

# EN DEFENSA DE LOS CANALES TRADICIONALES

Por LUIS TORRENT

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

*El autor presenta algunas observaciones a un artículo aparecido en nuestra Revista en su número de julio último, cuya continuación espera con impaciencia según se especifica en el primer párrafo del presente artículo.*

Los Ingenieros de Caminos D. Manuel Barragán y D. José Luis Sáenz han publicado en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS del mes de julio un artículo acerca de la construcción de canales de directriz circular que creemos merece la pena de ser ampliamente comentado. Vaya por delante nuestra felicitación a los autores por haber abordado un tema tan interesante y por inyectar entusiasmo innovador en la milenaria técnica de la construcción de canales. Esperamos con impaciencia los próximos artículos anunciados sobre la materia en los que confiamos encontrar amplitud de datos y referencias que nos permitan conocer aspectos prácticos de la nueva modalidad constructiva. Ahora bien, en calidad de simples teorizantes, queremos señalar dos o tres puntos de las cuestiones abordadas por los autores en su publicación cabeza de serie y, recordando los lejanos (1) tiempos de la Escuela, "poner pegas" a lo expuesto en dicho artículo.

1.º En los cuadros comparativos que acompañan al estudio que comentamos, existen algunos errores, tal vez de operación, que acentúan las ventajas hidráulicas de las secciones de directriz circular, sobre todo en la línea correspondiente al semi-círculo. Por ello, hemos vuelto a calcular las tablas 1, 2 y 3 de comparación entre secciones de canal de directriz circular y sección trapezoidal o rectangular clásicas, obteniendo los índices que se señalan en los cuadros adjuntos. La tabla 4, de "Relación entre anchuras a nivel de agua para igual sección" no la hemos comprobado, calculando en su lugar la de "Relación de anchuras a nivel de agua para igualdad de caudal", que consideramos más apropiada para las comparaciones que se busca establecer.

Hemos incluido en nuestras tablas la sección trapezoidal óptima, es decir, la de forma semi-hexagonal. Aunque no sea muy frecuente en la práctica, creemos que debe tenerse en cuenta esta sección para completar las comparaciones, de la misma manera que incluyen los autores las secciones trapezoidales de talud 1:3, que son casi exclusivamente empleadas en canales no revestidos. (Obsérvese que con este talud de cajeros y supuesta la sección de mayor radio hidráulico, la relación entre la anchura de solera y la del nivel de agua es de 1,19,5: la sección es prácticamente triangular). En cambio, la forma semi-hexagonal, actualmente sólo utilizada en te-

---

(1) Obsérvese que hemos suprimido el gracioso "¡ay!" que se acostumbra intercalar junto al adjetivo "lejano", muestra clara de lo contagioso que puede resultar el afán innovador a que arriba se alude.

renos coherentes, podrá en el futuro emplearse también en suelos no rocosos al amparo de las modernas técnicas de terraplenado.

2.º Los autores confeccionan sus tablas comparativas utilizando la fórmula de Strickler. Como es sabido, la velocidad de una corriente expresada según esta fórmula es función de la potencia  $2/3$  del radio hidráulico. Pero existen multitud de experimentadores que atribuyen otros valores al exponente del radio. En general, las fórmulas más modernas disminuyen el citado exponente (Hazen y Williams, Scobey, Scimemi, etc.). En un artículo recientemente publicado en esta Revista (1) demuestra que para satisfacer a las fórmulas logarítmicas más exactas, del tipo de Colebrook, en las expresiones exponenciales se debe modificar el exponente en función de la rugosidad, de forma que a cauces lisos corresponden valores menores de 0,6, mientras que en conducciones muy rugosas se utiliza la fórmula general:

$$V = BR^b i^{0.5},$$

con valores de  $b$  que pueden ser incluso superiores a los  $2/3$  de Strickler. Para canales revestidos, la zona de aplicación está entre  $b = 0,61$  y  $b = 0,59$ .

Al utilizar exponentes menores del radio hidráulico, la influencia de éste pesa menos en la comparación de secciones circulares y trapeziales, como puede apreciarse en las tablas que hemos calculado para  $b = 0,59$ , valor límite inferior que consideramos corresponde a un revestimiento de hormigón de ejecución excelente. Las diferencias entre los valores de estas tablas con los anteriores son muy reducidas, pero creemos deben ponerse también en la balanza de comparación de secciones.

