro de vaciamiento del cajón y a falta de un material pétreo idóneo, se recurre al uso de madera también para el taponamiento del paramento aguas abajo. Esta madera puede estar dispuesta paralelamente o transversalmente a los elementos longitudinales.

En caso se tenga que construir diques en cajón en áreas caracterizadas por la abundancia de materiales finos, se tiene que recordar que el terreno puede sufrir sensibles asentamientos del plano de fundación y movimiento de las orillas. Estos son los casos donde se explicitan

mayormente las ventajas de las estructuras en cajón, que tiene, respecto a estructuras en hormigón armado, mayores propiedades de:

- Elasticidad: absorbe, deformándose, las tensiones debidas a movimientos del terreno;
- Buena distribución de las cargas sobre el plano de fundación: debido a la amplia base de apoyo que caracteriza generalmente a las obras en cajón.

El cajón puede también anclarse en profundidad por medio de cables metálicos, de manera de garantizar la estabilidad de una porción más extensa de terreno. Este método constructivo es más frecuentemente adoptado en el caso de las obras de consolidación de laderas inestables y debe ser utilizado con cautela, ya que la obra a cajón, con sus pocos metros de fundación, no se presta generalmente a situaciones caracterizadas por movimientos del terreno que tienen lugar en la profundidad. Existen además otros métodos constructivos, provenientes ya sea de la práctica o del estudio teórico, que contribuyen, juntamente con la elección de los materiales y de los sitios de ubicación de la obra, a la buena eficiencia y duración de la misma. Por ejemplo, las conjunciones entre elementos longitudinales y transversales representan la normalidad en la práctica constructiva de los diques en madera. Se aconseja ejecutar las entalladuras para éstas conexiones únicamente en los elementos transversales, practicando el corte sobre el lado inferior de manera de impedir el estancamiento de agua y disminuir el riesgo de ataques de hongos. De ésta manera se evita que los largueros sean debilitados peligrosamente, ya que son justamente éstos elementos los mayormente solicitados.

Diversamente, las conexiones entre elementos longitudinales son ejecutadas solo cuando los troncos disponibles no presentan largos suficientes para cubrir toda la luz del paramento de la obra. En tal caso se recurre a la unión de más elementos, previendo una longitud máxima de superposición entre las partes terminales de cerca de 30 - 35 cm. Esta longitud representa el equilibrio entre la necesidad de tener una proporcionada superficie de contacto y la exigencia de limitar al mínimo la extensión del nudo que, por más que sea ejecutado de manera correcta, representa siempre un punto delicado para la estabilidad de la estructura entera. La entalladura se ejecuta en la parte final de los elementos a conectar, además de practicarse en la dirección del eje de los mismos, es oportuno que sea inclinado en un cierto ángulo respecto a la horizontal. Este detalle permite evitar la acumulación de agua sobre las superficies de contacto permitiendo la caída del agua eventualmente presente.

Otra advertencia a tener en cuenta en la construcción de obras de notable desarrollo transversal, caracterizadas por presentar uniones entre elementos longitudinales, consiste en hacer que las uniones entre los elementos longitudinales, sobre todo aquellos de la base, no se ubiquen nunca sobre el baricentro de la obra, o sea a lo largo de la línea ideal que sale del centro del vertedero y termina al pié del dique. La acción erosiva del agua que se manifiesta sobre todo por el impacto al pié de la obra del chorro efluente del vertedero puede exportar o arrastrar parte del terreno de fundación, determinando sobre las uniones entre los elementos una excesiva sollicitación mecánica. El tramo de cauce aguas arriba del cajón es normalmente colmado de tierra al terminar la construcción. Esto evidencia que el uso de estas obras es más aconsejable en el ámbito de las intervenciones de consolidación respecto que para intervenciones que busquen preferentemente la retención del material sólido transportado por el torrente. A la vez de la construcción de los diques de madera en cajón, son frecuentemente ejecutadas también intervenciones de reverdecimiento y de reforestación (siembra o plantación de estacas) a lo largo de las orillas del curso de agua, como forma de acelerar el proceso de consolidación y para permitir un buen sombreado de las obras, condición ésta que favorece una mayor duración de las mismas.

Entre todas las variedades de tipologías de diques de madera, el cajón con doble pared es el que permite alcanzar las mayores alturas sin determinar excesivos problemas de orden estático. De hecho, no se excluye la posibilidad de que con el cajón se puedan realizar diques con alturas de 6 - 7 m también en situaciones de marcada torrencialidad. En definitiva, estos tipos de obras, si bien proyectadas, pueden sustituir por funcionalidad estática e hidráulica, las obras monolíticas en hormigón simple o armado. Es por esta razón que el dimensionamiento de un cajón de pared doble no se basa en simples reglas empíricas, sino que es basado en estudios de estabilidad.

3.3.2 ESTABILIDAD ESTRUCTURAL

El criterio de dimensionamiento comúnmente utilizados para los cajones se basa en la experiencia y las tradiciones locales. En efecto, para éste tipo de obras se formó en el tiempo la regla general, según la cual la base de la construcción debe ser ancha al menos la mitad de la altura de la misma, o sea:

$$b \geq \frac{1}{2} Z_{eff} \quad (3.1)$$

Donde:

b : espesor de la obra;

Z_{eff} : altura efectiva de la obra (Fig. 3.13).

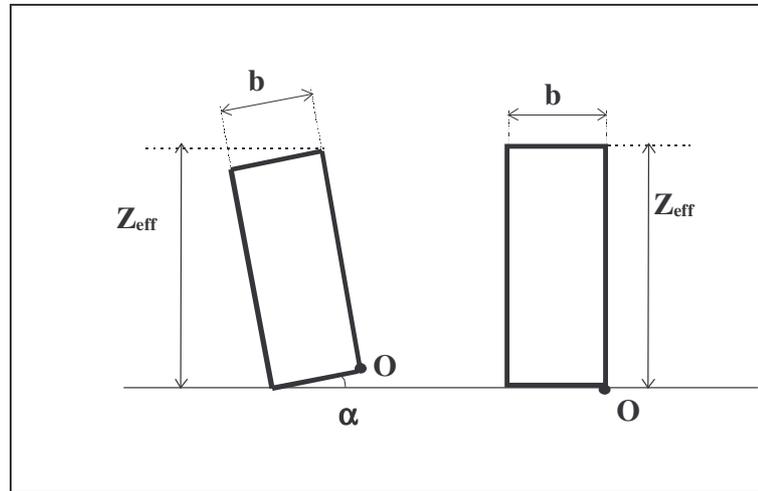


Figura 3.13 - Sección transversal esquemática de un cajón. (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

Esta relación no es puramente empírica y es justificable, desde el punto de vista teórico, por medio de una condición de equilibrio. Si se impone que la relación entre los momentos de las fuerzas estabilizantes y de aquellos de vuelco (calculados con respecto al punto O de la Fig. 3.13) sea igual a 1.5, se obtiene:

$$1.5 \times \left(\frac{1}{6} \times \gamma_w \times Z_{eff}^3 \right) = \frac{b^2 \times Z_{eff}}{2} \times \gamma_c \quad (3.2)$$

Donde γ_w es el peso específico del agua aguas arriba de la obra y γ_c el peso específico del cajón. Con simples pasajes de la ecuación (3.2) se llega a la relación:

$$b = Z_{eff} \times \sqrt{\frac{\gamma_w}{2\gamma_c}} \quad (3.3)$$

Si con buena aproximación, en la ecuación (3.3) se pone $\gamma_c = 2 \times \gamma_w$, se llega a la relación (3.1) escrita con el signo de igualdad. La experiencia del pasado también nos enseña que, para la eficiencia y la duración de los cajones, una ejecución correcta, un buen anclaje lateral de la obra, un relleno cuidadoso y una idónea manutención son tan importantes como un cuidadoso cálculo estático (Pedrini, 1993). No obstante esto, consideradas las alturas no despreciables que los cajones de madera pueden alcanzar, parece oportuno imponer un

tratamiento más riguroso a las fases de proyecto de éstas obras. Ésta consiste en determinar el espesor (b) que la obra tiene que poseer teniendo en cuenta la altura (Z_{eff}) a alcanzar habiendo prefijado un valor del coeficiente de seguridad al vuelco (G_{rib}).

Un dique a cajón es una obra transversal a gravedad, y por lo tanto debe su estabilidad a su propio peso. En el dimensionado estructural del dique se deben verificar dos condiciones:

- Las usuales condiciones de estabilidad estructurales externas (al vuelco, al deslizamiento sobre el plano de apoyo y al hundimiento del terreno de fundación);
- Admisibilidad de las tensiones internas. Las tensiones que se generan sobre los elementos longitudinales y transversales (los que constituyen la jaula del cajón), y sobre las relativas conjunciones no tienen que llevar al colapso de la estructura.

3.3.2.1 Estabilidad externa

Las situaciones que se pueden presentar en las diversas fases de la vida de un dique dependen de las modalidades constructivas adoptadas y difieren entre ellos por el tipo de empuje que ejerce sobre la pared aguas arriba de la obra. En general se prevé el enterramiento artificial del cajón en la obra. Este método hace que el primer período de vida de la estructura, cuando el terreno aguas arriba no posee todavía un buen grado de compactación, sea caracterizada por una acción desestabilizadora que se origina con una combinación de empuje de tipo hidrostático y de empuje del terreno. El Service Federal des Route et des Dignes (1973), después de un profundo estudio ha llegado a la conclusión que en esta fase transitoria de construcción el empuje resultante, con buena aproximación y operando de manera conservadora, puede ser considerado igual al empuje hidrostático. En cambio, cuando el material depositado aguas arriba de la obra se consolida, la condición de funcionamiento es asimilable al régimen del empuje activo del terreno. En definitiva, las principales fuerzas que pueden entrar en juego en la verificación de la estabilidad de un dique a cajón son:

- S_t : Empuje del terreno sobre la pared del cajón de aguas arriba;
- S_w : Empuje hidrostático;
- P : Peso propio de la estructura.

Las usuales condiciones de estabilidad estructurales externas deben considerar las condiciones de equilibrio al vuelco, al deslizamiento sobre el plano de apoyo y al hundimiento del terreno de fundación. En el dimensionamiento de un metro lineal de obra se pueden

considerar dos secciones tipo distintas, ósea la sección A-A en correspondencia a las alas y la sección B-B en correspondencia al eje medio del vertedero (Fig. 3.14).

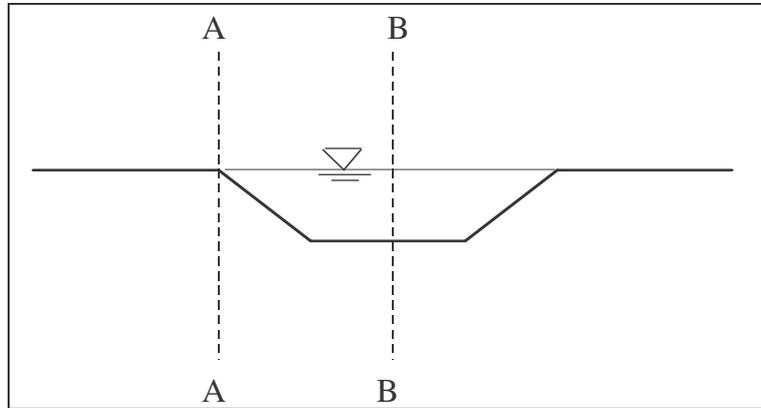


Figura 3.14 - Vista de frente esquemática de un dique en correspondencia del vertedero. (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

Considerando la sección A-A, las sollicitaciones actuantes sobre la obra pueden ser analizadas examinando el esquema de la figura 3.15 que representa un cajón inclinado respecto al terreno de apoyo y que constituye el caso más general respecto a la situación simplificada de obra vertical ($\alpha = 0$).

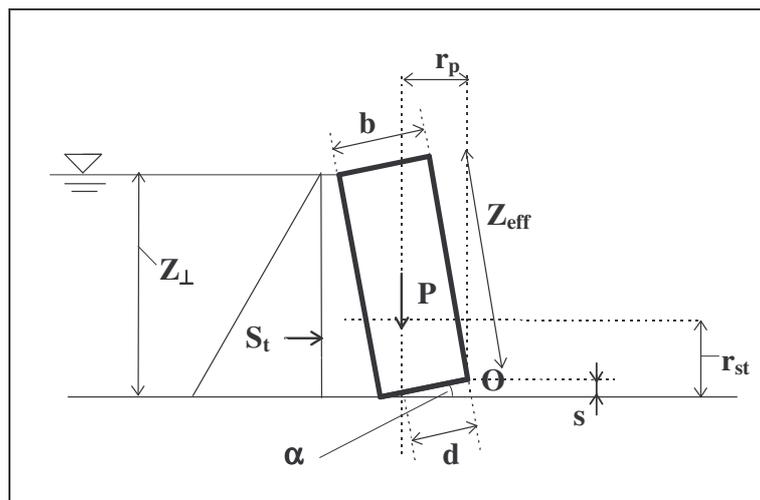


Figura 3.15 - Esquema estático para un cajón inclinado: Sección A-A de la figura 3.14. (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

La fuerza desestabilizadora al vuelco (S_t) es proporcionada por el empuje del terreno y está representada por la siguiente relación:

$$S_t = \frac{1}{2} \gamma_t \times Z_{\perp}^2 \times K_a \quad (3.4)$$

Donde:

γ_t : peso específico del terreno sobre la pared del cajón aguas arriba;

Z_{\perp} : altura vertical de la obra ($Z_v = Z_{eff} \times \cos \alpha$);

K_a : coeficiente de empuje activo;

K_a puede ser calculado mediante la expresión de Rankine y depende del ángulo de fricción interna del terreno (φ) según la relación:

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.5)$$

La ecuación (3.5) introduce una primera simplificación al tratamiento, puesto que la superficie sobre la que actúa la fuerza es considerada vertical también en el caso de obra inclinada. Al empuje del terreno se contraponen la fuerza estabilizadora (P) constituida por el peso propio de la obra:

$$P = \gamma_c \times b \times Z_{eff} \quad (3.6)$$

Donde:

γ_c : peso específico equivalente de todo el cajón;

b : espesor de la obra (Fig. 3.13);

Z_{eff} : altura efectiva de la obra (Fig. 3.13).

Siempre refiriéndose a la figura 3.15 y tomando en cuenta las consideraciones de geometría elemental, se pueden definir los brazos de las dos fuerzas P y S_t calculadas con respecto al vértice O .

Siendo:

$$d = \frac{b}{2} + \frac{Z_{eff}}{2} \times \tan \alpha \quad (3.7)$$

El brazo de P resulta

$$r_p = d \times \cos \alpha = \frac{1}{2} \times \cos \alpha \times (b + Z_{eff} \times \tan \alpha) \quad (3.8)$$

En cuanto a lo que respecta a S_t se puede observar que, siendo el diagrama de las presiones asociados a ésta fuerza de forma triangular, la resultante actúa a una distancia del punto O :

$$r_{S_t} = \frac{Z_{\perp}}{3} - s \cong \frac{Z_{\perp}}{3} \quad (3.9)$$

También esta última determinación está a favor de la seguridad en cuanto el brazo real de la fuerza es más corto con respecto a aquel indicado en el último término de la ecuación (3.9). El momento estabilizador (M_{stab}) y el de vuelco (M_{rib}) son respectivamente:

$$M_{stab} = P \times r_p = \gamma_c \times b \times Z_{eff} \times \frac{1}{2} \times \cos \alpha (b + Z_{eff} \times \tan \alpha) \quad (3.10)$$

$$M_{rib} = S_t \times r_{S_t} = \frac{1}{2} \times \gamma_t \times Z_{\perp}^2 \times K_a \times \frac{Z_{\perp}}{3} \quad (3.11)$$

la condición de equilibrio al vuelco con el coeficiente de seguridad asignado (G_{rib}) puede escribirse:

$$\gamma_c \times b \times Z_{eff} \times \frac{1}{2} \cos \alpha (b + Z_{eff} \times \tan \alpha) = G_{rib} \times \left(\frac{1}{2} \times \gamma_t \times Z_{\perp}^2 \times K_a \right) \times \frac{Z_{\perp}}{3} \quad (3.12)$$

De la cual:

$$b^2 + Z_{eff} \times \tan \alpha \times b - G_{rib} \times \frac{\gamma_t}{3\gamma_c} \times (Z_{eff} \times \cos \alpha)^2 \times K_a = 0 \quad (3.13)$$

Considerando la raíz positiva en b de la ecuación 3.13 se llega a la expresión:

$$b = \frac{-Z_{eff} \times \tan \alpha}{2} + \sqrt{\frac{Z_{eff}^2 \times \tan^2 \alpha}{4} + G_{rib} \times \frac{\gamma_t}{3\gamma_c} \times Z_{eff}^2 \times \cos^2 \alpha \times K_a} \quad (3.14)$$

Se puede expresar entonces la condición de estabilidad al vuelco:

$$b \geq Z_{eff} \times \left(\sqrt{\frac{\tan^2 \alpha}{4} + G_{rib} \times \frac{\gamma_t}{3\gamma_c} \times \cos^2 \alpha \times K_a} - \frac{\tan \alpha}{2} \right) \quad (3.15)$$

Si se considera el caso más desfavorable del empuje hidrostático, a γ_c se sustituye el peso específico del agua γ_w y se pone $K_a = 1$ la ecuación 3.15, y si se supone además $\gamma_c \approx \gamma_w$, adopta la forma simplificada:

$$b \geq Z_{eff} \times \left(\sqrt{\frac{\tan^2 \alpha}{4} + G_{rib} \times \frac{1}{6} \times \cos^2 \alpha} - \frac{\tan \alpha}{2} \right) \quad (3.16)$$

que constituye una generalización de la ecuación 3.1 para $\alpha \neq 0$ y el coeficiente de seguridad al vuelco deseado.

