

OBRAS DE DESVIACIÓN (Diversion Works)

Este tipo de obras se utilizan para dejar en seco la zona donde se construirá la presa y generalmente consiste en:

- **Túneles de desviación (valles estrechos) o**
- **Canales abiertos (valles de gran anchura que permiten el manejo del río).**

Una vez construida la obra de encauzamiento, es necesario construir la ataguía (cofferdam), pequeña presa de baja altura), necesaria para desviar el río hacia la nueva conducción. Esta ataguía debe tener la altura suficiente para desviar la crecida de diseño de la obra.

Dependiendo de la pendiente del río en la zona de construcción, en ocasiones es necesario construir una ataguía de aguas abajo para mantener seca la zona de obras.

CRECIDA DE DISEÑO

El riesgo de falla de las obras de desviación se puede calcular con:

$$R = 1 - (1 - (1/T))^n$$

Donde:

R: Riesgo hidrológico

T: período de retorno

n: número de años que tarda la construcción

Un valor razonable es $R = 0,15$ a $0,1$, con $n = 5$ años se obtienen períodos de retorno del orden de 30 a 50 años (valores usuales en presas de materiales de relleno, que no admiten vertimiento)

Período de retorno y seguridades asociadas = f (tipo presa)

Presas de Hormigón y/o ataguías hormigón: Tr: 5 a 10 años

Presas de Tierra y/o ataguías de tierra: Tr : 20 a 50 años.

TÚNELES DE DESVIACIÓN

El diseño de las obras de desviación considera normalmente:

- Ataguías de aguas arriba y de aguas abajo
- Portal de entrada a los túneles
- Túnel de desviación
- Portal de salida de los túneles

En el diseño de ataguías aplican las recomendaciones generales revisadas para el caso de presas de relleno, pero se debe tener en cuenta que corresponde a una estructura de uso temporal.

Normalmente se diseñan en escurrimiento libre, puede aceptarse escurrimiento en presión pero requiere que el túnel posea el refuerzo adecuado.

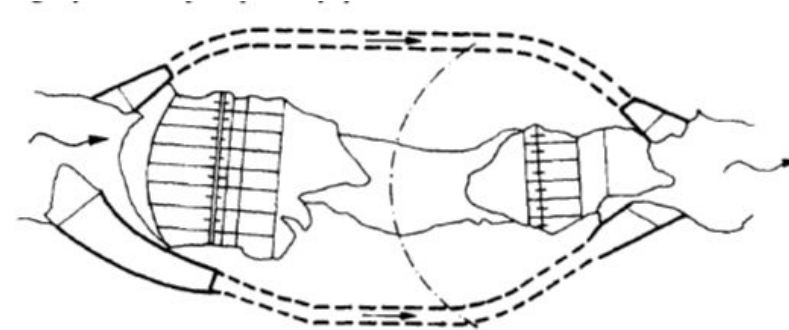
Si el caudal de diseño es muy alto, se puede utilizar varios túneles de desvío o disponer obras de desviación en ambas riberas.

El túnel de desvío puede ser cerrado después de la construcción (tapón de cierre), o podría ser utilizado para ubicar el desagüe de fondo (bottom outlet) o la estructura de toma de agua (water intake)

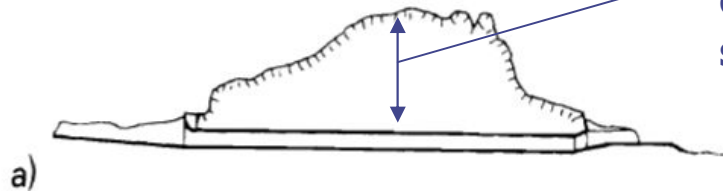
La configuración de los túneles depende fundamentalmente de la pendiente disponible, para pendientes bajas el diseño es en régimen subcrítico.

En el caso de pendientes altas, se podría tener un régimen supercrítico que tienda desde la sección de control aguas arriba a régimen uniforme

