

Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas

Tema 1. Las obras subterráneas



Rubén Pérez Álvarez

Departamento de Transportes y Tecnología
de Proyectos y Procesos

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

TEMA 1: LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS

- 1.1. Introducción.
- 1.2. Tipos y características.
- 1.3. Conceptos generales.



«Car going through the Red Canyon Tunnel on Utah State Route 12 near Bryce Canyon», Diana Robinson.
<https://www.flickr.com/photos/dianasch>.
<https://flic.kr/p/pwX5MF>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/>.

La competencia del ingeniero de minas en la obra subterránea

Minero legendario (Own work) [CC BY-SA 3.0].
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>.
Vía Wikimedia Commons.



Reglamento General para el Régimen de la Minería. Art. 1.4.

«En todos los casos las operaciones que puedan afectar a la seguridad de los bienes o de las personas o requieran el **uso de explosivos** habrán de ser dirigidos por titulados de Minas».

Justificable en base a la legislación existente:

- 🔗 Ley de Minas.
- 🔗 Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto, por el que se aprueba el **Reglamento General para el Régimen de la Minería**.
- 🔗 El **Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RD 863/1985, de 2 de abril)**.
- 🔗 **ITCs del R.G.N.B.S.M.**

- ➔
- 🔗 **ITC 04.6.05 (Labores Subterráneas: Sostenimiento de Obras; Túneles y Obras Especiales)**.
 - 🔗 **ITC 10.0.01 (Voladuras Especiales)**.
 - 🔗 **ITC 02.0.01 (Direcciones Facultativas)**.

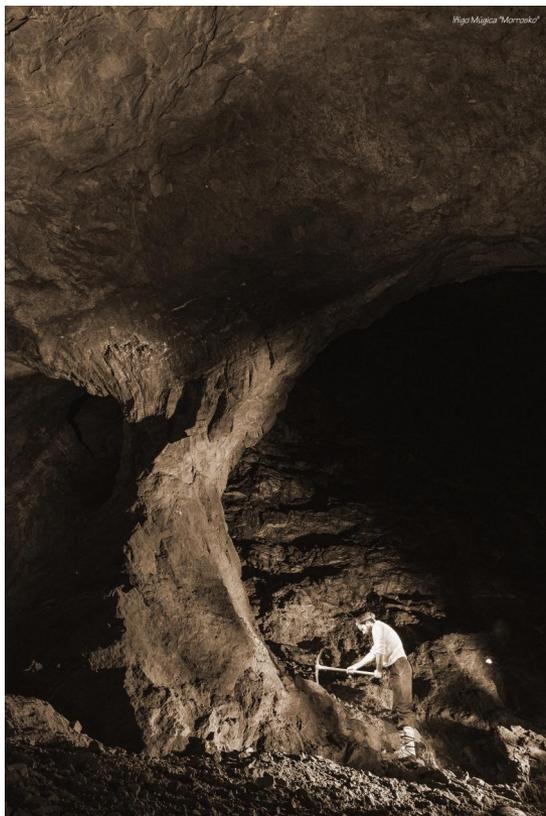
➔

«La Dirección Facultativa en las actividades recogida en el ámbito del RGNBSM será desarrollada por Ingenieros de Minas, Ingenieros Técnicos de Minas, Peritos de Minas o Facultativos de Minas en función de sus respectivas atribuciones profesionales».

Introducción

La competencia del ingeniero de minas en la obra subterránea

CONCEPTO DE «TÉCNICA MINERA»



«Mineros en acción», Iñigo Mujika.

<https://www.flickr.com/photos/morrosko/>.

<https://flic.kr/p/kxbiVe> <https://flic.kr/p/kxbiVe>.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0>.

«Se entiende necesaria la aplicación de técnica minera en los trabajos que a continuación se enumeran, cuando éstos tengan por finalidad la investigación y aprovechamiento de recursos minerales:

- 1. Todos los que se ejecuten mediante labores subterráneas, cualquiera que sea su importancia.*
- 2. Los que requieran el uso de explosivos, aunque sean labores superficiales.*
- 3. Los que realizándose a roza abierta y sin empleo de explosivos requieran formación de cortas, tajos o bancos de más de tres metros de altura.*
- 4. Los que, hallándose o no comprendidos en los casos anteriores, requieran el empleo de cualquier clase de maquinaria para investigación, extracción, preparación para concentración, depuración o clasificación.*
- 5. Todos los que se realicen en las salinas marítimas y lacustres, y en relación con aguas minerales, termales y recursos geotérmicos».*

Reglamento General para el Régimen de la Minería. Art. 1.4.

