



**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS**

**EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS
MASTER DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**

**TEMA XII
TÚNELES HIDRÁULICOS**

Versión 2015

**Francisco J. Castanedo Navarro
Ingeniero de Caminos
UCM**

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	2
2.	TÚNELES EN LÁMINA LIBRE.....	4
	2.1. Sección del túnel.....	4
	2.2. Excavación.....	9
	2.3. Necesidad de soporte y refuerzo	11
	2.4. Obras especiales	16
	2.5. Deterioros de túneles en lámina libre.....	20
3.	TÚNELES A PRESIÓN.....	26
	3.1. Sección	26
	3.2. Sostenimiento y revestimiento	26

TEMA XII TÚNELES HIDRÁULICOS

1. INTRODUCCIÓN

Los condicionantes para el diseño y ejecución de los túneles hidráulicos tienen singularidades que hacen necesario que el proyectista o ejecutor tenga unos conocimientos mínimos de estas singularidades.

Las tres principales diferencias respecto a túneles de otras finalidades son:

- Puedan llevar presión interior, que puede ser incluso superior a la del terreno y por tanto provocar esfuerzos de tracción en el sostenimiento.
- El rigor de seguir un trazado no es importante, ya que los fluidos se adoptan bien al cambio de dirección.
- Las dimensiones varían de 2,50 a 6 metros, aunque la mayoría de los túneles hidráulicos necesitan un gálibo horizontal entre 1,80 y 4 metros. Sin embargo, la anchura mínima por condicionantes constructivos puede considerarse de 2,50 metros para excavación convencional y de 2,80 metros para empleo de tuneladora.
- El mantenimiento o conservación es incompatible con la funcionalidad, lo que obliga a detener el paso del fluido durante periodos en que se realice la conservación.

La pérdida de ingresos de explotación durante esos periodos debe tenerse en cuenta para la valoración de la solución de sostenimiento más adecuada.

Dentro de la finalidad general de estos túneles que es la de conducir agua o un fluido, existe una gran variedad respecto a sus usos:

- Aprovechamiento hidroeléctrico, lo que obliga a que al menos la parte final del túnel (aducción) esté a presión para que pueda mover la turbina.
- Abastecimiento de agua, para lo que puede ser el túnel sin presión y (se denomina en lámina libre o canal) a presión.
- Trasvase de cuenca, que son en general los de mayor longitud y pueden ser parcial o totalmente a presión.
- Riego.
- Drenaje.
- Alcantarillado sanitario y/o pluvial.
- Enfriamiento de plantas térmicas.
- Conducción de otros fluidos.

2. TÚNELES EN LÁMINA LIBRE

2.1. Sección del túnel

La sección de un túnel en lámina libre (escurrimiento) habitualmente es de una de las geometrías de la figura 2.1.

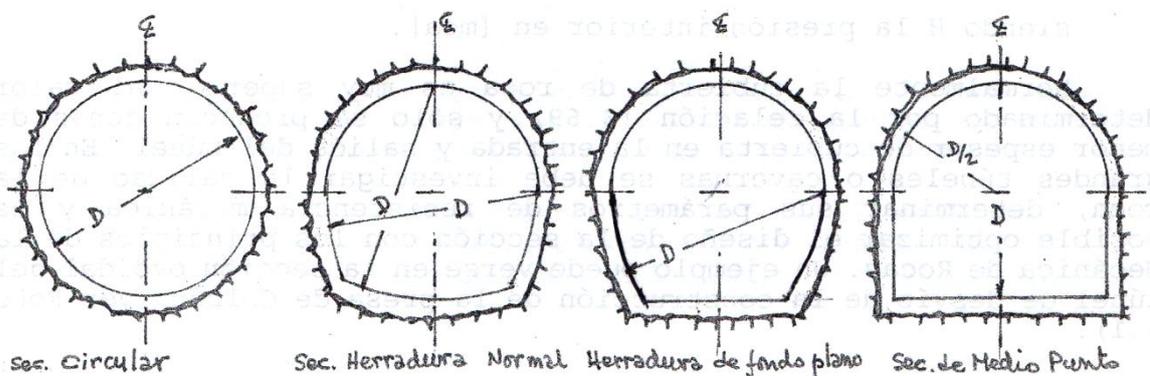


Figura 2.1.- Secciones túneles hidráulicos

Estas mismas geometrías pueden utilizarse en los tramos en que el túnel vaya a presión.

Las dimensiones mínimas por condicionantes de ejecución en estos túneles, (salvo hincas de tubos, saneamientos y/u otras conducciones urbanas de reducida longitud ejecutadas con maquinaria de gálibo reducido (pocerías) son:

- Túneles realizados por métodos convencionales. Diámetro excavado mínimo de 3.20 metros y mejor 3,50 metros.
- Tuneladoras de 3 metros de diámetro.

La capacidad de evacuación de agua de un túnel en lámina libre depende de los siguientes factores:

- Pendiente del túnel. A menor pendiente menos caudal, o si se quiere mantener el caudal, mayor sección.
 - Perímetro mojado y rugosidad del mismo.
 - Superficie de ocupación del agua.
 - Pérdida de carga que influye en la disminución de velocidad para la misma sección y pendiente.
- a) Velocidad del agua.

La velocidad del agua debe limitarse para evitar la degradación del contorno de roca en túneles sostenidos.

Por la experiencia existente, se recomienda:

- Para macizo no alterado con (Alt.III o inferior) $RMR > 40$ Vel.max $\leq 4,5$ m/seg
- Para macizo alterado (IV o sup) y/o con $RMR < 40$ Vel max $\leq 2,5$ m/seg

b) Perímetro mojado y rugosidad

En régimen turbulento rugoso, el parámetro "f" que define la rugosidad equivalente de una sección irregular (deficiente perfilado) depende únicamente de la rugosidad relativa, D_e/K_e , según la figura 2.2.