Las modalidades con las cuales las obras de madera son construidas sobre el terreno de fundación y las características constructivas de los materiales usados que llevan el coeficiente de rozamiento entre fundación y terreno a valores próximos a la unidad, hacen que al cumplirse de las ecuaciones 3.15 o 3.16 con un G_{rib} igual a 1.5–1.6 asegure, normalmente, también la verificación de la estructura al deslizamiento.

Las solicitaciones inducidas por los cajones de madera sobre el terreno de fundación no son en general muy elevadas, en razón de los amplios anchos de apoyo que son adoptados y de las alturas más recurrentes para tales obras ($Z_{eff} < 4 \text{ m}$). Mayor cuidado se debe poner cuando la altura del dique alcanza los 5-6 metros. En éste caso en las hipótesis que resulten actuantes el solo empuje del terreno y se dimensione el cajón par $G_{rib} = 1.5$, se alcanzan tensiones máximas transmitidas al plano de fundación en el orden de los 0.25–0.3 MPa.

3.3.2.2 Estabilidad interna

El análisis de la estabilidad interna puede ser realizado asimilando el esqueleto de madera del cajón a una serie de silos vinculados unos a otros que deben contener el material de relleno (D'Agostino, 1999). Cada uno de éstos silos tiene una planta de forma rectangular cuyo largo de los lados está definido por la distancia entre los elementos transversales puestos a una misma altura (a en la Fig. 3.16) y por la distancia entre dos paredes del cajón (b' en la Fig. 3.16).

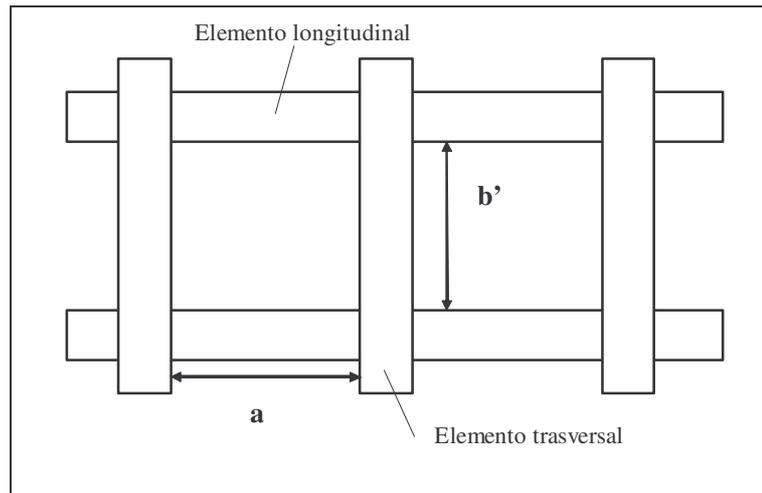


Figura 3.16 - Esquema de la estructuras de celdas del cajón (vista en planta). (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

El empuje ejercido por el material interior está contrabalanceado por la presencia de los elementos transversales que funcionan como tirantes e impiden a los paramentos de alejarse uno del otro. Para aumentar la eficacia de los tirantes se practican en ellos unas entalladuras que mejoran la unión con los elementos longitudinales y se recurre al uso de clavos, grampas o bulones para ensamblar sólidamente a las diversas piezas de la estructura.

En el interior del silo se consideran actuantes las siguientes solicitaciones (Fig. 3.17):

- p_{fz} : presión vertical transmitida por el material de relleno sobre la base del silo;
- p_{hz} : presión horizontal transmitida sobre las paredes del silo;
- p_{vz} : presión vertical transmitida a lo largo de las paredes.

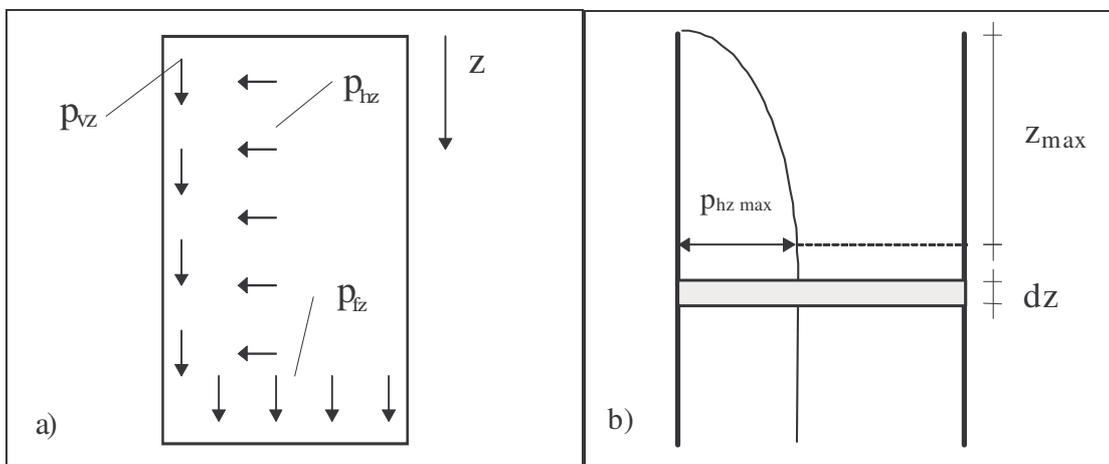


Figura 3.17 - a) Presiones que actúan en el interior del cajón según la teoría del silo; b) desarrollo de las presiones horizontales p_{hz} . (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

La presión vertical p_{fz} no tiene ninguna influencia sobre la estabilidad interna. La presión horizontal p_{hz} cuando actúa directamente sobre la traviesa no induce ningún estado de sollicitación. En efecto algunas traviesas son comunes a dos celdas contiguas y sufren sobre sus dos lados valores iguales y opuestos de las presiones horizontales que por lo tanto se anulan. Cuando p_{hz} se descarga sobre elementos longitudinales (Fig. 3.17), especialmente sobre los de la pared aguas abajo, tiende a flecharlos y requiere de la reacción de tracción de los tirantes (traviesas) a ellos conectados. La presión vertical p_{vz} , finalmente, tiende a inducir un estado de flexión ya sea sobre los elementos longitudinales o sobre las traviesas; sobre estos últimos la acción se duplica ya que cada pared de traviesa es común a dos silos contiguos. La sollicitación de flexión de los elementos transversales es inferior a la teórica, ya que la presencia del material de relleno debajo de las traviesas reduce de hecho, la luz de flexión b' (Fig. 3.16).

La presión unitaria actuante horizontalmente contra las paredes de los silos crece con la profundidad según un desarrollo exponencial negativo y alcanza el valor máximo en la profundidad (z_{max} ; Fig. 3.17b) en correspondencia a la cual el peso propio de un estrato de material es igual a la fuerza de rozamiento que se genera sobre la pared del cajón (Russo, 1955). Considerando los siguientes parámetros:

- dz : altura de la capa (m);
- A : sección transversal de la celda (m^2): $A = a b'$;
- γ_{pr} : peso específico del material de relleno ($N m^{-3}$),

El peso propio P de una capa dz puede ser así definido:

$$P = \gamma_{pr} \times A \times dz \quad (3.17)$$

Indicando en cambio con:

- U : el perímetro de la sección transversal de la celda del cajón (m): $U = 2a + b'$;
- $\tan \delta$: el coeficiente de rozamiento entre las paredes y material de relleno; en general puede ponerse $\delta = 2/3\varphi'$ siendo φ' el ángulo de roce del material de relleno;
- $p_{hz, \max}$: la presión unitaria horizontal máxima.

Se obtiene la fuerza resistente de rozamiento R actuante a lo largo del contorno de la capa dz :

$$R = p_{hz, \max} \times \tan \delta \times U \times dz \quad (3.18)$$

Donde $U \times dz$ representa la superficie entera lateral que encierra la capa considerada. Igualando ahora el peso de la capa con el roce resistente se obtiene la siguiente expresión:

$$A \times dz \times \gamma_{pr} = p_{hz,max} \times \tan \delta \times U \times dz \quad (3.19)$$

De la cual se puede obtener simplemente:

$$p_{hz,max} = \frac{A \times dz \times \gamma_{pr}}{U \times dz \times \tan \delta} = \frac{A \times \gamma_{pr}}{U \times \tan \delta} \quad (3.20)$$

Que, en el caso de celda de sección rectangular (Fig. 3.16), se transforma en:

$$p_{hz,max} = \frac{(a \times b') \times \gamma_{pr}}{2 \times (a + b') \times \tan \delta} \quad (3.21)$$

Conocido entonces el valor de $p_{hz, máx}$ se puede obtener también el correspondiente valor de la presión vertical inferior del silo ($p_{vz, máx}$) por medio de la relación:

$$p_{vz,max} = p_{hz,max} \times \tan \delta \quad (3.22)$$

Según el desarrollo de las presiones internas de un silo (Piper y Wenzel, 1964) y asumiendo $\varphi' = 30^\circ$ y $\delta = 2/3 \varphi$, se obtiene el 80% de los valores máximos expresados por las ecuaciones 3.21 y 3.22 a la profundidad ($Z_{80\%}$).

$$Z_{80\%} \cong 12 \times \frac{A}{U} \quad (3.23)$$

De la relación 3.23 se deduce que para un cajón formado por celdas cuadradas ($a = b'$) se acerca a las presiones máximas a una profundidad $Z_{80\%} \cong 3 a$, mientras que para las celdas de forma rectangular con el lado $b' = 2 a$ tal profundidad se incrementa a $Z_{80\%} \cong 4 a$. Por cuanto a las alturas más recurrentes para los cajones (1.5–4 m) y de los valores constructivos de a (que raramente son menores a 0.7 m), se deduce al considerar las presiones máximas como actuantes uniformemente sobre toda la altura del cajón, para que sea ampliamente seguro para la verificación de la jaula de madera.

De todas las sollicitaciones que se originan por la acción de las presiones $p_{vz, máx}$ y $p_{hz, máx}$ la que resulta más gravosa para la obra es la relativa al estado de flexión sobre un plano horizontal de los elementos longitudinales que constituyen el paramento aguas abajo del dique. Haciendo la hipótesis sobre cada uno de éstos elementos longitudinales como simplemente

apoyados en los extremos (traviesas), sobre ellas puede considerarse actuante la carga uniforme:

$$q = p_{hz,max} \times (D + i) \quad (3.24)$$

(de las figura 3.12 y 3.18) siendo:

- i : la distancia vertical entre los elementos longitudinales de dos hileras contiguas;
- D : el diámetro de los elementos longitudinales.

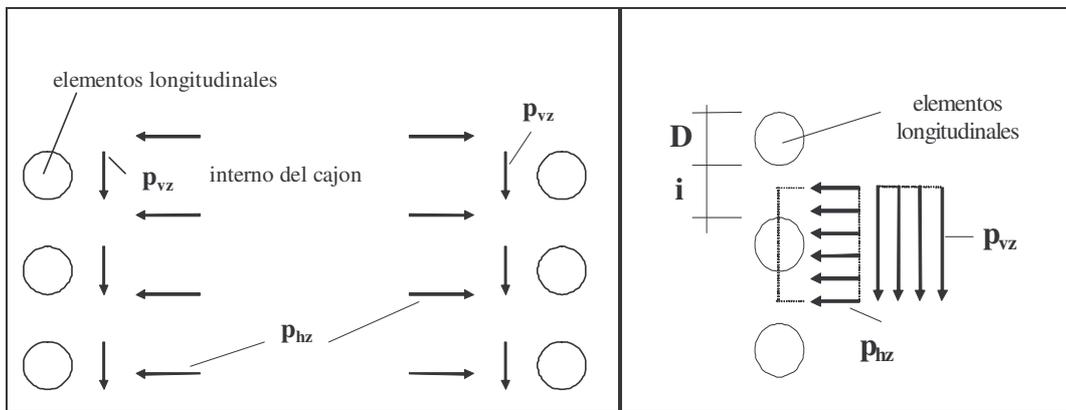


Figura 3.18 - Superficies de acción de las presiones internas al cajón que actúan sobre los elementos longitudinales. (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

Si se utilizan troncos de un único diámetro ya sea para los elementos transversales o para los longitudinales resulta que $i = D$ y la ecuación se simplifica:

$$q = 2p_{hz,max} \times D \quad (3.25)$$

Se puede entonces determinar la tensión máxima en el medio de los elementos longitudinales, tomados, como se ha dicho simplemente apoyados a las traviesas. El momento flector en el centro resulta:

$$M = \frac{q \times (a + D)^2}{8} = 2p_{hz,max} \times D \frac{(a + D)^2}{8} \quad (3.26)$$

El módulo de resistencia (W) de la sección circular es igual a:

$$W = \frac{\pi \times D^3}{32} \quad (3.27)$$

La tensión máxima (σ_{max}) puede por lo tanto expresarse con la siguiente expresión:

$$\sigma_{max} = \pm \frac{M}{W} = \pm \frac{8}{\pi} \left(\frac{a}{D} + 1 \right)^2 \times p_{hz,max} \quad (3.28)$$

que, combinada con la ecuación 3.21, permite el cálculo de las máximas tensiones de compresión (en el borde interno) y de tracción (en el borde externo) de los elementos longitudinales de la pared aguas abajo (Tab. 3.3).

D (m)	σ_{max} (MPa) por $a=b'$			σ_{max} (MPa) por $a= b'/2$		
	$a = 1$ m	$a=1.5$ m	$a = 2$ m	$a = 1$ m	$a=1.5$ m	$a = 2$ m
0.10	4.2	13.4	30.9	5.6	17.9	41.2
0.15	2.1	6.4	14.4	2.7	8.5	19.2
0.20	1.3	3.8	8.5	1.7	5.1	11.3
0.25	0.9	2.6	5.7	1.2	3.4	7.6
0.30	0.7	1.9	4.1	0.9	2.5	5.5
0.35	0.5	1.5	3.2	0.7	2.0	4.2

Tabla 3.3. Máximas tensiones en medio de los elementos longitudinales del cajón para diferentes dimensiones (a, b') de las celdas y los diferentes diámetros (D) de la madera. (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

En la tabla 3.3 se detallan, a título de ejemplo, los valores de ésta tensión para diferentes diámetros con la asunción que en la ecuación 3.21 $\gamma_{pr} = 20000 \text{ N m}^{-3}$ y $\delta = 20^\circ$. En la tabla se comparan los valores obtenidos para una celda de forma cuadrada (a la cual se aproxima para obras de poca altura) con los relativos a una celda rectangular con distancia entre las traviesas igual a la mitad de la distancia entre los dos paramentos del cajón ($a = b'/2$); a esta última geometría se aproxima al aumentar la altura del cajón. Es interesante observar que, en relación con las tensiones admisibles para la madera usada (para el *Larix Decidua* por ejemplo los valores admisibles a la flexión estática están usualmente comprendidos entre lo 8 y 13 MPa), celdas de dimensiones muy grandes pueden no ser compatibles con los diámetros asignados (por ejemplo para $a = b' = 2$ m y $D = 0.2$ m se obtiene la tensión de 8.5 MPa).