Breve reseña histórica de las obras subterráneas



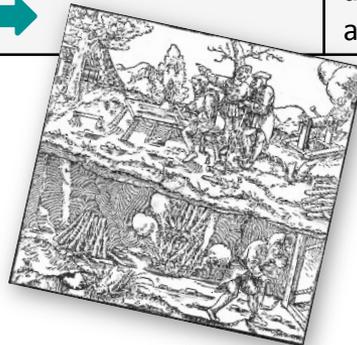
«Entrada al Túnel de Eupalinos», [ZachMarshall](#)
(Isla de Samos, Grecia).
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/deed.en>.



«Mina, Daroca (Zaragoza, España) 2014-01-08, DD 01»,
Diego Delso. [CC BY-SA 3.0] - Vía Wikimedia Commons
<http://commons.wikimedia.org/wiki>.

ÉPOCA o CIVILIZACIÓN	ACONTECIMIENTO
China, Antiguo Egipto	Aplicaciones religiosas de los túneles.
Tierra de Canaan (S. X a.C)	Utilización para abastecimiento hidráulico.
Isla de Samos (530 a.C)	Acueducto de Eupalinos de Megara en Samos para el abastecimiento de la capital durante un milenio (530 a.C), de un kilómetro de longitud.
Imperio romano	Galerías mineras, abastecimiento de agua, alcantarillado, drenaje de lagos volcánicos, calzadas romanas, túneles militares y catacumbas.
Edad Media	Túneles relegados a servicio de fortalezas y castillos. Avances en minería.
Renacimiento	De Re Metallica, de Georgius Agricola (S. XVI), tratado sobre el Laboreo de Minas. Mina de Daroca (construida por Pierres Bedel entre 1555 y 1570) para el desagüe y desvío de las aguas torrenciales de las que la villa de Teruel estaba aquejada.

De Re Metallica, Georgius Agricola



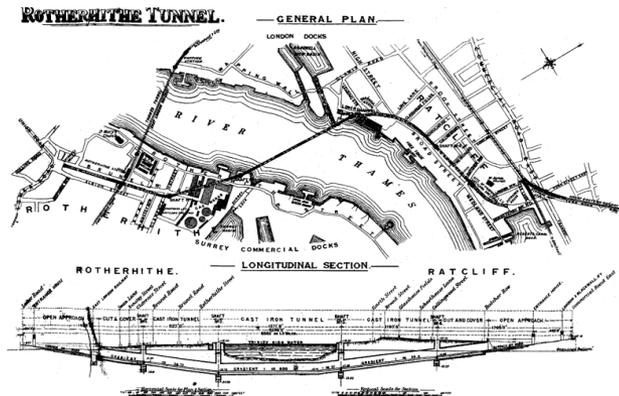
Breve reseña histórica de las obras subterráneas



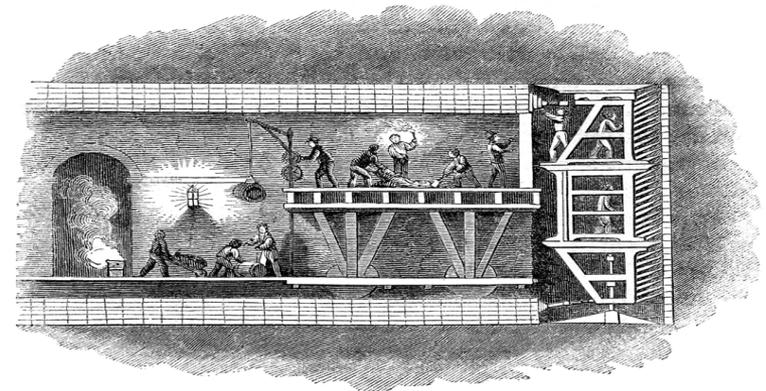
«Túnel de Malpas».

<https://www.flickr.com/photos/moondance38/>
<https://flic.kr/p/nskitu>
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

ÉPOCA o CIVILIZACIÓN	ACONTECIMIENTO
S. XVIII, Era de los Canales	Importancia los túneles se ve notablemente incrementada, pudiendo destacar el primer túnel en el que se empleó pólvora, concretamente el de Malpas, asociado al Canal de Midi, que a su vez buscaba la conexión del Atlántico y el Mediterráneo.
S. XIX, Era del Ferrocarril	Asociada a la Revolución Industrial. Primer túnel ferroviario, el de Terre-Noir (Francia, 1827), previo a la propia implantación masiva de los ferrocarriles de vapor (1830-1845) . Su incorporación se tradujo en obras como la línea Liverpool-Manchester, o el primer túnel bajo el Thamesis, en el que se aplicaría por primera vez el escudo patentado por Marc Brunel.