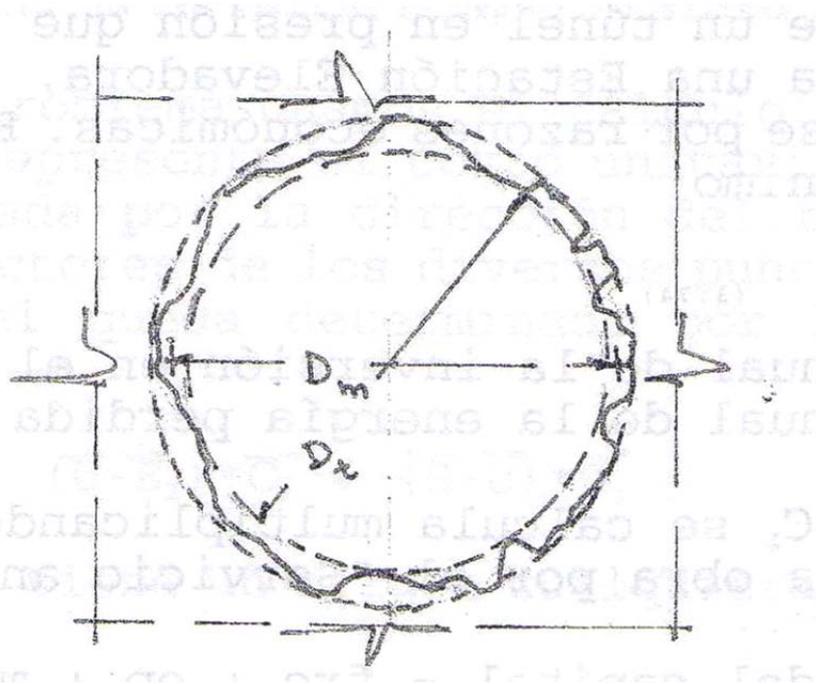


Figura 2.2.- Definición parámetros secciones túnel hidráulico

D_e =Diámetro equivalente

K_e =Tamaño equivalente de las irregularidades del contorno

D_m = Diámetro que representa la sección media excavada.

D_t = Diámetro interior libre o diámetro círculo inscrito en la sección final del túnel.

$$K_e = D_m - D_t$$

$$\frac{k_e}{D_m} = 1 - \frac{D_t}{D_m} = 1 - \sqrt{\frac{A_t}{A_m}}$$

El factor "f" de rugosidad de Darcy con flujo turbulento rugoso, puede obtenerse de la relación de Prandtl – Von Karman:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 \times \log \frac{D_e}{k_e} + 1,14$$

Sin embargo, en la hidráulica es mucho más utilizado el coeficiente “n” de Manning, que se correlaciona de forma empírica con el coeficiente “f” de Darcy.

$$f = 124,45 \times \frac{n^2}{D^{1/3}} \text{ con sección circular}$$

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{Rh^{1/6}}{n\sqrt{g}}$$

$$f = \frac{8 \times n^2 \times g}{Rh^{1/3}}$$

Siendo Rh o radio hidráulico la relación entre superficie ocupada por el agua y el perímetro mojado.

En el caso de distintas rugosidades en la sección se considera:

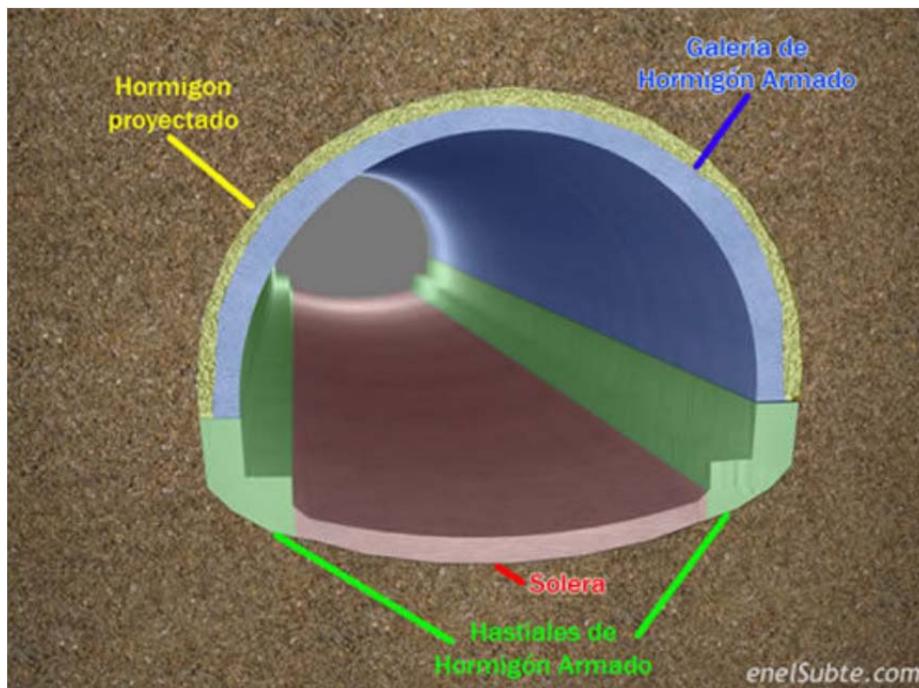


Figura 2.3.- Esquema sección varias rugosidades

$$n_{equiv} = \left[\sum \frac{l_i \times n_i^{3/2}}{l} \right]^{2/3}$$

Siendo “l” el perímetro mojado y “li” la longitud mojada del perímetro para cada tipo de rugosidad (l=Σli).

c) Superficie de ocupación del agua

La velocidad del agua en un canal se obtiene según la fórmula de Manning:

$$V = \frac{1}{n} \times R_h^{2/3} \times S^{1/2}$$

Siendo:

V= Velocidad del agua en el canal.