En la hipótesis que un cajón deba alcanzar una altura considerable (6-7 m) será por lo tanto aconsejable realizar la jaula insertando entre los dos paramentos externos una pared intermedia. De éste modo el cajón será formado por dos filas de celdas de menores dimensiones, volviéndose la longitud de los elementos transversales (b') igual aproximadamente a la mitad del ancho total de la obra (b , Fig. 3.13). Ésta regla también es impuesta por la longitud de los fustes que hasta valores en el orden de hasta 4 m tiene una disminución del diámetro aceptable para las exigencia constructivas.

3.3.3 GENERALIDADES SOBRE LOS DIQUES A CAJÓN

El análisis sobre las modalidades de dimensionado y de realización de un dique a cajón ha indicado como ésta intervención de consolidación de cauces o de laderas, aparentemente simple, deba seguir un dimensionamiento específico, orientado a aumentar la seguridad, la funcionalidad y la durabilidad en el tiempo de la misma obra. La tipología del cajón se adapta óptimamente a la realización de obras de defensa de orillas y a la consolidación de laderas inestables, además de diques, y su uso representa una solución válida para una amplia gama de problemas relacionados a la ordenación de las cuencas de montañas. Las características que el cajón ofrece, una, a un bajo impacto sobre el territorio, ya sea las características de adaptabilidad y flexibilidad de las obras (por la naturaleza misma del material utilizado), a las ventajas no despreciables de un posible control capilar de los fenómenos de torrencialidad de la cuenca y de una economía global de las obras de ordenación de cuencas.

Finalmente, parece oportuno recordar que también para las obras a cajón, así como para las obras realizadas únicamente con bloques, existe la posibilidad de hacer una emulación de las estructuras de *step-pool* naturales. En éste caso la construcción de un *log-step* de madera, que se caracterizará por una altura más modesta respecto a los cajones tradicionales (Fig. 3.19, 3.20), ofrece una alternativa válida a las obras de bloques, particularmente en aquellas intervenciones de reconstrucción fluviomorfológicas, y de restauración de torrentes, que no garantizan una suficiente disponibilidad de material pétreo de tamaño adecuado.



Figura 3.19 - *Log step* recién realizado (Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

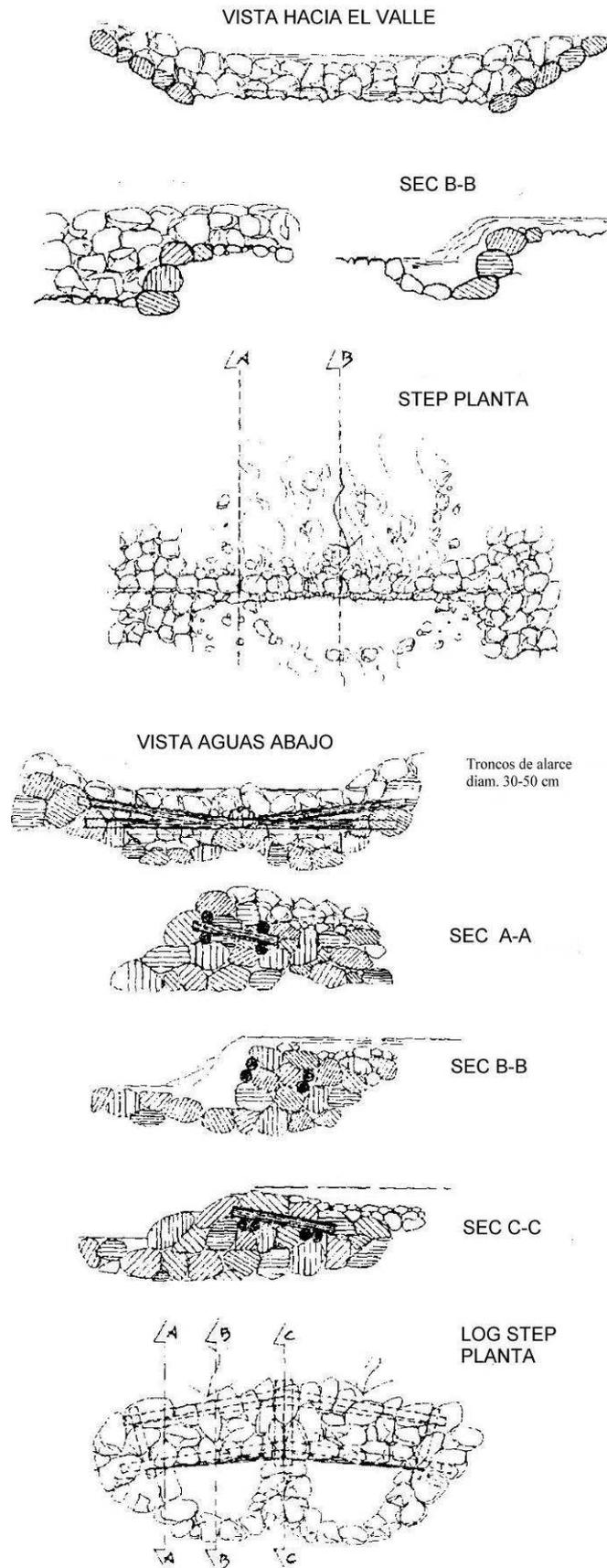


Figura 3.20 - Proyecto de obras tipo *step-pool* y *log-step* artificiales (dibujo Arq. Zolin, P.A.T.)
(Fuente: Lenzi y Otros, 2000).

3.4 OTRAS TIPOLOGÍAS DE DIQUES DE MADERA Y DIQUES MIXTOS

Las obras de las que se ha hablado en los apartados anteriores (diques de poste de madera, disipadores y diques a cajón), pertenecen a la tipología de obras de madera. La madera puede ser utilizada también para la construcción de otras tipologías de obras de defensa de cauces y márgenes de ríos (Tab. 3.4). En seguida se detallan otras tipologías de obras, especificando condiciones de uso y normas constructivas.

Obras de madera	Diques y umbrales	- Empalizada a una pared - Tipo Jesser - Tipo “convexo”
	Espigones	- Con plano de deslizamiento
	Defensa de riberas	- Empalizada a una pared
Obras mixtas	Diques y defensa de ribera	- Cajón en piedra y madera a doble pared - Cajón en piedra y madera con pared simple
	Umbrales	- En madera y grandes rocas
	Espigones	- En madera, piedras/rocas

Tabla 3.4 - Otras tipologías de diques de madera y diques mixtos. (Fuente: Aznar Fabra, 2003)

3.4.1 EMPALIZADA A UNA PARED

La empalizada con una pared representa la obra más simple y es también la más utilizada. Ésta se realiza de un modo estructuralmente similar, ya sea para la construcción de pequeños diques de corrección o para umbrales (Fig. 3.21 y 3.22) que para obras de defensa de riberas (Fig. 3.23, 3.24 y 3.28). El esqueleto principal que conforma la estructura de la empalizada está constituido por una serie de palos fijados verticalmente al terreno a una profundidad de 1-2 m. A estos palos van unidos, mediante clavos o tornillos de acero, los elementos horizontales que van a constituir la pared de “impacto” de la estructura.

Los elementos horizontales están constituidos por troncos descortezados en el caso de los pequeños diques de corrección, mientras que en el caso de defensa de riberas puede preverse algunas veces una altura de 40-60 cm y el espesor 5-20 cm (Fig. 3.24). Para un diámetro dado (D) de los palos verticales y para una altura prefijada de la obra en correspondencia con las alas (Z) puede establecerse el eje (l) sobre el cual pueden ponerse los palos. Cada palo está por lo tanto, sujeto al impulso hidrostático S_w :

$$S_w = \frac{1}{2} \times (\gamma_w \cdot Z^2 \cdot l) \quad (3.29)$$

(γ_w = peso específico del agua) que da lugar en un momento M respecto a la sección del palo en correspondencia con el terreno:

$$M = \frac{1}{6} \times (\gamma_w \cdot Z^3 \cdot l) \quad (3.30)$$

Y la tensión máxima :

$$\sigma_{\max} = \frac{1/6 \times (\gamma_w \cdot Z^3 \cdot l)}{\pi \cdot D^3 / 32} = 1,7 \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{Z}{D}\right)^3 \cdot l \quad (3.31)$$

Por lo tanto, imponiendo que la tensión máxima σ_{\max} sea inferior a la tensión admisible σ_{adm} para el tipo de madera que se ha utilizado en la obra, se obtiene:

$$1,7 \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{Z}{D}\right)^3 \cdot l \leq \sigma_{adm} \quad (3.32)$$

y escribiendo la ecuación (3.32), teniendo como incógnita el eje l , se llega a la relación:

$$l \leq \frac{\sigma_{adm}}{1,7 \cdot \gamma_w} \left(\frac{D}{Z}\right)^3 \quad (3.33)$$

Ejemplo: Queriendo establecer el eje interno máximo consentido a los palos para un dique teniendo: $Z = 1.5$ m; $D = 0.2$ m; $\sigma_{adm} = 7$ Mpa (7×10^6 N m⁻²) y asumiendo que $\gamma_w = 10000$ N m⁻³, se obtiene:

$$l \leq \frac{7 \cdot 10^6}{1,7 \cdot 10^4} \left(\frac{0,2}{1,5}\right)^3 \leq 1m \quad (3.34)$$

Un razonamiento análogo puede desarrollarse para la defensa de riberas, sustituyendo el impulso hidrostático y el impulso activo (St) del terreno. Si, con alguna aproximación, se pone $St = 2/3 S_w$, la relación (3.34) resulta:

$$l \leq \frac{\sigma_{adm}}{1,1 \cdot \gamma_w} \quad (3.35)$$

A igualdad de alturas sobre la tierra de la obra el eje interno requerido para la defensa de riberas (sujetas solo al empuje del terreno) puede por consiguiente asumirse aproximadamente una vez y media de lo requerido para los pequeños diques de corrección. En el caso particular de empujes de la estructura se obtiene el rendimiento mas estable utilizando el acoplamiento de los elementos verticales de la empalizada o bien previniendo (con especies en el caso de los pequeños diques de corrección), una empalizada de refuerzo, también aguas arriba, de los

elementos longitudinales que forman la pared, antes de hacerlo de forma usual, es decir, solamente aguas abajo (Fig. 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24). Para aumentar la seguridad de los pequeños diques de corrección se recurre muy a menudo a la elaboración de la empalizada simple con elementos longitudinales que, partiendo del pie de la empalizada superior, van unidos a algunos de los elementos de la empalizada inferior. La altura sobre el nivel del suelo de la empalizada no supera casi nunca 1.5 m, mientras que si consideramos también la longitud de penetración, los elementos verticales del terreno, la altura total alcanza un máximo de 3 m.

En el caso de defensa longitudinal la obra pueden hacerse también dejando una pequeña distancia vertical entre elementos (15-35 cm) para poder consentir el empleo de tales elementos y el enverdecimiento de la pared de la ribera (Fig. 3.26, 3.27 y 3.28), y es oportuno en este caso que la geometría de la sección del cauce garantice una capacidad suficiente de conducción hidráulica. La empalizada de ribera (Fig. 3.23) frecuentemente se ve reforzada previendo la incisión de palos de madera normalmente a la inclinación de la orilla; esta prevención mejora la estabilidad y resulta conveniente si los elementos verticales de la empalizada tienen un eje interno elevado (≈ 0.5). No obstante, para los pequeños diques de corrección puede preverse un cierto eje interno entre los elementos verticales. Los espacios dejados libres entre palos pueden entonces ser rellenados con matorrales o herbazales de modo que se forme una columna drenante (Fig. 3.22). Una solución más actual e indudablemente mas duradera es la realización de una pared de postes puestos en obra con continuidad y posicionamiento (antes de reintentar artificialmente la obra) de un tejido de geotextil a ras de la pared (Fig. 3.21).

El empleo de la empalizada como obra transversal de corrección de torrentes está limitado a cursos de agua muy modestos con una capacidad máxima del orden de $0.8-1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Se seleccionan en este caso vertederos que generalmente son de forma rectangular. Mas allá de este límite es necesario utilizar vertederos mas abiertos con una geometría en forma de “cola de golondrina”, prestando atención al refuerzo de riberas erosionables con intervenciones de ingeniería naturalística. En caso de que se quiera realizar un umbral fijo en el cauce interesado en traer notables aportes (superiores a $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por metro de ancho del lecho), es oportuno acompañar la empalizada con la construcción de una pequeña cuenca de disipación; esta última podrá ser realizada también toda en madera, previendo una serie de elementos apilados dispuestos longitudinalmente (para formar la plataforma contra la erosión) seguidos de dos elementos transversales formando el contradique (Fig. 3.25).

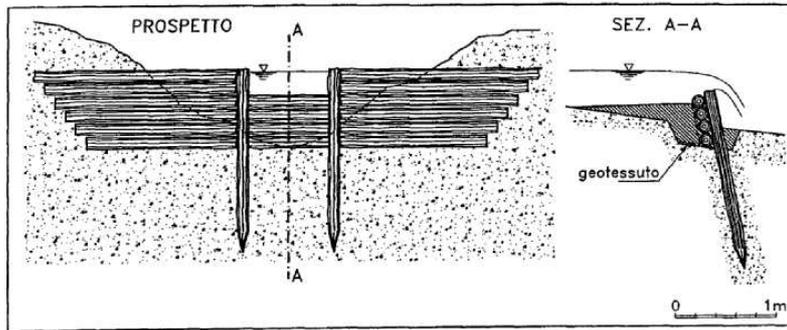


Figura 3.21 - Pequeño dique de corrección con empalizada simple con vertedero de forma rectangular. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

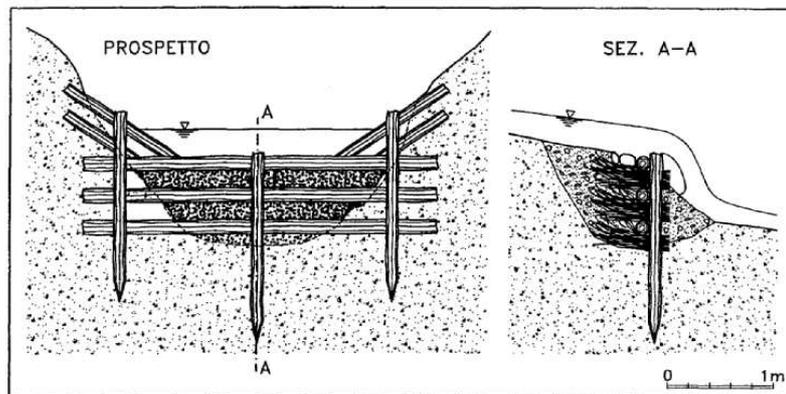


Figura 3.22 - Pequeño dique de corrección con empalizada simple y con vertedero a "cola de golondrina". (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

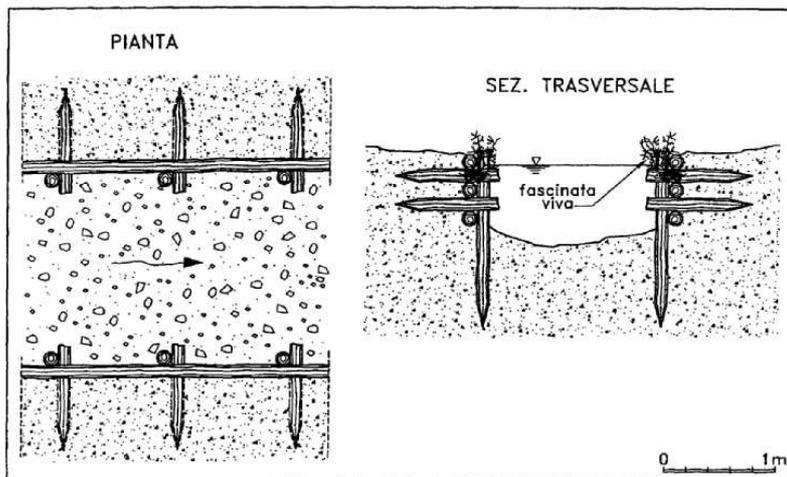


Figura 3.23 - Defensa de riberas con empalizada simple reforzada con elementos incrustados en las riberas y con intervenciones de ingeniería naturalística ("empalizada viva"). (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