Por razones constructivas, se recomienda que la pendiente no sea superior al 10%

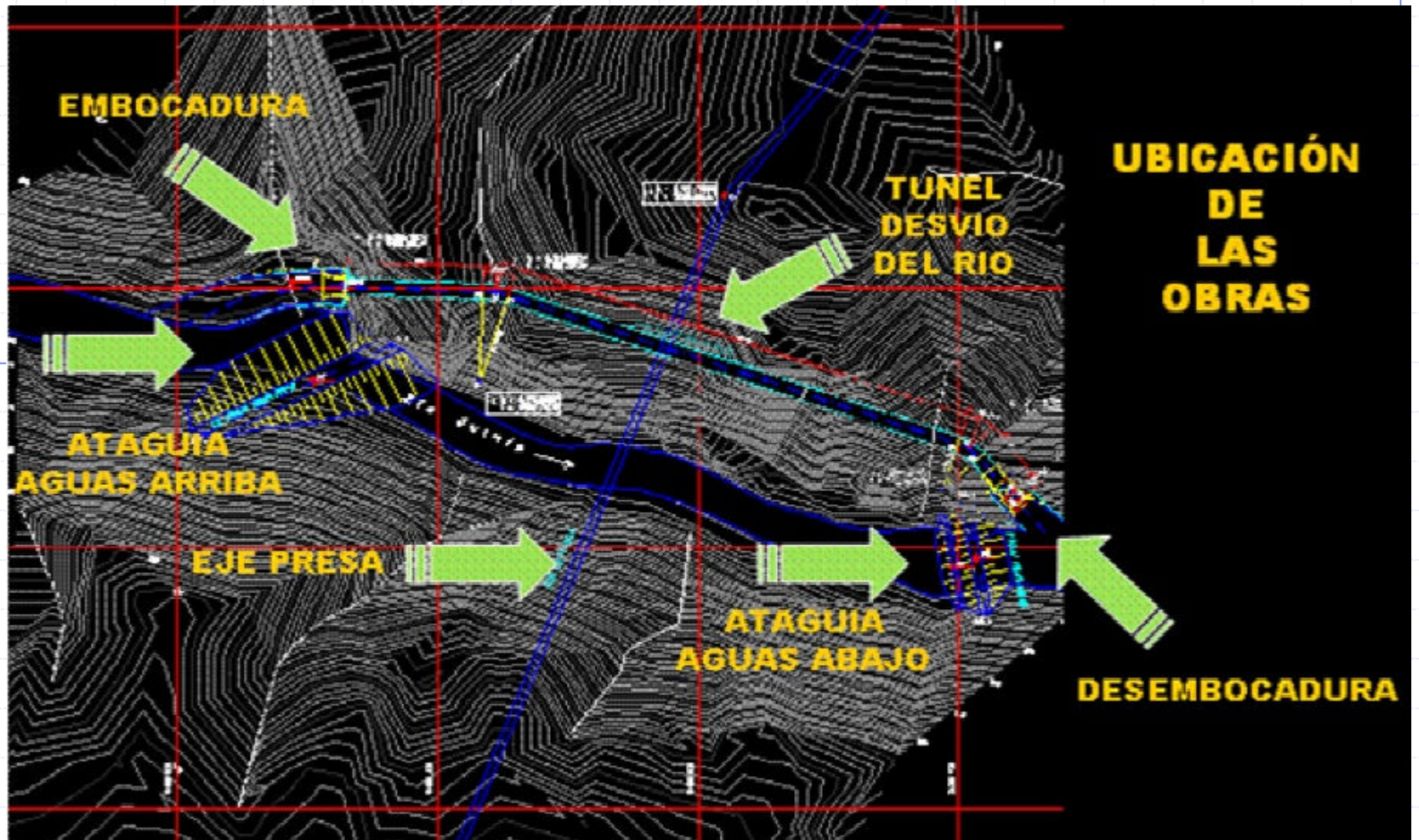


0 [m] 200



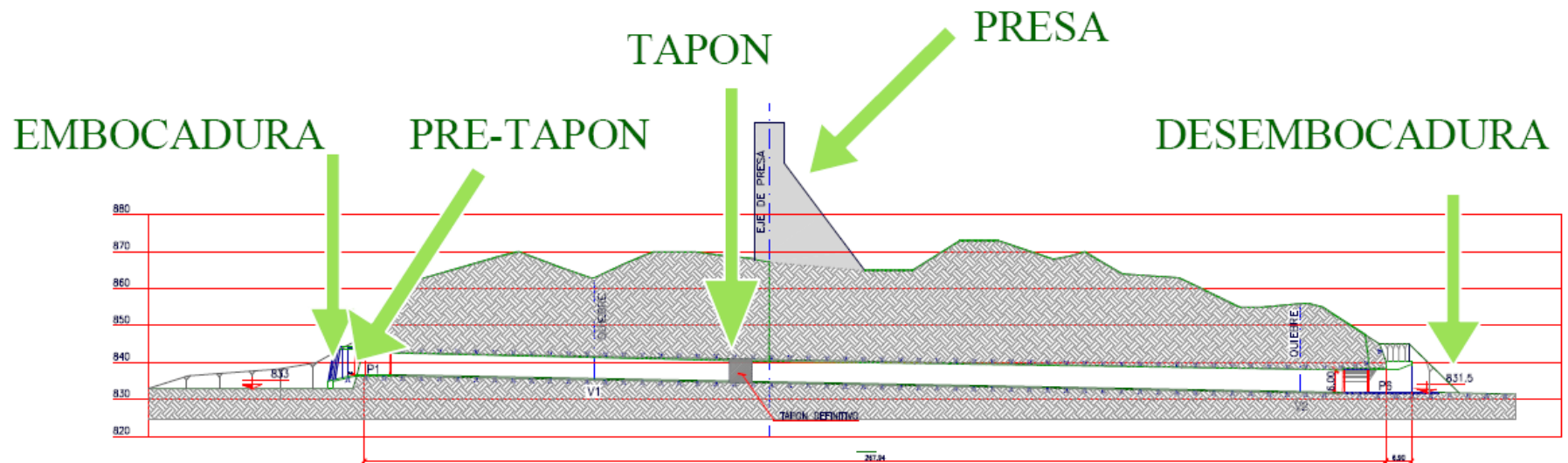
**Cobertura o
cubierta de roca
sobre el túnel**

Obras de Desvío para construcción de presas.



