

DRENAJES ATRAVESANDO LOS MONEGROS

OBRA: SISTEMA DE RIEGOS DEL ALTO ARAGÓN. CANALES DE MONEGROS (TRAMO V) Y SASTAGO (TRAMO I): COLECTORES

OSWALDO ZAERA BOROBA. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Jefe del Servicio de Obras 2 de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Director de Proyecto y Obra.
ANTONIO ANADÓN ORIOL. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Delegado de Construcciones Sobrino, S.A. Jefe de Obra de la U.T.E. Contratista
JESÚS POLO SORIANO. Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Administrador Único de A.T.I.C.A., S.L. Asesor Técnico del Contratista

RESUMEN: En las transformaciones de secano a regadío es imprescindible incluir en las infraestructuras sistemas de drenaje mediante colectores que recogen las aguas provenientes de las escorrentías y de los sobrantes de los riegos. Los colectores de la obra epigrafiada corresponden al Plan Coordinado de Obras de la 1ª parte de Monegros II. Debido a que discurren por suelos muy susceptibles de sufrir erosión y asientos por colapso, ha sido necesario disponer unos revestimientos de tipo flexible (escollera) que se adapten a estas difíciles condiciones. En particular, en los últimos tramos del colector principal (nº 1) ha habido que conjugar esta premisa de flexibilidad con el condicionante de tener un coeficiente de fricción mucho más bajo que las soluciones tradicionales. Se ha resuelto mediante placas prefabricadas de hormigón colocadas a tope. En el presente artículo se detallan los resultados obtenidos en el diseño de las protecciones utilizando métodos de cálculo tradicionales, y se describe el método desarrollado, a partir de uno de los anteriores, para el dimensionamiento de las placas.

PALABRAS CLAVE: COLECTORES, DRENAJE, PROTECCIONES, PLACAS

ABSTRACT: In the transformation of dry lands to irrigated ones is essential to include draining systems, as main drains, that will collect the water coming from the runoff and the remainder of the irrigations. The main drains of the referred project correspond to the 1st part of Monegros II of the Projects Coordinated Plan go through very erodible and collapsing soils. This has forced to cover them with a flexible protection (rock rip-rap) capable to cope with this difficult conditions. Particularly, in the lining of the final part of one of the collectors it has been necessary to conjugate the need for flexibility with a friction coefficient much lower than that of the rip-rap. This problem has been solved with a lining of precast concrete plates of square section and small thickness. In the present article, the sizes of the rip-rap protections, obtained using the classical methods, are detailed, and the method developed to determine the size of the plates is described.

KEYWORDS: COLLECTORS, DRAINAGE, PROTECTIONS, PLATES

INTRODUCCIÓN

En obras de transformación de zonas de secano a regadío es importante incluir una buena red de desagües que sirvan para dar salida a los sobrantes del agua de riego e infiltración, así como para evacuar las aguas procedentes de las escorrentías de las aguas de lluvia.

La obra mencionada anteriormente fue adjudicada el 30 de mayo de 1992 a la U.T.E. formada por las empresas As-

faltos y Construcciones Elsan, S.A., Construcciones Adolfo Sobrino S.A. y Fernández Constructor, S.A. y fue terminada el 30 de junio de 1998. El coste final de misma fue de 3.196.017.937,- pts.

Los cuatro colectores que componen el proyecto discurren por el centro de valles, y recogen las aguas de los barrancos laterales que llegan a los mismos, así como las de infiltración provenientes de los riegos existentes en ambas márgenes.

Figura 1.
Planta general
de los
colectores.



Anteriormente, el agua de escorrentía desaguaba por el centro de los barrancos excavados en la cota más baja de dichos valles. El trazado de los colectores coincide básicamente con los antiguos barrancos, pero se han hecho las modificaciones convenientes para adaptarlos a una sucesión de curvas y rectas, así como para minimizar las afecciones.

DESCRIPCIÓN DE LOS COLECTORES

El sistema de desagüe consiste en cuatro colectores numerados del 1 al 4.

En los colectores nº 1 y 4, que son los más largos, se consideraron varios tramos con diferentes caudales de cálculo para tener en cuenta el incremento que se produce en los mismos a medida que aumenta el área de aportación.

El colector nº 1 comienza en el val de Peseguera y termina en el arroyo Valcuerna, y tiene una longitud de 23.900 m. Tiene cinco tramos, considerando para su diseño caudales que varían entre 54 m³/seg para el primero y de 83 m³/seg para el quinto.