R_h= Radio hidráulico (superficie / perímetro mojado).

S= Pendiente canal en tanto por uno.

N= Parámetro que depende de la rugosidad.

Y el caudal es:

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_h^{2/3} \times \sqrt{S}$$

Siendo “A” el área ocupada por el agua.

Sin embargo, en el caso de un conducto circular o en herradura, al disminuir la superficie no ocupada por el agua se pierde capacidad de evacuación y por tanto, la máxima eficiencia y por tanto caudal se alcanza cuando es máximo el valor:

$$A \times R_h^{2/3}$$

Esto se obtiene para $\frac{h}{D} = 0,94$ en una sección en herradura.

Pero para evitar cavitaciones por causa del oleaje y facilitar la ventilación del aire en el hueco superior, es mejor cumplir:

$$0,7 < \frac{h}{D} < 0,8$$

D=Anchura de la sección

h=Altura de la sección

Por tanto, la sección de túnel necesaria de lámina libre para el paso del caudal necesario se obtendrá a partir de:

- La pendiente.
- La rugosidad (parámetro n)
- Existencia de puntos singulares (cambios de dirección, rebosaderos, etc.).

En cualquier caso, la anchura del túnel será mayor que el mínimo constructivo de 3,20 a 3,50 metros.

2.2. Excavación

Como en el resto de los túneles, la excavación puede realizarse:

- Perforación y voladura (Drilling & Blasting), perforando con jumbos y extrayendo el derrubio. Un ejemplo se tendría en la figura 2.4.

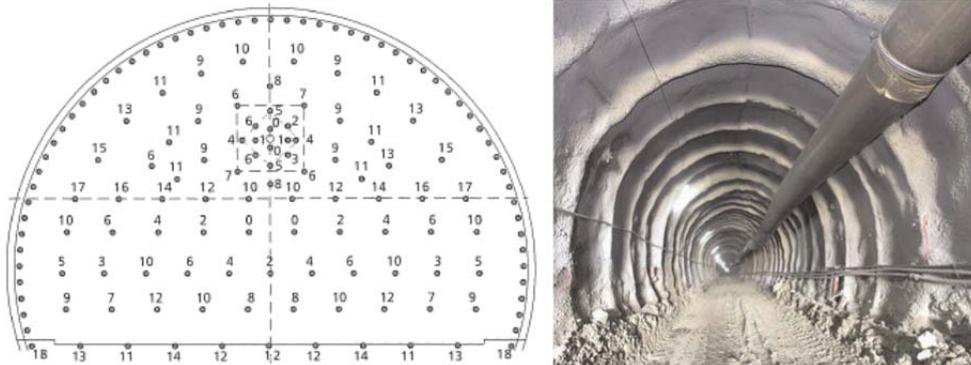


Figura 2.4.- Excavación túnel por perforación y voladura

Las pegas son de 2 a 4 metros de longitud, y un avance típico con trabajo a tres turnos es de 10 metros diarios (300/mes).

- Rozadora.

Pueden conseguirse rendimiento de 8 a 12 metros / mes dependiendo de la pegajosidad y dureza de la roca.

- Martillo hidráulico.

Rendimiento de 6 a 10 metros / mes.

Sin embargo, y sobre todo en túneles largo, el mayor problema de rendimiento de la excavación de estos túneles es por su dimensión reducida la extracción de escombros, ya que en un ancho que no permite dar la vuelta a los vehículos debe:

- o Adelantarse a la maquinaria de excavación.
- o Cargarse el derrubio de frente.
- o Voltearse para cargar volquetes, vagones o un silo que alimenta una cinta transportadora.

Existen equipos específicos más o menos ingeniosos para realizar estos trabajos con la productividad y flexibilidad.

- Tunneladoras.

En rocas - Tunneladoras abiertas o topos y doble escudo.

En suelo - Tunneladoras EPB y doble escudo.

2.3. Necesidad de soporte y refuerzo

Siempre que por su finalidad sea posible que existan periodos para la conservación, el sostenimiento puede ser muy estricto y no necesario el revestimiento, con importantes ahorros del coste respecto al de túneles de la misma sección pero otras finalidades.

Así, en estos túneles puede ser admisible:

- Un perfilado grosero e irregular siempre que se compruebe la capacidad de la sección para conducir el caudal de agua previsto.

En el cuadro de la figura 2.5 puede verse una recopilación de la geometría y la rugosidad debida al perfilado en 10 túneles hidráulicos en USA y en 8 túneles en Suecia, de los que además algunos serían a presión. Estos valores en los países reconocidos como la de mayor riqueza, significa que la admisión de perfilado grosero no es una cuestión de falta de recursos, sino de efectividad en el empleo de los mismos.

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
Harspränget	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					

Figura 2.5.- Cuadro recopilación sección y rugosidad túneles hidráulicos

Con el significado de los parámetros de la figura 2.6.