Obras de Desvío

Perfil Longitudinal



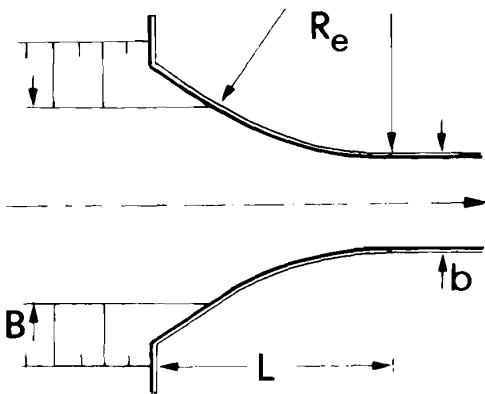
Ataguia y Entrada a Túneles de Desvío



Estructura de entrada

La sección inicial corresponde al diseño de una transición (Ver Capítulo 2)

Un diseño simplificado corresponde al siguiente (Dam Hydraulics, Vischer y Hager)



$$L = 1,25 * (B-b)$$

$$Re = 1,65 * (B-b)$$

$$\Delta H_e = 0.06(1 - \beta_e) \frac{V_t^2}{2g}$$

$$\beta_e = b/B$$

$$V_t: \text{velocidad aguas abajo} = Q / (b * h_t)$$

En la estructura de entrada se disponen compuertas que efectuar el cierre del túnel y por tanto deben soportar adecuadamente la carga de agua del embalse.

Las velocidades máximas usuales en la zona de compuertas pueden llegar a ser del orden de 6 – 10 m/s para el caudal de diseño.

En el diseño de la obra de entrada son aplicables las recomendaciones relativas al diseño de transiciones (ver Cap. 2), no obstante lo anterior, se debe tener en cuenta que esta obra corresponde a una obra de funcionamiento temporal.

Obra de Toma: incluye obra de entrada y estructuras de compuertas externa o interna.

Estructura de cierre externa.



Acceso a Tapón y estructura de cierre interna.

Entrada Túnel Desvío



Túnel de Desvío

Se debe calcular el eje hidráulico (EH) a lo largo del túnel, para lo cual se tener en cuenta la condición de borde (CB) aguas arriba o aguas abajo según sea el caso.

Régimen de escurrimiento en túnel:

Normal: régimen de río => verificar EH del río en la salida, se calcula como una alcantarilla con control de salida, se puede diseñar como acueducto estable o bien francamente en presión o semi en presión.

Especiales: régimen torrencial, se calcula como acueducto estable, debiéndose definir una cubeta disipadora o bien un salto de esquí en su extremo terminal => verificar que erosión en obra de salida no comprometa presa o ataguías.