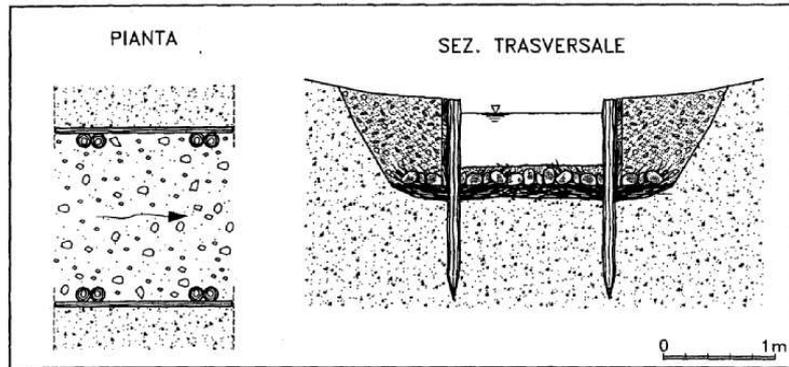


Figura 3.24 - Defensa de riberas con empalizada y con una corriente constituida por tablas.
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

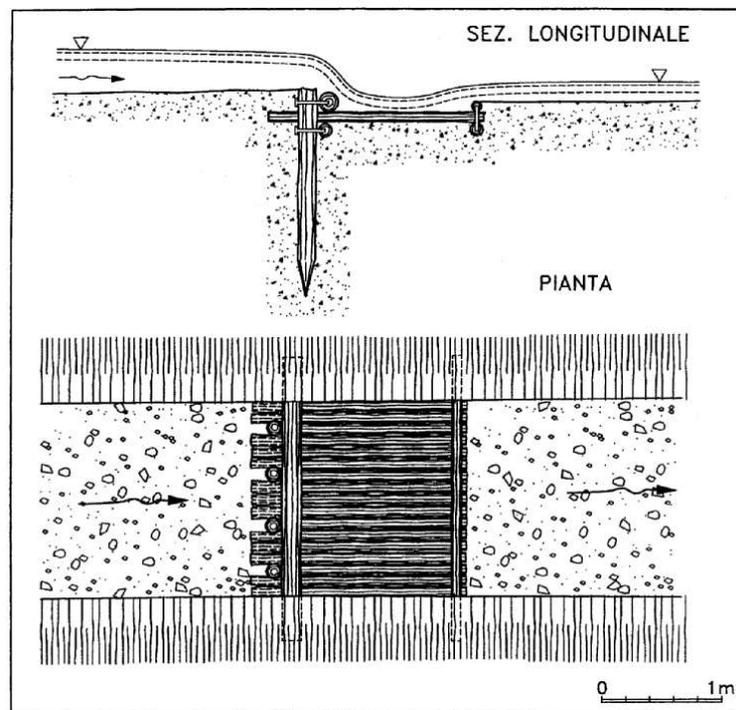


Figura 3.25 - Umbral con empalizada simple seguida de un contradique.
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

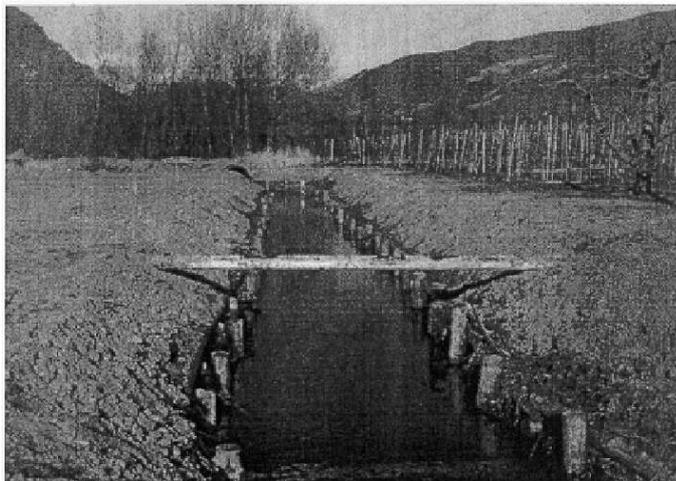


Figura 3.26 - Corrección de riberas con una empalizada recién acabada. (Rio Sacco, Val Venosta Bz)
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

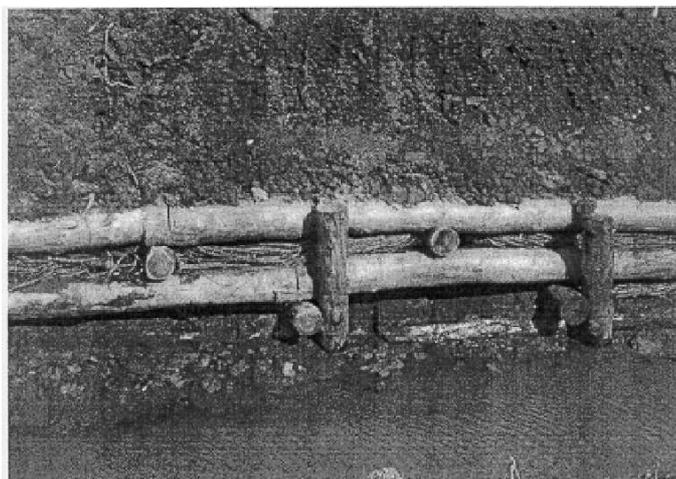


Figura 3.27 - Corrección de riberas con una empalizada: particular. (Rio Sacco, Val Venosta Bz)
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).



Figura 3.28 - Corrección de riberas con una empalizada después de un año de su construcción. (Rio Sacco, Val Venosta Bz)
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

3.4.2 DIQUE JESSER

El cuerpo de los diques Jesser está formado por elementos longitudinales apilados de modo que se forme, planimetricamente, un perfil del vertedero en forma de V con el vértice dispuesto aguas arriba (Fig. 3.29). Los elementos longitudinales se desarrollan sobre dos planos levantados a una altura de 0.4-1.0 m de modo que se forme un dique con doble coronamiento, y una plataforma contra la erosión aguas abajo. Esta puede ser realizada toda en madera, de modo análogo al dispositivo ilustrado en la Fig. 3.25, o bien con una plataforma delimitada por un “marco” de madera (Fig. 3.29) y pavimentada con bloques lapídeos de tamaño mediano.

Las dimensiones alcanzables con tal topología constructiva son inferiores a las alcanzadas con las obras a cajón. Difícilmente, de hecho, se superan los 2 m de altura (calculados desde el pie de la plataforma aguas abajo). Esta obra presenta generalmente una mayor solidez respecto a la empalizada simple y es capaz de soportar avenidas mas elevados (incluso del orden $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). La particular forma del vertedero tiene la ventaja de ser muy eficaz a la hora de concentrar en ejes sobre el cauce las avenidas fuertes y también las suaves. La empalizada puede ser de tal forma preferible al dique Jesser cuando la sección del cauce es muy fija y está muy encajada a las riberas erosionables, mientras el dique Jesser es preferible en caso de secciones más abiertas (Fig. 3.29).

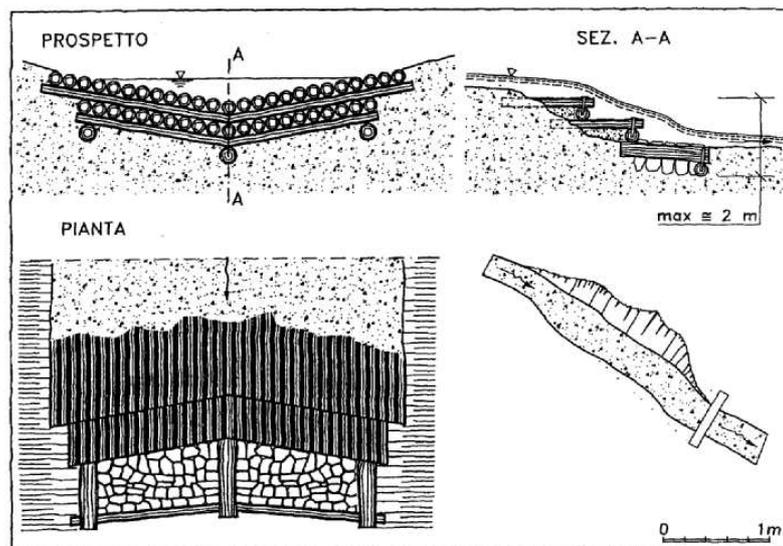


Figura 3.29 - Dique Jesser. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

3.4.3 DIQUE CONVEXO

El dique convexo es estructuralmente muy similar al dique Jesser, con el que tiene en común el campo de acción y las características funcionales, pero se diferencia de este último por tener una superior solidez estructural. Los dos planos de elementos longitudinales, que en el dique Jesser dan al coronamiento un perfil escalonado, están en este caso prácticamente alineados sobre la vertical (Fig. 3.30). Si además no están dispuestos, como en el dique Jesser, paralelamente a la dirección de la corriente, los encontramos puestos con un ángulo de 20-30° respecto a tal dirección. Aún en este caso el perfil planimétrico del coronamiento (vertedero) asume la forma de V con el vértice orientado aguas arriba y favoreciendo la concentración de los flujos sobre el eje de la sección del cauce. Los elementos transversales del dique convexo confieren a la obra una notable estabilidad. De hecho, estos van dispuestos de forma acoplada bajo unos planos longitudinales y, encontrándose en el vértice de la V, están insertos al menos 2.5-3 m dentro del cuerpo de la obra (Fig. 3.30). Con esta disposición y trama de X de los elementos transversales, los empujes externos en parte se descargan sobre las orillas y en parte son absorbidos por el mismo cuerpo de la obra. Como para el dique de Jesser, es oportuno que el pie de la obra sea protegido de la socavación, realizando una plataforma de protección (Fig. 3.30) o la construcción de un contradique de corta distancia.

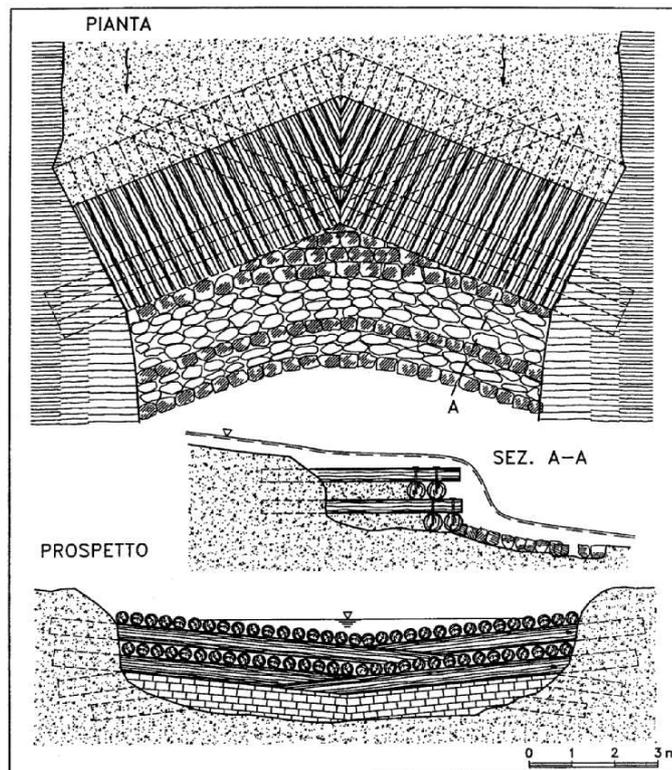


Figura 3.30 - Dique convexo. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

3.4.4 ESPIGÒN CON UN PLANO DE DESLIZAMIENTO

Si se excluye la posibilidad, a la cual se recurre raramente, de realizar un espigón mediante una empalizada, es este el único tipo de espigón de madera. Esta tipología está muy poco difundida en Italia y fue transmitida por una tradición austriaca. La estructura principal está constituida por un conjunto de palos verticales, responsables del soporte del espigón (Fig. 3.31). Los elementos longitudinales inclinados (en número de 3-4) constituyen el esqueleto del plano deslizante y están unidos tanto a los palos verticales como al pie (aquí el palo hace la función de una bisagra) y a la cabeza (el palo en este caso funciona como un puntón). Los palos verticales van anclados al terreno y unidos, en sentido transversal, por traviesas de madera ancladas a su cabeza. Algunos elementos longitudinales inclinados sobre el plano de deslizamiento no se apoyan directamente sobre los palos (Fig. 3.31), pero hay traviesas que rinden recíprocamente en colaboración con los palos verticales. Completan el espigón los cilindros de menor diámetro (5-15 cm), que vienen dispuestos de forma continua a los elementos longitudinales oblicuos, formando así la pared superior del espigón. La inclinación recomendada para el plano de deslizamiento está entorno a 30°, considerando el ángulo formado entre la dirección del plano de deslizamiento y el lecho debajo de dicho plano.

Para el empleo óptimo del espigón con un plan de deslizamiento, debe ser dimensionado como no sumergible (la caída puede de hecho, provocar erosión localizada), dedicado a la consolidación de riberas en secciones torrenciales mas bien amplias (por lo menos 20 metros) y para pendientes no muy altas (en todo caso no superiores a 3.5-4 %). Típica es la realización de espigones en serie posicionados al exterior de una curva (Fig. 3.31) para contener los fenómenos de erosión o remolinos y las divagaciones del lecho. Puede ser también oportuna la realización entonces de intervenciones aisladas (1-2 espigones), en correspondencia con nichos de erosión de riberas y/o al pie de vertientes inestables. Se debe recordar que el espigón con deslizamientos es particularmente apropiado para crear zonas de refugio y de reproducción para la fauna autóctona. La zona de reposo para los peces no se sitúa solo en la parte inferior de la obra, como se hace en los espigones tradicionales, pues se extiende también a la zona situado debajo del plano de deslizamiento con aguas tranquilas y sombreadas.

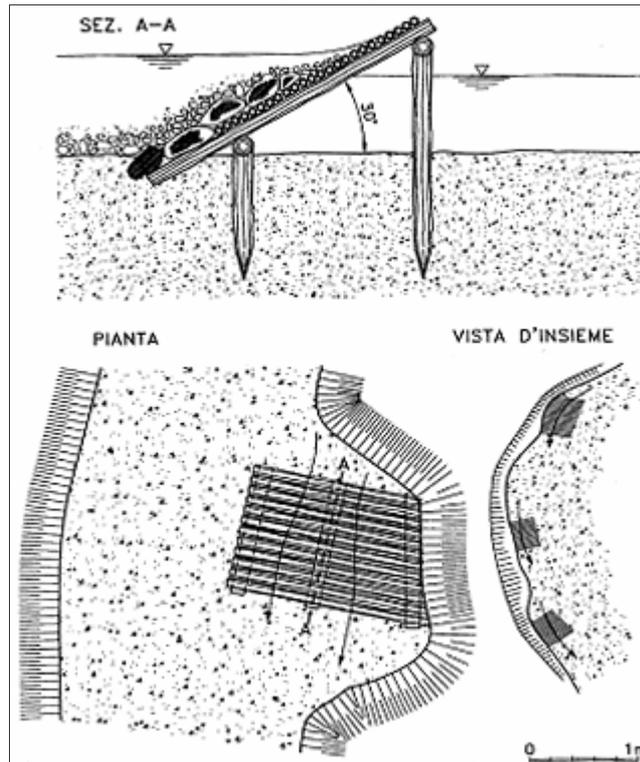
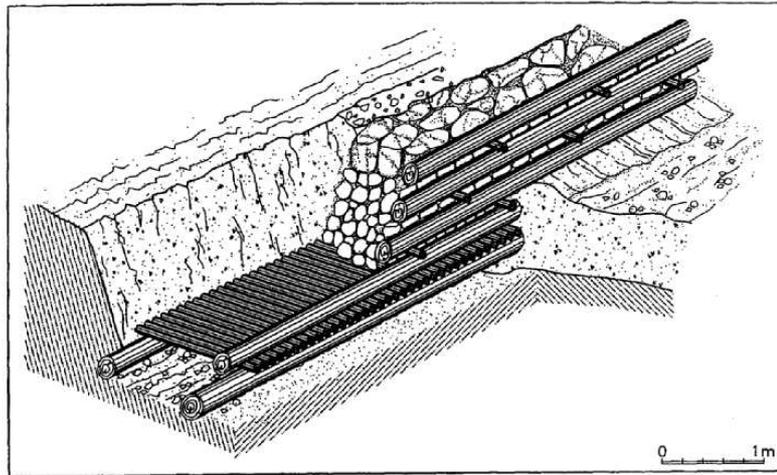


Figura 3.31 - Espigón con un plano de deslizamiento. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

3.4.5 OBRAS MIXTAS CON CAJÓN DE DOBLE PARED

El cajón representa la obra de madera que mayormente se emplea en las correcciones hidráulico-forestales. Han sido realizadas por el hombre desde hace casi dos siglos, desarrollando una gran tradición tanto en las intervenciones de consolidación del cauce, como en las intervenciones de estabilización de laderas. El cajón está constituido por una estructura portante de madera, formada por elementos transversales (traviesas) y por elementos longitudinales (largueros), que se rellenan sucesivamente con material rocoso de variada granulometría o, en algunos casos, de tierra (Fig. 3.32).