El colector nº 2 sigue los cauces del val de Maijo, val de Ladrones y barranco de Valdenoches, tiene una longitud de 7.765 m y se consideró un caudal de cálculo de 22 m³/seg.

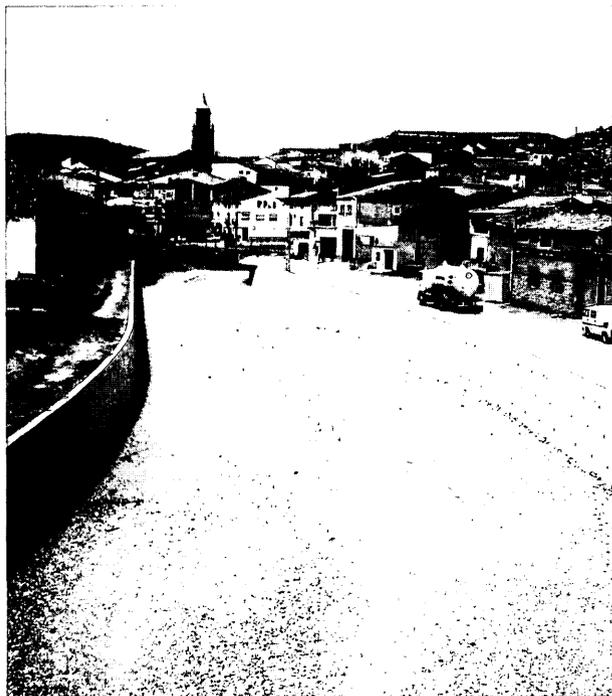


Figura 2. Colector nº 1 a su paso por Peñalba.

El colector nº 3 desciende siguiendo los cauces del val de Rafeta y del val de la Almolda, tiene una longitud de 12.610 m y se consideraron cuatro tramos. Los caudales de cálculo considerados variaron de 8 m³/seg para el primer tramo y de 48 m³/seg para el cuarto tramo.

Finalmente, el colector nº 4 reproduce los cauces del val Grande, val de Farcollo y del barranco de Valresema, tiene una longitud de 22.285 m y se distinguieron dos tramos, el segundo de los cuales va en trinchera. El caudal considerado, igual para los dos tramos, fue de 33 m³/seg.

Los caudales indicados anteriormente son los que se consideraron en zonas rurales, y corresponden al máximo entre el caudal de avenida de período de retorno de 25 años y el caudal de máximo vertido desde los canales del sistema. En zonas urbanas y en cruces con carreteras, se consideró el máximo entre el caudal de avenida de período de retorno de 100 años y el resultante de la suma del caudal de avenida de período de retorno de 25 años con el caudal de máximo vertido desde los canales del sistema.

Como se ha mencionado anteriormente, el trazado de los colectores sigue aproximadamente el de los barrancos antiguos, pero hubo que hacer modificaciones para minimizar los problemas de ocupación de los terrenos, adaptándose a los planes de concentración ya existentes; este problema fue especialmente agudo en el caso de los tres últimos tramos del colector nº 1.

La sección adoptada en proyecto es trapezoidal, con taludes 2H:1V en los cajeros y con ancho de solera variable en función de los caudales y pendientes. Constituye excepción el colector nº 1 a su paso por Peñalba, que va encauzado en una

sección rectangular con muros de hormigón armado (fig. 2), y el último tramo del colector nº 3 que tiene sección rectangular, ejecutada en su totalidad en hormigón armado.

El perfil longitudinal de los colectores se compone de tramos de pendiente constante, de pequeño valor e inferior a la del cauce natural, separados por escalones o "saltos" que eliminan la altura ganada en los tramos uniformes, como consecuencia de la diferencia de pendientes.

La altura de los saltos es variable dependiendo de la pendiente y longitud de cada tramo uniforme de los colectores; se proyectaron saltos de 1, 2, 3 y 4 m.

En los saltos se distinguen tres zonas bien diferenciadas:

- *Zona de contracción:* Situada inmediatamente antes de la entrada en la rápida. Tiene un estrechamiento de sección con el fin de aumentar el calado respecto al que se tendría de seguir con la misma sección del colector; de esta forma se consigue disminuir la velocidad del agua en la zona de aproximación del salto, y con ello sus efectos erosivos. Esta zona constituye la sección de control del tramo uniforme situado aguas arriba.
- *Zona de rápida:* Es el tramo de pendiente más elevada y tiene la misión de perder la altura que ha sido acumulada en el tramo uniforme anterior del colector al tener una pendiente menor que la del cauce natural.
- *Zona de amortiguación:* Es la zona que sigue a continuación de la rápida y su misión es eliminar el exceso de



Figura 3. Vista de un tramo "tipo" de colector.