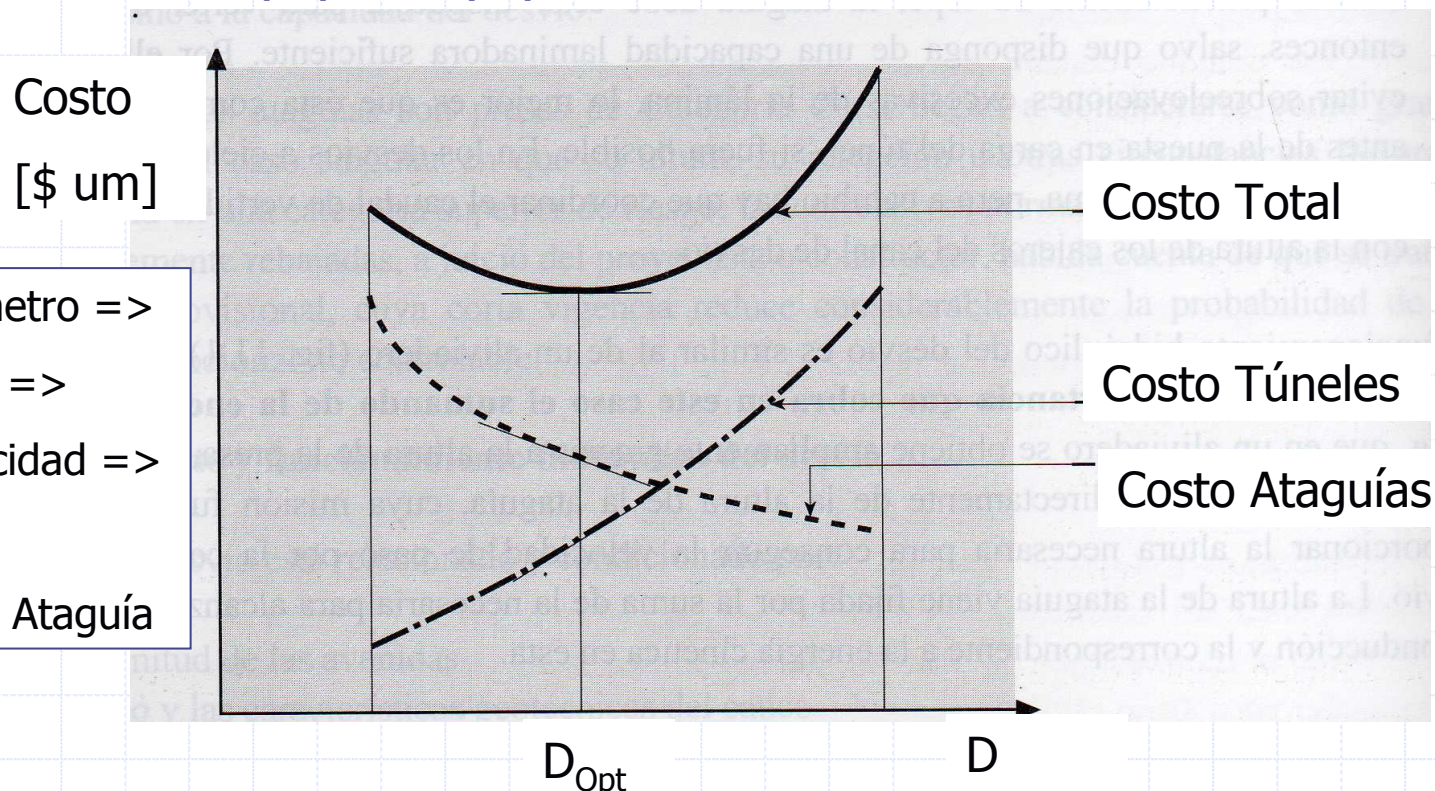
**DE ACUERDO A ESTOS
CÁLCULOS SE DEFINEN LAS
COTAS DE LAS ATAGUÍAS.**



TÚNELES DE DESVIACIÓN ELECCIÓN DEL DIÁMETRO ECONÓMICO

La elección del diámetro económico puede ser analizado desde el punto de vista económico, considerando que el costo total se compone esencialmente de:

- Costo de las ataguías
- Costo del(os) túnel(es) de desviación



TÚNELES

VELOCIDADES ADMISIBLES

Independientemente de los resultados que puedan obtenerse de los estudios económicos, es recomendable respetar algunos valores límites de la velocidad del flujo por el interior de los túneles, los que son producto de la buena práctica de la ingeniería y de la experiencia acumulada a través del tiempo.

Las velocidades máximas normalmente aceptadas son superiores a 5 m/s e inferiores a 10 m/s (12 m/s) para la condición de diseño.

En casos específicos, se admite que el túnel para la condición de diseño opere en presión en atención a que se trata de una obra temporal.

Túneles de escurrimiento libre

Estos túneles, de escurrimiento libre, pueden ser de sección circular, herradura normal, herradura de fondo plano, sección medio punto, etc.

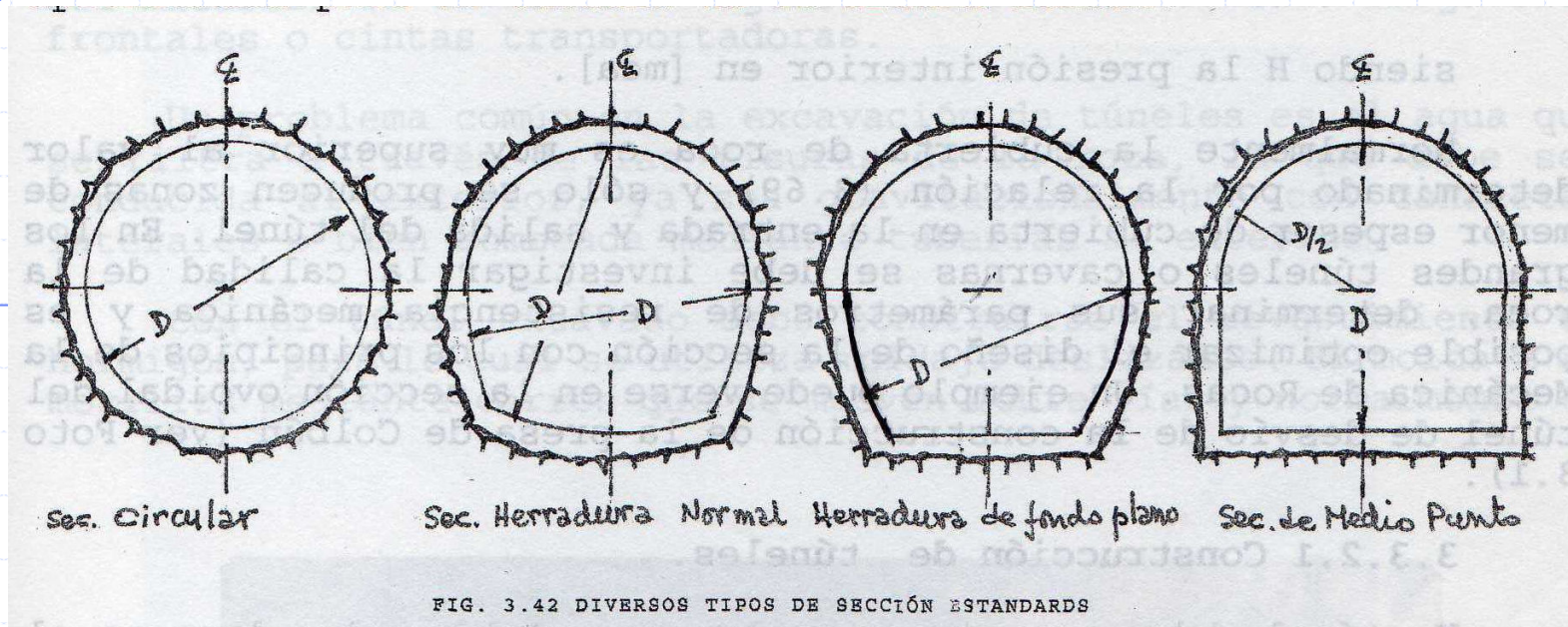
Debe recordarse de la Hidráulica, que en las secciones abovedadas, cuando el nivel es cercano a la clave presentan un máximo del caudal en la curva de descarga ($h/D = 0,94$), mayor que el sección llena.