**Figura 3.32 - Vista de un sistema a cajón utilizado como defensa de riberas.
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).**

Dentro del grupo de los pequeños diques de corrección clasificados en la tipología del cajón mixto, se pueden distinguir dos modalidades diferentes de construcción del vertedero:

- En forma de cola de golondrina (Fig. 3.36a; Fig. 3.37; Fig. 3.38);
- A sección trapezoidal (Fig. 3.36b; Fig. 3.39; Fig. 3.40).

La tipología con las alas en forma de cola de golondrina se adapta a los cauces caracterizados por riberas escarpadas y que pueden soportar también suaves empujes debidos al transporte sólido; en este caso, la corriente no fluye únicamente por el centro del cauce, puede ser necesario prever la consolidación de las riberas con traviesas o con plantas de especies arbustivas.



Figura 3.33 - Utilización de traviesas en una obra de cajón con doble pared.
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).



Figura 3.34 - Dique con cajón con el paramento aguas abajo tamponado con madera.
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).



Figura 3.35 - Dique con cajón con el paramento aguas abajo tamponado con piedras.
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

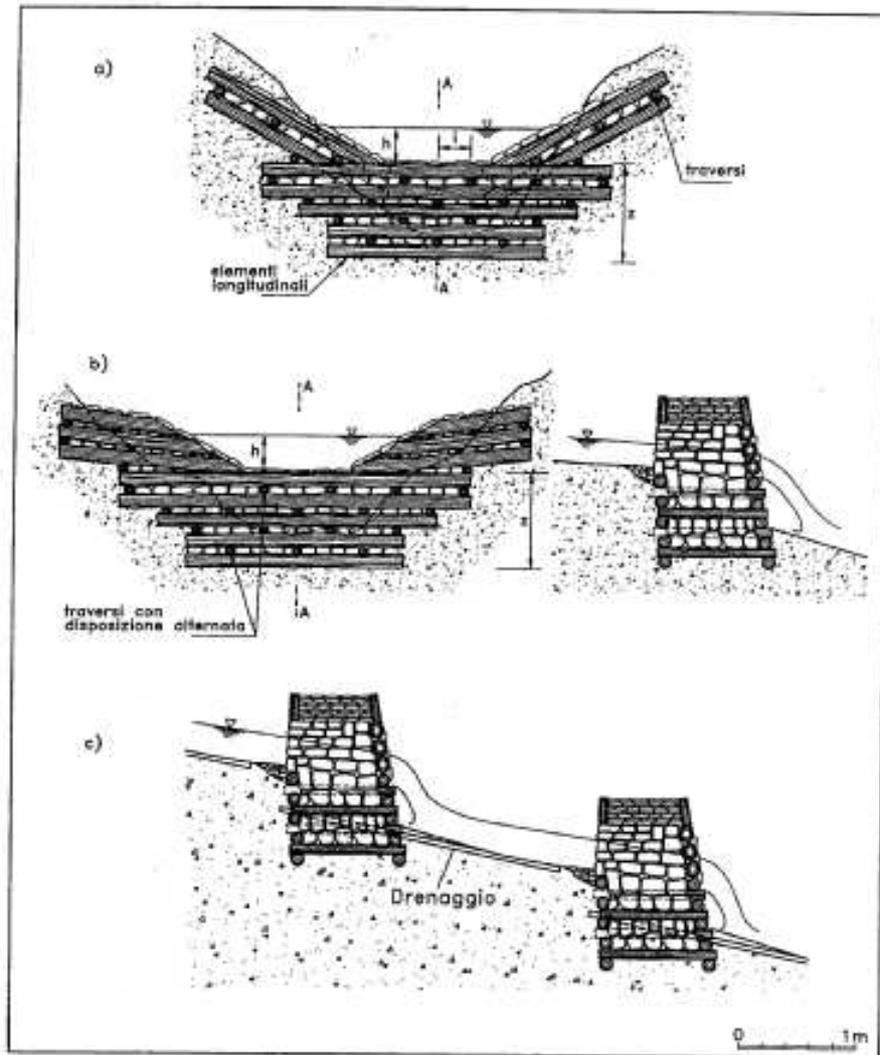


Figura 3.36 - Dique con cajón : a) con vertedero en forma de cola de golondrina; b) con vertedero trapezoidal; c) con dispositivo de drenaje. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).



Figura 3.37 - Dique con cajón y vertedero en forma de cola de golondrina. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).



Figura 3.38 - Consolidación del cauce: diques con cajón y con vertedero en forma de cola de golondrina. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

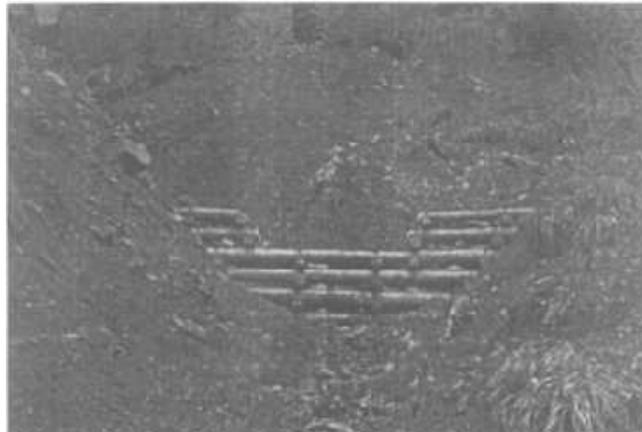


Figura 3.39 - Dique con cajón de doble pared y con vertedero de forma trapezoidal: torrente con fuerte pendiente. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

3.4.6 OBRAS MIXTAS CON CAJÓN EN PARED SIMPLE

Esta tipología constructiva deriva de la simplificación del cajón clásico, es decir, es una estructura formada por elementos longitudinales y transversales, pero la jaula del cajón no está totalmente cerrada (como en la Fig. 3.40c) ya que faltan los elementos longitudinales correspondientes a la pared superior del cajón (Fig. 3.40a y 3.40b). Esta tipología puede ser empleada ya bien como defensa longitudinal de riberas (Fig. 3.40a; Fig. 3.41) o bien como obras transversales (Fig. 3.42). En el caso de defensa de riberas, puede preverse también una fundación con una mayor longitud respecto al cuerpo de la obra que asume la función de proteger el pie de la estructura de la erosión. En los diques los elementos transversales deben presentar una longitud suficiente para poder anclarse de forma eficaz al terreno recuperando nuevos tramos de la parte superior (tendiendo generalmente a ser un poco más largo que los correspondientes a los elementos del cajón de doble pared), mientras que los longitudinales

constituyen el paramento aguas abajo que, la mayoría de las veces, presenta alas en forma de cola de golondrina que acaban en una única pendiente dentro de las riberas. Las rocas posicionadas junto a las alas deben tener unas dimensiones tales que la corriente no pueda arrastrarlas y deben ser puestas en obra con cierta delicadeza, intentando dar así una continuidad a la superficie del coronamiento. Una variante muy interesante de la tipología con pared simple utiliza, como elementos transversales, troncos de árboles sin ramas y corteza, los cuales van fijados al terreno, después de su podadura (Fig. 3.43). Entre las características de esta variante se recuerda la notable longitud de penetración de los troncos en el terreno aguas arriba y el reducido trabajo que es necesario para la preparación de material leñoso utilizado.

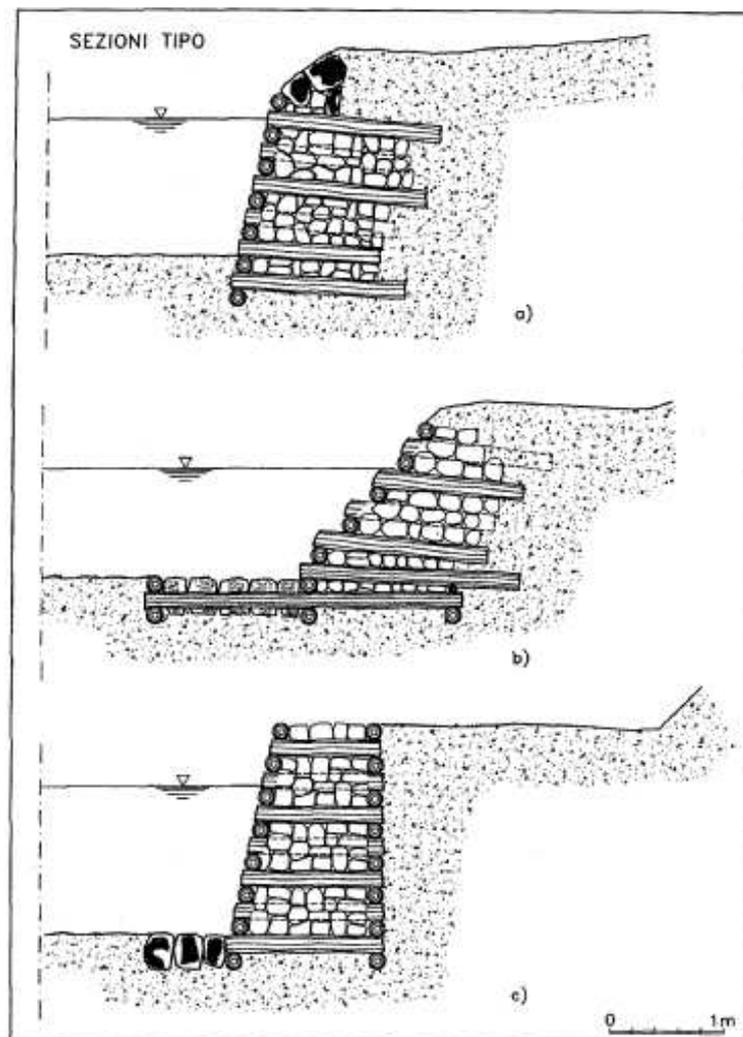


Figura 3.40 - Defensa de riberas con madera y piedra: a) cajón con una pared y con base de apoyo de tipo tradicional; b) cajón con una pared y con un ensanchamiento del lecho de fundación; c) cajón de doble pared con protección del pie con rocas. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).



Figura 3.41 - Defensa de riberas realizada con madera de castaño. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

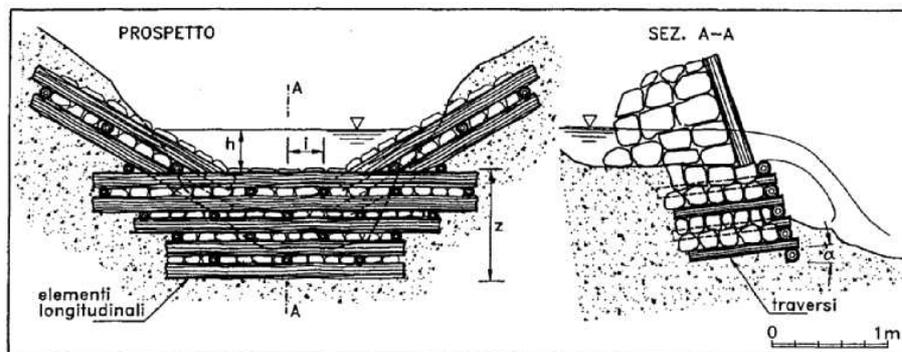


Figura 3.42 - Dique de madera y piedra con pared simple. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

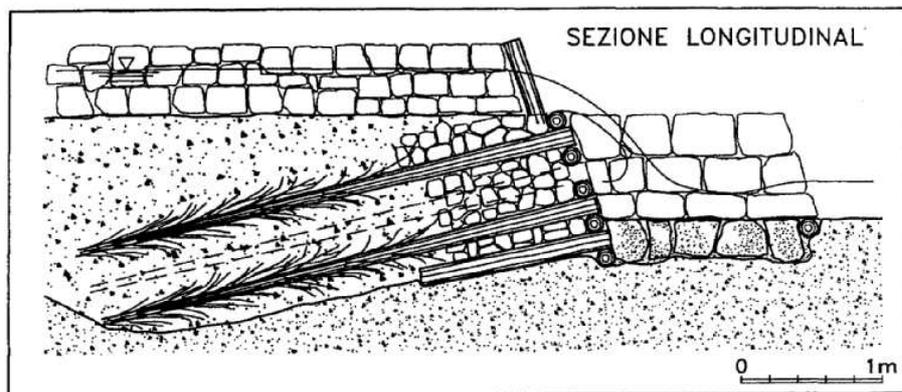


Figura 3.43 - Sección de un dique de madera y piedra anclado por medio de plantas enteras. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

3.4.7 UMBRALES EN MADERA Y GRANDES ROCAS

La necesidad de realizar umbrales de consolidación del fondo en cauces caracterizados por amplios transporte de sedimentos puede llevar a la realización de obras que utilicen rocas y palos de madera según diferentes tipologías constructivas. Estas intervenciones pueden realizarse de múltiples formas, según los usos localizados y las exigencias de proyecto y

ejecución de la intervención. Para que un umbral sea muy estable, sobretodo cuando la relación ancho/profundidad del torrente es superior o igual a 12-14, debe realizarse una doble fila de rocas dispuesta en forma de arco y consolidada por la incisión de una doble fila de palos de madera (Fig. 3.44). La primera fila de palos viene puesta, con un intervalo entre (0.5-2 m), en medio de las dos filas de rocas. La segunda fila viene fijada inmediatamente bajo la otra, teniendo cuidado de que no coincidan, respecto a la dirección de la corriente, la puesta de ambas filas de palos. De larga tradición histórica es también el umbral de la figura 3.45.

