

INFORME

SOBRE

LA CAPACIDAD PORTANTE DEL CANAL XERTA-SÈNIA

Tortosa, 4 de julio de 2002



Autor:

José M^a Franquet Bernis
INGENIERO AGRÓNOMO, EUR.-ING.
INGENIERO TÉCNICO EN EXPLOTACIONES
AGROPECUARIAS

Av. Generalitat, 73 – 43.500 TORTOSA (Tarragona)

Teléf. y Fax (977) 44.18.43
(977) 51.00.97
e-mail: jfbernis@iies.es

DON JOSÉ M^a FRANQUET BERNIS,

INGENIERO AGRÓNOMO SUPERIOR, EUR-ING, Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales, Ingeniero Técnico en Explotaciones Agropecuarias, Profesor Asociado de la Universidad Internacional de Cataluña (UIC) y Profesor-Tutor de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), con ejercicio legal y residencia en la ciudad de 43.500 Tortosa (Tarragona), Avenida de la Generalitat, nº: 73, entlo., comarca del “*Baix Ebre*” colegiado con el nº: 193 en el Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Catalunya, con antigüedad de 16 de octubre de 1974, asociado con el nº: 141 en la Asociación Catalana de Peritos Judiciales y Forenses (Colaboradores de la Administración de Justicia), inscrito en el Registro de Peritos Tasadores de Seguros (Art. 40 de la Ley 33/1984, de 2 de agosto, sobre Ordenación de los Seguros Privados), Tasador Inmobiliario inscrito en el Registro correspondiente del Banco de España con la clave JFB 4322, mayor de edad, provisto del N.I.F.: 40.901.425-L, y requerido por la Plataforma en Defensa del Ebro (PDE) para informar acerca de la capacidad portante del tramo ya construido del canal Xerta-Sénia y sus consecuencias en relación a la reciente concesión administrativa de aguas a dicha zona regable,

RELACIONO QUE:

Debidamente impuesto acerca de los extremos sobre los que tengo que informar.

Habiendo reconocido los terrenos e instalaciones objeto de la presente expertización, con las mediciones y contrastaciones pertinentes, consultado a las personas físicas y jurídicas que he estimado conveniente, analizado toda la documentación obrante en el expediente que me ha sido suministrada referente al caso, llevado a cabo un cambio de impresiones con personas prácticas en la materia de la zona y estudiado técnicamente, y del modo solicitado, el asunto en cuestión.

En virtud de mis conocimientos profesionales, y de acuerdo con mi más leal saber y entender, paso a emitir el siguiente:

INFORME

0. ANTECEDENTES

Se trata aquí del estudio hidráulico del canal denominado “Xerta-Sénia”, ya construido parcialmente entre los años 1972 y 1980, con una longitud de 33’816 km., distancia entre juntas de dilatación de 75/100 metros, distancia entre juntas de hormigonado de 2’10-2’20 m., sección transversal semicircular en su tramo principal y una capacidad portante teórica (según se afirma en el proyecto de concesión) de 19 m³/seg., para el abastecimiento de agua de riego a una zona regable de 16.480 Has. de las comarcas tarraconenses del *Baix Ebre* (44’7% de la superficie) y *Montsià* (55’3% de la superficie), abarcando 12 términos municipales, cuatro en la primera comarca y ocho en la segunda. Arranca a 3.524 metros del origen primitivo, situado en el embalse de la *Vall de l’Infern*. Dicha zona se halla comprendida aproximadamente entre el azud de Xerta, el canal de la Derecha del Ebro, el río Sénia y la cota taquimétrica 200 m.s.n.m. El proyecto técnico inicial se aprobó en agosto de 1972, habiéndose iniciado las obras en enero de 1973 y recibándose provisionalmente el 18 de junio de 1980. Hace pocas semanas se otorgó, por parte de la Confederación Hidrográfica del Ebro, la pertinente concesión administrativa de aguas, con un volumen anual de 72 hm³ y un caudal punta de 10 m³/seg.

Otras características técnicas interesantes del proyecto en cuestión son las siguientes:

- La captación se ha de realizar aguas arriba del azud de Xerta, cuya coronación se halla en la cota 10’55 m.s.n.m. De esta manera, para el caudal mínimo del río, se garantiza un nivel mínimo de agua en la captación a la cota 11’25 m.s.n.m.
- La altura mínima de bombeo ha de ser la cota de la lámina de agua del canal ya construido, o sea 151’385 m.s.n.m.
- El canal transcurre por la parte superior de toda la zona regable siguiendo la curva de nivel 150, de forma que las diferentes curvas de nivel tienen un trazado paralelo al canal tanto por debajo como por encima del mismo. Debido a este hecho, cualquier sectorización que se realice será perpendicular al canal y el terreno presentará un desnivel similar en todos los sectores, pasando de la cota 150 m.s.n.m. a la cota 10 m.s.n.m.
- Todo el trazado del canal se encuentra surcado perpendicularmente por numerosos barrancos y ramblas bastante encajonados y pronunciados, sobre los que el canal transcurre en paso elevado de acueducto, cuyo cálculo hidráulico será también objeto del presente estudio. Estos barrancos habrán de considerarse como límites naturales de los sectores y puntos de desagüe del canal.
- Número de horas de bombeo al día: 16 h.

- Tarifa eléctrica: Alta tensión: Tarifa R-1 hasta 36 kv con una discriminación horaria del tipo 4.
- Material constitutivo de las tuberías: De la misma forma que en otras transformaciones similares, se ha realizado un estudio comparativo de costes de instalación en función del material, diámetros y timbrajes empleados en las redes de distribución ($P_t < 15$ atm.), resultando más económicos los siguientes materiales:

$\varnothing \leq 315$ mm.	PVC
315 mm. $< \varnothing \leq 800$ mm.	PRFV
800 mm. $< \varnothing$	Hormigón armado con camisa de chapa de acero

En las tuberías de impulsión existen tramos con timbrajes superiores a 15 Kp/cm^2 , resultando más aconsejables y baratas las tuberías de fundición dúctil para diámetros moderados (600-450 mm.) y hormigón con camisa de chapa para diámetros superiores. Para timbrajes superiores a 20 Kp/cm^2 , resulta más económico el acero, tanto con soldadura helicoidal como con soldadura longitudinal.

1. ESTUDIO TEÓRICO DE LA SECCIÓN CIRCULAR

Sea el canal semicircular representado en la figura siguiente y admitamos una altura de agua hasta el nivel ac con el ángulo θ (expresado en radianes). Esta sección queda determinada por dos elementos fundamentales: el radio r y el ángulo θ .