Túnel bajo el Thámesis

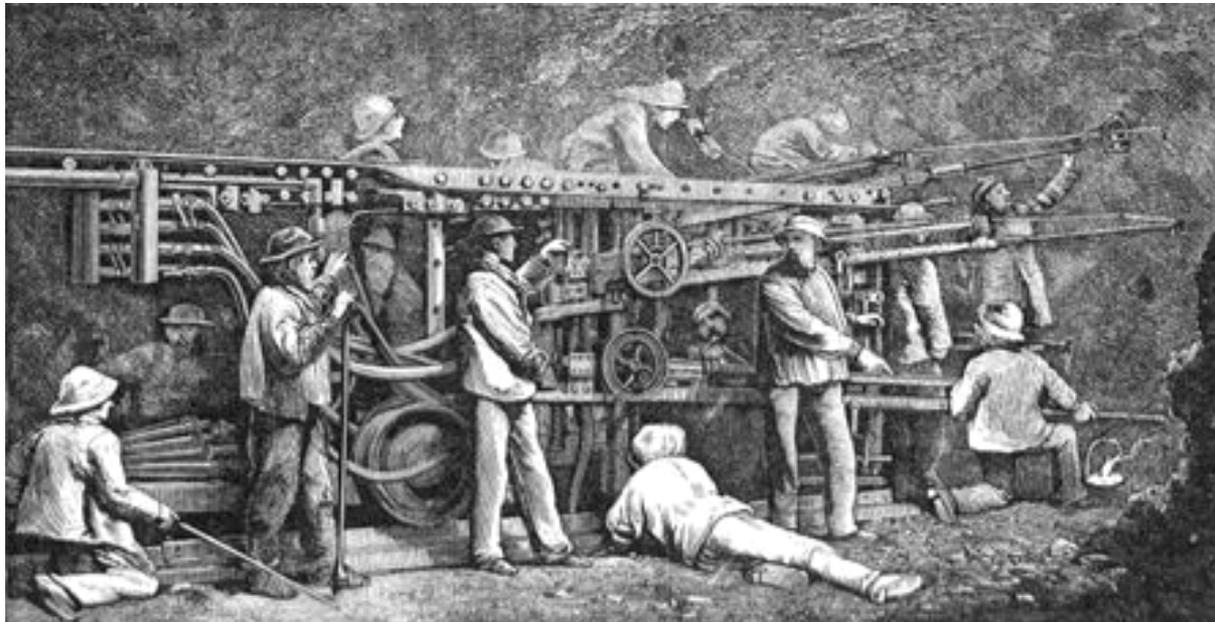


Escudo de Brunel



Breve reseña histórica de las obras subterráneas

ÉPOCA o CIVILIZACIÓN	ACONTECIMIENTO
Segunda mitad del XIX	Construcción de los grandes túneles de ferrocarril de los Alpes (Mont Fenís, San Gotardo y Simplón, de longitudes 12.6 km, 15.2 km y 19.7 km) supone en sí un hito y la incorporación de los martillos de aire comprimido de Sommeiller. Basta mencionar para ilustrar las condiciones de peligrosidad de las obras los cerca de 200 fallecidos en el túnel de San Gotardo.



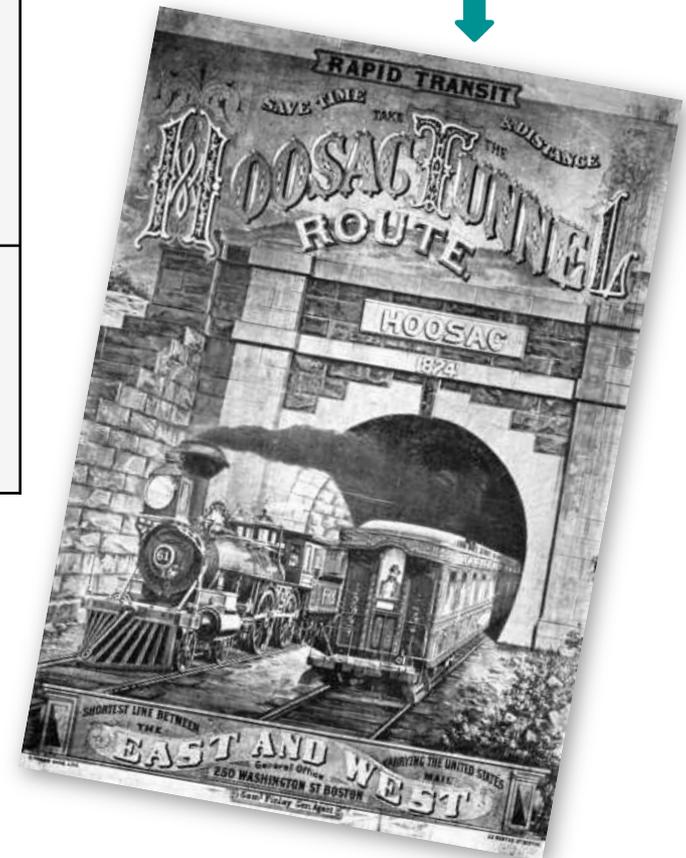
Taladradora de aire comprimido de Sommeiller