Figura 4. Vista de incorporación por el lado del camino.

energía potencial mediante un resalto y tranquilizar el régimen a la entrada del tramo uniforme siguiente.

Los saltos permiten tener velocidades inferiores en los tramos uniformes, y concentrar en ellos la pérdida de la energía potencial acumulada respecto al cauce natural preexistente.

La separación entre escalones depende de las pendientes existentes en los cauces naturales de los diferentes tramos; se situaron buscando optimizar el movimiento de tierras y que la distancia entre ellos fuera lo mayor posible.

Para proteger los materiales existentes en el cauce de los colectores se dispuso una protección mediante escollera, sobre un fieltro anticontaminante de fibra poliéster; este último con el fin de evitar la salida de finos hacia el colector y la consiguiente erosión del cauce por pérdida de material.

La escollera se obtenía de los estratos margo-calizos del Mioceno existentes en la zona. Estas calizas se encuentran estratificadas horizontalmente con espesores variables entre 0,3 y 0,5 m.

Los bloques que se obtenían de estos estratos sólo podían ser de forma más o menos cúbica hasta dimensiones en planta iguales al espesor, pasando a ser de tipo lajoso para dimensiones mayores.

En los barrancos laterales que desaguan a los colectores se han acondicionado sus incorporaciones con el fin de que la entrada de agua perturbe lo menos posible el flujo de los mismos, a la vez que se evite que se produzcan erosiones en sus márgenes.

Cuando las incorporaciones son por el lado del camino de servicio, la entrada se efectúa a través de tubos metálicos que atraviesan el terraplén del camino; cuando es por el lado de la banqueta, se ha dispuesto un pequeño badén para que puedan pasar los vehículos (cuando no hay flujo de agua).

Inmediatamente aguas arriba de las incorporaciones se han situado unos cuencos tranquilizadores revestidos de escollera concertada.

PROBLEMÁTICA DE LOS REVESTIMIENTOS

En algunos de los tramos de los colectores fue necesario ajustar la anchura de la sección tipo a la franja de terreno disponible.

Por ello, se consideró necesario aumentar las pendientes de los colectores con el fin disminuir la sección mojada al incrementar la velocidad del agua; la disminución de sección mojada acarrea la reducción de la anchura de ocupación, como era el objetivo.

Las velocidades consideradas inicialmente en los tramos uniformes eran inferiores a 2,25 m/s para caudales superiores a 50 m³/s, e inferiores a 1,25 m/s para caudales inferiores a dicho valor. Como resultado de aumentar las pendientes estas velocidades pasaron a ser de 2,48 y 2,33 m/s, respectivamente, que siguen siendo aceptables para este tipo de revestimiento.

Las velocidades y los calados se calcularon con la conocida fórmula de Manning; como coeficiente de rugosidad de la escollera de protección se consideró un valor igual a 0,038.

Al aumentar las pendientes, la eliminación de energía mediante los saltos se reducía consiguientemente; ello permitía disponer un menor número de ellos lo cual pareció muy conveniente dado que éstos constituyen los puntos más débiles del diseño. La reducción del número de saltos fue mayor que la que resultaba de los incrementos de pendiente, ya que en algunos de los saltos fue necesario además aumentar la altura de los mismos.

Figura 5. Salto hidráulico visto desde aguas abajo.