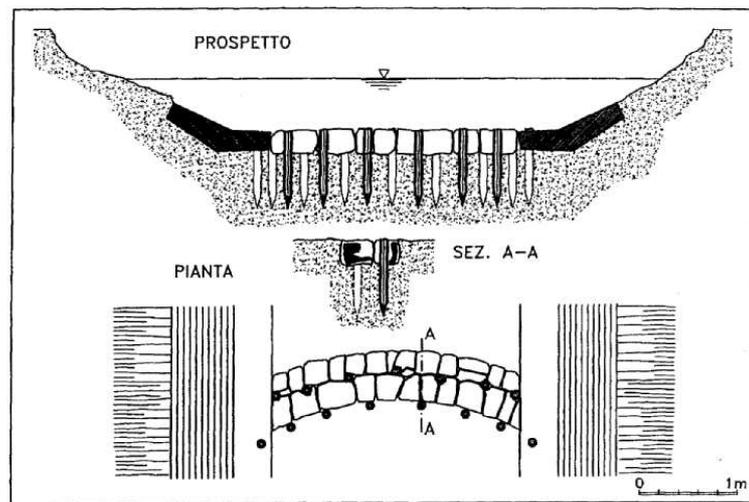


Figura 3.44 - Umbral de madera y roca de forma arqueada. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

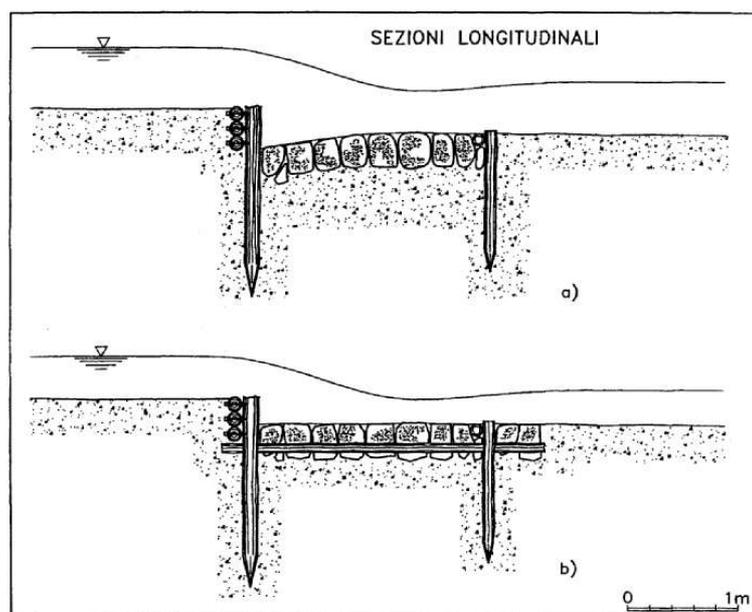


Figura 3.45 - Umbral en madera y roca con un pequeño salto de fondo: a) Cuenca de disipación en roca; b) Cuenca de disipación con un telar en madera. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

3.4.8 ESPIGONES DE MADERA, PIEDRA Y ROCA

Los espigones pueden ser utilizados en la corrección de torrentes de montaña con uno de los siguientes objetivos: estabilizar un derrumbe que pueda llegar al cauce, alejar la corriente de las riberas, o bien crear un cauce mas estrecho, profundo y estable, concentrando los filones principales de la corriente en una zona central del cauce. En ambos casos estas obras pueden realizarse apilando de forma ordenada rocas reforzadas en una estructura de madera fuertemente anclada al fondo. Muy común es la incisión de una serie de palos verticales en correspondencia al lado superior del espigón. Estos palos están unidos a los elementos horizontales de manera que se forme un cañizo que absorberá el impulso hidrodinámico de la corriente y que evitará la movilización de rocas durante la fase de llenado (Fig. 3.46). Como se observa en el esquema de la figura 3.46, los elementos horizontales pueden estar posicionados solo sobre la empalizada vertical, ya sea bien encima o debajo, aumentando la rigidez del cañizo. Las rocas están dispuestas de modo tal que se rellenen los verdaderos huecos creados en el curso de agua que se corresponden con las curvas repentinas o tramos asimétricos respecto a su sección. En este caso la estructura de contenido de las piedras puede ser realizada con una serie de palos verticales distribuidos en el interior del relleno (Fig. 3.47) o delimitando, siempre con palos, solo el perímetro del área ocupada por las rocas y uniendo eventualmente a los palos una serie de elementos horizontales de madera.

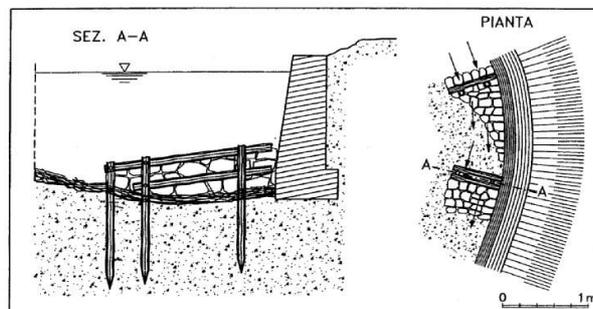


Figura 3.46 - Espigón mixto en madera y rocas. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

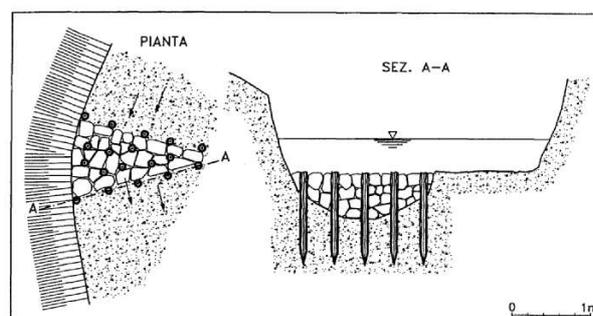


Figura 3.47 - Obras de palos y rocas para la corrección de una erosión localizada. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

4 AGENTES DEGRADADORES Y MÉTODOS DE PROTECCIÓN DE LA MADERA

Se entiende por agentes degradadores de la madera todas las causas que directamente o indirectamente intervienen en la alteración de la madera. Se puede hacer una primera clasificación de los mismos en agentes abióticos y agentes bióticos. Los agentes destructores abióticos incluyen, principalmente, los agentes atmosféricos, los agentes químicos y el fuego. Los agentes destructores bióticos comprenden los organismos vivos que degradan la madera. Dentro de los agentes degradadores abióticos se incluyen los agentes atmosféricos (el sol y la lluvia, los compuestos químicos y el fuego), mientras que dentro de los agentes bióticos se distinguen los que pertenecen al reino vegetal (mohos, hongos cromógenos, y hongos de pudrición) y al reino animal (insectos xilófagos y algunas aves). Algunos autores agrupan los agentes degradadores en agentes xilófagos y físicos. Todos estos agentes originan la degradación de la estructura de la madera y la disminución de su resistencia a través de su fraccionamiento mecánico o de reacciones químicas que transforman la madera en alimento asimilable por parte de insectos, o en energía en el caso del fuego.

Los principales agentes atmosféricos o meteorológicos que pueden causar la degradación de la madera son el sol y la lluvia. Éstos claramente actúan mayormente en los elementos leñosos que constituyen las paredes externas de estructuras a cajón. En este apartado se explica la acción de dichos agentes sobre la madera no tratada con productos para su protección superficial, conjuntamente a la degradación que producen en la madera protegida superficialmente. Varios estudios han demostrado que lo más importante es proteger la madera antes de que su superficie sea expuesta a los agentes atmosféricos. Queda claro que un sistema de protección superficial (una pintura o un barniz) aplicado a una superficie nueva permanecerá en perfectas condiciones durante años, pero cuando éste es aplicado sobre una superficie anteriormente sometida a los agentes atmosféricos, mostrará los primeros efectos de deterioramiento después de un periodo relativamente corto. A menudo las superficies pintadas o barnizadas presentan grandes zonas de película envejecida, quebrada, etc., que pueden permanecer varios años así antes de que se vuelvan a pintar. De toda forma, las superficies repintadas denotan una vida más corta, ya que la pintura no actúa correctamente sobre una superficie que está parcialmente degradada.

El estudio de la protección superficial de la madera se remonta a muchos años atrás. Existen referencias de como se protegió el Arca de Noé (40% de betún, 40% de resina y 20%

de aceite), en los Anales de Confucio aparecen las primeras instrucciones sobre la tecnología del lacado, pero solo en el siglo XVIII los ebanistas ingleses y franceses llegaron al virtuosismo en los temas de la tratamiento superficial de la madera. Las tres características visuales que desde siempre han definido la calidad de la superficie de la madera son la transparencia, la textura y el color.

4.1 FACTORES QUE INCIDEN SOBRE LA MADERA Y SOBRE LA PROTECCIÓN SUPERFICIAL

La durabilidad de los recubrimientos aplicados sobre una superficie de madera colocada al exterior depende fundamentalmente de tres grandes factores, que independientemente o interrelacionados entre sí, degradan y destruyen la protección superficial de la misma: la inestabilidad superficial de la madera, su meteorización por agentes atmosféricos (sol y lluvia) y los mecanismos de envejecimiento que se derivan de dicha meteorización.

Los elementos que mas afectan a la durabilidad de la madera, para cada uno de estos factores, son los siguientes: la radiaciones del sol, la humedad atmosférica, el oxígeno del aire y los iones de la polución englobados dentro de los agentes atmosféricos, la porosidad de la madera, el color, los extractos celulares de la madera y los cambios de la transición vítrea.

La acción de la meteorización o de los agentes atmosféricos se puede dividir en las acciones originadas por el macroclima y las acciones originadas por el microclima. En el macroclima se encuentran los factores atmosféricos como las radiaciones solares, la humedad atmosférica, la temperatura y el oxígeno del aire y los gases ácidos provocados por la contaminación atmosférica. En el microclima se encuentran los parámetros que afectan directamente al recubrimiento en el entorno inmediato, tal como el rocío prolongado, las radiaciones luminosas cuya energía produce procesos químicos, los iones de la polución y el oxígeno del aire.

4.1.1 LA ACCIÓN DEL SOL

La radiación solar actúa su efecto degradante principalmente a través de la radiación de los rayos ultravioletas e infrarrojos. Los rayos ultravioletas no penetran profundamente en la madera y sus acciones se concentran en la superficie. La degradación que producen es lenta, se estima en 5-12 nm por siglo, y se centra en la lignina de la madera. Las fibras de la madera, que contienen elevados porcentajes de celulosa, permanecen sobre la superficie de la madera y

le dan ese color grisáceo (la celulosa es de color blanco) con el paso del tiempo. En la madera desnuda provoca que se pierda cohesión entre las fibras al degradar la lignina que las une, por lo que es relativamente fácil que se desprenda o se deshilache parte de la superficie por la posterior acción de la lluvia. El color de la madera expuesta al exterior se ve afectado muy rápidamente. En unos pocos meses y de forma general todas las maderas adquieren un color amarillo-marrón debido a la destrucción de la lignina y los extractos. Las maderas ricas en extractos, como el cedro, se blanquean antes de adquirir las tonalidades amarillas-marrones-grisáceas. Los últimos estudios realizados concluyen que la decoloración de la madera en presencia de humedad se debe al crecimiento de hongos cromógenos de la especie *Aureobasidium pullulans* (*Pullularia pullulans*) en su superficie. Cuando la madera incorpora una protección superficial, los rayos ultravioletas degradan progresivamente las resinas de los productos de protección, sobre todo aquellos que no están protegidos por los pigmentos, lo que se conoce como “vitrificación del barniz”.

Los rayos infrarrojos provocan una acción degradante indirecta sobre la madera ya que mediante un proceso de calentamiento superficial generan la aparición de fendas en la cara expuesta al sol y la subida de resinas a la superficie. El contenido de humedad de la madera es función directa de la temperatura de la misma. La superficie expuesta sufre un proceso de calentamiento que origina una pérdida de humedad superficial. Ya que el interior de la pieza se mantiene más frío, su contenido de humedad será diferente al de la capa superficial. Esta diferencia de contenidos de humedad entre la superficie y el interior de la pieza se traduce en tensiones, ya que la superficie de la pieza tenderá a contraerse al disminuir su contenido de humedad por la acción de calor y dicha contracción se ve dificultada o frenada por la parte interior, lo que provoca la aparición de fendas. La aparición de fendas también está relacionada con la especie de madera utilizada. Si la madera tiene un coeficiente de contracción elevado se favorece la aparición de fendas, si por el contrario tiene un coeficiente de contracción bajo disminuye la posibilidad de que aparezcan o, si aparecen, su número y su profundidad tiende a ser mucho menor. Otro efecto negativo provocado por este calentamiento es la subida de la resina que sale en la superficie de la pieza; algunas especies cuyo contenido en resina es elevado presentan con mayor frecuencia esta particularidad. Cuando la madera lleva una protección superficial, la acción del calor originada por los rayos infrarrojos acelera el envejecimiento de la resina del producto. En el caso de los barnices, al ser estos transparentes, los rayos infrarrojos llegan a la superficie de la madera muy fácilmente y producen los efectos mencionados anteriormente (aparición de fendas y subida de la resina).

En el caso de las pinturas, su acción se ve mitigada por la presencia de los pigmentos, que actúan como un escudo protector. La temperatura de la superficie varía sensiblemente dependiendo de la coloración del producto, siendo máxima para el negro y mínima para el blanco, así que se originarán más fendas con una pintura negra que con una pintura blanca. Un aspecto que tiene que ser considerado es que los coeficientes de dilatación térmica de la madera y de los productos de protección superficial son diferentes. Estos últimos suelen ser superiores a los de la madera, originando rupturas en la película protectora a lo largo del tiempo si la flexibilidad del revestimiento no es suficiente. La velocidad con que se verifique este proceso dependerá de las excursiones térmicas diarias y estacionales y de la zona geográfica en que nos encontremos.

Resumiendo, la acción de los rayos infrarrojos es muy perjudicial porque provoca la aparición de fendas, y estas tienen una influencia desfavorable sobre la duración de la protección superficial y constituyen el factor más importante en la degradación de la madera. Los mejores productos de protección superficial son los que no forman película ya que, aunque el revestimiento exterior pueda seguir las variaciones dimensionales, estas nunca podrá resistir a la aparición de una fenda en la madera.

4.1.2 LA ACCIÓN DE LA LLUVIA

La acción mecánica de la lluvia sobre la madera produce un efecto negativo parecido pero inverso al que es originado por los rayos infrarrojos. La lluvia induce un aumento del contenido de humedad en la superficie de la madera, que será entonces superior respecto al del interior de la pieza. Este gradiente de contenidos de humedad provoca tensiones superficiales que conducen a la aparición de fendas. Cuando las piezas de madera están revestidas con un producto de protección superficial, estas resistirán durante bastante tiempo la acción exterior del agua ya que, impermeabilizando la madera, evitan la entrada de agua (ya sea en forma líquida o en forma de vapor) en la madera. Si se aplica una protección superficial sobre una superficie que ha estado expuesta a la acción de la lluvia, su duración o permanencia será mucho menor, ya que el agarre de la película es inferior al que tendría si se hubiera aplicado sobre una superficie que no ha estado expuesta. Antes de aplicar el producto se recomienda lijar o cepillar la madera hasta que aparezca la madera sana o con su color natural. Resumiendo lo expuesto anteriormente, se puede concluir que:

- No se puede dejar la madera expuesta a los agentes atmosféricos sin protegerla previamente. La duración de un barniz disminuye en gran medida al dejar, aunque sea solamente una semana, el soporte al sol previamente a un tratamiento;
- Los productos totalmente transparentes (barnices) deben evitarse porque permiten a los rayos ultravioletas de alcanzar la madera y, a su vez, se degradan más rápidamente que los que incorporan pigmentos;
- Evitar en la medida de lo posible la exposición total al sol de la madera sin proteger o protegida superficialmente (medidas constructivas);
- La madera más expuesta a la acción de los fenómenos atmosféricos debería tratarse con un producto protector adicionado con resinas que estabilicen la madera y amortigüen los posibles cambios dimensionales;
- La duración de un producto depende principalmente de la orientación de la superficie tratada. En el hemisferio norte, las fachadas sur, suroeste y oeste son las más desfavorables frente a la acción del sol.

4.2 CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA

Entre las más importantes propiedades físicas de la madera que merece ser resaltada en este sede, por su relación directa con la durabilidad de la madera misma y la acción de algunos de sus agentes degradadores, es su higroscopicidad. Su conocimiento es de gran importancia para una correcta utilización de la madera y tiene una gran influencia en el estudio de métodos de protección de la misma.