Breve reseña histórica de las obras subterráneas

ÉPOCA o CIVILIZACIÓN	ACONTECIMIENTO
<p>Segunda Mitad S. XIX</p>	<p>1869 – 1871: túneles bajo el río de Chicago, única vía de escape en el incendio de 1871. También en Estados Unidos se van imponiendo los túneles en la segunda parte del siglo XIX.</p> <p>Túneles de Hoosac (primero en el que se empleó la nitroglicerina), y el de Saint Clair (ejecutado mediante un escudo de 6,45 metros de diámetro).</p>
<p>S XX. Generalización a otros ámbitos</p>	<p>Aprovechamiento para el metro, refrigeración de centrales y túneles carreteros.</p> <p>La generalización de su ejecución ha propiciado la aparición de diversos métodos de ejecución (el Método Inglés, el Belga, el Alemán, el Austriaco y posteriormente el Nuevo Método Austriaco).</p>

Folleto del
Túnel de
Hoosac



Tipos y características

Principales criterios de clasificación

- 🌀 Clasificación general.
- 🌀 En base al tipo de terreno.
- 🌀 En base a los utilización y solicitaciones.
- 🌀 En función del método constructivo.
- 🌀 Considerando la sección transversal.
- 🌀 En función de su ubicación con respecto al entorno.
- 🌀 En base a su situación con respecto a otros túneles.



«Túnel», Gustavo Minas.

<https://flic.kr/p/4FBAAh>
<https://www.flickr.com/photos/gustavominas>
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>



«Túnel ferroviario en Sant Pol de Mar».

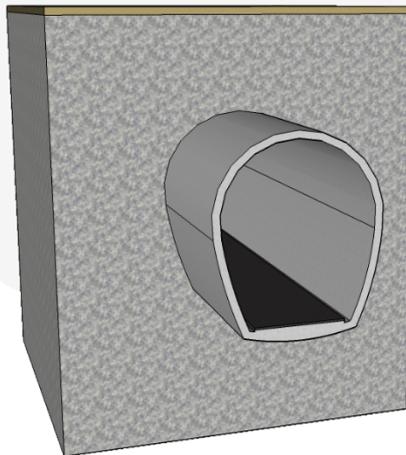
<https://www.flickr.com/photos/robertrd>
<https://flic.kr/p/auhjwr>
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/>

Tipos y características

Clasificación general

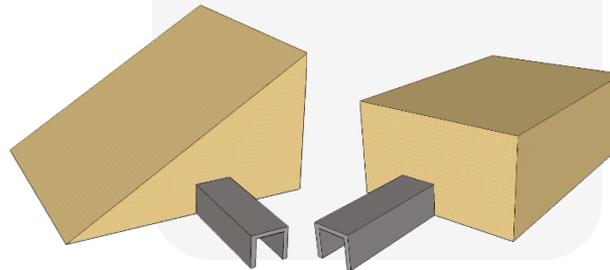
TÚNELES REALES (EN MINA)

Excavados mediante métodos específicos de excavación (**técnica minera**).

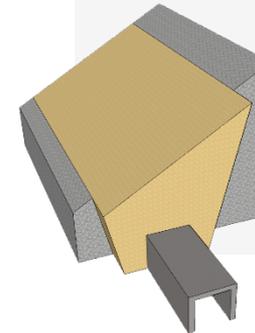


FALSO TÚNEL

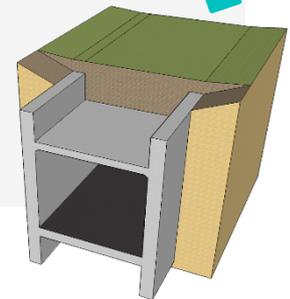
BAJO TERRAPLÉN



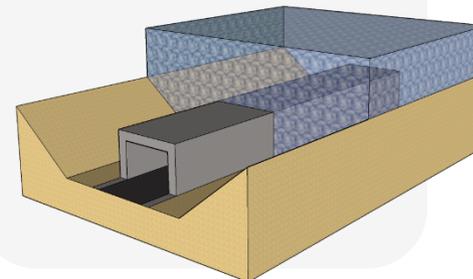
CORTE Y RELLENO
(CUT AND COVER)