3.º La tabla 5.<sup>a</sup>, del estudio comentado "Economías aproximadas globales", se basa en una descomposición de precios que ya los autores indican no tiene otro carácter que el de simple orientación. En nuestra opinión, esta tabla puede, más bien, producir alguna desorientación, porque arrastra errores de los que anteriormente señalamos (por ejemplo, señala economía del 14,85 por 100 en la comparación de secciones semicirculares y trapeziales 1 : 1, cuando la cifra debería ser 8,89 por 100) y porque adolece del defecto de suponer que son iguales los importes de excavación a talud recto o cóncavo y que cuesta lo mismo un hormigón en solera de canal y en cajeros lisos que en secciones circulares de encofrado curvo.

En las tablas 5 y 5' que incluimos se señalan los índices de costes corregidos, según criterio de precios de los autores ( $a$ ); y se añaden otras tablas ( $b$ ) calculadas análogamente, pero en las que se supone que el refino de taludes a superficie cilíndrica representa un 5 por 100 de incremento de coste de excavación, mientras que el hormigón de paramento circular cuesta un 10 por 100 más que el liso (incluida solera).

Del examen de estos últimos cuadros se desprende que las ventajas económicas de los canales de directriz circular desaparecen prácticamente — e incluso pueden cambiar de signo — respecto a los trapeziales de taludes más escarpados. El talud de coste semejante al del canal circular correspondiente está comprendido, en general, entre 1 : 1,5 y 1 : 1.

4.º Un punto que los autores pasan por alto en su estudio, pero que en nuestra opinión es importante, es el del calado. Estimamos que, para que las compara-

---

(1) "Discusión de las fórmulas de rugosidad". Abril de 1966.

$$V = K R^{2.33} j^{0.5}$$

TABLA 1.<sup>a</sup> — *Relación entre caudales que circulan por canales de directriz circular y de sección trapecial más hidráulica, a igualdad de sección.*

tg $\alpha$	3,00	2,00	1,50	1,00	0,577	0
$\beta = 90^\circ$	1,284	1,163	1,103	1,052	1,032	1,084
$\beta = 80^\circ$	1,278	1,158	1,098	1,047	1,029	1,079
$\beta = 70^\circ$	1,261	1,143	1,083	1,033	1,015	1,065
$\beta = 60^\circ$	1,230	1,115	1,057	1,008	0,990	1,039

TABLA 2.<sup>a</sup> — *Relación entre secciones para igual caudal*

$\beta = 90^\circ$	1,206	1,120	1,076	1,039	1,024	1,062
$\beta = 80^\circ$	1,802	1,117	1,073	1,035	1,022	1,059
$\beta = 70^\circ$	1,190	1,105	1,062	1,025	1,011	1,048
$\beta = 60^\circ$	1,168	1,085	1,042	1,006	0,992	1,029

TABLA 3.<sup>a</sup> — *Relación de perímetros a igualdad de caudal*

$\beta = 90^\circ$	1,598	1,328	1,201	1,100	1,060	1,163
$\beta = 80^\circ$	1,585	1,317	1,191	1,091	1,055	1,154
$\beta = 70^\circ$	1,545	1,284	1,161	1,063	1,028	1,125
$\beta = 60^\circ$	1,475	1,226	1,109	1,015	0,981	1,074

TABLA 4.<sup>a'</sup> — *Relación de anchuras a nivel de agua para igual caudal*

$\beta = 90^\circ$	2,381	1,881	1,611	1,332	1,113	0,911
$\beta = 80^\circ$	2,137	1,689	1,446	1,196	0,999	0,818
$\beta = 70^\circ$	1,910	1,510	1,293	1,069	0,893	0,731
$\beta = 60^\circ$	1,696	1,340	1,148	0,949	0,793	0,649

TABLA 5.<sup>a</sup> — *Economías aproximadas globales (%) según criterio de precios a).*

$\beta = 90^\circ$	32,30	22,06	15,55	8,89	-4,95	8,44
$\beta = 80^\circ$	31,40	20,97	14,31	7,43	3,52	6,60
$\beta = 70^\circ$	29,63	18,83	11,92	-4,72	0,51	3,47
$\beta = 60^\circ$	26,70	15,34	8,06	0,41	-4,18	-1,30

TABLA 5.<sup>a'</sup> — *Economías aproximadas globales (%) según criterio de precios b)*

$\beta = 90^\circ$	27,49	16,47	9,47	2,36	-1,79	2,20
$\beta = 80^\circ$	26,57	15,35	8,20	0,85	-3,25	0,32
$\beta = 70^\circ$	24,70	13,09	5,67	-2,01	-6,41	-2,94
$\beta = 60^\circ$	21,58	9,44	1,57	-6,58	-11,38	-7,97

TABLA 6.<sup>a</sup> — *Relación de calados de agua para igual caudal*

$\beta = 90^\circ$	0,753	0,841	0,894	0,942	0,964	0,911
$\beta = 80^\circ$	0,806	0,900	0,956	1,008	1,031	0,975
$\beta = 70^\circ$	0,863	0,964	1,024	1,080	1,104	1,044
$\beta = 60^\circ$	0,929	1,038	1,103	1,163	1,189	1,124

tg  $\alpha$  = talud de los cajeros del canal trapecial.