Se recomienda diseñar un túnel acueducto con la altura de escurrimiento en el rango:

$$0,70 < h/D \leq 0,8$$

Sección mínima constructiva: Abovedadas de diámetros cercanos a 3,2 m, rectangulares de 2,0 m de ancho por 2,2 m de alto.

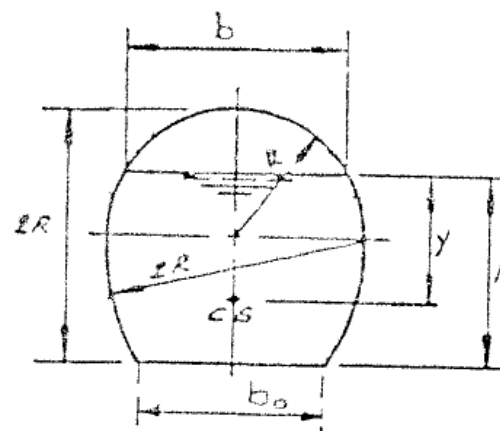
Tipos de Sección de Túnel



h/R	A/R^2	R_h/R	b/R	y/R
0.05	0.0746	0.0473	1.5199	0.0248
0.10	0.1519	0.0898	1.5721	0.0494
0.15	0.2318	0.1286	1.6208	0.0737
0.20	0.3140	0.1642	1.6661	0.0979
0.25	0.3983	0.1971	1.7081	0.1218
0.30	0.4847	0.2278	1.7470	0.1456
0.35	0.5730	0.2564	1.7829	0.1693
0.40	0.6629	0.2833	1.8158	0.1929
0.45	0.7545	0.3087	1.8458	0.2165
0.50	0.8475	0.3326	1.8730	0.2400
0.55	0.9418	0.3553	1.8974	0.2635
0.60	1.0372	0.3767	1.9192	0.2869
0.65	1.1336	0.3971	1.9383	0.3104
0.70	1.2310	0.4164	1.9547	0.3339
0.75	1.3291	0.4347	1.9686	0.3574
0.80	1.4278	0.4521	1.9799	0.3809
0.85	1.5270	0.4687	1.9887	0.4045
0.90	1.6266	0.4843	1.9950	0.4282
0.95	1.7265	0.4992	1.9987	0.4520
1.00	1.8264	0.5133	2.0000	0.4759
1.05	1.9264	0.5266	1.9975	0.4999
1.10	2.0261	0.5392	1.9900	0.5241
1.15	2.1253	0.5507	1.9774	0.5485
1.20	2.2238	0.5614	1.9596	0.5731
1.25	2.3212	0.5712	1.9365	0.5980
1.30	2.4173	0.5800	1.9079	0.6232
1.35	2.5119	0.5878	1.8735	0.6488
1.40	2.6046	0.5944	1.8330	0.6748
1.45	2.6951	0.6000	1.7861	0.7013
1.50	2.7831	0.6043	1.7321	0.7284
1.55	2.8682	0.6072	1.6703	0.7560
1.60	2.9499	0.6088	1.6000	0.7844
1.65	3.0280	0.6088	1.5199	0.8135
1.70	3.1017	0.6071	1.4283	0.8436
1.75	3.1706	0.6034	1.3229	0.8747
1.80	3.2337	0.5974	1.2000	0.9072
1.85	3.2902	0.5885	1.0536	0.9412
1.90	3.3385	0.5758	0.8718	0.9772
1.95	3.3763	0.5567	0.6245	1.0160
2.00	3.3972	0.5070	0.0000	1.0596

Sección Herradura de Fondo Plano.

Elementos geométricos



A = AREA MOJADA

R_h = RADIO HIDRAULICO

b = ANCHO SUPERFICIAL

$$b_0/R = 1.4641$$

Cálculo h_n y h_c

Sección Herradura de fondo plano

Altura Normal

Q [m³/s]	600,0
n	0,0250
i	0,006
D [m]	11
R [m]	5,5
h [m]	8,52
h/R	1,548
A/R²	2,866
A [m²]	86,7
Rh/R	0,607
Rh [m]	3,34
FO	0,000

Altura Crítica

h [m]	7,12
h/R	1,295
A/R²	2,407
A [m²]	72,8
b/ R	1,911
b [m]	10,51
FO	0,000

Condición Hidráulica

SubCrítico (Río)

h/D	0,774
-----	--------------

Túneles de escurrimiento en presión

En este tipo de túneles debe dejarse una cubierta de roca que asegure la estabilidad de la construcción, el espesor mínimo o cubierta de roca sobre la clave del túnel varía entre 2 y 4 veces el diámetro.