Evidentemente, se cumplirá que:

Área segmento circular $abc = \text{Área sector circular } aoc - \text{Área triángulo } aoc$

$$S = S_1 - S_2$$

pero:

$$S_1 = \frac{1}{2} r \cdot r q = \frac{1}{2} r^2 q$$

$$S_2 = \frac{1}{2} ac \times od = \frac{1}{2} 2r \cos \frac{q}{2} \times r \sin \frac{q}{2} = r^2 \sin \frac{q}{2} \cos \frac{q}{2}$$

y siendo:

$$\sin \frac{q}{2} \cdot \cos \frac{q}{2} = \frac{1}{2} \sin q$$

nos quedará:

$$S_2 = \frac{1}{2} r^2 \sin q$$

y, en consecuencia:

$$S = S_1 - S_2 = \frac{1}{2} r^2 q - \frac{1}{2} r^2 \text{sen } q = \frac{1}{2} r^2 (q - \text{sen } q)$$

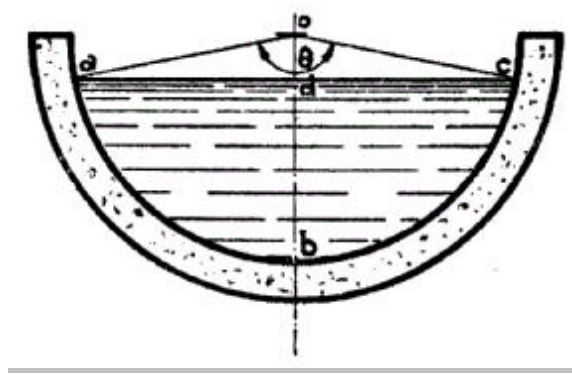


Fig. 1. Sección transversal del canal

El perímetro o contorno mojado, vale:

$$c = r \cdot \theta$$

por lo tanto, el radio hidráulico medio o cociente S/c será:

$$R = \frac{1}{2} r^2 (q - \text{sen } q) : (rq) = r \frac{q - \text{sen } q}{2q}$$

Este radio hidráulico será máximo (lo que dará un máximo caudal) cuando se encuentre un valor de θ tal que anule la derivada primera (condición necesaria o de primer grado) de la expresión trigonométrica: $\frac{q - \text{sen } q}{2q}$. Su resolución nos daría para θ el valor del ángulo llano $180^\circ = \pi$ radianes, es decir, que el radio máximo se consigue cuando el nivel de agua pasa por el punto **o**.

Además, como de las diversas secciones poligonales el semicírculo es la de perímetro mínimo, esta forma de sección es la más ventajosa. En cualquier caso, aunque esta sección transversal es la que posee una mayor sección mojada para un perímetro dado, no suele ser muy utilizada en la práctica, por dificultades constructivas y de conservación o mantenimiento.

2. COMPROBACIÓN HIDRÁULICA DEL CANAL CONSTRUIDO

Emplearemos, sucesivamente, las diversas formulaciones que se emplean para el cálculo hidráulico de este tipo de conducciones libres.

Partiremos, pues, de las siguientes fórmulas:

$$S = \frac{r^2}{2} (q - \text{sen } q) \quad (1)$$

$$R = \frac{r(q - \text{sen } q)}{2q} \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (3) \text{ (Manning-Strickler)}$$

para una rugosidad: $n = 0'014$, se tendrán los siguientes valores de velocidad y caudal:

$$V = 45 I^{\frac{1}{2}} \left[\frac{r(q - \text{sen } q)}{q} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

$$Q = V \cdot S = 22'5 I^{\frac{1}{2}} \left[\frac{r^8 (q - \text{sen } q)^5}{q^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

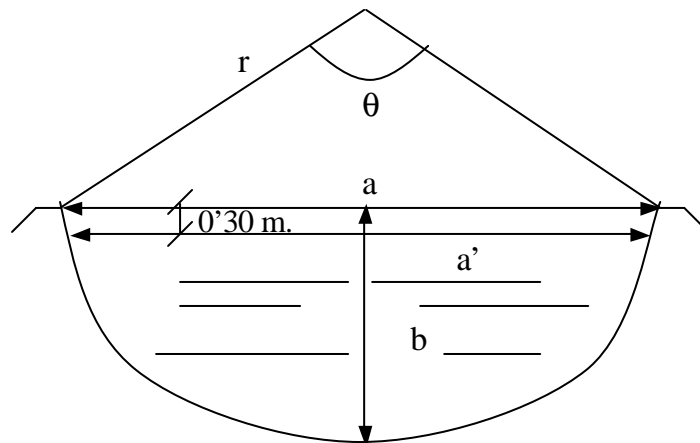


Fig. 2. Características dimensionales del canal Xerta-Sénia

Vamos, ahora a plantear diversas hipótesis de cálculo:

1°. Canal lleno

$$a = 10'20 \text{ m.}$$

$$b = 2'70 \text{ m.}$$

$$r \operatorname{sen} \frac{q}{2} = \frac{10'2}{2} = 5'1 \quad (6)$$

$$r \cos \frac{q}{2} = r - 2'70 \quad (7)$$

$$(6)^2 + (7)^2; r = \frac{5'1^2 + 2'7^2}{2 \times 2'7} = 6'17 \text{ m.}$$

$$q = 2 \operatorname{arc} \operatorname{sen} \frac{5'1}{6'17} = 111'58 = 111^\circ 35' = 1'95 \text{ rad.}$$

Para las diferentes pendientes motrices ensayadas I, habida cuenta de la diversidad de tramos que constituyen este canal, se obtienen los siguientes resultados:

S(m²)	I(m/m)	V(m/seg)	Q(m³/seg)
19'42		(98'28·I ^{1/2})	(1.908'79·I ^{1/2})
“	0'0002	1'39	27'00
“	0'0003	1'70	33'06
“	0'0004	1'97	38'26
“	0'0005	2'20	42'72
“	0'0006	2'41	46'80
“	0'0007	2'60	50'49
“	0'0008	2'78	53'99

2°. Canal con resguardo hidráulico de 0'30 m.

a) Expresión de Manning-Strickler:

En este caso, se tendrá:

$$r = 6'17 \text{ m.}$$

$$b = 2'70 - 0'30 = 2'40 \text{ m.}$$

$$\theta = 104'67 = 104^\circ 40' = 1'83 \text{ rad.}$$

$$S = 16'42 \text{ m}^2$$

I(m/m)	V(m/seg)	Q(m³/seg)
	(91'69·I ^{1/2})	(1.505'55·I ^{1/2})
0'0002	1'30	21'29
0'0003	1'59	26'08
0'0004	1'83	30'11
0'0005	2'05	33'67
0'0006	2'25	36'88
0'0007	2'43	39'83
0'0008	2'59	42'58

Debe hacerse notar, en cualquier caso, que la consideración de $n = 0'014$ en la fórmula de Manning-Strickler es bastante exigente.

b) Expresión de Forchheimer:

Considerando, ahora, un resguardo hidráulico de 30 cm., se tiene (según Forchheimer):

$$V = \delta \cdot R^{0.7} \cdot I^{0.5}; \delta = 70 \text{ (hormigón mal enlucido)}$$

$$R = \frac{r(q - \text{sen} q)}{2q} = \frac{6'17(1'83 - 0'9674)}{2 \times 1'83} = 1'454 \text{ m.};$$

$$S = \frac{r^2}{2} (q - \text{sen} q) = \frac{6'17^2}{2} (1'83 - 0'9674) = 16'42 \text{ m}^2;$$

de dónde se obtiene:

I(m/m)	V(m/seg)	Q(m³/seg)
0'0002	1'29	21'12
0'0003	1'58	25'87
0'0004	1'82	29'87
0'0005	2'03	33'40
0'0006	2'23	36'59
0'0007	2'41	39'52
0'0008	2'57	42'25

que ofrece unos resultados ligeramente inferiores (prácticamente iguales) a la ya calculada expresión de Manning-Strickler.

c) Expresión de Bazin:

Tomando $\gamma = 0'16$ (categoría 2: paredes lisas de hormigón fino sin pulir) se tiene, para el mismo resguardo hidráulico:

$$V = \frac{87}{1 + \frac{g}{\sqrt{R}}} \times \sqrt{R \cdot I} = \frac{87}{1 + \frac{0'30}{\sqrt{1'454}}} \times \sqrt{1'454 \cdot I} = 92'616941 \times \sqrt{I}; \text{ de dónde:}$$

I(m/m)	V(m/seg)	Q(m ³ /seg)
0'0002	1'31	21'51
0'0003	1'60	26'34
0'0004	1'85	30'42
0'0005	2'07	34'01
0'0006	2'27	37'25
0'0007	2'45	40'24
0'0008	2'62	43'01

que ofrece unos resultados prácticamente iguales (si bien ligeramente superiores) a los de Manning-Strickler.

d) Expresión de Ganguillet y Kütter:

Tomando (al igual que en la formulación ya expresada de Manning-Strickler) el valor de $n = 0'014$ (para paredes de hormigón poco liso), se tiene la expresión de la velocidad media:

$$V = \frac{23 + \frac{0'00155}{I} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0'00155}{I}\right) \times \frac{n}{\sqrt{R}}} \times \sqrt{R \times I}; \text{ de dónde:}$$

I(m/m)	V(m/seg)	Q(m ³ /seg)
0'0002	1'28	21'08
0'0003	1'57	25'74
0'0004	1'81	29'67
0'0005	2'02	33'14
0'0006	2'21	36'27
0'0007	2'39	39'16
0'0008	2'55	41'85

que, así mismo, ofrece resultados muy similares a los anteriores. Obviaremos aquí la aplicación de la expresión simplificada de estos mismos autores, al ser algunas pendientes: $I \leq 0'0005$ m/m.

A la vista de los resultados anteriores, así como de la aplicación de otras fórmulas usuales (Hazen-Williams, Biel y otras), tomaremos como totalmente aceptables los resultados obtenidos hasta ahora.

e) Expresión de Knauff:

La fórmula de **Knauff**, específica para canales circulares revestidos no completamente llenos, como es el caso del que nos ocupa, de empleo corriente en Alemania, con un resguardo hidráulico de 30 cm., ofrece la expresión simple:

$$V = \frac{114 \cdot R}{\sqrt{R + 0'2565}} \times \sqrt{I} = \frac{114 \times 1'454}{\sqrt{1'454 + 0'2565}} \times \sqrt{I} = 113'35 \times I^{\frac{1}{2}}, \text{ con lo que:}$$

I(m/m)	V(m/seg)	Q(m ³ /seg)
0'0002	1'60	26'32
0'0003	1'96	32'24
0'0004	2'27	37'22
0'0005	2'53	41'62
0'0006	2'78	45'59
0'0007	3'00	49'24
0'0008	3'21	52'64

que resultan sensiblemente superiores a los obtenidos con las restantes formulaciones.

f) Expresión de Koeschlin:

La fórmula de **Koeschlin**, con el mismo resguardo hidráulico que en los casos anteriores, ofrece una velocidad media de (considerando un $K = 48$, para hormigón no enlucido):

$$V = K(1 + 0'6 \times \sqrt{R}) \cdot \sqrt{R} \cdot \sqrt{I} = 48(1 + 0'6 \times \sqrt{1'454}) \sqrt{1'454} \cdot \sqrt{I} = 99'75 \cdot I^{\frac{1}{2}},$$

de lo que resulta:

I(m/m)	V(m/seg)	Q(m³/seg)
0'0002	1'41	23'16
0'0003	1'73	28'37
0'0004	2'00	32'76
0'0005	2'23	36'62
0'0006	2'44	40'12
0'0007	2'64	43'33
0'0008	2'82	46'33

El empleo de esta fórmula es adecuado en este caso, habida cuenta de que, en todo momento, el radio hidráulico es: $R < 3'00$ m.

g) Expresiones de Franquet:

Veamos, por último, que según las formulaciones universales propuestas por este autor, con una categoría de rugosidad $K = 3'0$ (canales revestidos de hormigón), se tendría:

g-1) Modelo simple:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot R \cdot I}{0'0004 \times R^{-0'2952}}} = 70'02 \times R^{0'6476} \times I^{0'5} = 70'02 \times 1'454^{0'6476} \times I^{0'5} = 89'23 \times I^{\frac{1}{2}},$$

g-2) Modelo múltiple:

$$\begin{aligned} V &= 4'43 \times \sqrt{R^{1'3006} \times e^{6'1766 - 0'2185 \times K}} \times \sqrt{I} = \\ &= 4'43 \times \sqrt{1'454^{1'3006} \times e^{6'1766 - 0'2185 \times 3}} \times \sqrt{I} = 89'33 \times I^{\frac{1}{2}}, \end{aligned}$$

que ofrece resultados prudentes por la banda inferior, a saber:

I(m/m)	V(m/seg)	Q(m³/seg)
0'0002	1'26	20'74
0'0003	1'55	25'41
0'0004	1'79	29'34
0'0005	2'00	32'80
0'0006	2'19	35'93
0'0007	2'36	38'81
0'0008	2'53	41'49

Veamos que, en todos los casos, hemos remarcado los resultados obtenidos para una consideración de la pendiente media del cauce en estudio de $I = 0'0003$ m/m., ya

que es ésta la pendiente general aproximada que resulta de la medición completa del canal en toda su longitud ya construida, a saber:

$$I = \frac{150 - 140}{33.816} \cong 0'0003 \text{ m/m.}$$

En cualquier caso, la velocidad de circulación del agua por este canal y, consecuentemente, el caudal portante, podrían verse incrementados considerablemente efectuando un sellado de juntas con banda de polipropileno o cinta de PVC, que puede aplicarse tanto en juntas estrechas como anchas, independientemente del hecho de que la junta a que sustituya sea de berenjeno relleno de arcilla o producto asfáltico. En algunos tramos de este canal, habida cuenta del tiempo transcurrido desde su construcción, el hormigón puede encontrarse con cierto grado de degradación, lo que provocaría un elevado número de filtraciones, tanto por las juntas como por la aparición de fisuras.

Cabría también la posibilidad de impermeabilizar el canal con láminas de PVC en toda la sección, previa la limpieza de la superficie de apoyo de la lámina, colocación de un geotextil y colocación de la lámina por tramos, con longitudes que puedan facilitar su manejo. La fijación lateral, aunque se puede realizar con mortero tixotrópico (caro) también podría efectuarse mediante pletinas de aluminio o de PVC, para evitar su oxidación. La fijación transversal se llevaría a cabo cada 50 metros para evitar que las tracciones del agua puedan producir su rotura. Estas fijaciones transversales se realizarían con mortero tixotrópico, con dos capas de extensión del mismo, sujetando la lámina al estar perforada en los bordes.

Si se considera, por último, que el recrecimiento de la sección semicircular ya construida podría realizarse con facilidad (mediante aceros redondos corrugados empotrados en el borde superior del paramento existente a distancias convenientes, colocación de cercos de varilla, estribos o mallazo electrosoldado y su posterior encofrado y hormigonado *in situ*), el caudal circulante por ella podría alcanzar razonablemente las “puntas” o máximos precisos (35-40 m³/seg.) para efectuar el trasvase previsto en el Plan Hidrológico Nacional hacia las cuencas hidrográficas del Júcar, Segura y Almería (Sur), sin necesidad alguna de recurrir a la construcción de cualquier otra conducción libre o forzada, a tal efecto.

3º. Sección hidráulica óptima

Veamos, por último, que la sección hidráulica óptima semicircular, para una sección mojada de: $S = 16'42 \text{ m}^2$, exigiría un calado del canal de:

$$b = 0'798 \times \sqrt{16'42} = 3'23 \text{ m. , con un contorno o perímetro mojado de:}$$

$$c = 2'507 \times \sqrt{16'42} = 10'16 \text{ m. y una anchura de la lámina de agua de:}$$

$$a' = 1'596 \times \sqrt{16'42} = 6'47 \text{ m.}$$

3. TRAMOS DEL CANAL EN MOVIMIENTO VARIADO

Cuando siendo constante el caudal circulante varían su sección y la pendiente del fondo, como ha podido comprobar el que suscribe en ciertos tramos del canal que estudiamos, el movimiento que se producirá será *variado*, gradual o simplemente variado, según que dicha variación sea continua o brusca, movimientos que se presentan más frecuentemente en los cauces naturales como el del vecino río Ebro del cual, por cierto, tomará sus aguas el canal Xerta-Sénia. Dos ejemplos tenemos en el movimiento producido en el lecho de un río: en las proximidades de un puente o por causa de la construcción de una presa. La corriente estrecha del lecho -debido a las pilas del puente o por la propia presa- origina un hinchamiento de la masa líquida aguas arriba, con la brusca variación del nivel del plano o lámina del agua. Este desnivel o *remanso* (de elevación o depresión) lleva aparejado que, durante cierto recorrido de la corriente, desaparece la constancia de la profundidad del agua, la sección mojada y la velocidad media de los filetes líquidos, y a causa de esta variación la fuerza viva libre se emplea en la elevación del nivel del agua. Una vez alejada la corriente de la presa o del obstáculo, y a partir de una cierta distancia de aquellos, el movimiento empieza a ser sensiblemente uniforme.

En el movimiento permanente no uniforme, la velocidad del agua en cada punto es constante e independiente del tiempo, pero variable de un punto a otro. Esta clase de movimiento plantea el problema de conocer la variación del nivel de la superficie libre del líquido bajo determinadas condiciones (curvas de remanso y de resalto), cuestión ésta que ya fue estudiado en profundidad por J. B. Belanger y otros investigadores y que huelga desarrollar aquí.

El movimiento permanente puede considerarse como una sucesión de movimientos uniformes. El modo más sencillo de tratar el problema del movimiento permanente consiste en seguir la siguiente metodología: a) despreocuparse de las variaciones de la fuerza viva del agua, esto es, el trabajo o energía (positiva o negativa) correspondiente a las aceleraciones, de uno u otro signo, que la masa líquida experimenta al seguir el cauce de la corriente que se considere, y b) calcular el rozamiento de modo exactamente igual que cuando se trata de un movimiento uniforme. Por tanto, si las velocidades, o sea, las fuerzas vivas, no son considerables y la curvatura de la superficie libre resulta suficientemente ligera, puede calcularse ésta (supuesto conocido el perfil longitudinal del cauce en todo su recorrido y el nivel del agua en un punto determinado) dividiendo el curso del canal en pequeñas secciones sucesivas.