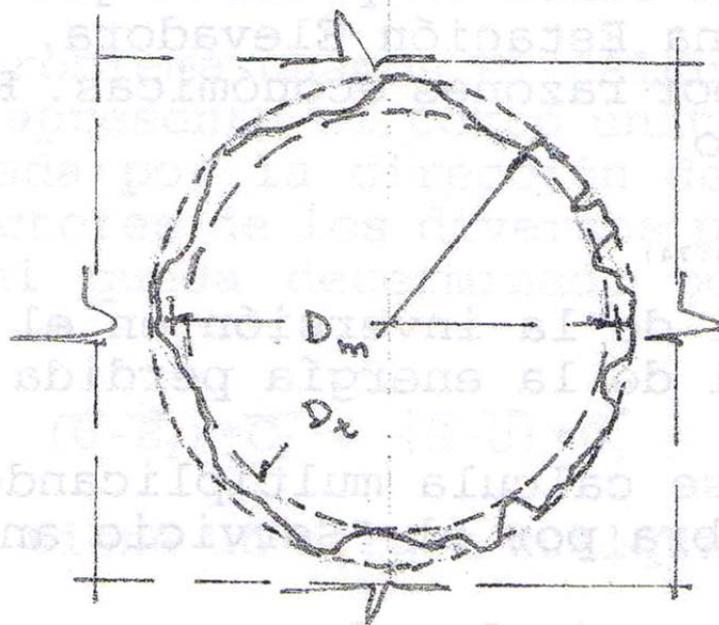


Figura 2.6.- Denominaciones elementos sección túnel

- Caída esporádica de cuñas y bloque, lo que obliga al diseño de instalaciones en el túnel que evitan que los derrubios puedan taponar el túnel.

Además de los desprendimientos de fragmentos de roca en el propio perímetro del túnel, también pueden colaborar en los taponamientos la presencia de troncos y ramas que puedan ser arrastrados.

El límite de exigencia de seguridad frente a estos desprendimientos debe depender de las exigencias de explotación y así se tendría:

- o En el caso de túneles hidroeléctricos, que la obligatoriedad de un periodo de reparación sea inseparable de la parada de la explotación, la pérdida de ingresos temporal por estas paradas compensa una mayor seguridad frente a las caídas de bloques o cuñas.
- o Iguales serían los condicionantes para los túneles de refrigeración.
- o Igual o más estrictos serían los túneles de abastecimiento, si no llevarán embalses de compensación a la salida del túnel.
- o Los túneles de regadío estacional, permitirían sin pérdidas de funcionalidad, la realización anual de periodos de conservación.

Sin embargo, si no disponen de embalses o bolsas de regulación, frente a un desplome inesperado deben tener un coeficiente de seguridad elevado, ya que las pérdidas en los cultivos por una parada de suministro de agua para regadío podrían arruinar toda la cosecha del año.

En cualquier caso, estos túneles de reparación anual, pueden considerarse de cara al sostenimiento como provisionales, reforzando anualmente los tramos del mismo que se encuentren más deteriorados, o en caso de cierre de sección por squeezing, realizando un reperfilado.

Para el dimensionado del sostenimiento y según el tamaño del túnel pueden seguirse los criterios habituales basados en las clasificaciones geomecánicas:

- Índice RMR de Bieniawski, que nos daría sostenimientos muy del lado de la seguridad por las siguientes razones:
 - o La valoración del macizo no tiene en cuenta la provisionalidad de estos túneles.
 - o El empleo de las recomendaciones de sostenimiento de Bieniawski de 1989 que se incluyen en la tabla de la figura 2.7, son válidas hasta para túneles de 10 metros de diámetro, con lo que quedarían muy del lado de la seguridad en túneles de 3 a 5 metros.

TABLA 1. Recomendaciones indicativas para la excavación y el sostenimiento de túneles excavados en roca (Bieniawski, 1989).

CLASE	RMR	EXCAVACIÓN (PASE)	SOSTENIMIENTO		
			BULONES (Longitud en m)	HORMIGÓN PROYECTADO	CERCHAS METÁLICAS
I Muy buena	81-100	Sección completa (3 m)	Ocasionalmente	No necesario	No necesarias
II Buena	61-80	Sección completa (1-1.5 m). Sostenimiento terminado a 20 m del avance	Localmente en clave. L = 3 m. Espaciados a 2.5 m con mallazo ocasional	50 mm en clave donde sea necesario	No necesarias
III Media	41-60	Avance y destroza (1.5-3 m en avance) Sostenimiento empezado en el frente y terminado a 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 4 m. Espaciados 1.5 a 2.0 m. Mallazo en clave.	50-100 mm en clave. 30 mm en hastiales.	No necesarias
IV Mala	21-40	Avance y destroza (1.0-1.5 m en avance) Sostenimiento empezado simultáneamente con la excavación y hasta 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 4 a 5 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo	100-150 mm en clave. 100 mm en hastiales.	Ligeras a medias, espaciadas a 1.5 m donde sea necesario
V Muy mala	1-20	Galerías múltiples. (0.5-1.5 m en avance) Sostenimiento simultáneo con la excavación. Hormigón proyectado inmediatamente después de la voladura.	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 5-6 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo. Butonar la contrabóveda.	150-200 mm en clave. 150 mm en hastiales. 50 mm en el frente.	Medias a pesadas, espaciadas a 0.75 m, con forro y longarinas donde sea necesario. Contrabóveda

Notas (de Bieniawski): Sección del túnel en herradura. Ancho 10 m. Tensión vertical < 25 MPa. Excavado por voladuras.

Figura 2.7.- Recomendaciones sostenimientos Bieniawski (1989)

- Índice Q de Barton, que si considera la dimensión real de la excavación y las exigencias de mantenimiento de los túneles.

- En la figura 2.8 se representa una versión de la figura de asignación de sostenimiento de Barton y Grimstad (2013).