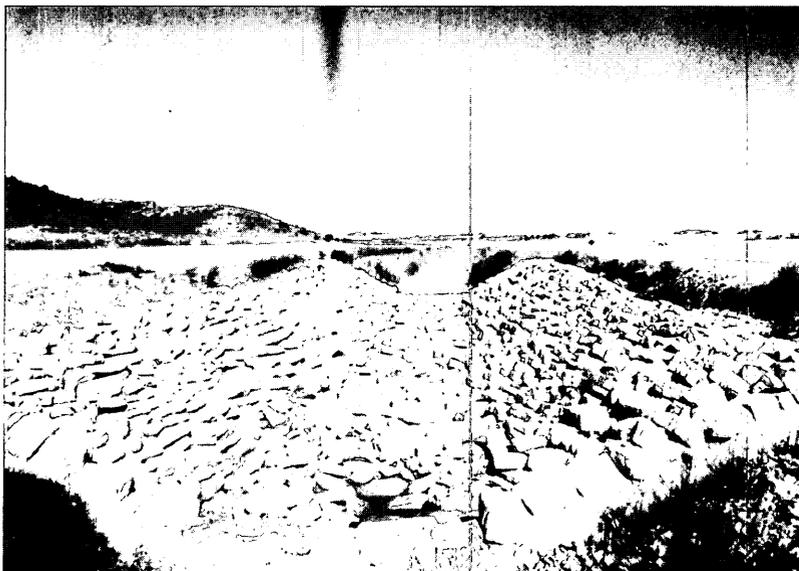


TABLA 1. TAMAÑOS DE LA PROTECCIÓN CON ESCOLLERA EN LOS TRAMOS UNIFORMES

Colector nº	Tramo nº	Caudal (m³/s)	Pendiente (t.p.u.)	R _h (m)	Velocidad (m/s)	d ₅₀ (m)	
						Solera	cajeros
1	I	54	0,00500	1,41	2,41	0,14	0,26
	II	59	0,00508	1,52	2,48	0,15	0,27
2	I	22	0,00400	1,11	1,79	0,09	0,16
3	I	8	0,00649	0,69	1,66	0,09	0,16
	II	13	0,00467	0,89	1,66	0,08	0,15
	III	25	0,00512	1,09	2,00	0,11	0,20
	IV	48	0,00488	1,43	2,33	0,13	0,25
4	I	33	0,00198	1,45	1,50	0,08	0,14

Conjugando las nuevas pendientes con la ubicación y altura de los saltos se diseñó el nuevo perfil longitudinal buscando optimizar el movimiento de tierras.

Con el fin de confinar el resalto a la zona de amortiguación de los saltos, se dispusieron al final de la misma unos escalones de pequeña altura, transversales al cauce, tanto en la solera como en los cajeros (fig. 5).

La protección de los saltos se diseñó inicialmente mediante escollera, pero con posterioridad se estimó muy conveniente reforzarla en la zona de contracción y en el escalón final. La necesidad de reforzar estos elementos se reveló al estudiar los daños que se produjeron en algunos de los saltos durante la avenida que ocurrió el 31 de agosto de 1994.

El refuerzo consistió en rejuntar los bloques de escollera con hormigón a modo de una escollera concertada "pobre" (figs. 3 y 5). El hormigón se vertía entre la escollera, pero sin llegar hasta la parte superior con el fin de que ésta mantuviera su rugosidad.

Además, y con el fin de compensar la falta de formas cúbicas, se determinó colocar —en lo posible— los bloques de escollera piedra a piedra, de forma escalonada y apoyados unos sobre otros (fig. 5). De esta forma se conseguía una cierta trabazón de la que carecerían si se hubieran colocado por simple vertido.

El aumento de pendiente de los tramos uniformes obligó a recalcular los tamaños y espesores de las protecciones de escollera para obtener un coeficiente de seguridad adecuado.

Protecciones con escollera

Para el dimensionamiento de los tamaños de las protecciones de escollera, tanto en los saltos como en los tramos uniformes, se utilizó inicialmente el método de David Stephenson (1979). Como en los tramos uniformes se obtuvieron tamaños muy pequeños en general, pareció conveniente utilizar otro método más conservador como es el de Simons (1976). En los saltos se consideraron los resultados del primer método que proporcionaba tamaños bastante razonables.

El método de *Simons* considera los efectos de la fuerza tractiva que se desarrolla sobre los elementos de la protección al fluir el agua sobre ellos.

Este método establece el equilibrio de momentos de las fuerzas de peso "sumergido", de suspensión y de arrastre que actúan sobre una partícula que gira respecto de un punto de otra partícula en contacto con la anterior; para ello considera unos brazos o distancias de aplicación de las fuerzas respecto a dicho punto basándose en resultados experimentales y en las siguientes hipótesis:

- La relación de los brazos de las componentes del peso, según la normal al plano donde se encuentra la partícula y según la recta del movimiento de la misma, es independiente de la dirección de ésta dentro del plano.
- Los momentos de las componentes normales a la recta del movimiento de la partícula de las fuerzas de suspensión y de peso, según el plano del talud, se equilibran. Ello equivale a decir que el movimiento sucede en un plano que contiene a la recta del movimiento y que es perpendicular al talud.
- Los momentos de las fuerzas de suspensión y arrastre son iguales en el momento de iniciarse el movimiento.

Una protección pétreo viene caracterizada por el tamaño (o diámetro) representativo de sus partículas, siendo usual tomar éste igual al "d₅₀" de su granulometría, es decir el diámetro por el que pasa un 50% de la muestra.