La madera es un material higroscópico que absorbe o cede agua según las condiciones ambientales (humedad relativa y temperatura del aire). Esto afecta a las relaciones con los agentes xilófagos como los hongos, las termitas y algunos anobidos que necesitan un contenido de humedad superior al 20-22%. Si la pieza de madera puede alcanzar este contenido de humedad convendrá protegerlos contra ellos. El contenido de humedad máximo que puede alcanzar la madera cuando solo absorbe agua en forma de vapor es aproximadamente 28%, aunque en la práctica es relativamente difícil que se encuentre en situaciones en las que la humedad relativa del aire sea superior al 90%, por lo que a humedad sería entorno al 22%. Pero en algunas situaciones la madera puede absorber agua en forma líquida y alcanzar contenidos de humedad superiores al 22%, tal como las piezas expuestas

durante mucho tiempo a las condiciones atmosféricas, recibiendo el agua de la lluvia, en contacto con suelos húmedos, en piezas en las que se acumulan gotas de rocío que quedan sobre su superficie, en piezas en las que se producen condensaciones o acumulaciones de agua, etc. Los detalles constructivos y las medidas arquitectónicas que impiden el contacto directo de la madera con las fuentes de humedad juegan un papel importante tanto para que la madera no absorba agua líquida como para favorecer la ventilación, evitando alcanzar ese punto fatídico del 22% de humedad. Finalmente hay que recordar que la pérdida de humedad provoca en las piezas de madera posibles movimientos de contracción que se traducen en la aparición de fendas y desajustes de las uniones y ensambles entre las piezas. Este movimiento o juego de la madera se expresa por medio del coeficiente unitario de contracción que varía con la especie y cuyos valores se pueden consultar en la bibliografía existente sobre la tecnología de la madera.

4.3 DURABILIDAD NATURAL E IMPREÑABILIDAD

La madera no es habitualmente considerada el mejor material para la construcción de obras de corrección de torrentes y de laderas a causa de sus potencialmente peligrosos procesos de degradación por agentes xilófagos y a los posibles movimientos y aparición de fendas. En realidad, estos problemas pueden ser superados respetando algunas simples reglas de construcción y cuidando el tratamiento de las piezas de madera a usar en la construcción. Como ya anteriormente comentado, antiguamente los carpinteros empleaban piezas de madera con una gran porcentaje de duramen y piezas previamente conservada de tal manera de cuidar el contenido de humedad. Actualmente la tecnología nos permite optimizar los procesos y el aprovechamiento de la madera, pudiendo acelerar el proceso de secado a través de técnicas de secado artificial en cámara y mejorando las prestaciones mediante su correcta protección.

La durabilidad natural se define como la resistencia intrínseca de la madera frente a posibles degradaciones que pueden producir cada uno de los agentes destructores de la madera, entre los cuales se recuerdan los hongos de pudrición, los insectos xilófagos de ciclo larvario (anobios, licidos y cerambidos), los insectos xilófagos sociales (termitas), los xilófagos marinos y finalmente el fuego. Respecto a las normas sobre la durabilidad de la madera y de los materiales derivados, las dos más significativas en Europa son la UNE EN 350-1 y la UNE EN 350-2. La primera especifica los ensayos a realizar para la cuantificación de la durabilidad de la madera y las clasificaciones establecidas para cada agente degradador y

la segunda suministra informaciones sobre la durabilidad natural y la impreñabilidad de las especies comerciales de madera más utilizadas en Europa.

Las informaciones proporcionadas por estas específicas pueden ayudar en la elección de la especie a utilizar y especificar el tipo de protección en función de su aplicación (clases de riesgos). Dependiendo del uso, en algunos casos la durabilidad natural de la madera será suficiente y no se requerirá de ningún tratamiento químico. Para el estudio que nos ocupa (madera a usar en la construcción de diques de madera), se debería hacer referencia a la situación más crítica (clase de riesgo 5 de la UNE EN 350), que es la correspondiente a la madera sumergida permanentemente o intermitentemente en agua, con un grado de humedad permanente elevado. Para dicha clase de riesgo es conveniente realizar un tratamiento químico preventivo obligatorio con un producto a acción muy profunda como sales hidrosolubles (en cantidades de 8 kg cm³) usando un autoclave (vacío-presión). El tratamiento en autoclave es el único tratamiento de carácter industrial que puede garantizar la profundidad del tratamiento y las rendiciones del producto protector, y con ello de su eficacia. El autoclave es un cilindro de acero que dispone de una bomba de vacío y otra de presión. Con la bomba de vacío se saca el aire de la madera, además de abrir los poros. Con la bomba de presión se persigue facilitar la entrada de producto protector a la madera. En función de la facilidad o dificultad del tratamiento protector de la madera o del tipo de producto que se aplique o de la intensidad del tratamiento que se desee, se realizará mayor o menor vacío, mayor o menor presión, y mayor o menor tiempo de cada una de las fases del tratamiento.

La impreñabilidad de una especie de leñame es una medida de la capacidad para que un líquido pueda penetrar en el interior de la madera. Con la sola excepción del método de difusión, que utiliza como vehiculo para el producto de tratamiento el agua que tiene la propia madera, en todas las técnicas de tratamiento la cantidad de producto que entra en la madera está muy relacionada con su estructura anatómica (dimensión, forma y número de células por unidad de volumen, además de la capacidad de las mismas para transportar líquidos). En general la madera de albura absorbe líquidos con más facilidad, independientemente del comportamiento que tenga su madera de duramen. De toda forma existen casos particulares en los que es más difícil impregnar la madera de la albura.

La cantidad de producto que entra en la madera depende del método de tratamiento que se utilice. Las mayores penetraciones se consiguen forzando la entrada del producto en el interior de la madera a base de presión. El volumen máximo de producto protector que puede

introducirse depende del espacio libre que existe en el interior de la madera. El peso específico de la madera que no tuviera nada de aire en su interior sería, aproximadamente, de unos 1.200 kg m³. Conociendo el peso específico de cada madera es posible entonces saber la cantidad de producto líquido que es posible introducir de forma teórica. Por ejemplo una especie de madera que tuviera un peso específico de 400 kg m³ podría teóricamente absorber hasta su saturación unos 720 l m³ de productos; mientras que otra que tuviera un peso específico de 800 kg m³ absorbería 400 l m³, aunque en la práctica se consiguen absorciones de producto mucho menores. Aunque existan excepciones, de forma general se puede decir que las especies de madera que son más fáciles de impregnar son las que tienen también una durabilidad menor. La clasificación de la impreñabilidad de la madera está basada en las experiencias obtenidas con los métodos de vacío-presión, ya que no existe ningún ensayo normalizado que evalúe esta característica. La norma UNE EN 350 define cuatro clases de impreñabilidad, y para cada una de estas clases la norma incluye una explicación de su significado basado en la experiencia de aplicación de procedimientos de impregnación por vacío y presión:

- Clase 1: Impregnable. La madera aserrada puede ser impregnada totalmente con tratamiento a presión sin dificultad.
- Clase 2: Medianamente impregnable: Normalmente no es posible una impregnación completa, pero después de 2 o 3 horas de tratamiento a presión se puede alcanzar una presión de más de 6 mm en las coníferas. En las frondosas se puede conseguir impregnación de los vasos en una proporción elevada.
- Clase 3: Poco impregnable. Después de 3 - 4 horas de tratamiento bajo presión se alcanzan penetraciones solo de 3 a 6 mm.
- Clase 4: No impregnable. Después de 3 - 4 h de tratamiento bajo presión, solo se absorben pequeñas cantidades de producto. Penetraciones longitudinales y laterales prácticamente inexistentes.

Bajo un punto de vista más práctico, para la madera a utilizar en las obras a cajón para la corrección de torrentes, la información a buscar para valores de durabilidad debe hacer referencia a la madera de albura, mientras que para la impreñabilidad se debe hacer referencia a la madera de duramen. Otra cuestión a la hora de decir sobre la protección de las piezas de

madera contra insectos xilófagos sociales (termitas) y de ciclo larvario es la zona geográfica en la que nos encontremos.

4.4 MÉTODOS DE PROTECCIÓN DE LA MADERA

Hay distintos productos comerciales disponibles para el tratamiento de piezas de madera a emplear en la construcción de obras en cajón. Las principales materias primas empleadas en la fabricación de los productos de protección superficial de las maderas son las resinas, los pigmentos y los solventes. La función de cada una de ellas es la siguiente:

- Resina: Protege la madera frente a la acción del agua y comunica flexibilidad al producto;
- Pigmentos: Además de su emisión decorativa, tienen la función de disminuir el efecto del sol (actúan como un espejo frente a la acción de los rayos infrarrojos);
- Solvente: Funciona como vehículo para transportar la resina y los pigmentos. Se usa como vehículo el agua (productos hidrosolubles) o disolventes orgánicos.

En seguida se relaciona sobre algunos entre los productos comerciales más empleados en el tratamiento de la madera a emplear en obras de correcciones de cursos de agua.

4.4.1 MADERA TRATADA CON REPELENTE ULTRAWOOD

El tratamiento de la madera con productos preservativos exteriores solo proporciona la protección contra la putrefacción y el ataque de termitas. El producto denominado UltraWood es un repelente contra el agua y proporciona una protección a largo plazo contra la putrefacción, deterioro y el ataque de las termitas y los efectos de las condiciones atmosféricas. La madera expuesta al exterior está sujeta a ciclos repetitivos de mojado y secado que causa que la madera se hinche y se encoje, llevándola a astillarse, rajarse y combarse. Los productos con UltraWood son ideales para proyectos de construcción de exterior donde la protección es importante y los efectos de las inclemencias meteorológicas son una prioridad. Este producto puede ser aplicado solo superficialmente con un cepillo o puede ser aplicado en profundidad a través de un tratamiento a presión. Los productos de madera tratados con UltraWood están clasificados como madera tratada a presión con un repelente de agua fabricada según los estándares de la AWPA (AWPA U1, T1, UC1, UC2, UC3A, UC3B, UC4A, UC4B). Éste garantiza la protección a largo plazo (50 años) contra la putrefacción y ataques de termitas.

4.4.2 MADERA TRATADA A PRESIÓN CON REPELENTE SUPATIMBER

La madera tratada a presión con el repelente SupaTimber está protegida contra la putrefacción, el deterioro y ataque de termitas. El producto es a base de arseniato cromado de cobre, conocido normalmente como CCA. Los preservativos de la madera a base de CCA son los que mayoritariamente son usados para el tratamiento de la madera en todo el mundo y se usan eficientemente para tratar madera para uso externo que garantice una duración de 50 años. La madera tratada a presión SupaTimber esta también disponible en tratamientos específicos para su uso en ambientes marinos como para estacadas, espigones y diques de madera. Como por el UltraWood, los productos de madera tratados con SupaTimber están clasificados como madera tratada a presión con un repelente de agua fabricada según los estándares de la AWWA (AWPA U1, T1, UC1, UC2, UC3A, UC3B, UC4A, UC4B). Éste garantiza la protección a largo plazo (50 años) contra la putrefacción y ataques de termitas.

4.4.3 MADERA TRATADA A PRESIÓN CON REPELENTE PRESERVE

La madera tratada a presión con el repelente Preserve esta protegida contra la putrefacción, deterioro y ataque de termitas. Este preservativo no contiene arsénico ni cromo y se puede usar para una gran variedad de aplicaciones en caso de madera que se van a emplear en contacto con el terreno o con agua dulce.

5 EVALUACIÓN DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LOS DIQUES DE MADERA

La durabilidad y la eficiencia de las obras en madera, por causa de la naturaleza del material utilizado, se ven generalmente reducidas respecto a las obras en hormigón simple o armado. De todas forma, con una constante manutención la durabilidad de las obras en madera puede ser notablemente prolongada en el tiempo. A continuación se presenta una metodología propuesta por el Instituto Federal de Investigación Forestal suizo (Zeller y Röthlisberger, 1987) para la evaluación del estado de conservación de los diques de madera. Ésta se considera de extremo interés para comprender todos los aspectos relacionados con la durabilidad de las obras en madera.

El objetivo fundamental de la evaluación del estado de conservación consiste en la determinación de la eficiencia y la duración presumible de las obras en madera. Para hacer esto es necesario inspeccionar, a intervalos temporales regulares, todas las obras de una corrección, con la intención de evitar un rápido deterioro y de mantener siempre un elevado grado de eficiencia de las mismas obras. Sobre la base de la inspección de las obras resulta posible la individuación de los tramos del río o de las porciones de laderas que necesitan una urgente intervención de manutención y/o reforzamiento con la finalidad de consentir el mantenimiento de un buen nivel de seguridad del curso de agua. El instrumento base utilizado en la evaluación de cada uno de los diques y de la cuenca circunstante, es una check-list descriptiva con la cual es posible resumir la situación de cada obra, poniendo en evidencia los daños presentes.

La clasificación del estado de conservación de los diques (de muy bueno a pésimo) dependerá del estado de la madera, del cuerpo del dique, del vertedero y de las alas del dique (Tab. 5.1). Esta clasificación se puede acompañar a una cartografía a escala adecuada (por ejemplo 1:500) para encuadrar el estado funcional global de toda la ordenación del curso de agua examinado.

Símbolo	Estado general	Estado de la madera	Estado del cuerpo del dique	Estado de la fundación
	Muy bueno	Sano	Bueno	Bueno
	Todavía bueno	Sano	Bueno con daños leves	Bueno, pero con una ligera erosión del pie
	En parte comprometido	Parcialmente sano	Presenta primeros signos de desprendimiento	Erosión acentuada en el pie
	De mediocre a no bueno	Avanzado estado de degradación	Daños elevados con rotura de las traviesas	Erosión en el pie muy acentuada
	De muy mala calidad a destruido	Completamente degradado	Completamente destruido	Completamente comprometido

Símbolo	Estado lateral	Estado del vertedero	Estado de las alas del dique	Movimientos del terreno
	Bueno	Bueno	Bueno	Nulo o insignificativo
	Bueno	Bueno con ligeros daños	Bueno con ligeros daños	Leve
	Inicio del descubrimiento de las alas	Daños evidentes que no comprometen la eficacia de la obra	Daños evidentes que no comprometen la eficacia de la obra	Modesto
	Orillas en movimiento con las alas siempre descubiertas	Aportación de rocas y algunas traviesas	Alas presentes solo en parte o en fase de degradación	Fuerte
	Alas completamente descubiertas y no ligadas a las orillas	Muy dañadas con aportaciones de partes enteras	De su destrucción a su desaparición	Muy fuerte

Tabla 5.1 - Definición del estado de conservación de un dique de madera.
(Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

El paso sucesivo consiste en reconstruir la eficacia y el estado presumible de algunas de las obras después de una intervención extrema (Tab. 5.2). Se ha construido para ello, un cuadro general de varias intervenciones de manutención necesarias garantizando la estabilidad y la eficacia de todo el sistema implantado.

Conservación del dique	Daños y mantenimiento	Eficacia después de una intervención extrema	Estado después de una intervención extrema	Símbolo
<i>Muy bueno</i>	Presencia de daños insignificativos	Plenamente eficiente	Bueno, obra solo con daños leves	
<i>Bueno</i>	Daños de pequeños a medios	Plenamente eficiente	Grandes daños y obra en parte destruida	
<i>Comprometido en parte</i>	Daños importantes pero todavía reparables	Parcialmente eficiente	Grandes daños y obra en parte destruida	
<i>De mediocre a mala calidad</i>	Grandes daños no reparables; las partes deben ser sustituidas	De poco eficiente a ineficiente	Enormes daños y en parte o totalmente destruida	
<i>De mala calidad a destruido</i>	Es necesario el reforzamiento de la obra	Completamente ineficiente	Obra completamente destruida o no presente	

Tabla 5.2 - Varias intervenciones de mantenimiento necesarias garantizando la estabilidad y la eficacia de todo el sistema implantado. (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

La metodología para la evaluación del estado de conservación de las obras en madera brevemente descrita arriba, a sido aplicada por el Instituto Federal de Investigación Forestal de la Suiza (en el torrente de Gams). Los datos recogidos han dado lugar a la situación representada en la Fig. 5.1, en la cual se indica la evolución media del estado de conservación de las obras en madera ligada a la edad y al número porcentual de diques. Las tres curvas indican las diferentes situaciones de eficiencias de las obras (desde plenamente eficiente a completamente ineficiente). Considerando una edad de 50 años encontramos que el 50% del número de diques es todavía plenamente eficiente, el 40% lo es solo parcialmente y el 10% es totalmente ineficiente (Fig. 5.1). Se puede ver como los primeros daños aparecen después de 15 años desde la construcción de la obra (se nota de hecho la disminución de los diques plenamente eficientes y el aumento de aquellos parcialmente eficientes).