El espesor de roca que tiene un peso equivalente a la fuerza de presión sobre la bóveda es

$$e = \frac{\gamma}{\gamma_s} \cdot H$$

H : Presión interior [mca]

Normalmente, la cubierta de roca es muy superior al requerido, salvo en la zona de entrada y salida del túnel.

En los grandes túneles o cavernas se debe investigar la calidad de la roca, determinar sus parámetros de resistencia mecánica y optimizar el diseño del túnel según los principios de la Mecánica de rocas.

Rugosidad de un túnel revestido (lined)

El flujo en un túnel es normalmente turbulento y se puede utilizar la formula de Manning (n) o la de Darcy (f). La equivalencia entre f y n, se puede expresar

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{R_h^{1/6}}{n \cdot \sqrt{g}} \quad f = \frac{8 \cdot n^2 \cdot g}{R_h^{1/3}}$$

$$f = 124,45 \cdot \frac{n^2}{D^{1/3}} \quad \text{Sección circular}$$

En cuanto a las rugosidades, se usan normalmente los siguientes valores:

<u>MATERIAL</u>	<u>COEF. DE RUGOSIDAD (n)</u>
Hormigón proyectado	0,020-0,025
Hormigón colocado con molde metálico	0,011-0,014

Rugosidad de un túnel no revestido

En régimen turbulento rugoso, f , depende solamente de la rugosidad relativa (D_e/k_e) y se puede aplicar la relación de Prandtl-von Karman:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 * \log\left(\frac{D_e}{K_e}\right) + 1,14$$

D_e : Diámetro equivalente

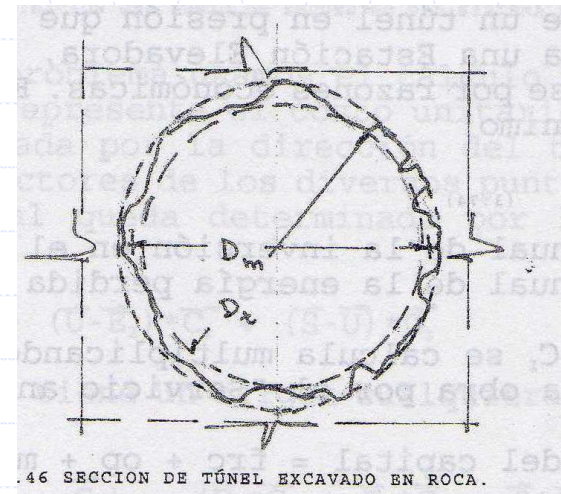
k_e : tamaño equivalente de las asperezas de la pared

$$K_e = D_m - D_t$$

D_m : diámetro que representa la sección media excavada

D_t : diámetro teórico interior libre

$$K_e / D_m = 1 - D_t / D_m = 1 - (A_t / A_m)^{1/2}$$



Rahm (10 túneles en USA y 8 en Suecia)

$$\sqrt{\frac{1}{f_m}} = 4 * \log\left(\frac{D_m}{K_e}\right) - 0,92$$

Proyecto	Tipo de roca	D _m	k _e	D _m /k _e	f _t	f _m
Cresta	G	8,81 [m]	0,55 [m]	16,4	0,0645	0,075
Wes Point	"	5,12	0,52	10,0	0,1053	0,080
Bear River	"	3,32	0,21	16,4	0,0645	0,066
Balch	"	4,48	0,36	13,0	0,0802	0,079
Haas	"	4,66	0,46	10,7	0,0980	0,068
Kings River	"	4,85	0,30	14,7	0,0704	0,071
Cherry	"	4,21	0,24	17,3	0,0614	0,090
Jai Bird	"	4,78	0,21	21,3	0,0519	0,077
Apalachia	Cta-P	7,13	0,43	16,7	0,0634	0,095
Alfta	G-Gn	6,46	0,30	17,3	0,0614	0,086
Harsprånget	G	16,09	0,55	28,6	0,0416	0,052
Järpstrommen	P-Esqu	12,04	0,49	23,8	0,0476	0,048
Krokstrommen	G	11,34	0,64	17,9	0,0548	0,048
Porjus I	G-Gn	8,56	0,58	14,9	0,0704	0,073
Porjus II	"	8,84	0,85	10,2	0,1031	0,055
Selsfore	G-P	10,12	0,70	14,9	0,0704	0,114
Sillse	Gn	2,90	0,36	7,8	0,1425	0,102
Sunnerstaholm	G-Gn	6,77	0,61	11,6	0,0885	0,104
Tipo de roca						
Granito.....	G					
Cuarcita.....	Cta					
Pizarra.....	P					
Gneiss.....	Gn					
Esquisto.....	Esqu					

En cuanto al coeficiente de rugosidad de Manning (n), normalmente se adoptan los siguientes valores:

MATERIAL

COEF. DE RUGOSIDAD (n)

Roca a la vista

0,030-0,040

Rugosidad equivalente

Cuando la sección transversal del túnel está parcialmente revestida o tiene revestimientos de distinto tipo en el radier y las paredes (*por ejemplo, radier de hormigón y paredes y bóveda con hormigón proyectado*), la pérdida de carga se calcula aplicando Manning, pero con un **coeficiente de rugosidad ponderado**, que se calcula con la siguiente fórmula:

$$n_{\text{equiv}} = \left(\sum (p_i n_i^{3/2} / p) \right)^{2/3}$$

En que los p_i son los tramos de perímetros con rugosidad n_i constituyentes del perímetro mojado total p .