CON SISTEMAS DE
CONTENCIÓN
LATERAL



SUMERGIDOS

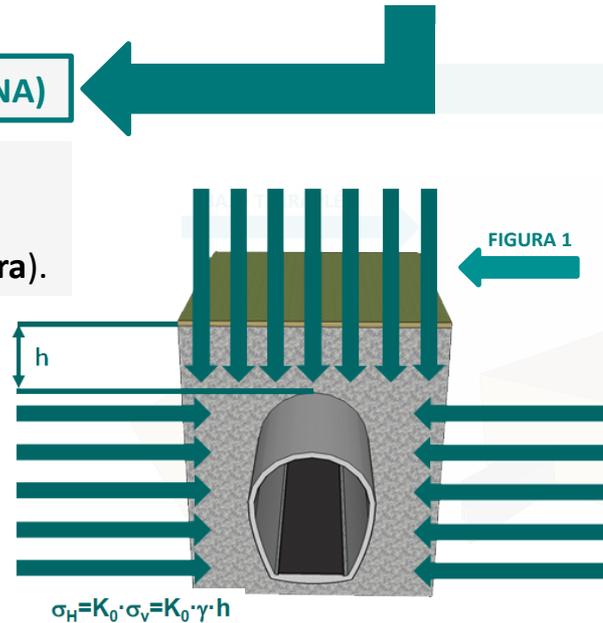
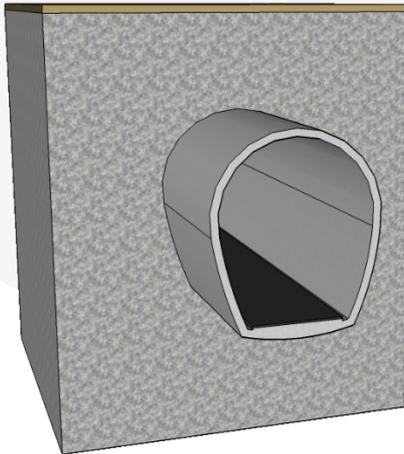


Tipos y características

Clasificación general

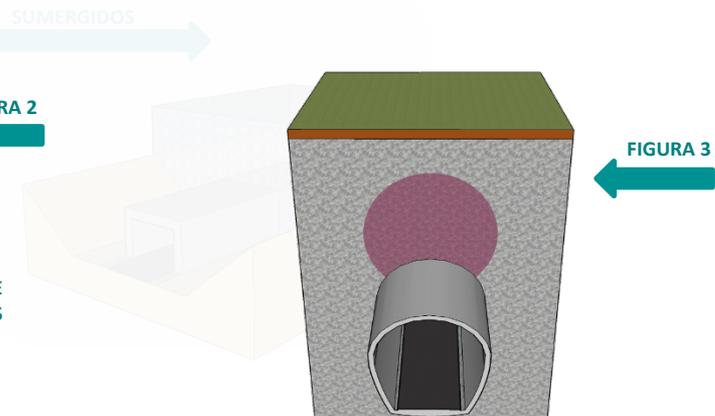
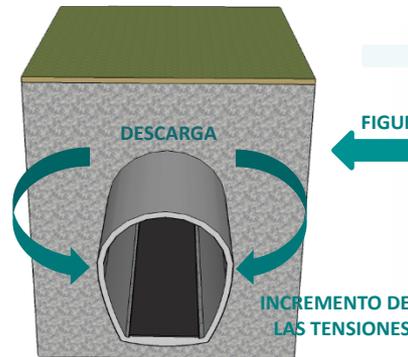
TÚNELES REALES (EN MINA)

Excavados mediante métodos específicos de excavación (**técnica minera**).



