

Estabilización de taludes mediante muros Krainer y empalizadas de troncos

Miguel Hernanz Sánchez⁽¹⁾, Marta González Sánchez⁽¹⁾, José Manuel García-Guijas Redondo⁽¹⁾, Alfonso Saiz de la Hoya Zamacola⁽¹⁾, Francisco Javier Sánchez Martínez⁽²⁾, Mónica Aparicio Martín⁽²⁾

(1) Dirección Técnica de Tragsa

(2) Subdirección de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico. Dirección General del Agua. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

jgarcia5@tragsa.es

Los muros Krainer o las empalizadas de troncos, son técnicas desarrolladas en el ámbito de la bioingeniería, empleadas para la estabilización de taludes, y basadas en el uso de materiales biodegradables.

Aunque de manera distinta, ambas técnicas mejoran sustancialmente el factor de seguridad del talud, permitiendo construir taludes verticales, según el caso. Por un lado, su efecto de muro ha demostrado ser capaz de contener taludes de diferentes alturas, en función de la dimensiones de estos. Por otro lado, este tipo de técnicas emplea en su construcción material vegetal vivo con capacidad de enraizar, lo que mejorará las capacidades mecánicas del terreno.

Dado el carácter biodegradable de estas técnicas, es imprescindible asegurar la viabilidad del sistema vegetativo, para que de esta manera, el sistema radicular del mismo supla a la estructura instalada inicialmente, cuando esta se degrade. Por este motivo, la humedad es un factor limitante para la viabilidad de estas técnicas a largo plazo. Esto ha condicionado el uso de estas técnicas, restringiéndose al ámbito fluvial.

Ya se posee experiencia en diseño y ejecución de este tipo de técnicas para la estabilización de taludes en el ámbito fluvial, en la mayoría de las confederaciones hidrográficas.

1. INTRODUCCIÓN

El muro Krainer es una técnica de bioingeniería, compuesta por troncos dispuestos en sucesivos planos horizontales. Últimamente se ha venido usando esta técnica para frenar procesos erosivos y en la estabilización de taludes frente a procesos de deslizamientos. Sin embargo, cabe destacar que son procesos diferentes y que se deben tener en cuenta cada uno por separado.

Dispuesta en las márgenes de los ríos, esta técnica ha tenido distintas y variadas respuestas en función de la tipología de río, materiales usados o terreno en el que se instala. En la respuesta de esta estructura se deberían tener en cuenta una gran cantidad de variables de muy distinta tipología, mecánica de suelos, hidráulica y resistencia de materiales.

Muchas veces esta técnica se realiza con materiales disponibles en la zona y por ello se justifican las dimensiones y materiales de estos, no optimizando de esta manera, el rendimiento de los elementos que la componen. En este sentido, en el presente documento se definirán las dimensiones mínimas frente a unas determinadas condiciones, las que se han considerado más frecuentes.

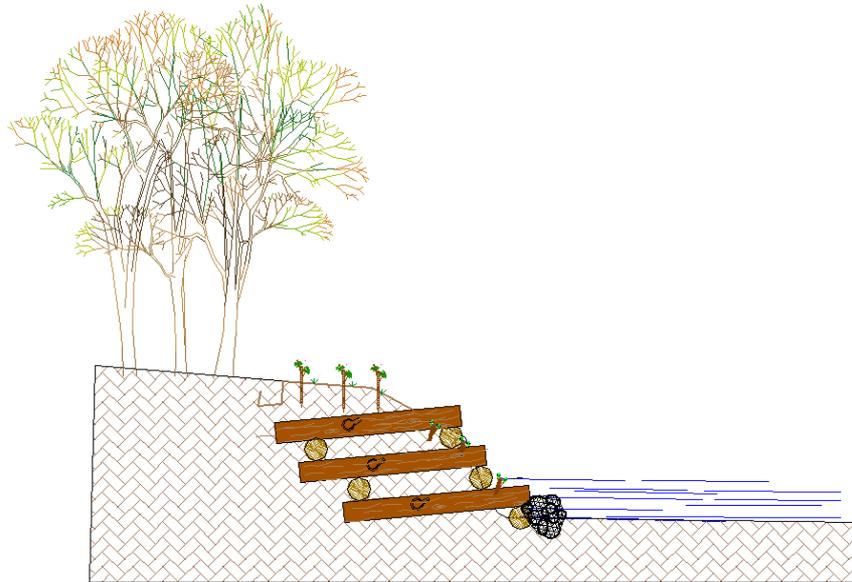


Figura 1. Croquis general de un muro Krainer

2. OBJETO

El objeto del presente documento es justificar el dimensionamiento del muro Krainer y la empalizada de troncos, en función de distintos criterios, hidráulico, geotécnico y estructural. En el caso de las consideraciones geotécnicas, se ha recurrido a bibliografía específica de muy diversos ámbitos, como de cimentaciones o carreteras [1, 2 y 3]. Sin embargo, esto ha permitido definir unas dimensiones mínimas de diseño para la mayoría de las casuísticas que se dan en el ámbito fluvial.