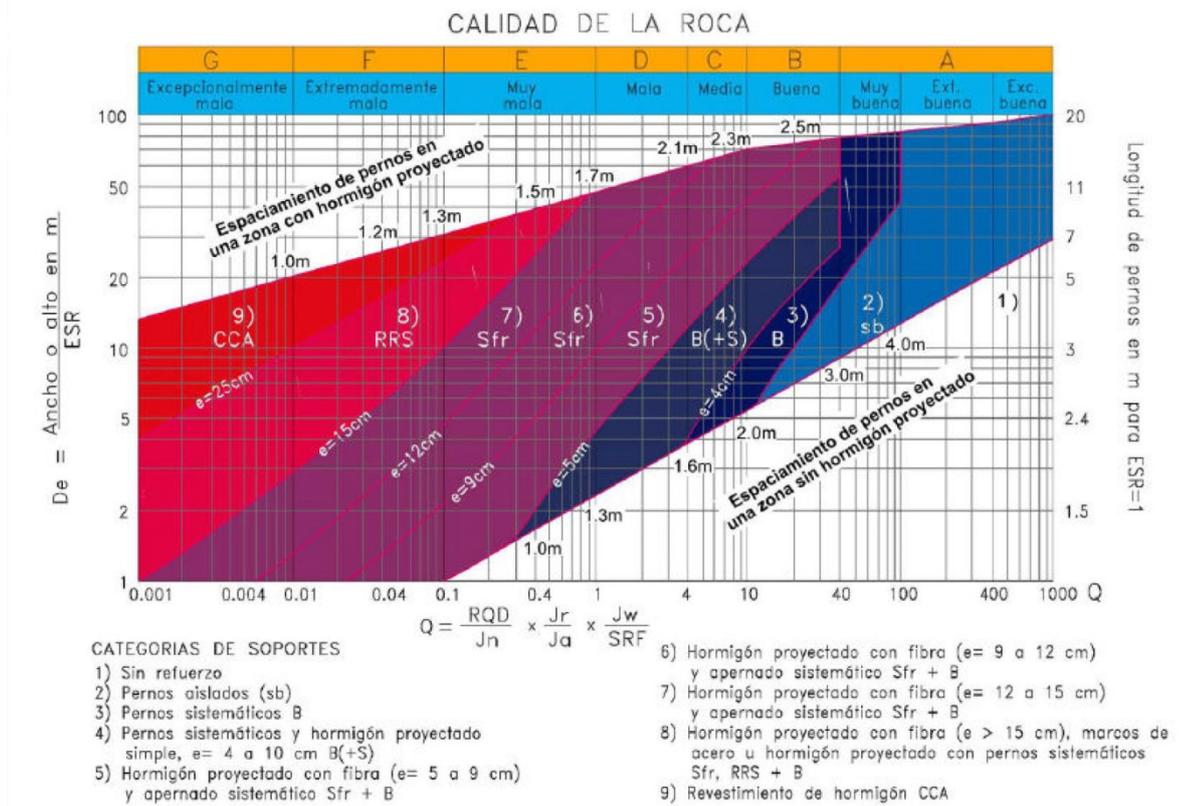


Figura 2.8.- Sostenimiento en función del índice Q y dimensiones de la sección

Las ordenadas corresponden a la máxima dimensión excavada y no sostenida del túnel (ancho o largo) dividida por un factor según la previsión de vida del túnel y su conservación.

- En la figura 2.9 se representa la tabla de asignación del valor de factor ESR según la finalidad y condiciones de conservación.

Valores del índice ESR de la Clasificación Q		
	Tipo de excavación	ESR
A	Labores mineras de carácter temporal, etc.	2-5
B	Galerías mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas (excluyendo las galerías de alta presión), túneles piloto, galerías de avance en grandes excavaciones, cámaras de compensación hidroeléctrica.	1,6-2,0
C	Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles de carreteras secundarias y de ferrocarril, túneles de acceso.	1,2-1,3
D	Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carreteras primarias y de ferrocarril, refugios subterráneos para defensa civil, emboquilles e intersecciones de túneles.	0,9-1,1
E	Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas, fábricas, túneles para tuberías principales de gas.	0,5-0,8

Figura 2.9.- Valores índice ESR de la clasificación Q

En el caso de túneles con conservación cuando sea necesario sin pérdidas económicas, podría adoptarse un valor ESR del orden de 2 a 5.

El resto de galerías en lámina libre, cuya conservación no coste el abastecimiento, un valor de 1 a 2.

En abastecimientos sin balsas o embalse de regularización el valor de ESR sería de la unidad.

De cara a la definición del sostenimiento, debe considerarse que no es obligado el gunitado sistemático en las secciones de excavación, salvo cuando se obtenga como necesario.

2.4. Obras especiales

En un túnel hidráulico deben considerarse las siguientes obras especiales:

- Trampas de arena y piedras.

Sirven para retener los sólidos finos (arenas) o gruesos (piedras) que sean arrastrados por el agua y procedan del embalse de alimentación o material caído del propio contorno del túnel.

En la figura 2.10 se representan varios diseños de trampas de arena.