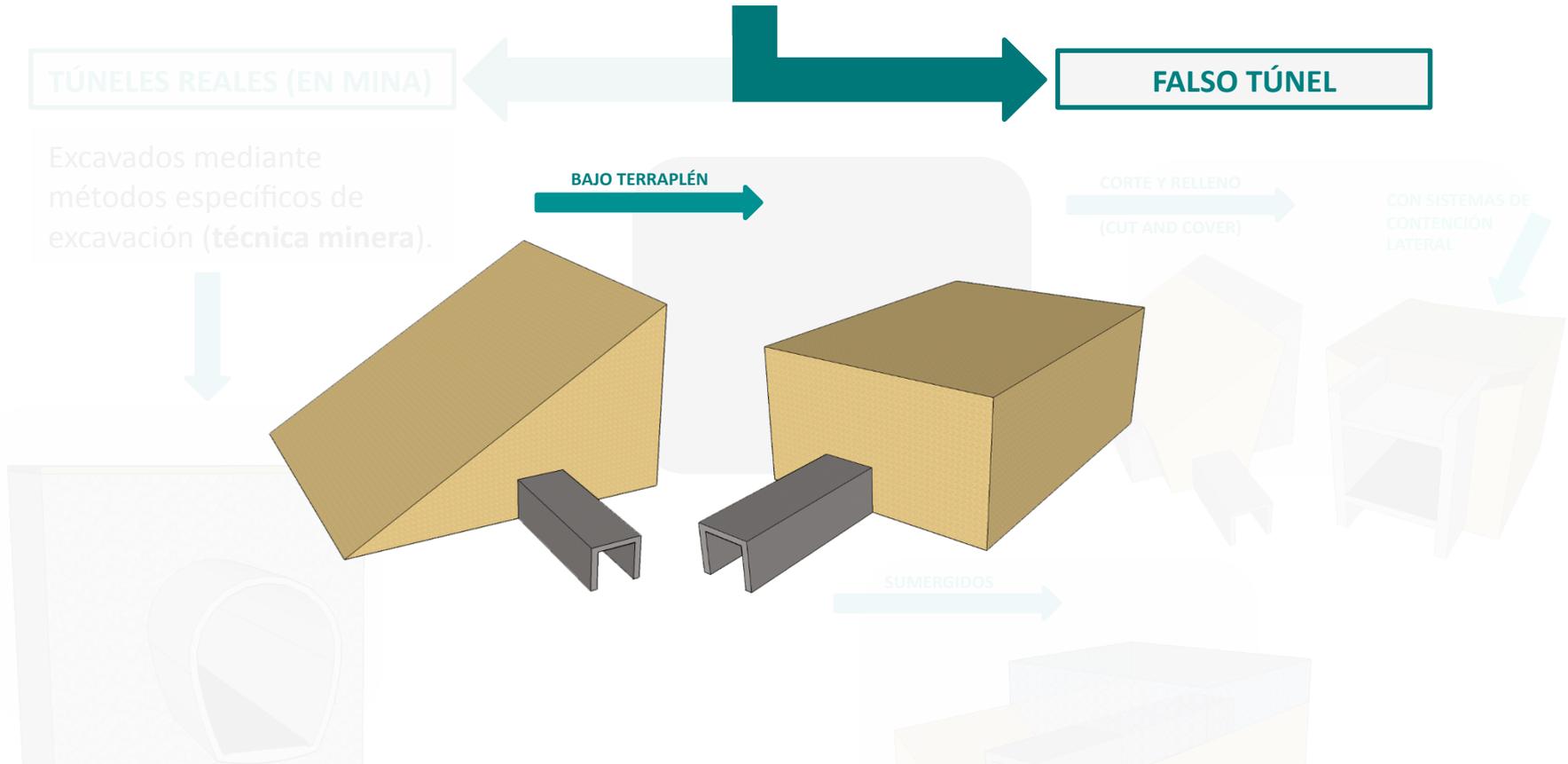
La forma seleccionada para el túnel condicionará de forma significativa la distribución de tensiones.

Frente a la situación intuitiva de distribución y supuesto un comportamiento elástico (**Figura 1**), los fenómenos frecuentes de **arcos de descarga** o **antifunicularidad** incrementan la tensión transmitida a los hastiales, reduciéndose las de la clave (**Figura 2**). Los comportamientos plásticos, frecuentes en las inmediaciones del hueco excavado, marcarán la proporción de materiales suprayacentes a sostener (**Figura 3**).



Tipos y características

Clasificación general



Excavados mediante métodos específicos de excavación (técnica minera).

En este caso se plantea la ejecución de la estructura, para posteriormente proceder al relleno. La disposición y compresión sucesiva de las tongadas constituyentes del terraplén, que encontrarán la oposición del falso túnel ya existente, ocasionan un comportamiento inverso al recogido en los túneles reales (incremento de la presión en la zona de clave, constituyendo un **arco de supercarga**).

Tipos y características

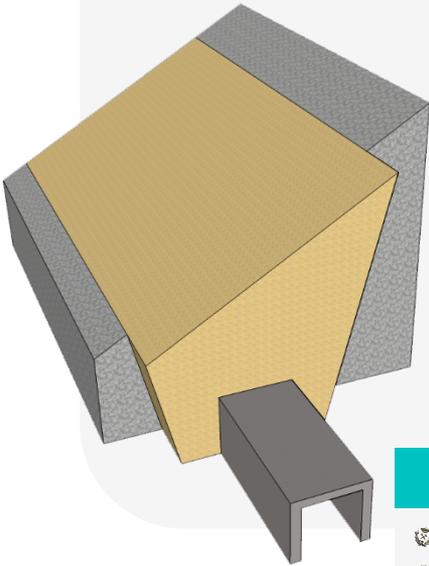
Clasificación general

TÚNELES REALES (EN MINA)

FALSO TÚNEL

CORTE Y RELLENO

(CUT AND COVER)



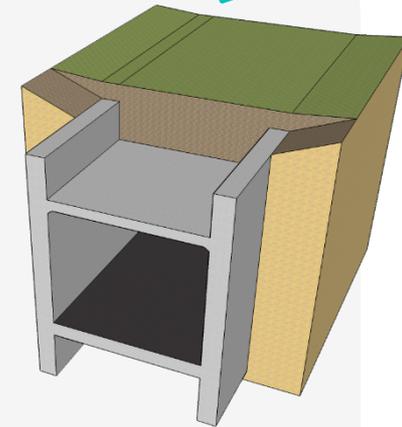
El sistema de corte y relleno implica la retirada de materiales, ejecución de la estructura, y recubrimiento posterior con relleno. Son frecuentes en obras desarrolladas fuera de núcleos urbanos, donde el desmonte previo es posible.