El coeficiente de seguridad se obtiene como cociente de los momentos desestabilizadores y de los momentos resistentes.

En los colectores se utilizó un proceso iterativo, en el que se buscaba la dimensión representativa d₅₀ que proporcionase un coeficiente de seguridad adecuado (1,5 en tramos uniformes).

En los cálculos se consideró para la escollera una densidad igual a 2,65 t/m³ y un ángulo al reposo "φ" igual a 50°.

Los resultados se indican en la tabla 1.

TABLA 2. TAMAÑOS DE LA PROTECCIÓN CON ESCOLLERA EN LOS SALTOS

Colector nº	Tramo nº	Altura (m)	R _h (m)	Pendiente (t.p.u.)		d ₅₀	
				energía	solera	solera	Cajeros
1	I	1	0.89	0.069	0.118	0.64	0.78
		2	0.83	0.070	0.118	0.61	0.74
		3	0.81	0.078	0.118	0.66	0.80
		4	0.80	0.085	0.118	0.70	0.86
	II	1	0.93	0.070	0.101	0.66	0.82
		2	0.87	0.073	0.101	0.65	0.80
	III	2	0.97	0.052	0.100	0.51	0.63
	IV	2	0.98	0.053	0.100	0.53	0.66
2	Unico	2	0.58	0.088	0.143	0.55	0.66
		4	0.56	0.108	0.143	0.65	0.78
3	I	1.5	0.39	0.101	0.152	0.42	0.51
	II	1.5	0.48	0.095	0.152	0.49	0.59
	III	1.5	0.60	0.079	0.125	0.50	0.61
	IV	1.5	0.82	0.070	0.125	0.60	0.74
4	Unico	1	0.69	0.094	0.100	0.65	0.81
		1.5	0.65	0.096	0.120	0.65	0.80
		2	0.64	0.097	0.120	0.64	0.79
		4.5	0.58	0.131	0.160	0.83	0.99

Dado que algunos de los tamaños resultaron muy pequeños en los cálculos, incluso con este método, se consideró que a nivel constructivo no se debía bajar de 0,12 m, por lo que todos los d₅₀ inferiores se incrementaron hasta este valor.

Para cada valor d₅₀ se definió la curva granulométrica que tenía que cumplir la escollera de protección:

Tamaño	% que pasa
1,66 x d ₅₀	100
1,00 x d ₅₀	50
0,50 x d ₅₀	20
0,20 x d ₅₀	< 3

Los espesores se definieron igual a 1,66 x d₅₀, que coincide con el tamaño máximo de la curva granulométrica.

El método de *Stephenson* analiza la estabilidad del material pétreo dispuesto en una capa continua sobre una superficie, con cierta trabazón entre las diferentes piedras, y sometido a las fuerzas gravitatorias, de rozamiento y de arrastre del agua.

En este método se determina el diámetro o dimensión representativa del material "d₅₀", Como variables representativas de la escollera están el peso específico (γ_s) la porosidad (n) y el ángulo de rozamiento (ϕ). De estos parámetros se tomaron los siguientes valores:

$$\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3 \quad n = 0,4 \quad \phi = 50^\circ$$

En este caso, se consideró una mayoración del volumen efectivo (representado por el d₅₀) de 1,25, estimando que, por el especial método de colocación, supondría un coeficiente de seguridad superior a 1,5.

Las variables que intervienen en los cálculos son la geometría del salto, el radio hidráulico, la pendiente de la solera y la pendiente de la línea de energía, habiendo elegido dentro del salto el punto con condiciones más desfavorables.

En la tabla 2 que sigue pueden verse los tamaños característicos d₅₀ en cada uno de los tipos de saltos dentro de los cuatro colectores.

Protecciones con placas

En el colector nº 1, a partir de la localidad de Peñalba, (tramos III, IV y V) no era factible disponer de la banda necesaria para mantener la tipología de la sección transversal utilizada en el resto de los colectores.

Ello era debido a que en ambas márgenes se habían desarrollado una serie de regadíos que se pretendía respetar.

Se planteaba la problemática de encajar un perfil longitudinal y un revestimiento que fuera capaz de conducir el caudal resultante en dicho tramo con unas limitaciones muy fuertes en la anchura de la sección.

El perfil longitudinal quedaba condicionado como siempre por el perfil existente en el cauce actual y por la necesidad de optimizar el movimiento de tierras.