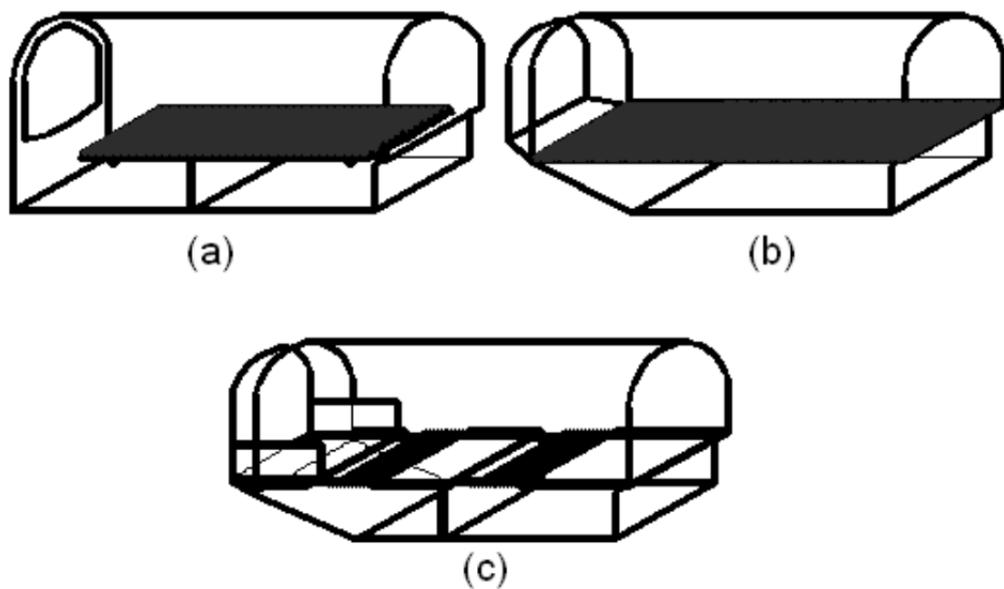


Figura 2.10.- Esquemas de modelos de trampas de arena

En la figura 2.11 se representa un diseño de trampa de piedras.

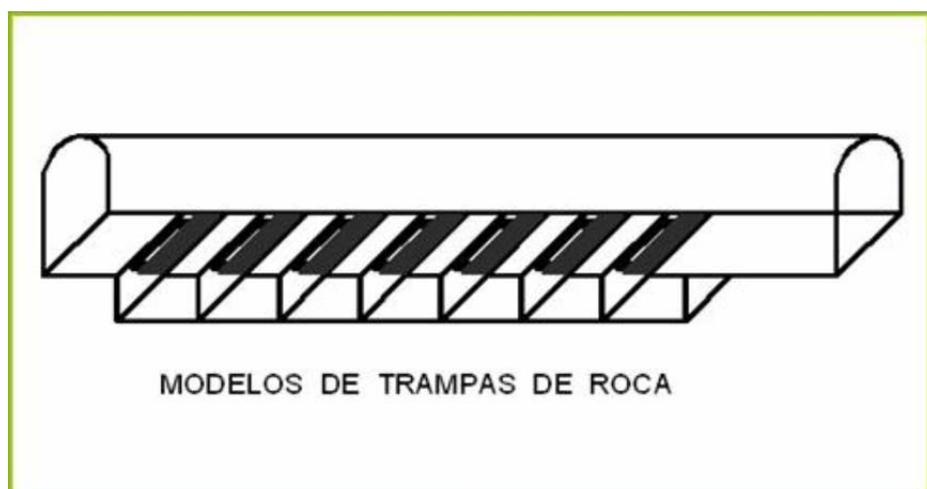


Figura 2.11.- Esquema de trampa de piedras

El esquema más sencillo de trampa de piedras sería un rebaje dentro del túnel como puede verse en la foto 2.1.



Foto 2.1.- Vista trampa de piedra

- Blindajes

En los tramos en que el terreno que se atraviese presente problemas de estabilidad o riesgo continuado de desprendimientos, la solución más directa y habitual es reforzar el sostenimiento del túnel con un blindaje, como puede verse en la foto 2.2.



Foto 2.2.- Vista blindaje

El blindaje es de palastro o acero y con espesor de chapa de 2 a 4 cm.

La colocación de un blindaje puede realizarse tanto durante la construcción como en la conservación.

- Chimeneas de equilibrio.

Son necesarias para asegurar la ventilación (paso del aire) en la superficie del túnel no ocupada por el agua.

Al pasar el agua con su velocidad tiende a arrastrar el aire, con lo que si no se colocaran chimeneas para que se introduzca nuevo aire, acabaría produciéndose vacío y cavitación en el túnel.

En la foto 2.3 puede verse una chimenea de equilibrio encima del túnel.



Figura 2.3.- Vista superior de chimenea de equilibrio

Conviene realizar alguna o todas las chimeneas de equilibrio de forma que puedan utilizarse como accesos intermedios y para el paso de materiales, blindajes, etc. en los trabajos de conservación.

2.5. Deterioros de túneles en lámina libre

El deterioro de un túnel en lámina libre es debido a dos tipos de desperfectos:

- La caída continuada de bloques que pueda obligar a blindar algunos tramos (figura 2.12).