Hay que tener en cuenta, en fin, que de no circular por el cauce del canal todo el caudal con su correspondiente calado, sería posible e incluso necesario construir represamientos o vertederos sumergidos que mantuvieran el nivel adecuado por encima del correspondiente “colchón de agua”, al objeto de unificar la profundidad de las tomas y disminuir la altura manométrica de elevación de los bombeos intermedios

hasta las balsas de regulación proyectadas (en número de 18, con capacidad para almacenar tres días de consumo máximo y posterior distribución a toda la red de riego). Ello puede presentarse en este caso, habida cuenta de que las necesidades de caudal de la zona regable proyectada son bastante inferiores a la capacidad portante de la conducción principal, como ya se ha comprobado, por lo que el nivel de la lámina de agua correspondiente a la sección mojada necesaria sería muy bajo. En estas circunstancias, debe considerarse que en un cauce cilíndrico como el que nos ocupa todos los perfiles son idénticos y los niveles vienen dados por líneas horizontales a distinta altura trazadas sobre la sección transversal, constante. Así pues, para cada tramo comprendido entre dos perfiles transversales consecutivos se puede determinar fácilmente la sección media S y, por consiguiente, para un caudal dado Q , también la pendiente J que corresponde.

En esta tesitura, sea Δh la diferencia de alturas entre los niveles de dos perfiles consecutivos, Δx la distancia entre éstos, e i la pendiente, constante, de la solera del cauce. Resulta, para la de la superficie libre del trozo considerado:

$$J = i - \frac{\Delta h}{\Delta x}, \text{ de donde: } \Delta x = \frac{\Delta h}{i - J}$$

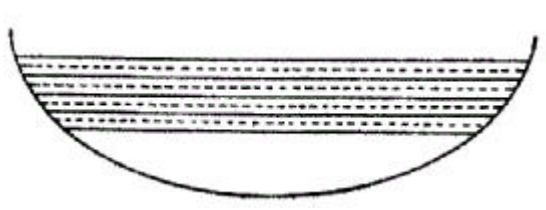


Fig. 3. Sección transversal del cauce cilíndrico

Se obtiene, de tal modo (Fig. 4), una línea quebrada que alcanza a zonas tanto más alejadas del muro de presa cuanto más pequeñas sean las divisiones Δh . En el límite, cuando éstas fuesen indefinidamente pequeñas, la curva de remanso resultaría asintótica de una paralela a la solera del canal. Así:

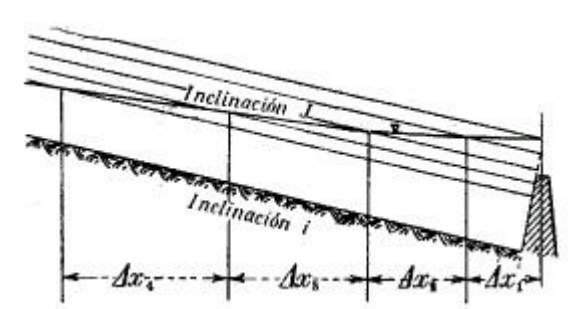


Fig. 4. Sección longitudinal del cauce cilíndrico

Por consiguiente, en los cauces cilíndricos se llega a una curva continua de remanso, que puede calcularse analíticamente por diferentes procedimientos (G. Tolkmitt, M. Rühlmann, F. Schaffernak, fórmula parabólica, ecuación diferencial, etc.). Los cálculos de Rühlmann y Tolkmitt fueron continuados por J. Dankwerts, quien construyó una gráfica en la que, a partir de una recta inclinada a 45° , que representa el nivel primitivo, se llevan como ordenadas las relaciones z/h_0 , obteniendo así un haz de curvas del que puede deducirse fácilmente la forma de la curva completa de remanso, hallándose el trazado gráfico completado por una tabla numérica. Ahora bien, en todos los cálculos a efectuar en estas condiciones es necesario el estudio de todas aquellas perturbaciones que modifiquen la corriente estacionaria del canal, como por ejemplo los cambios de sección, la presencia de obstáculos sumergidos en el cauce, entradas y salidas del agua, cambios de pendiente de la solera, etc.

4. ESTUDIO DEL CANAL PRINCIPAL

Está prevista, en el proyecto concesional de diciembre de 1999, una sección trapecial, con paredes de hormigón “in situ”, del tipo:

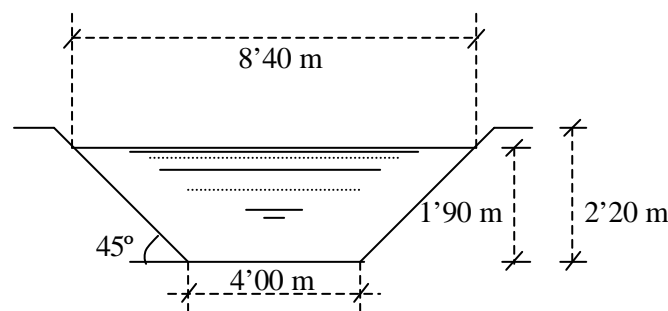


Fig. 5. Sección proyectada del “canal principal”

$L = l + 2 \cdot h \cdot \cotg \alpha$; de dónde:

$$\cotg \alpha = \frac{L - l}{2 h} = \frac{8'40 - 4'00}{2 \times 2'20} = \frac{4'40}{4'40} = 1$$

de dónde, efectivamente: $\alpha = 45^\circ$.

Aunque se anuncie un “calado normal”, en el proyecto técnico correspondiente, de 1'70 m., suponiendo, como en los casos anteriores, un resguardo hidráulico de 0'30 m., se tendrá: $h = 1'90$ m. (ver figura), con lo que:

$L = 4'00 + 2 \times 1'90 \times \cotg 45^\circ = 7'80$ m., de dónde se tendrán las siguientes variables del problema:

Sección mojada:

$$S = \frac{L+1}{2} \times h = \frac{7'80 + 4'00}{2} \times 1'90 = 11'21 \text{ m}^2$$

Perímetro mojado:

$$c = 1 + \frac{2 \times h}{\text{sen } a} = 4'00 + \frac{2 \times 1'90}{\text{sen } 45^\circ} = 9'37 \text{ m.}$$

Radio hidráulico medio:

$$R = \frac{S}{c} = \frac{11'21}{9'37} = 1'20 \text{ m.}$$

En el mismo proyecto concesional se anuncia una pendiente media del 0'306 por mil y un número de Manning: $n = 0'018$, con lo que resultará una velocidad media de:

$$V = \frac{1}{0'018} \times 1'2^{\frac{2}{3}} \times 0'000306^{\frac{1}{2}} = 1'10 \text{ m/seg.}, \text{ y:}$$

$$Q = S \times V = 11'21 \times 1'10 = 12'33 \text{ m}^3 / \text{seg.}$$

que resulta, incluso, superior al caudal de diseño ($10 \text{ m}^3/\text{seg.}$).