Figura 2. Muro krainer ejecutado

Estas recomendaciones tienen por objeto garantizar la estabilidad de las estructuras por un período de 5 años, periodo en el que se supone que el sistema radical de la vegetación implantada será capaz de estabilizar por sí solo el talud. En función del tipo de

infraestructura a proteger con la estabilización del talud, el coeficiente de seguridad deberá variar, en los presentes cálculos se ha considerado un coeficiente de seguridad de 1,5.

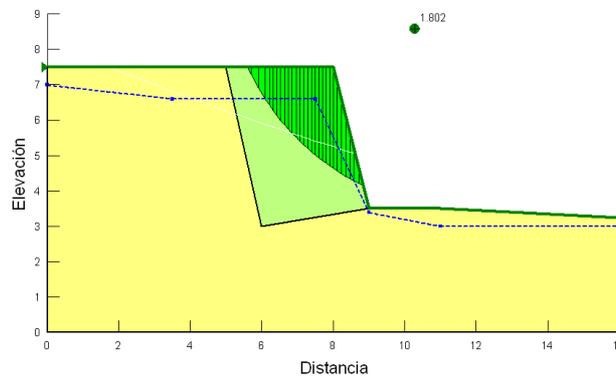


Figura 3. Muro krainer ejecutado

3. PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN MURO KRAINER

El muro Krainer tiene por cometido estabilizar y proteger el talud de las corrientes con mayores velocidades, conformando una estructura similar a un muro de tierra armada.

El proceso comenzará con el cajeadado, para después colocar la primera fila de troncos paralelamente al cauce de longitud variable entre 2 y 4 m. Posteriormente se dispondrán troncos perpendicularmente al río. La unión de estos troncos se realizará mediante machihembrado y con clavos o varillas metálicas.

Una vez construido un plano se rellenará con tierra vegetal y se colocarán estacas vivas sauce cuyos diámetros serán de 3-10 cm y con una longitud aproximada de 1,5-2 m y/o plantas enraizadas. Se realizarán planos sucesivos de igual manera posicionando los troncos paralelos a la ribera retranqueados respecto al plano inmediatamente inferior. El material aportado entre los diferentes planos deberá compactarse.



Figura 4. Operarios colocando troncos en un plano del muro Krainer.

Es conveniente, que los troncos necesarios para llevar a cabo esta técnica procedan de tratamientos selvícolas realizados en la zona de actuación o en su entorno, procurando

evitar aquellas especies exóticas invasoras por su peligro de rebrote. En la medida de lo posible se utilizarán troncos descortezados.

Los planos se colocarán con un ángulo en contrapendiente del 10-15%. En cuanto a la ejecución de los troncos perpendiculares a la corriente se aconseja que, para facilitar el empotramiento, estos se afilen y se hincuen en el talud.

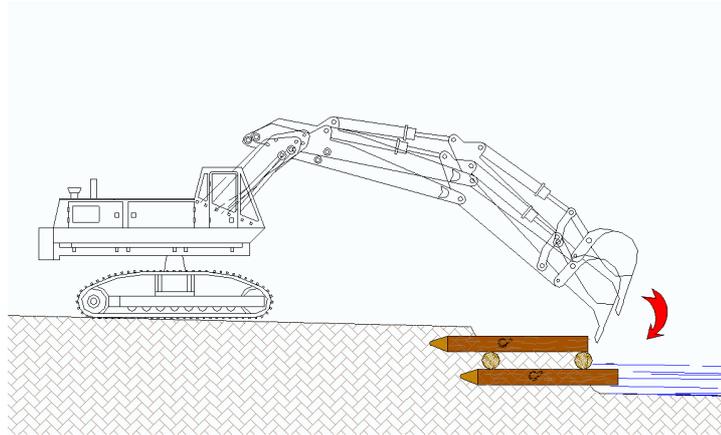


Figura 5. Croquis de cómo se deben empotrar los troncos perpendiculares al sentido de la corriente

4. CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO DE UN MURO KRAINER

En el dimensionamiento de este tipo estructuras se deben considerar diferentes puntos de vista, así como el funcionamiento global de la misma. El proyectista tendrá que definir dos parámetros, uno que definirá el nivel de seguridad que tendrá el proyecto a dimensionar, y otro será el periodo de retorno de diseño. Desde el punto de vista hidráulico, el periodo de retorno de la avenida de diseño será el parámetro básico para después obtener la velocidad y calado de la corriente con los que dimensionar la obra. El factor de seguridad será el parámetro que defina el porcentaje.