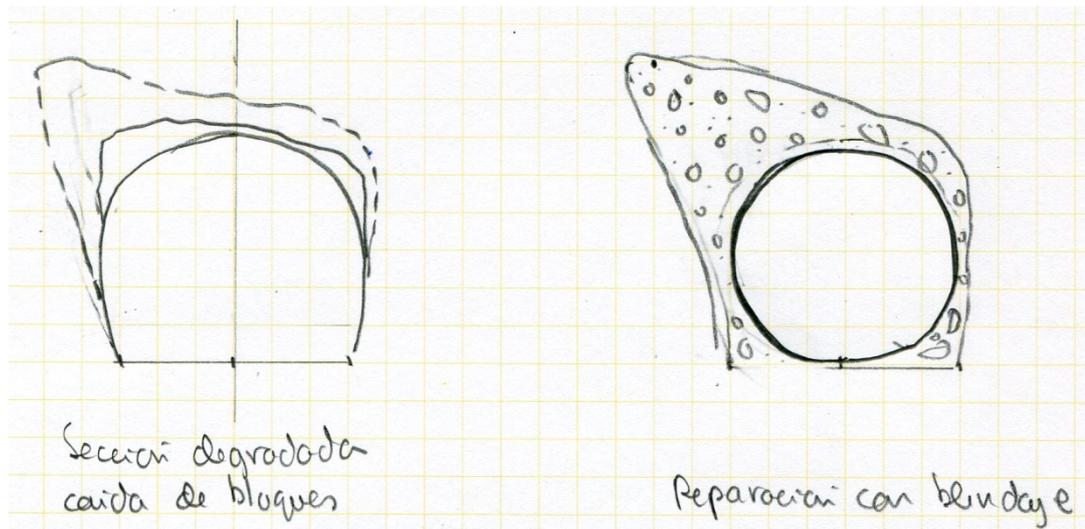


Figura 2.12.- Reparación sección por exceso caída de bloques

- Los daños por cavitación. La presión negativa del aire al ser arrastrado por el agua, provoca esfuerzos de tracción en el sostenimiento y/o roca que va deteriorando progresivamente estos materiales.

Igual se produce en el colapso de burbujas que crea presiones de impacto del orden de milos de kilopondios por centímetro cuadrado.

También el colapso de burbujas desarrolla una púa de líquido denominada "microjet" que impacta contra la superficie deteriorada como una lanza de agua.

Después la burbuja expande y rebota creando una onda de choque que vuelve a golpear la superficie.

En la figura 2.13 puede verse un esquema de este proceso.



Figura 2.13.- Esquema colapso de burbuja por cavitación

La acción repetida de estas fuerzas provocan el deterioro progresivo del hormigón o roca del contorno con formación de desconches e incluso descarnando la armadura, como se ve en las fotos 2.5 y 2.6.



Foto 2.5.- Desconches en sostenimiento túnel

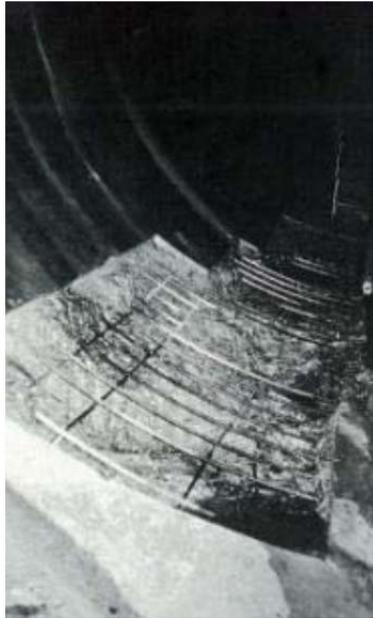


Foto 2.6.- Armadura descarnada de revestimiento túnel

Las zonas en que se concentran los daños por cavitación dependen de varios factores, enumerándose seguidamente los más usuales:

- Trazado de la conducción.

En la figura 2.14 se representan las zonas de concentración de daños por cavitación en tramos curvos.

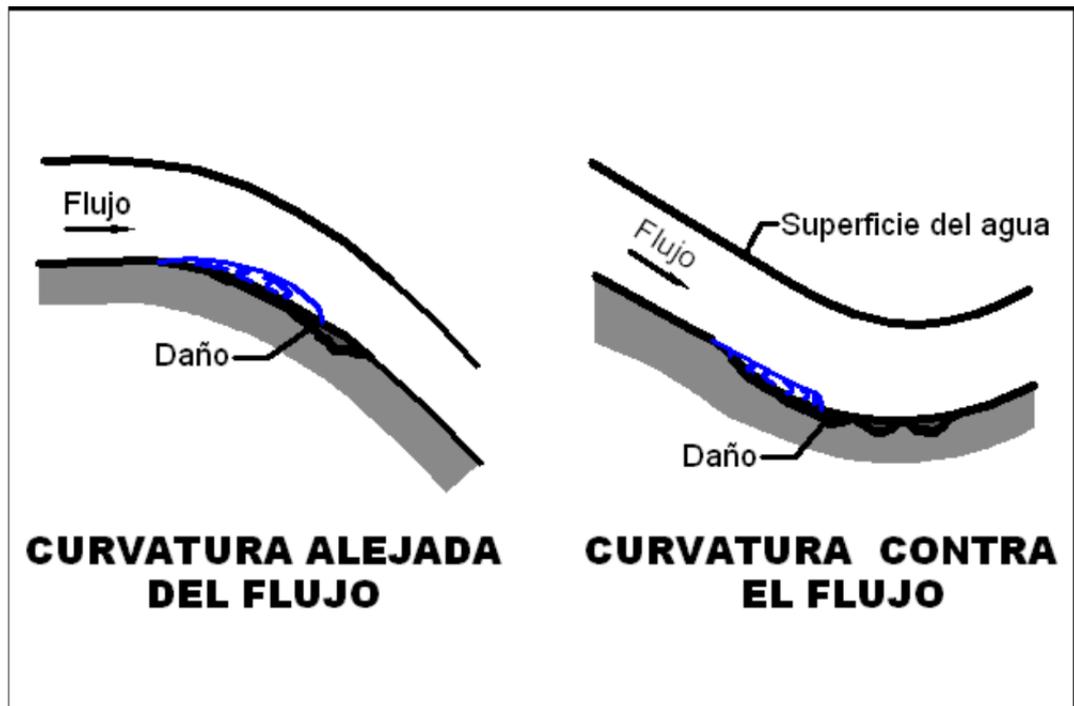


Figura 2.14.- Situación daños en curva del canal

- Cambio de geometría en el contorno

Las zonas de concentración de daños se representan en la figura 2.18.