Figura 6. Detalle de un tramo de colector revestido con placas. Abajo, figura 7. Vista de un colector revestido con placas en los tramos de pendiente uniforme y con escollera en los saltos.

El revestimiento debía tener menor coeficiente de rugosidad que el de la escollera para conseguir una mayor capacidad hidráulica y de esta manera necesitar menor sección, pero a la vez tenía que seguir siendo flexible para adaptarse a los previsible movimientos de los suelos sobre los que apoyaría, dadas las características de deformabilidad y erosionabilidad de los limos yesíferos por los que discurre el cauce.

Se partió de la idea de que el revestimiento tenía que ser de bloques que pudieran adaptarse a los asientos y movimientos que pudieran producirse, pero que a la vez no presentarían mucha rugosidad al agua.

La escollera podría cumplir esas premisas pero era necesario colocarla de tal manera que no presentará salientes que producen mucha rugosidad. Esto implicaba un esfuerzo en la selección y colocación de los bloques que resultaba claramente antieconómico.

El conseguir una cierta facilidad en la ejecución llevó a la idea final. Los bloques tenían que tener una geometría regular para facilitar la colocación, ser de un tamaño lo más grande posible para disminuir su número, con suficiente peso para no ser arrastrados por el agua y limitadas sus dimensiones en planta por la necesidad de adaptarse a los movimientos. Estas premisas llevaban directamente a unas placas de hormigón prefabricadas, colocadas a tope sin ningún tipo de mortero de unión.

En la superficie de contacto con el agua las placas van ranuradas transversalmente a la dirección del flujo con el fin de proporcionar un coeficiente de rugosidad más elevado (0,027) que el correspondiente a una superficie lisa, ya que en este último caso las velocidades hubieran sido excesivas en obra nueva (antes del crecimiento de vegetación). Además se dispusieron dos entalladuras a cada lado de las placas para facilitar su colocación y para dar salida al agua procedente de los suelos (fig. 6).

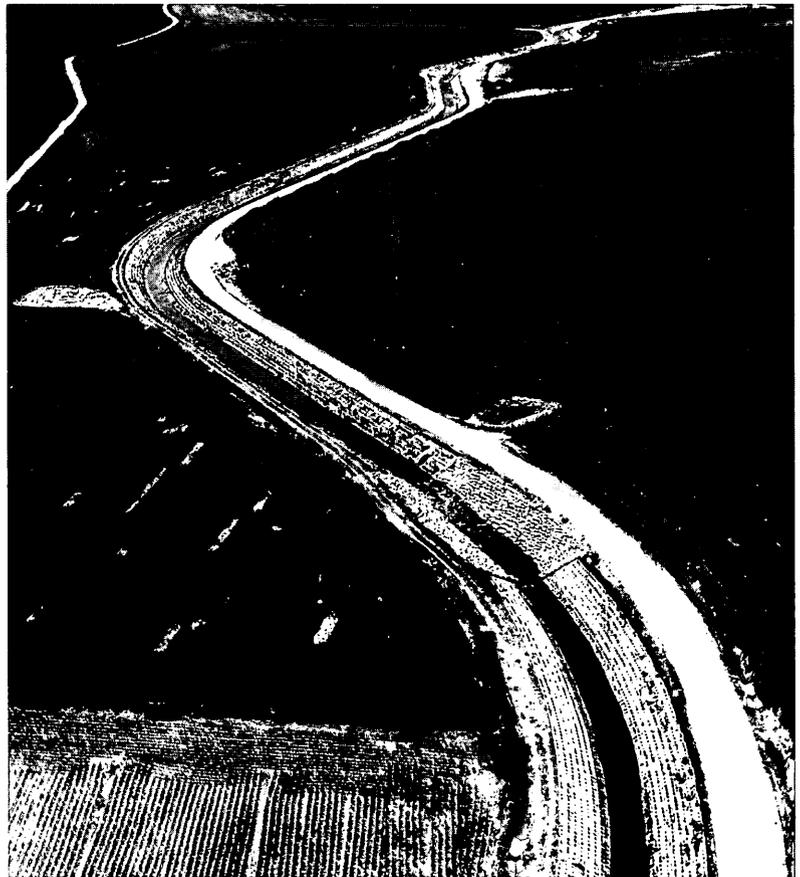
Finalmente la sección elegida fue de placas cuadradas de 80 cm de lado y 14 cm de espesor. Las dimensiones en planta permitían adaptarse a cualquier hundimiento "razonable" de las paredes del cauce sin perder el contacto con el suelo, y el espesor proporcionaba una trabazón entre placas adyacentes al igual que sucede con los bloques de escollera.