4.1. Criterios geotécnicos

En el dimensionamiento de estructuras que sirva para estabilización de taludes diferenciaremos entre:

- Análisis de estabilidad global. El conjunto formado por el cuerpo del muro Krainer y su cimiento puede verse inmerso en un fallo global sin que se produzcan antes otros fallos locales. Para la estabilidad global de la estructura se analizará la resistencia al deslizamiento y al vuelco de la estructura completa. Estos cálculos determinarán una altura y longitud mínima. A continuación se muestran en las tablas 1 y 2:

Altura del muro Krainer para que no deslice (m)		Ángulo de rozamiento interno (grados)					
		20º	25º	30º	35º	40º	45º
Altura de talud (m)	1,0	0,75	0,62	0,51	0,42	0,33	0,26
	1,5	1,13	0,93	0,77	0,62	0,50	0,39
	2,0	1,50	1,25	1,02	0,83	0,67	0,53
	2,5	1,88	1,56	1,28	1,04	0,83	0,66
	3,0	2,26	1,87	1,53	1,25	1,00	0,79
	3,5	2,63	2,18	1,79	1,45	1,17	0,92
	4,0	3,01	2,49	2,05	1,66	1,33	1,05
	4,5	3,38	2,80	2,30	1,87	1,50	1,18
	5,0	3,76	3,11	2,56	2,08	1,67	1,32

Tabla 1. Altura de muro Krainer para que no deslice en función de la altura del talud y el ángulo de rozamiento interno

Altura del muro Krainer para que no vuelque		Ángulo de rozamiento interno (grados)					
		20º	25º	30º	35º	40º	45º
Altura del muro Krainer para que no deslice (m)	1,0	0,15	0,10	0,07	0,04	0,03	0,02
	1,5	0,22	0,15	0,10	0,07	0,04	0,03
	2,0	0,29	0,20	0,13	0,09	0,06	0,04
	2,5	0,36	0,25	0,17	0,11	0,07	0,04
	3,0	0,44	0,30	0,20	0,13	0,09	0,05
	3,5	0,51	0,35	0,23	0,16	0,10	0,06
	4,0	0,58	0,40	0,27	0,18	0,11	0,07
	4,5	0,65	0,45	0,30	0,20	0,13	0,08
	5,0	0,73	0,50	0,34	0,22	0,14	0,09

Tabla 2. Altura de muro Krainer para que no vuelque en función de la altura del talud y el ángulo de rozamiento interno

En los resultados anteriores se contempla el deslizamiento en una superficie plana, sin embargo el deslizamiento más probable de suelo se produce a través de un superficie de

curvatura variable, que se ha asimilado al arco de una circunferencia. Para contemplar este tipo de deslizamiento se ha utilizado el método de Morgenstern-Price que es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite. Este análisis no solo se ha tenido en cuenta el deslizamiento de la estructura como un bloque sino la fractura de la misma, por esto los datos están englobados en el siguiente apartado (análisis de estabilidad local).

- Análisis de estabilidad local. Se entiende como modo de fallo de estabilidad local de un muro Krainer, a aquel en el que la superficie de rotura corta a dicho muro, dejando una parte del muro por encima de la superficie de fallo y otra por debajo.

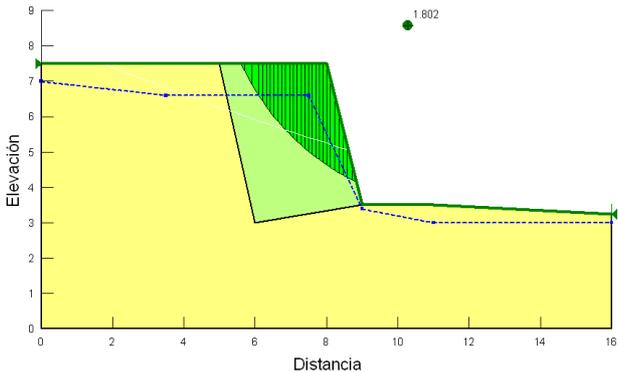


Figura 6. Croquis en el que se visualiza la superficie de rotura por fallo de estabilidad local