$\beta$  = semi-ángulo en el centro del segmento circular.

$$V = B R^{0,59} i^{0,5};$$

TABLA 1.<sup>a</sup> — *Relación entre caudales que circulan por canales de directriz circular y de sección trapecial más hidráulica, a igualdad de sección.*

tg $\alpha$	3,00	2,00	1,50	1,00	0,577	0
$\beta = 90^\circ$	1,2475	1,143	1,090	1,046	1,028	1,074
$\beta = 80^\circ$	1,243	1,139	1,086	1,042	1,025	1,070
$\beta = 70^\circ$	1,228	1,125	1,073	1,029	1,013	1,057
$\beta = 60^\circ$	1,201	1,101	1,050	1,007	0,991	1,034

TABLA 2.<sup>a</sup> — *Relación entre secciones para igual caudal.*

$\beta = 90^\circ$	1,186	1,109	1,069	1,035	1,0215	1,0565
$\beta = 80^\circ$	1,183	1,106	1,066	1,032	1,0145	1,0535
$\beta = 70^\circ$	1,172	1,095	1,056	1,023	1,010	1,044
$\beta = 60^\circ$	1,152	1,077	1,038	1,005	0,993	1,026

TABLA 3.<sup>a</sup> — *Relación de perímetros a igualdad de caudal.*

$\beta = 90^\circ$	1,5845	1,321	1,197	1,098	1,059	1,160
$\beta = 80^\circ$	1,572	1,311	1,188	1,089	1,0535	1,151
$\beta = 70^\circ$	1,533	1,278	1,158	1,062	1,027	1,122
$\beta = 60^\circ$	1,465	1,221	1,1065	1,015	0,9815	1,072

TABLA 4.<sup>a'</sup> — *Relación de anchuras a nivel de agua para igual caudal*

$\beta = 90^\circ$	2,362	1,872	1,606	1,331	1,109	0,909
$\beta = 80^\circ$	2,121	1,681	1,442	1,195	0,996	0,816
$\beta = 70^\circ$	1,896	1,503	1,289	1,068	0,8905	0,7295
$\beta = 60^\circ$	1,685	1,336	1,146	0,949	0,791	0,648

TABLA 5.<sup>a</sup> — *Economías aproximadas globales (%) según criterio de precios a).*

$\beta = 90^\circ$	31,47	21,50	15,16	8,67	4,78	8,11
$\beta = 80^\circ$	30,61	20,44	13,96	7,23	3,33	6,27
$\beta = 70^\circ$	28,85	18,29	11,58	4,60	0,40	3,18
$\beta = 60^\circ$	25,99	14,91	7,80	0,37	— 4,15	— 1,51

TABLA 5.<sup>a'</sup> — *Economías aproximadas globales (%) según criterio de precios b).*

$\beta = 90^\circ$	26,61	15,88	9,09	2,12	— 1,97	1,85
$\beta = 80^\circ$	25,73	14,78	7,82	0,63	— 3,45	— 0,03
$\beta = 70^\circ$	23,86	12,51	5,31	— 2,13	— 6,53	— 3,25
$\beta = 60^\circ$	20,82	8,91	1,29	— 6,62	— 11,35	— 8,19

TABLA 6.<sup>a</sup> — *Relación de calados de agua para igual caudal.*

$\beta = 90^\circ$	0,747	0,837	0,891	0,941	0,961	0,909
$\beta = 80^\circ$	0,799	0,896	0,953	1,007	1,028	0,972
$\beta = 70^\circ$	0,856	0,960	1,022	1,079	1,101	1,042
$\beta = 60^\circ$	0,923	1,035	1,101	1,163	1,187	1,123

tg  $\alpha$  = talud de los cajeros del canal trapecial.

$\beta$  = semi-ángulo en el centro del segmento circular.

ciones sean completas, debe de tenerse en cuenta la altura de la lámina de agua en unas y otras secciones, ya que de ella dependen aspectos tan interesantes como la cota de máxima utilización del agua en regadíos, altura de obras auxiliares, coste de compuertas, etc.