Después de 30-40 años sin ninguna intervención de mantenimiento surgen grandes daños que hacen ineficientes un número siempre creciente de diques. La figura 5.1 representa una situación media que no considera los diversos contextos de inserción de la obra o particulares condiciones ambientales. Algunos casos relevantes ya sea en Suiza (Zeller y Röthlisberger,

1987) como en el Alto Adige (Mantovani, 1996) han evidenciado la posibilidad de que se verifiquen condiciones de durabilidad muy diferentes. En el Alto Adige, por ejemplo, han sido restaurados los diques de madera de *Larix Decidua* construidos al inicio de siglo y solo parcialmente dañados, mientras el Instituto Federal de Investigación Forestal de la Suiza tiene un cierto número de obras en madera que, siendo construidas en contextos desfavorables, después de 40 años de edad se encuentran prácticamente destruidas. Como se observa en la figura 5.2, la duración de los diques de madera construidos en contextos desfavorables es decisivamente menor respecto a la situación media de la figura.

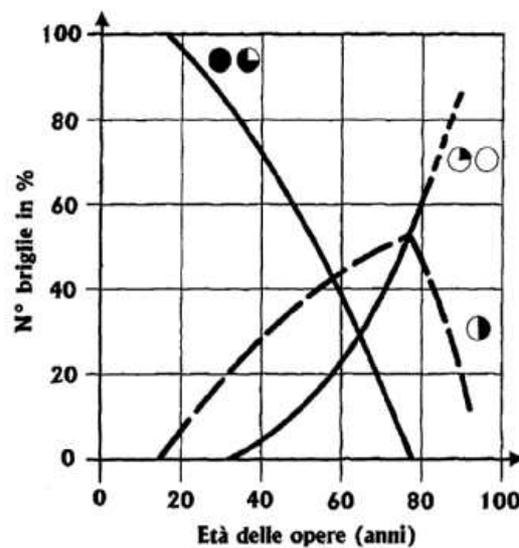


Figura 5.1 - Evolución general media del estado de conservación de los diques de madera dependiendo de la edad y del número de diques (Zeller y Röhlißberguer, 1987). (Fuente: Zeller y Röhlißsrger, 1987)

Como contextos desfavorables para la construcción de diques de madera se entienden ambientes caracterizados por fuertes desprendimientos, zonas con completa ausencia de sombra y zonas con condiciones variables de humedad. En tales ambientes la velocidad de deterioramiento de los diques aumenta de forma decisiva respecto a lo que sucede en los ambientes más favorables.

Entrando en cambio en las condiciones favorables, se pueden resaltar: la estabilidad del terreno, la ausencia de erosión del fondo del torrente, la presencia de taludes estables, el completo sombreado de las orillas y el escaso transporte sólido del torrente. Los mejores resultados, en términos de durabilidad, que se obtienen en estos contextos son acompañados de una mayor duración de los diques plenamente eficientes (se obtiene un incremento medio de 10 años) y una sustancial ausencia de diques completamente destruidos hasta una edad aproximadamente de 70 años (Fig. 5.3).

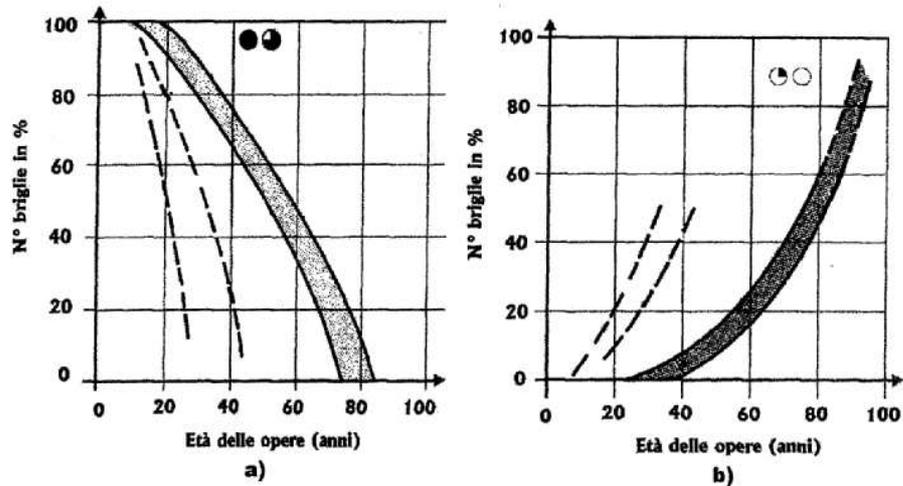


Figura 5.2 - Seguimiento real del numero de diques plenamente eficientes (a) y completamente ineficientes (b) construidos en contextos desfavorables y en contextos medios (líneas continuas) realizados según su edad (Fuente: Zeller y Röthlisbger, 1987)

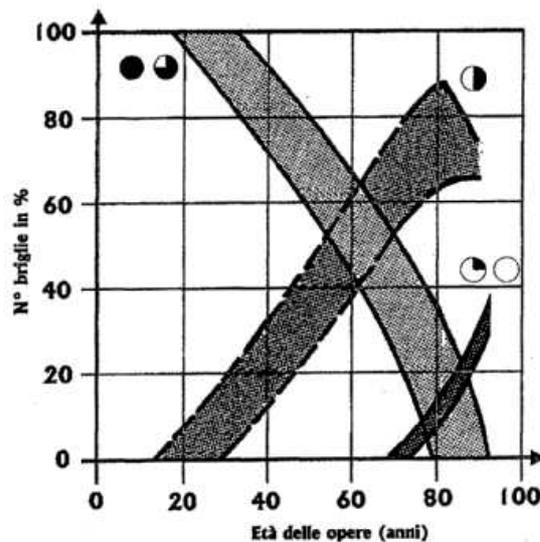


Figura 5.3 - Seguimiento del estado de conservación de los diques introducidos en contextos favorables (Fuente: Zeller y Röthlisbger, 1987)

Las observaciones en campo sobre la durabilidad de las obras han permitido la formulación de clases de idoneidad (Tab. 5.3) en varios contextos de introducción de diques en madera. Los parámetros considerados están en parte directamente ligados al lugar de construcción (movimientos del terreno, exposición, sombreado, transporte sólido, tipo de cursos de agua, etc.) y en parte vinculados a las características intrínsecas de la obra.

	IDONEIDAD				IDONEIDAD		
	Buena	Media	Escasa		Buena	Media	Escasa
Tipo de curso de agua: -torrente grande -torrente medio -torrente pequeño	✓ ✓	✓	✓	Construcción del dique: -con inclinación lateral -de gravedad -anclado	✓ ✓	✓	
Transporte sólido: -coladas detriticas -elevado -escaso	✓	✓ ₁	✓	Altura del dique: -> 5.0 m -4.0-5.0 m -≤ 3.0 m	✓	✓	✓ ₁
Movimientos del terreno: -ninguno -medio -medio-grande -elevado	✓ ✓ ✓ ₁	✓ ₁		Longitud de la obra: -≥ 30 m -15-20 m -≤ 15 m	✓	✓	✓ ₁
Exposición: -Sur -Oeste -Norte -Este	✓ ✓ ✓	✓ ₁ ✓ ₁		Duración deseada: -≥150 años -50-60 años -20-30 años	✓ ✓	✓ ₂	✓
Sombra: -ausente -presente	✓	✓ ₁		Manutención: -constante -salteada -no necesaria	✓	✓ ₁	✓
Función del dique: -retenida -consolidación -umbral	✓	✓	✓				

Tabla 5.3 - Posibilidad de realizar los diques de madera en diversos contextos (1 =duración reducida, 2 = ambiente desfavorable). (Fuente: Andrich, D'Agostino 2000).

5.1 LA MANUTENCIÓN DE LAS OBRAS EN MADERA

La manutención es seguramente una de las operaciones fundamentales en el campo de la intervención de corrección de torrentes con obras en madera. Esta influye de manera relevante sobre la duración de las obras, alargándolas a una media de 20 años, como resulta también de los datos recogidos del estudio de Zeller y Röthlisberguer (1987). Los dos autores observaron que, conforme se acercan al umbral fisiológico de decaimiento de las obras en madera (75-80 años), las intervenciones necesarias para llevar a los diques a su estado de plena eficiencia se deberían realizar a lo largo del tiempo en intervalos cada vez mas pequeños. Las intervenciones de manutención resultan entonces convenientes hasta los 40-45 años desde su construcción, resultando mas oportuno, después de tal limite, proceder al refuerzo total de la obra o de una parte sustancial de esta. De un modo análogo a lo formulado para la manutención de los caminos (Kuonen, 1983) se puede plantear para los diques de madera tres clases de manutención:

- La manutención corriente que consiste en el control y la limpieza de las obras y en las pequeñas reparaciones que se realizan anualmente o después de importantes avenidas;
- La manutención periódica, relativa a la limpieza y reparación de buena parte de la obra, con particular atención a las partes desgastadas del vertedero (las intervenciones pueden tener una cadencia de 10-15 años);
- El reforzamiento total, consiste en la realización de un nuevo dique en substitución del precedente o del desmantelamiento de la vieja obra con el aprovechamiento, si es posible, de parte del material de construcción (esto se puede hacer en el caso de obras relativamente jóvenes dañadas por una crecida con carácter excepcional).

Un aspecto negativo por lo que concierne al trabajo de manutención es el elevado coste que ello conlleva. Evidentemente estos gastos deben ser previstos en el momento de la proyectación de la obra y deben reintentar equilibrarlos de forma conveniente evaluando las posibilidades y como ultimo paso se procederá a la elección de la tipología constructiva que se empleará.

6 CONCLUSIONES

Las obras de corrección hidráulico forestal, ya sea de defensa de laderas o de consolidación de cauces, han estado por mucho tiempo fuertemente ligadas al uso de materiales constructivos fácilmente obtenibles en el área misma de construcción de las obras, ósea la madera y la piedra. Con la aparición de la tecnología del hormigón simple y armado ha ido surgiendo, desde las primeras decenas del 1900, una cierta discriminación de las obras de madera y piedra. Esta orientación ha provocado una inevitable progresiva reducción de la ordenación de cauces y laderas de las porciones más inaccesibles y altas de las cuencas, donde las intervenciones requerirían costos excesivos relacionados a la provisión de los materiales constructivos (hormigón y acero). Las obras de consolidación se han concentrado así en el curso medio e inferior de los torrentes, descuidando parcialmente las necesidades de intervención y ordenación de la red hidrográfica periférica.

Solo a partir de aproximadamente 20 años, gracias a una creciente sensibilidad de la opinión pública hacia el medio ambiente, se ha dado un nuevo impulso al uso de los materiales “tradicionales” en las obras de corrección hidráulicas, tal como la madera, los bloques y la piedra. Siguiendo el mismo impulso, se ha además puesto mayor atención al mantenimiento y a la restauración de las características morfológicas de los cursos de agua, con el objetivo de seguir en el posible, la natural tendencia evolutiva de los cursos de agua, de mejorar el ecosistema biológico y de favorecer la integración entre las intervenciones de correcciones hidráulicas y las de restauración de torrentes y de cursos de agua. Los bloques y las maderas son además materiales que participan de forma natural en la definición del paisaje, al cual confieren también una recalificación estética (D’Ambros, 1994) y constituyen elementos solidamente involucrados en los procesos de dinámica torrencial. Para confirmar esto es suficiente recordar como existen naturalmente en los cauces, unidades morfológicas totalmente constituidas de acumulaciones de madera tal como los *log steps* y los *valley jams* (Abbe y Montgomery, 1996). En este documento se han descrito las características y los principios de proyectación de diferentes obras de bajo impacto ambiental que se pueden utilizar en la restauración y en la corrección de torrentes, tal como los diques de postes de madera, los disipadores y los diques a cajón, diques de bloques, etc. Ya que el principal material empleado en la construcción de estas obras es orgánico, para asegurar una mayor durabilidad de los troncos frente a las condiciones medioambientales, se han descrito las técnicas y los productos a emplear para el tratamiento de los mismos.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Abbe T.B., Montgomery D.R. (1996) Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers*, 12, pp. 201-221.
- Andrich A., D'Agostino V. (2000) *Le opere in legno nella sistemazione dei torrenti montani*. Centro Valanghe di Arabba, ARPAV, Regione Veneto. pp. 141.
- D'Agostino V. (1999) Strutture in legname nella sistemazione dei corsi d'acqua alluvionali: dalla tradizione all'innovazione. Atti del Convegno "La Gestione Dell'erosione, Scienza Tecnica e Strumenti a Confronto per il controllo dei fenomeni torrentizi", Ed. Bios, Cosenza.
- D'Agostino V., Cerato M., Da Re F., Lenzi M.A. (1997) La sistemazione idraulica dei torrenti con briglie in massi. *Dendronatura*, 18(2).
- D'Agostino V., Lenzi M.A. (1997) Origine e dinamica della morfologia a gradinata (step-pool) nei torrenti alpini a elevata pendenza. *Dendronatura*, 18(2).
- D'Ambros E. (1994), *Opere in pietrame e legname*. Atti del Corso di formazione professionale in ingegneria naturalistica, 14-29 Aprile 1994, Regione del Veneto, Dipartimento Foreste, Centro Valanghe di Arabba.
- De Horatiis (1930) *Istituzioni di Idronomia Montana*, Tipografia di Mariano Ricci, Firenze.
- Kuonen (1983) *Wald- und Güterstrassen: Planung-Projectierung-Bau*. Eigen-verlag des Verfassers, Pfaffhausen, Zürich.
- Leopold L. B., Wolman M. G., Miller J.P. (1964) *Fluvial processes in geomorphology*. Freeman Ed., San Francisco, California, pp. 522.
- Lenzi M.A. (1999) Morfología y estabilidad de las secuencias en escalones (step pool) en las torrentes alpinas de elevada pendiente. *Ingeniería del Agua*, 6 (2), 151-152.

- Lenzi M.A., D'Agostino V. (1998) Dinamica dei torrenti con morfologia a gradinata e interventi di sistemazione dell'alveo. *Quaderni di Idronomia Montana*, 17, 37-56.
- Lenzi M.A., D'Agostino V., Sonda D. (2000) *Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti*. Ed. Bios., Cosenza, pp. 208.
- Mantovani D. (1996) *Costruzione, impiego e durabilità delle briglie in legno*, Tesi di Laurea in Scienze Forestali, Università degli Studi di Padova, pp.185.
- Pedrini A. (1993) *Analisi e valutazione di opere di sostegno in legno*. Lavoro di Diploma, Sezione di Ingegneria Forestale del Politecnico Federale di Zurigo, pp.57.
- Service Federal des Routes et des Dignes (1973) *Dimensionnement des Barrages en Torrents en Beton et Béton Armé*. Berne, pp. 29.
- Viviani V. (1688) *Discorso al Serenissimo Cosimo III Gran Duca di Toscana intorno al difendersi da' Riempimenti, e dalle corrosioni de' Fiumi, applicato ad Arno in vicinanza della Città di Firenze*. Stamperia Pietro Malini, Firenze, pp. 49.
- Whittaker J.G., Jaeggi M.N.R. (1982) Origin of step pool systems in mountain streams. *Journal of Hydraulic Divison, ASCE*, 108, 758-773.
- Wohl E., Madsen S., MacDonald L. (1997) Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana. *Geomorphology*, 20, 1-10.
- Zeller J., Röthlisberger G. (1987) *Lebensdauer von Holzsperrren am beispiel der gamser Wildbäche*, Berichte Nr.291, Istituto Federale di Ricerche Forestali n.271, Berichte, Birmensdorf, pp. 34.

EPIC FORCE - UNIPD Obras de bajo impacto ambiental para la restauración de torrentes

Lenzi M.A., Mao L., Rigon E., Comiti F., Andreoli A., Pecorari E., Picco L.

Publicación Especial EPIC FORCE – UNIPD

*Illustrative technical guidelines on boulder and log check dam design and use in river
rehabilitation and restoration*

*GUÍA TÉCNICA - Obras de bajo impacto ambiental (diques de bloque y de madera) para
la restauración y la corrección de torrentes*

Lenzi M.A., Mao L., Rigon E., Comiti F., Andreoli A., Pecorari E., Picco L.

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Università degli Studi di Padova

Viale dell'Università, 16

35020 Legnaro (PD) ITALY

Padova, Septiembre de 2007