Debido a que es difícil reproducir el comportamiento real del muro mediante un modelo matemático de cálculo, se ha optado por considerar dos criterios de cálculo, uno en el que el muro Krainer se considera como un material homogéneo, con unas determinadas características (modelo usado en el cálculo de escolleras); y otro en el que se considera el efecto que tienen las pilas de madera empotradas tal y como si fueran pilotes. Dado que de los criterios expuestos, ninguno se adapta fielmente a la realidad, en cada caso simulado se ha escogido el resultado que queda más del lado de la seguridad.

Longitud de troncos Hz. $F_s > 1.5$						
Altura del talud (m)	Ángulo de rozamiento interno (grados)					
	20°	25°	30°	35°	40°	45°
1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,5	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00
2,0	2,00	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00
2,5	2,00	2,00	1,50	1,50	1,00	1,00
3,0	3,00	3,00	2,50	2,00	1,00	1,00

Longitud de troncos Hz. $F_s > 1.5$						
Altura del talud (m)	Ángulo de rozamiento interno (grados)					
	20°	25°	30°	35°	40°	45°
3,5	3,50	3,00	2,50	2,00	1,00	1,00
4,0	3,50	3,00	2,50	2,00	1,50	1,50
4,5	3,50	3,00	2,50	2,00	2,00	2,00
5,0	3,50	3,00	2,50	2,50	2,50	2,00

Tabla 3. Longitud de troncos del muro Krainer en función de la altura del talud y el ángulo de rozamiento interno

En cuanto a la cimentación, es importante tener en cuenta no solo las cargas sobre el talud sino también la capacidad portante del suelo. El suelo en un cauce puede ser muy cambiante y no se deben extrapolar las condiciones de suelos de un tramo a otro de río, la solución en suelos de peor calidad pasa por hacer una cimentación más profunda. Para calcular la tensión admisible soportada por el suelo se ha empleado la formulación de Terzaghi, considerando un suelo no drenado. En los resultados mostrados en la tabla anterior se ha comprobado que la tensión transmitida al suelo es menor que la carga admisible por el mismo, para unas condiciones genéricas, no obstante se debería comprobar para cada caso.

4.2. Criterios hidráulicos

La principal variable de diseño considerada en este sentido, ha sido la velocidad, dado que de esta depende la tensión tractora. Por tanto para determinar si el agua es capaz de erosionar la estructura como socavar los cimientos o coronación de esta, se tendrá en cuenta la velocidad

El calado no se ha considerado tan importante, ya que es asumible que la estructura permanezca inundada ocasionalmente, sin embargo será el parámetro que defina la posición del muro Krainer respecto al río, ya que aunque la estructura requiere colocarse cerca del agua (para que tenga humedad), pero tampoco debe estar continuamente inundada. Por estos motivos la estructura empezará en el cambio de pendiente, si lo hay, o más allá del canal de agua bajas.