En los saltos de estos tres tramos se mantuvo la protección mediante escollera de la misma forma que en el resto de los colectores, dado que en los saltos no es necesario aumentar velocidades sino todo lo contrario.

La estabilidad de las placas se estudio, de forma aproximada, basándose en el método de Simons (1976). Se consideró la placa de forma que estuviera sometida a la fuerza del agua frontalmente por haber desaparecido las placas inmediatamente situadas aguas arriba.

En esta situación la placa se encuentra sometida a la fuerza de suspensión que tiende a levantarla y las fuerzas del peso –sumergido– y de arrastre que tienden a mantenerla en su sitio.

El coeficiente de seguridad viene dado por la relación entre la suma de los momentos de las fuerzas estabilizadoras –peso y arrastre– y el momento de la fuerza de suspensión respecto al punto de rotación, que es la arista superior



de contacto con la placa adyacente situada aguas abajo. Teniendo en cuenta los brazos con los que actúan dichas fuerzas la expresión es la siguiente:

$$C_{\text{seg.}} = \frac{F_W \times e_W + F_D \times e_D}{F_L \times e_L} \quad (1)$$

Las fuerzas de la fórmula anterior vienen dadas por las expresiones siguientes:

$$F_D \text{ (fuerza de arrastre)} = c_D \times k^2 \times \tau_s$$

$$F_L \text{ (fuerza de suspensión)} = c_L \times k^2 \times \tau_s$$

$$F_W \text{ (peso sumergido de la partícula)} = c_W \times (\gamma_s - 1) \times \gamma_w \times k^3$$

τ_s es la tensión tangencial que produce el agua en su avance sobre el revestimiento, y viene dada por la fórmula:

$$\tau_s = \gamma_w \times R_h \times j \quad (2)$$

donde:

γ_w : peso específico del agua

R_h : radio hidráulico

j : pendiente de la línea de energía

Los brazos de las fuerzas anteriores son los siguientes:

$$e_W = L / 2 \quad e_D = E / 2 \quad e_L = L / 2 \quad (3)$$

siendo "L" el lado de la placa y "E" el espesor de la misma.

Para un flujo turbulento la velocidad "v" a una distancia "y" del lecho viene dada por la expresión de Keulegan (1938) siguiente:

$$v = 2,5 \times v_s \times \ln (30,2 \times y / k) \quad (4)$$

siendo v_s la velocidad de corte (o de fricción), que viene dada por la expresión:

$$v_s = (\tau_s / \rho)^{1/2} \quad (5)$$

donde "ρ" es la densidad del agua.

Tomando como velocidad de referencia " v_r " para los cálculos la que se produce a una distancia "y" del lecho igual a "k", y entrando en la fórmula (4) se tiene:

$$v_r = 8,5 \times v_s \quad (6)$$

Utilizando las ecuaciones (5) y (6), se obtiene la siguiente expresión:

$$\tau_s = (\rho \times v_r^2) / 72 \quad (7)$$

La velocidad media en la vertical de un punto " v_m " viene dada por la expresión de Keulegan (1938) siguiente:

$$v_m = 2,5 \times v_s \times \ln (12,3 \times y_O / k) \quad (8)$$

Asumiendo que la velocidad media según la vertical sea igual a la velocidad media, y combinando las ecuaciones (6) y (8), se tiene:

$$v_r = 3,4 \times v_m / \ln (12,3 \times y_O / k) \quad (9)$$

si se introduce la expresión de v_r , dado por la fórmula (9), en la fórmula (7) se obtiene " τ_s " en función de la densidad de agua "ρ", el calado " y_O ", la velocidad media " v_m " y la dimensión típica "k", datos todos ellos conocidos.

Dado que la dimensión contra la que incide el flujo del agua frontalmente es el espesor, es razonable tomar éste como la dimensión típica "k".

El parámetro c_W es una constante igual al cociente entre el volumen de la placa y el cubo de la dimensión tipo, y c_D es otra constante igual a 36 veces el producto del coeficiente de arrastre con el cociente entre la superficie frontal y el cuadrado de la dimensión tipo; el coeficiente de arrastre se ha tomado igual a 0,9, ya que, según Vanoni (1975), es 0,5 para esferas y aproximadamente 1 para láminas. En este caso las placas tienen una forma más próxima a una lámina.