TIPOS PRINCIPALES DE PANTALLAS

- ✦ Pantallas continuas de hormigón armado.
- ✦ Pantallas de pilotes.
- ✦ Pantallas de micropilotes.
- ✦ Pantallas de tablestacas.

CON SISTEMAS DE CONTENCIÓN LATERAL

La alternativa basada en la ejecución previa de pantallas suele aplicarse en núcleos urbanos. Dichos sistemas de contención lateral buscan garantizar la no afectación de la ejecución de la obra al entorno.



FASES DE TRABAJO CON PANTALLAS

- ✦ Ejecución de las pantallas.
- ✦ Excavación.
- ✦ Ejecución de la bóveda.
- ✦ Excavación en mina bajo la losa.
- ✦ Ejecución de la solera.

Clasificación general

CON SISTEMAS DE CONTENCIÓN LATERAL

TIPOS PRINCIPALES DE PANTALLAS

- ☛ Pantallas continuas de hormigón armado.
- ☛ Pantallas de pilotes.
- ☛ Pantallas de micropilotes.
- ☛ Pantallas de tablestacas.

PANTALLAS CONTINUAS

Muros construidos por excavación de zanjas profundas en las que se introduce la armadura y luego el hormigón, generando una estructura continua, pudiendo emplear lodos bentoníticos como protección si se requiere.



«Ejecución del muro pantalla continuo del Depósito de Tormantas de Gijón».

By vicens (Own work)
[CC BY-SA 2.5].
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5>.
Vía Wikimedia Commons.

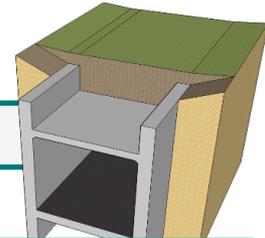


«Sheet pile New Orleans 09-04-05». Publicado bajo la licencia Dominio público.
Vía Wikimedia Commons.

TABLESTACAS

Pantalla constituida por elementos prefabricados de limitado espesor y diversos materiales posibles (hormigón, acero, etc). En caso de ser de hormigón, se distinguirán de las pantallas de paneles prefabricados por sus menores dimensiones. Suelen disponerse por hincado mediante vibración y, en menor medida, mediante golpe.

FALSO TÚNEL



PILOTES

Elemento de cimentación profunda que, con la forma de columna vertical, permite transmitir las tensiones a estratos competentes en aquellos casos en que otras alternativas más simples, como puedan ser losas o zapatas, no resulten viables. Pueden ser de hormigón (prefabricados o ejecutados in situ), madera o acero.

MICROPILOTES

Elemento de cimentación, resistente a tracción y compresión, compuesto por una armadura tubular que se aloja en un taladro, en el que posteriormente se inyecta hormigón.

Tipos y características

Clasificación general



FASES DE EJECUCIÓN DE PANTALLA CONTINUA DE HORMIGÓN

TRABAJOS PREVIOS	
PLATAFORMA DE TRABAJO	Limitación y señalización de la obra, de la zona de carga y descarga, acopio de material y posicionamiento de equipos. Adecuación de la plataforma, garantizando la estabilidad, horizontalidad y compacidad del terreno.
MONTAJE DE EQUIPOS	
ELABORACIÓN DE MURETES GUÍA	Dos elementos de hormigón armado dispuestos en paralelo al terreno, separados entre sí una distancia algo superior al ancho de la cuchara. Garantizan la alineación de la pantalla, guiado de los útiles de excavación, evitan desprendimientos, y servirán como soporte a las jaulas de la armadura.
CONSTRUCCIÓN DE LA PANTALLA	
EXCAVACIÓN	El elemento de excavación (cuchara bivalva o al cable, cuchara hidráulica, hidrofresa, o trépano si el terreno es duro o ha de demolerse cimentación antigua), de común empleo en terrenos blandos y medios, se introduce entre los muretes guía para extraer el detritus. Para eliminar el riesgo de desprendimiento se recurre al empleo de lodos bentoníticos, que forman una película protectora (cake) en las paredes del panel.