Obra de salida: se restituyen las aguas al cauce del río, considerando la condición de borde de aguas abajo. Se recomienda que el flujo en la salida del túnel sea no sumergido

Salida Túnel Desvío

Atabajo



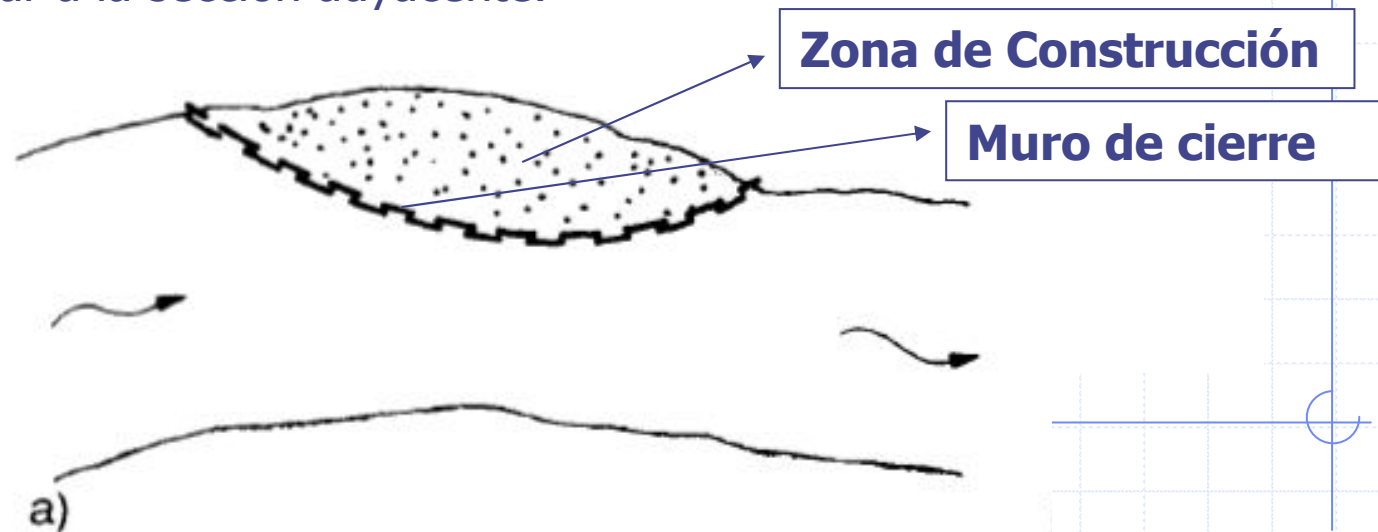
Principales Recomendaciones de Diseño

- Período de retorno y seguridades asociadas = f (tipo presa). Presas de hormigón (T_r : 5 – 10 años) y presas de tierra o enrocados (T_r : 20 - 50 años)
- Régimen de escurrimiento en túnel. Normalmente se diseñan en régimen subcrítico eventualmente se acepta régimen supercrítico.
- Tipo de sección, la sección más ampliamente utilizada es la herradura o herradura de fondo plano.
- Tipo de revestimiento, en general se utilizan túneles no revestidos, salvo tramo muy específicos que lo requieran.
- Deben verificarse que la velocidad de escurrimiento sea menor a la velocidad máxima admisible.
- Obras de entrada, considera compuertas que deben operar con la carga máxima del embalse (después del cierre)
- Se debe analizar el posible uso como desagüe de fondo (opcional) o como obra de entrega.
- La revancha de las ataguías debe considerar al menos 2 m sobre el nivel del agua en la condición de diseño.

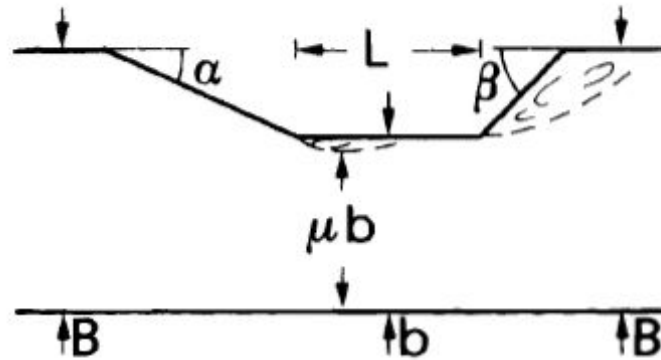
Canal de Desviación

Una opción a la utilización de túneles de desviación, es utilizar un canal como estructura de construcción.