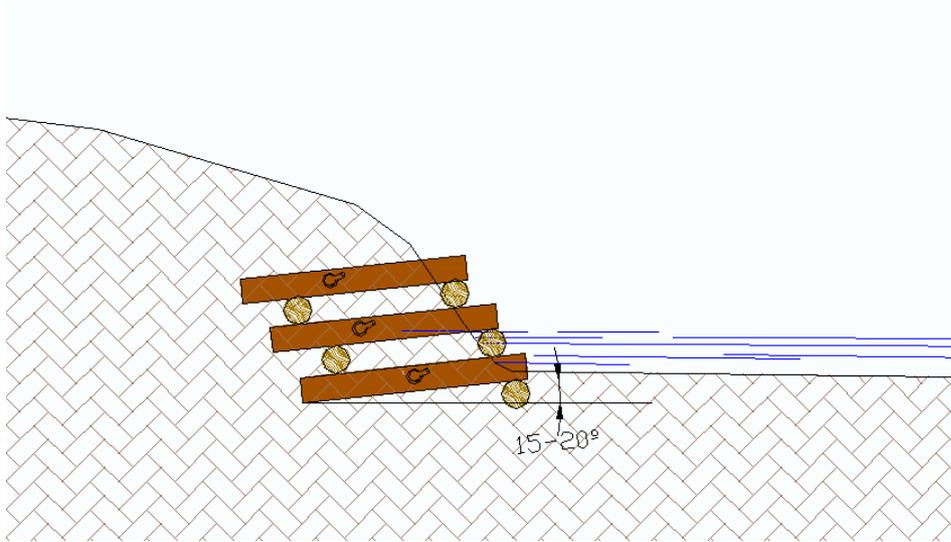


Figura 7. Croquis de disposición del muro Krainer

La velocidad de diseño de la corriente de agua determinará en primer lugar en que medida ese talud es adecuado para instalar una estructura de este tipo. La velocidad para este tipo técnicas es de 3,5-4 m/s. Las mayores velocidades y mayores tensiones en la estructura se presentarán en el cambio de pendiente del talud, en su parte inferior.

En muchas ocasiones se encuentran problemas por el contacto de estas estructuras rígidas con un medio flexible como el lecho de un río, el lecho se erosiona de una forma más incisiva en este punto. A este fenómeno se le denomina erosión transitoria. Para evitar problemas la estructura debe empotrarse por debajo de esta medida. Para la estimación de ésta se ha recurrido a la formulación empírica desarrollada por Liu et al (1961) para el dimensionamiento de esta magnitud en estribos de puentes. Se trata de una formulación empírica usada en el diseño de carreteras.

Máxima erosión transitoria (m)		Velocidad (m/s)		
		1	2	3
Calado (m)	1,0	0,437	0,589	0,701
	2,0	0,753	1,015	1,208
	3,0	1,035	1,140	1,250

Tabla 4. Máxima erosión transitoria en función del calado y la velocidad de la corriente

Por otro lado la velocidad de la corriente determinará la viabilidad de esta estructura ya que no resiste velocidades mayores de 4,5m/s. En el proyecto de I+D+i de optimización de técnicas de bioingeniería se han probado esta estructuras hasta dichas velocidades con resultados satisfactorios.

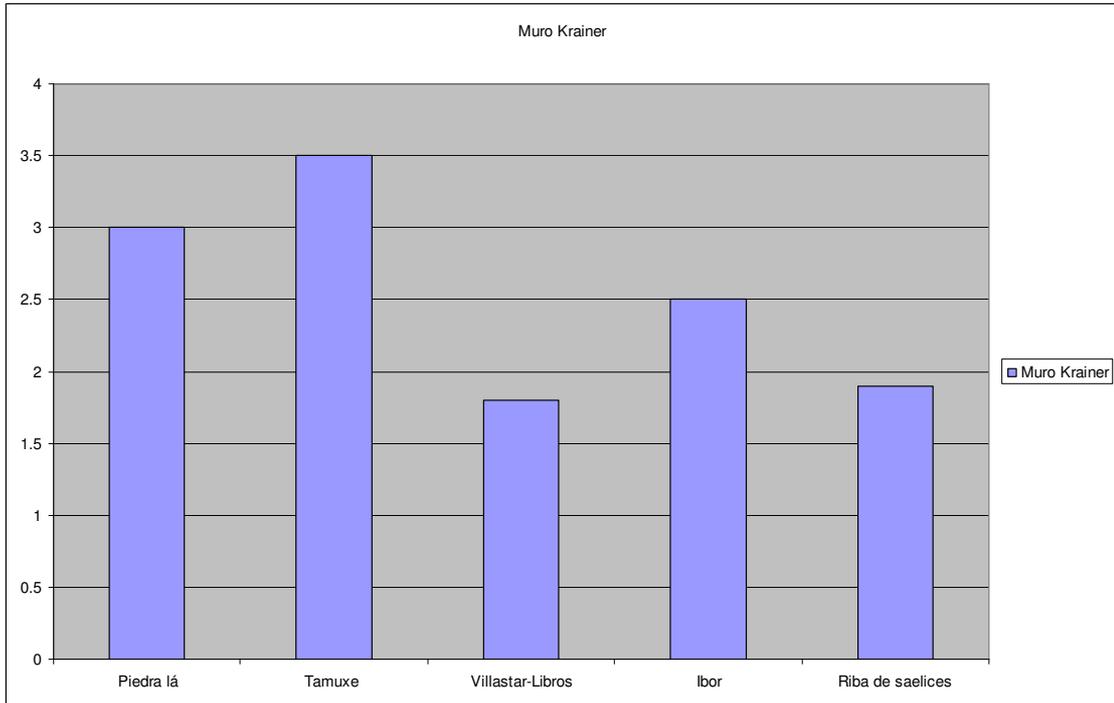


Figura 7. Velocidades soportadas por los muros Krainer de diferentes actuaciones del proyecto de I+D+i

4.3. Criterios estructurales

Desde el punto de vista estructural, solo se ha analizado el punto más desfavorable, donde se han analizado las tensiones transmitidas a los troncos (en la base de la estructura), en estos se ha supuesto una resistencia a flexión, al corte y a compresión media y se ha calculado el diámetro mínimo del tronco para resistir soportar dichas condiciones. Las cargas soportadas por la estructura también dependerán de las características del suelo, ya que el empuje al que se pueda ver sometido la estructura también lo está. En estas condiciones se presentan a continuación los diámetros mínimos que deben tener los troncos del muro.