Empleando la formulación universal propuesta por este autor, y en base a la interpolación desarrollada anteriormente para una categoría de rugosidad $K = 3'4$, se tendrá una velocidad media de:

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{\frac{2 \times g \times R \times I}{I}} = \sqrt{\frac{2 \times g \times R \times I}{0'00432 \times R^{-0'302812}}} = \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 9'806 \times 1'2 \times 0'000306}{0'00432 \times 1'2^{-0'302812}}} = 1'33 \text{ m/seg.}, \end{aligned}$$

lo que implicaría un caudal circulante de:

$Q = 11'21 \times 1'33 = 14'91 \text{ m}^3/\text{seg.}$, que resulta ser bastante superior al supuesto en el expresado proyecto concesional.

Así pues, veamos que el diseño hidráulico de este canal podría ser un tanto contradictorio. Como ya se ha visto, para este tipo de sección transversal trapezoidal, y suponiendo una sección mojada de $11'21 \text{ m}^2$, con un gasto de $10 \text{ m}^3/\text{seg.}$, se tendría una geometría óptima (sección de máximo rendimiento hidráulico) de:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{10}{11'21} = 0'89 \text{ m/seg.}, \text{ y las siguientes dimensiones:}$$

$$L = 2'092 \times \sqrt{11'21} = 7'00 \text{ m.}$$

$$l = 0'613 \times \sqrt{11'21} = 2'05 \text{ m.}$$

$$L = 0'74 \times \sqrt{11'21} = 2'48 \text{ m.}$$

$$c = l + L = 2'05 + 7'00 = 9'05 \text{ m.}$$

$$R = \frac{S}{c} = \frac{11'21}{9'05} = 1'24 \text{ m.}$$

lo que exigiría una pendiente motriz media de sólo:

$$I = \frac{I \times V^2}{2 \times g \times R} = \frac{0'00432 \times R^{-0'302812} \times V^2}{2 \times g \times R} = \frac{0'00432 \times 0'89^2}{2 \times 9'806 \times 1'24^{1'302812}} =$$

= 0'000132 m/m. = 0'132 por mil, que resultaría bastante inferior a la prevista de 0'306 por mil.

5. ACUEDUCTO TOSCÀ

5.1. Trabajando como conducción libre

Para salvar el barranco del mismo nombre, se construyó en su día un acueducto soportado por pilares, en el p.k. 8'5 de la conducción. De hecho, a lo largo del canal existente, se observan varios de estos acueductos de características geométricas similares. Se trata de una sección transversal rectangular del tipo:

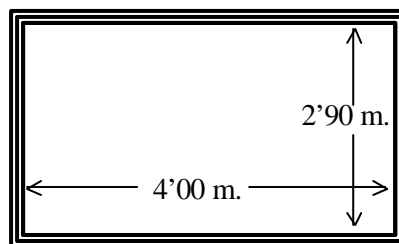
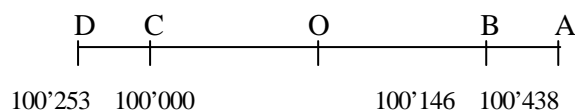


Fig. 6. Sección transversal de los acueductos

El esquema lineal del acueducto es el siguiente, con las cotas de la solera correspondientes:



Distancias:

$$AD = 247'0 \text{ m.}$$

$$CB = 241'6 \text{ m.}$$

En el tramo AD, se tendría una pendiente motriz de:

$$I = \frac{(100'438 - 100'253)\text{m.}}{247'0 \text{ m.}} = 0'000749 \text{ m/m.}$$

, con una pendiente motriz menor en el tramo CB (comprobada *in situ* taquimétricamente por el que suscribe), de:

$$I = \frac{(100'146 - 100'000)\text{m.}}{241'6 \text{ m.}} = 0'000604 \text{ m/m.}$$

, por lo que adoptaremos prudentemente el valor: $I = 0'0006 \text{ m/m}$. Se pueden analizar dos casos o situaciones diferentes:

a) Sección llena:

$$\left. \begin{array}{l} S = 4 \times 2'90 = 11'60 \text{ m}^2 \\ c = 4 + 2 \times 2'90 = 9'80 \text{ m.} \end{array} \right\} R = \frac{S}{c} = 1'18 \text{ m.}$$

La formulación de Manning-Strickler, ofrecerá:

$$V = \frac{1}{0'014} \times 1'18^{\frac{2}{3}} \times 0'0006^{\frac{1}{2}} = 1'95 \text{ m/seg.}$$

$$Q = 11'60 \times 1'95 = 22'66 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

b) Sección con resguardo hidráulico:

Con un resguardo hidráulico de 30 cm., como siempre, se tendrá:

$$S = 4 \times 2'60 = 10'40 \text{ m}^2, c = 4 + 2 \times 2'60 = 9'20 \text{ m.}; R = \frac{S}{c} = 1'13 \text{ m.}$$

$$V = \frac{1}{0'014} \times 1'13^{\frac{2}{3}} \times 0'0006^{\frac{1}{2}} = 1'90 \text{ m/seg.}$$

$$Q = 10'40 \times 1'90 = 19'76 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

Si ahora aplicamos, para el cálculo del caudal circulante por el acueducto, la formulación múltiple propuesta por este autor, se tendrá (suponiendo una categoría de rugosidad $K = 2'5$, habida cuenta de la técnica constructiva empleada en paredes y solera):

$$\begin{aligned} Q &= 4'43 \times c \times I^{0'5} \times R^{1'6503} \times e^{3'0883 - 0'10925 \times K} = \\ &= 4'43 \times 9'20 \times 0'0006^{0'5} \times 1'13^{1'6503} \times e^{2'815175} = 20'40 \text{ m}^3 / \text{seg.}, \end{aligned}$$

con una velocidad media de:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{20'40}{10'40} = 1'96 \text{ m/seg.}$$

que ofrecen resultados similares a los obtenidos por aplicación de la fórmula de Manning-Strickler.