Según esto, los parámetros anteriores resultan:

$$c_W = 32,6 \quad c_D = 185,1 \quad (10)$$

De acuerdo con Gessler (1971), cuando se inicia el movimiento de las partículas y con flujo turbulento sobre el revestimiento, el parámetro de Shield, definido por el cociente $\tau_s / (\gamma_s - 1) \times \gamma_w \times k$, es igual a 0.047.

Basándose en esto, se llega a la siguiente relación (Simons, 1976):

$$\frac{e_L \times c_L + e_D \times c_D}{e_W \times c_W} = 21 \quad (11)$$

En esta ecuación son todos los parámetros conocidos excepto c_L , para el que se obtiene un valor igual 718,1.

Con estos valores, y sustituyendo τ_s por la expresión de la fórmula (7), se calculan F_D , F_L y F_W basándose en datos conocidos. En función de éstas fuerzas, y utilizando la fórmula (1), se obtienen los coeficientes de seguridad que se indican en la tabla 3.

Como puede verse, los coeficientes resultaron en los tres casos muy próximos a 1,3 o superiores, que aún siendo infe-

TABLA 3.
COEFICIENTES DE SEGURIDAD DE LOS REVESTIMIENTOS CON PLACAS

Colector	Tramo	Caudal (m ³ /s)	V _{media} (m/s)	Calado (m)	C _{seg.}
1	III	71	3,410	2,377	1,29
	IV	74	3,374	2,459	1,33
	V	83	3,343	2,660	1,39

rios al considerado para las protecciones con escollera se estimó que era suficiente. Por otro lado, hay que tener en cuenta que en el caso de revestimiento con placas era necesario ser más estricto por la incidencia económica que suponía este cambio respecto a la solución de proyecto.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los colectores de la zona regable de Monegros II se han construido con el fin de canalizar las escorrentías que se producen durante las tormentas y de recoger las aguas sobrantes de los riegos. Dichos colectores se componen de unos tramos de pendiente uniforme moderada separados por unos saltos en los que se elimina la diferencia de altura originada por la menor pendiente de esos tramos respecto al terreno.

Tanto los tramos uniformes como los saltos van protegidos por un revestimiento de escollera sobre un geotextil con el fin de evitar la erosión de la sección con el agua, dada la naturaleza de los terrenos que atraviesan (limos yesíferos).

El dimensionamiento de las protecciones pétreas se efectuó simultáneamente mediante los métodos de Simons y Stephenson. Los tamaños obtenidos con el primer método (más conservador) se aplicaron a la protección de los tramos uniformes, y los obtenidos con el segundo método a la protec-

ción de los saltos, ya que en estos se obtenía un "extra" de seguridad con el método de colocación que aportaba una excelente trabazón entre las piedras.

El revestimiento de los tres últimos tramos del colector nº 1 (en las zonas de pendiente uniforme) se ha hecho mediante placas cuadradas prefabricadas de hormigón de 80 cm de lado y 14 cm de espesor, colocadas a tope, para tener, a la vez que un revestimiento flexible, una sección hidráulica menor, necesaria para minimizar la superficie de ocupación.

Las dimensiones en planta de las placas se eligieron buscando un compromiso entre el coste de su fabricación y puesta en obra, y la necesidad de que fueran lo más pequeñas posible para adaptarse a las deformaciones del cauce por asentamientos y erosión de los suelos que los forman.

El dimensionamiento del espesor se efectuó siguiendo la filosofía del método de Simons (1976), particularizado para el problema de que las placas pudieran, por alguna razón, quedar expuestas frontalmente a la acción del agua por haber desaparecido las inmediatas aguas arriba.

La respuesta de los revestimientos, tanto en las protecciones a base de escollera como de placas prefabricadas ha sido excelente en los años transcurridos y ya han soportado caudales significativos sin apreciarse deterioros. Ello avala la bondad de los métodos utilizados en el diseño de protecciones. ■

BIBLIOGRAFÍA

-Keulegan, G.H., "Laws of turbulent flow in open channels", Journal of research, vol. 21, National Bureau of Standards, Washington, D.C. (1938).
-Gessler, J., "Beginning and ceasing of sediment motion", River Mechanics, vol. 1, published by Hsieh Wen Shen, ed., Fort Collins, Colo., (1971).

-Vanoni, V.A. (Editor), Sedimentation Engineering, ASCE, NY, (1975).
-Stevens, M.A. and Simons, D.B., "Safety factors for riprap protection" Journal of the Hydraulics Division, (1976).
-Stephenson, D., "Rockfill in hydraulic Engineering", (1979).