Diámetro de troncos (cm)	Ángulo de rozamiento interno (grados)				
	20º-25º	25º-30º	30º-35º	35º-40º	40º-45º
Altura del talud (m)					
1,0 a 1,5	13	13	12	11	10
1,5 a 2,0	16	15	14	13	12
2,0 a 2,5	19	18	17	16	14
2,5 a 3,0	21	21	19	18	17

Tabla 5. Diámetro de troncos del muro Krainer en función de la altura del talud y el ángulo de rozamiento interno

5. PROCESO CONSTRUCTIVO DE UNA EMPALIZADA DE TRONCOS

Primero se insertan troncos verticalmente con una separación aproximada de 0,8-1,0 m. Estos se hincan o empotran en el terreno por debajo del círculo de deslizamiento del talud de manera que ancle el talud de manera global.

Longitud de empotramiento (m)	Ángulo de rozamiento interno (grados)				
Altura de talud (m)	20º-25	25º-30º	30º-35º	35º-40º	40º-45º
1 a 1,5	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
1,5 a 2	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7
2 a 2,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8
2,5 a 3	1,5	1,2	1,1	1,0	0,9

Tabla 6. Longitud de empotramiento frente a los empujes activos del terreno

Detrás de los postes verticales se irán colocando troncos longitudinalmente sujetándose mediante cuerdas. Cada 50-70 cm de altura se colocarán postes transversales al río que ayudarán a reforzar el entramado vivo.

La longitud de los troncos estará comprendida entre 2 y 4 m según su disposición.

Al final de la ejecución del entramado se rellenará el trasdós con tierra vegetal y se compactará para facilitar su enraizamiento.



Figuras 7 y 8. Colocación de postes verticales (izqda.) y colocación de postes longitudinales y transversales (dcha.)

6. CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA EMPALIZADA DE TRONCOS

Es conveniente, que los troncos necesarios para llevar a cabo esta técnica procedan de tratamientos selvícolas realizados en la zona de actuación o en su entorno. Las experiencias con *Salix alba* han sido muy satisfactorias pero se tendrán en cuenta las especies de ribera propias de la zona de actuación.

El diámetro de los troncos vendrá definido por el momento flector que puede generar el empuje del terreno en la sección más desfavorable, siendo superior a 8 cm. Todas estas medidas son aproximadas y se podrán ajustar a las condiciones del terreno mediante las

siguientes tablas en las que se ha utilizado la fórmula de Rankine (en función de la altura del talud y ángulo de rozamiento del suelo):

Diámetro de los postes verticales (cm)	Ángulo de rozamiento interno (grados)				
	20°-25°	25°-30°	30°-35°	35°-40°	40°-45°
Altura del talud (m)					
1,0 a 1,5	13	13	12	11	10
1,5 a 2,0	16	15	14	13	12
2,0 a 2,5	19	18	17	16	14
2,5 a 3,0	22	21	19	18	17

Tabla 7. Diámetro de los postes verticales en función de la altura del talud y el ángulo de rozamiento interno

Diámetro de los postes horizontales (cm)	Ángulo de rozamiento interno (grados)				
	20°-25°	25°-30°	30°-35°	35°-40°	40°-45°
Altura del talud (m)					
1,0 a 1,5	6	6	6	6	5
1,5 a 2,0	7	7	7	6	6
2,0 a 2,5	8	8	7	7	6
2,5 a 3,0	9	8	8	7	7

Tabla 8. Diámetro de los postes horizontales en función de la altura del talud y el ángulo de rozamiento interno



Figuras 9 y 10. Empalizada de troncos recién ejecutado (izqda.) y después de un año (dcha.)

7. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Fomento. *Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera*, (2006).
- [2] Ministerio de Fomento. *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, (2006).
- [3] Muelas, A. *Manual de mecánica del suelo y cimentaciones*.