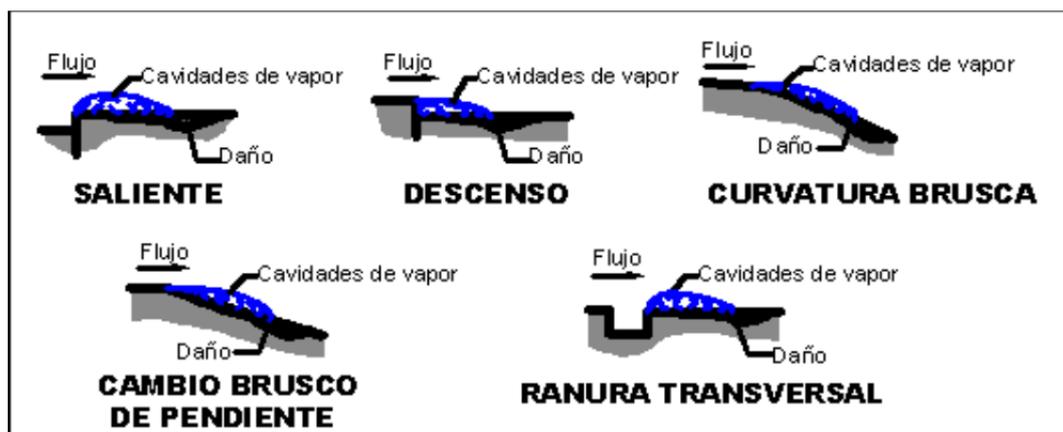


Figura 2.18.- Concentración daños en cambios geometría paredes canal

- Rugosidad del contorno del canal

La rugosidad del contorno del canal provoca turbulencias con aumento de la presión que favorece la cavitación y colapso de burbujas.

En la figura 2.15 se representan las zonas de anulación de desperfectos debido a la concentración de burbujas por vapor.

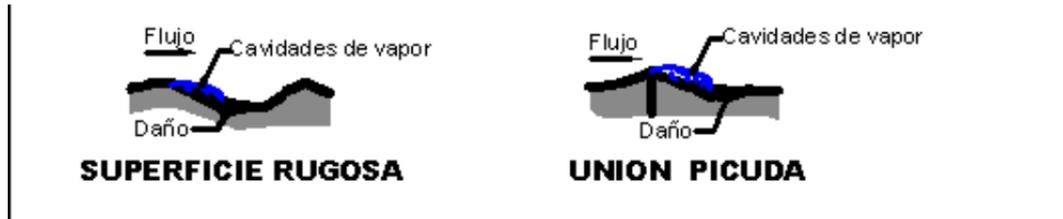


Figura 2.15.- Deterioro en rugosidad contorno

3. TÚNELES A PRESIÓN

En conducciones hidráulicas parte o todo el canal de desvío puede ser a presión. En una conducción hidroeléctrica al menos el tramo final de entrada a las turbinas es a presión.

3.1. Sección

La geometría de la sección del túnel puede ser la misma que la de un túnel de lámina libre, y con las mismas limitaciones de gálibo constructivo.

3.2. Sostenimiento y revestimiento

En principio no es obligado revestir un túnel porque esté en presión.

El revestimiento de un túnel hidráulico debe cumplir tres finalidades:

- Evita el riesgo de hidrofracturación del contorno del túnel.

La hidrofracturación consiste en la apertura de fisuras y el desplazamiento de la roca que rodea el túnel. Se puede producir cuando la presión existente en su interior supera los esfuerzos de cierre a que se encuentra sometido el macizo rocoso. Este fenómeno debe evitarse, ya que su ocurrencia puede ocasionar el colapso del túnel.

- o Método Simplificado (Benson, 1989).

$$Hr = \frac{1,3 \times p/\gamma - H_s \times \gamma_s}{\gamma_r}$$

No hay riesgo de hidrofracturación, si sobre la clave del túnel existe un espesor de roca superior a Hr.

Dónde:

Hr= espesor de la cobertura de roca.

P= Presión estática existente en el interior del túnel.

γ = peso específico del agua.

Hs= espesor de la cobertura de roca.

γ_s =peso específico del suelo.

γ_r = peso específico del macizo de roca.

En túneles excavados bajo laderas (cuyo ángulo de inclinación con la horizontal sea α), es posible estimar Hr según lo siguiente:

$$Hr = \frac{1,3 \times p/\gamma}{\gamma_r \times \cos \alpha}$$

Dónde:

Hr= Espesor de la cobertura de roca.

P= Presión estática existente en el interior del túnel.

γ = Peso específico del agua.

α = ángulo de inclinación c/r a la horizontal.

En caso que exista riesgo de hidrofracturación y no sea posible evitar este fenómeno modificando la posición del túnel, es necesario utilizar revestimientos metálicos (blindajes de acero).

- Para evitar la erosión del contorno del túnel

Es recomendable respetar algunos valores límites de la velocidad de 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, estas velocidades son:

TIPO DE TÚNEL	VEL. MAX. RECOMENDABLE (M/S)
Roca expuesta, solera concreto	3,0
Perímetro con h. proyectado, solera de hormigón	4,0
Revestimiento de hormigón con moldes de acero	6,0
Revestimiento de palastro (blindaje)	10,0

- Para mejorar la rugosidad y reducir la pérdida de carga

n roca: 0,025-0,040

n hormigón proyectado: 0,018-0,025

n hormigón: 0,012-0,016

- Para evitar filtraciones.