Veamos, en fin, que el citado acueducto de Toscà constituye un cierto estrangulamiento en la capacidad portante media del canal Xerta-Sénia, puesto que con un resguardo hidráulico de 0'30 m. ofrece caudales circulantes del orden de 20 m³/seg. frente a los 26-28 m³/seg. del resto de la conducción ya construida, para una pendiente media de $I = 0'0003 \text{ m./m.}$

Por otra parte, al tratarse de una sección mojada rectangular, puede considerarse como un caso límite de la sección trapezoidal en la cual $\alpha = 90^\circ$, por lo que la sección hidráulica óptima (o de caudal máximo) debería ser capaz de minimizar la función del contorno o perímetro mojado, a saber:

$$c(h) = \frac{S}{h} + 2h$$

que al derivar e igualar a cero (condición necesaria o de primer grado) ofrece:

$$c'(h) = -\frac{S}{h^2} + 2 = 0$$

Condición suficiente o de segundo grado:

$$c''(h) = \frac{2hS}{h^4} = \frac{2S}{h^3}, \text{ con lo que:}$$

$$c''(h) = \frac{4h^2}{h^3} = \frac{4}{h} > 0, \text{ luego se trata, efectivamente, de un}$$

mínimo relativo o local.

$$\text{De donde: } S = 2 \cdot h^2 \text{ y } l = 2 \cdot h; R = \frac{2h^2}{4h} = \frac{h}{2}$$

Luego la sección rectangular hidráulica óptima es el semicuarto circunscriptible al semicírculo de centro **0** y radio **h**. Esto es:

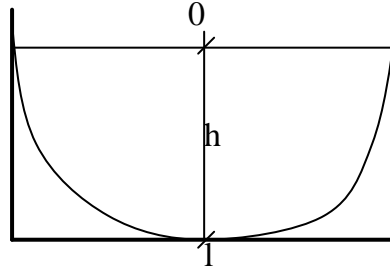


Fig. 7. Estudio teórico de la sección rectangular

Generalizando, podemos decir que en toda sección transversal de máximo caudal puede inscribirse siempre un semicírculo que tiene su centro en el punto medio de la superficie del agua.

En esta tesitura, las dimensiones óptimas de dicho acueducto serán:

$10'40 = 2 \cdot h^2$; de dónde: $h = \sqrt{\frac{10'40}{2}} = 2'28 \text{ m.}$ y $l = 2 \cdot h = 2 \cdot 2'28 = 4'56 \text{ m.}$, valores dimensionales que resultan ligeramente diferentes de los existentes en dicho acueducto que, por otra parte, como hemos visto, resulta insuficiente para transportar el caudal previsto para el resto de la conducción ya ejecutada ($26\text{-}28 \text{ m}^3/\text{seg.}$). Ello podría obviarse mediante su refuerzo con tuberías laterales en *by-pass*, mediante la construcción de otro acueducto paralelo o bien aumentando la velocidad media de circulación mediante bombeo centrífugo o por ruedas hidróforas. En este último caso, respetando el resguardo hidráulico, sería necesaria una velocidad media en el acueducto reseñado, para un caudal de $27 \text{ m}^3/\text{seg.}$, del orden de:

$$V = Q/S = 27'00/10'40 = 2'60 \text{ m./seg.}$$

5.2. Trabajando como conducción ligeramente forzada

Si ahora consideramos que esta sección podría trabajar, en cierto modo, como una conducción forzada (con cierta presión), se tendría:

$$c = 8 + 2 \times 2'90 = 13'80 \text{ m.} ; R = \frac{S}{c} = \frac{11'60}{13'80} = 0'84 \text{ m.}$$

$V = \frac{1}{0'014} \times 0'84^{\frac{2}{3}} \times 0'0006^{\frac{1}{2}} = 1'56 \text{ m./seg.}$, que ofrecería un caudal circulante máximo de:

$Q = 11'60 \times 1'56 = 18'10 \text{ m}^3/\text{seg.}$, inferior incluso al supuesto en el caso anterior de comportamiento hidráulico como conducción libre, tanto a tubo lleno como considerando 30 cm. de resguardo hidráulico.

Resulta conveniente, complementariamente, contrastar los valores obtenidos hasta ahora con los que resultan de la aplicación de la fórmula de Hazen-Williams (1920), muy utilizada en USA para el cálculo de tuberías con movimiento turbulento intermedio (en la zona de transición). En efecto, en este tipo de circulación, el coeficiente de fricción depende del número de Reynolds, o sea:

$$f \approx \frac{1}{\text{Re}^n} \quad \text{o bien : } J \approx V^{2-n}$$

Esta dependencia será intermedia entre la que corresponde a tuberías plenamente rugosas, para las cuales $n = 0$, y la de tuberías lisas, en las cuales, para la zona cubierta por la fórmula de Blasius, se produce que: $n = \frac{1}{4}$.

Luego en la zona de transición expresada (para $n = 1/8$), se puede escribir en términos aproximados:

$$f \approx \frac{1}{\text{Re}^{0'125}}$$

es decir:

$$J \approx V^{2-0'125} = V^{1'875}$$

o bien:

$$V \approx J^{0'54}$$

que es, en realidad, la proporcionalidad directa que caracteriza a la mencionada fórmula de Hazen-Williams (aunque quizás fuera más preciso referirla a $J^{0'53}$).

Así pues, se tendría una velocidad media del orden de (expresada en unidades métricas):

$$V = 0'85 \times C \times R^{0'63} \times J^{0'54}$$

Tomando un valor: $C = 128$ (para tubos de hormigón armado), se tendrá una velocidad media de:

$$V = 0'85 \times 128 \times 0'84^{0'63} \times 0'0006^{0'54} = 1'77 \text{ m./seg.},$$

que ofrecería un caudal circulante de:

$$Q = 11'60 \times 1'77 = 20'53 \text{ m}^3/\text{seg.},$$

que resulta intermedio entre los anteriormente hallados, por lo que podría proponerse a los efectos de su adopción.

Notemos, en fin, que el campo de aplicación de esta fórmula viene definido por los valores del nº de Reynolds (normal y de rugosidad) de:

Re > 4.000, o bien:

$0'3 < Re^* < 60.$

Por todo lo expuesto y detallado, como resumen y síntesis de ello, y a tenor de las cuestiones y conceptos sobre los que debo informar, puedo afirmar y

AFIRMO QUE:

1º) Se trata aquí del estudio hidráulico del denominado “canal Xerta-Sénia” ya construido parcialmente entre los años 1972 y 1980, con una longitud de 33’816 km., distancia entre juntas de dilatación de 75/100 metros, distancia entre juntas de hormigonado de 2’10-2’20 m., sección transversal semicircular en su tramo principal y una capacidad portante teórica (según se afirma en el proyecto de concesión) de 19 m³/seg., para el abastecimiento de agua de riego a una zona regable de 16.480 Has. de las comarcas tarraconenses del *Baix Ebre* (44’7% de la superficie) y *Montsià* (55’3% de la superficie), abarcando 12 términos municipales, cuatro en la primera comarca y ocho en la segunda. Arranca a 3.524 metros del origen primitivo, situado en el embalse de la *Vall de l’Infern*. Dicha zona se halla comprendida aproximadamente entre el azud de Xerta, el canal de la Derecha del Ebro, el río Sénia y la cota taquimétrica 200 m.s.n.m. El proyecto técnico inicial se aprobó en agosto de 1972, habiéndose iniciado las obras en enero de 1973 y recibíendose provisionalmente el 18 de junio de 1980. Hace pocas semanas se otorgó, por parte de la Confederación Hidrográfica del Ebro, la pertinente concesión administrativa de aguas, con un volumen anual de 72 hm³ y un caudal punta de 10 m³/seg.