Hemos preparado unos cuadros comparativos de calados para cauces de igual caudal, bien sea con la fórmula de Strickler o utilizando el exponente 0,59 que antes señalamos.

La comparación de secciones circulares *versus* trapeciales en el doble aspecto de economía constructiva y calado, muestra que de los 24 casos estudiados son favorables en ambos aspectos las cuatro secciones circulares siguientes:

$\beta = 60^\circ$  superior a  $\text{tg } \alpha = 1 : 2$  y a  $\text{tg } \alpha = 1 : 1,5$ .

$\beta = 70^\circ$  aventaja a  $\text{tg } \alpha = 1 : 1,5$ .

$\beta = 80^\circ$  es ligeramente ventajosa (menos del 1 %) a  $\text{tg } \alpha = 1 : 1$ .

En los restantes veinte casos, la forma trapecial presenta ventajas respecto a las circulares, bien sea en coste o en calado (o en ambos aspectos). Sin un estudio particular del caso concreto de conducción que se proyecta, no puede estimarse apriorísticamente que es más conveniente, si ahorrar en la construcción y perder en la cota o viceversa.

5.º Como ya se indica más arriba, el calado condiciona otros aspectos del proyecto del canal, como obras de fábrica, compuertas, etc., pero a su vez, estos elementos condicionan localmente la forma del cauce. Las transiciones a sección rectangular adecuada para la instalación de compuertas y partidores, o a la sección de herradura típica de túneles, los cambios de forma por transeurrir el canal por terrenos de diferente cohesión o dureza, son, en nuestra opinión, notablemente más sencillos de ejecutar — y, por consiguiente, más económicos — que las modificaciones de sección sobre un canal circular.

La máxima hidraulicidad del perfil transversal no es, generalmente, un imperativo categórico del proyecto, como lo prueba la existencia de infinidad de canales que no cumplen esta condición. Las posibilidades del proyectista de conducciones clásicas, tememos se vean muy limitadas al adoptar secciones circulares. Un caso muy frecuente, en la práctica, es la construcción de un canal en terreno superficialmente incoherente, con subsuelo rocoso. El canal trapecial de máxima hidraulicidad obligaría a una excavación costosa en roca que el proyectista elude adoptando una anchura de solera superior a la propia del radio óptimo. No vemos clara la correspondencia de este proceso en el caso de secciones circulares, como no sea la adopción de formas mixtilíneas.

6.º El ejemplo final del artículo objeto de estas notas nos da pie para una nueva objeción que nos gustaría ver aclarada.

Pero antes conviene precisar algunos puntos de la comparación económica que hacen los autores entre el canal semicircular y el rectangular autorresistente. En primer lugar, los caudales comparados no son iguales:

$Q = 8 i^{0,5}$  para la sección rectangular;

$Q = 7,254 i^{0,5}$  para la circular

(según Strickler). El terraplén señalado como 12,70 m.<sup>2</sup> no corresponde a la figura, como tampoco es exacto el volumen del revestimiento circular. Nos parece poco real la suposición de igual coste del hormigón de 0,15 m. de espesor que el del hormigón en masa de los muros cajeros y solera plana del rectangular. Por último, no se tiene en cuenta que la superficie ocupada por el canal circular es 4,38 m.<sup>2</sup> superior por m. l. a la del clásico, cuya lámina de agua es 0,19 m. más baja, para el mismo caudal.

Sin embargo, nuestra principal objeción al ejemplo citado no está en las cifras manejadas, sino en los conceptos. Nos extraña que los autores arropen su canal semicircular con terraplenes de paramentos lisos, en lugar de proponer espaldones cóncavos, más próximos al equilibrio natural del terreno, según se postula en el trabajo comentado.

Pero, ¿está en realidad más cerca del límite de equilibrio del terreno una superficie circular de pequeño radio que una plana de talud conveniente? Obsérvese que los radios de curvatura utilizados por los autores son, como máximo,  $r = \sqrt{3}h$ , siendo  $h$  la altura sobre fondo del canal; es decir, se trata de radios muy inferiores, en general, al del círculo pésimo de deslizamiento. Por otra parte, la existencia sobre el talud de la membrana que constituye el revestimiento y las presiones hidrostáticas que dicha membrana transmite, alteran el estado de tensiones del terreno y, por consiguiente, su superficie límite de equilibrio, que no será igual para canal vacío que para canal lleno o semilleno.