El uso de este tipo de solución requiere contraer lateralmente el río e iniciar la construcción en la sección contraída, depende fuertemente de las condiciones del sitio de interés. En una segunda etapa, la parte construida de la presa (obras) puede conducir una parte del caudal pasante y la construcción puede continuar a la sección adyacente.



Dam Hydraulics, Vischer y Hager.



Análisis Simplificado (ver Vischer y Hager, Dam Hydraulics)

El efecto de contracción del río puede ser considerable y por tanto, debe ser apropiadamente considerado en el diseño hidráulico

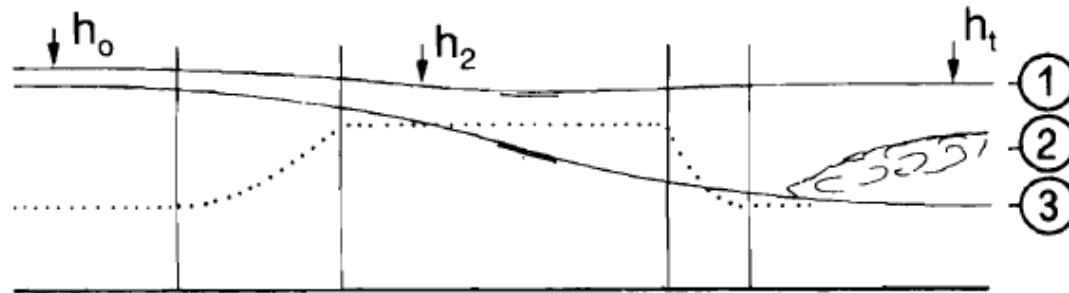
Dependiendo del caudal de diseño, la razón de anchos $\psi = b/B \leq 1$, la razón de longitudes $\lambda = L/b$ y los ángulos α y β , se pueden obtener dos tipos de escurrimientos:

- Transición desde río a torrente para una contracción fuerte .
- Flujo subcrítico en todo el tramo para una contracción débil.

(caso típico, ya que una contracción fuerte causa problemas de sumergencia y erosión aguas abajo)

Caso Flujo subcritico (CB aguas abajo (h_t))

Dependiendo de la condición de borde aguas abajo, se puede tener los casos 1, 2 y 3 (en forma análoga se puede resolver este problema con consideraciones de hidráulica clásica):



Considerando las pérdidas locales en la expansión aguas abajo y definiendo la razón $T = h_o/h_t$ como función de

$$F_t = Q/(g B^2 h_t^3)^{1/2}$$

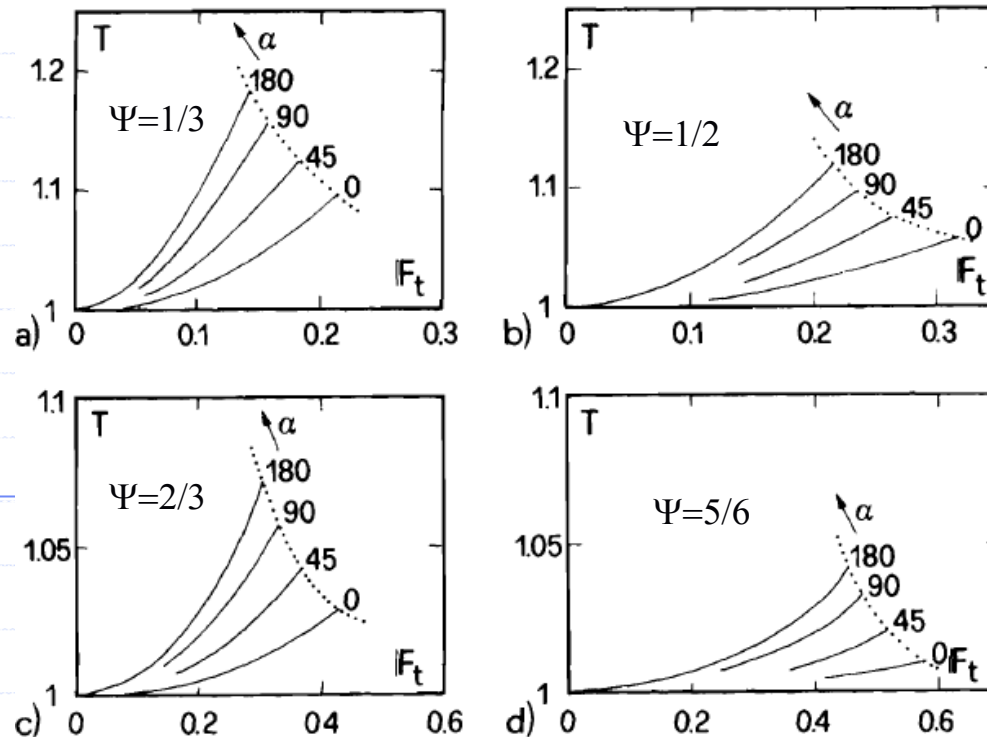


Figure 3.14
Depth ratio $T = h_o/h_t$ as a function of $F_t = Q/(g B^2 h_t^3)^{1/2}$ for various approach angles α and $\psi = (\alpha)$ 1/3, (b) 1/2, (c) 2/3, (d) 5/6

Nota: En el diseño del canal aplican las recomendaciones que se verán en el Cap. 4.