2º) Realizados los cálculos hidráulicos correspondientes, empleando diversas formulaciones universalmente reconocidas así como las propias propuestas por el Ingeniero que suscribe, resulta que la capacidad portante del tramo construido del canal Xerta-Sénia es del orden de 26-28 m³/seg., que resultan ser los precisos para conducir, en caudal ficticio continuo, los 850 hm³ anuales que se proyectan transferir desde el río Ebro hacia las cuencas hidrográficas del Júcar, Segura y Almería (Sur) en el vigente Plan Hidrológico Nacional, aprobado por la Ley 10/2001, de 5 de julio.

3º) Existen, además, diversos procedimientos para incrementar el caudal a transportar por la conducción ya construida. En cualquier caso, la velocidad de circulación del agua por este canal y, consecuentemente, el caudal portante, podrían verse incrementados considerablemente efectuando un sellado de juntas con banda de polipropileno o cinta de PVC, que puede aplicarse tanto en juntas estrechas como anchas, independientemente del hecho de que la junta a que sustituya sea de berenjeno relleno de arcilla o producto asfáltico. En algunos tramos de este canal, habida cuenta del tiempo transcurrido desde su construcción, el hormigón puede encontrarse con cierto grado de degradación, lo que provocaría un elevado número de filtraciones, tanto por las juntas como por la aparición de fisuras. Cabría también la posibilidad de impermeabilizar el canal con láminas de PVC en toda la sección, previa la limpieza de la superficie de apoyo de la lámina, colocación de un geotextil y colocación de la lámina por tramos, con longitudes que puedan facilitar su manejo. La fijación lateral,

aunque se puede realizar con mortero tixotrópico (caro) también podría efectuarse mediante pletinas de aluminio o de PVC, para evitar su oxidación. La fijación transversal se llevaría a cabo cada 50 metros para evitar que las tracciones del agua puedan producir su rotura. Estas fijaciones transversales se realizarían con mortero tixotrópico, con dos capas de extensión del mismo, sujetando la lámina al estar perforada en los bordes. Si se considera, por último, que el recrecimiento de la sección semicircular ya construida podría realizarse con facilidad (mediante aceros redondos corrugados empotrados en el borde superior del paramento existente a distancias convenientes, colocación de cercos de varilla, estribos o mallazo electrosoldado y su posterior encofrado y hormigonado *in situ*), el caudal circulante por ella podría alcanzar razonablemente las “puntas” o máximos precisos (35-40 m³/seg.) para efectuar el trasvase previsto en el Plan Hidrológico Nacional hacia las cuencas hidrográficas del Júcar, Segura y Almería (Sur), sin necesidad alguna de recurrir a la construcción de cualquier otra conducción libre o forzada, a tal efecto.

4º) Hay que tener en cuenta, en fin, que de no circular por el cauce del canal todo el caudal con su correspondiente calado, sería posible e incluso necesario construir represamientos o vertederos sumergidos que mantuvieran el nivel adecuado por encima del correspondiente “colchón de agua”, al objeto de unificar la profundidad de las tomas y disminuir la altura manométrica de elevación de los bombeos intermedios hasta las balsas de regulación proyectadas (en número de 18, con capacidad para almacenar tres días de consumo máximo y posterior distribución a toda la red de riego). Ello puede presentarse en este caso, habida cuenta de que las necesidades de caudal de la zona regable proyectada (16.480 has.) son bastante inferiores a la capacidad portante de la conducción principal, como ya se ha comprobado, por lo que el nivel de la lámina de agua correspondiente a la sección mojada necesaria sería muy bajo.

5º) Por lo que se refiere al diseño hidráulico del denominado “canal principal”, que recoge el agua directamente de las tuberías de impulsión de la estación de bombeo de Xerta para empalmar con la sección semicircular actualmente construida, veamos que podría ser un tanto contradictorio. Calculados los caudales o capacidad portante del mismo, se observa un caudal potencialmente circulante de 14'91 m³/seg., que resulta ser bastante superior al supuesto en el expresado proyecto concesional (10 m³/seg.).

6º) Para salvar el barranco del mismo nombre, se construyó en su día un acueducto soportado por pilares, en el p.k. 8'5 de la conducción. De hecho, a lo largo del canal existente, se observan varios de estos acueductos de características geométricas similares. Veamos, en fin, que el citado acueducto de Tosca constituye un cierto estrangulamiento en la capacidad portante media del canal Xerta-Sénia, puesto que con un resguardo hidráulico de 0'30 m. ofrece caudales circulantes del orden de 20 m³/seg. frente a los 26-28 m³/seg. del resto de la conducción ya construida, para una pendiente media de $I = 0'0003$ m./m. valores dimensionales que resultan ligeramente diferentes de los existentes en dicho acueducto que, por otra parte, como hemos visto, resulta insuficiente para transportar el caudal previsto para el resto de la conducción ya

ejecutada (26-28 m³/seg.). Ello podría obviarse mediante su refuerzo con tuberías laterales en *by-pass*, mediante la construcción de otro acueducto paralelo o bien aumentando la velocidad media de circulación mediante bombeo centrífugo o por ruedas hidróforas. En este último caso, respetando el resguardo hidráulico de 30 cm., sería necesaria una velocidad media en el acueducto reseñado, para un caudal de 27 m³/seg., del orden de 2'60 m./seg.



Dando así por finalizado el trabajo de mí recabado, que dejo sometido, como siempre, a cualquier otra opinión más autorizada que la mía.

Y en cumplimiento de la misión que me fue encomendada, llevada a cabo rectamente, según el más leal saber y entender, y para que conste a los efectos pertinentes, libro el presente DICTAMEN PERICIAL por duplicado ejemplar y a un sólo efecto, y lo firmo, rubrico y sello, en la ciudad de Tortosa (Baix Ebre), a cuatro de julio del dos mil dos.

EL INGENIERO AGRÓNOMO, Eur-Ing.:

Fdo.: José M^a Franquet Bernis.