Tipos y características

Clasificación general



FASES DE EJECUCIÓN DE PANTALLA CONTINUA DE HORMIGÓN

CONSTRUCCIÓN DE LA PANTALLA	
COLOCACIÓN DE JUNTAS	Terminada la excavación del panel, se coloca una junta en su extremo. La junta sirve de encofrado al extremo del panel y permite la conexión con el siguiente, mediante un machi-hembrado entre paneles contiguos.
COLOCACIÓN DE ARMADURAS	Suelen fabricarse en la en la plataforma de trabajo. Para su introducción en el batache generado se amarran a las asas de izado, elevándolas hasta disponerlas verticalmente para su colocación.
HORMIGONADO	Para el hormigonado se requiere una tubería tremie, que en su parte superior cuenta con un embudo por el que se verterá el hormigón.

CONSTRUCCIÓN DE LA VIGA DE CORONA

Se construye tras concluir los bataches de la pantalla, antes de excavar el recinto interior de la obra subterránea. Da continuidad en la parte superior de la pantalla y uniformiza el comportamiento de los paneles. Suele armarse fuertemente, presenta el mismo ancho de la pantalla, y un canto de entre 70 y 100 cm.

Tipos y características

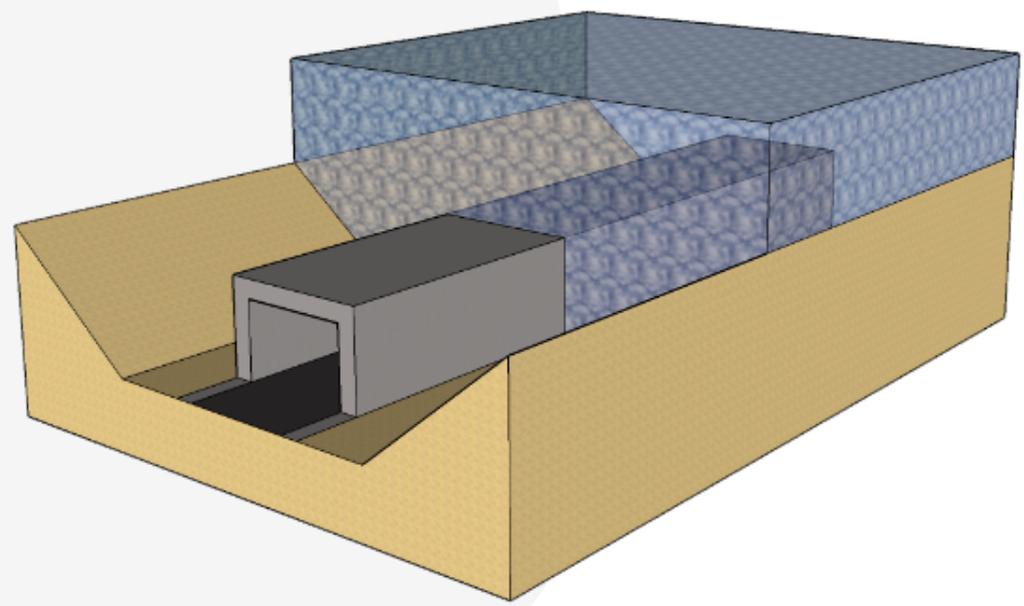
Clasificación general



SUMERGIDOS



Túnel poco típico en el país, desarrollado en base a preformas de hormigón que se construyen en tierra y se colocan sobre el fondo, sin enterrar.



Tipos y características

CLASIFICACIÓN EN BASE AL TIPO DE TERRENO

TÚNELES EN SUELO

TÚNELES EN ROCA

A más competente resulte el material, la excavación resultará más exigente, pero el sostenimiento podrá resultar menos intensivo en cuanto a requerimientos.

CLASIFICACIÓN EN BASE UTILIZACIÓN Y SOLICITACIONES

NO PRESURIZADOS

PRESURIZADOS

- 🚗 Carreteros .
- 🚂 Ferroviarios.
- 🚶 Peatonales.
- 🚰 Hidráulicos/canalizaciones (circulación en lámina libre o con colectores).
- 🚚 Mixtos.

- 🚰 Hidráulicos presurizados, destinados a la conducción de fluido a presión, por lo general de sección circular.



«Túnel del Centro Botín», José Miguel Martínez Pereda.
<https://www.flickr.com/photos/jmpereda>.
<https://flic.kr/p/pjgU9S>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0>.

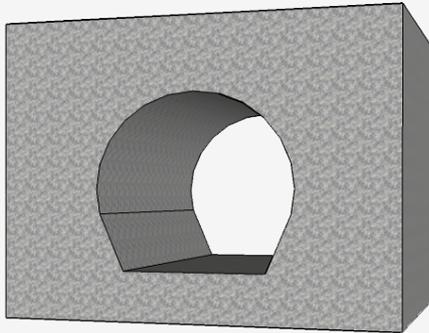
OTRAS GEOMETRÍAS

Pozos, planos inclinados, cámaras, cavernas, almacenes...

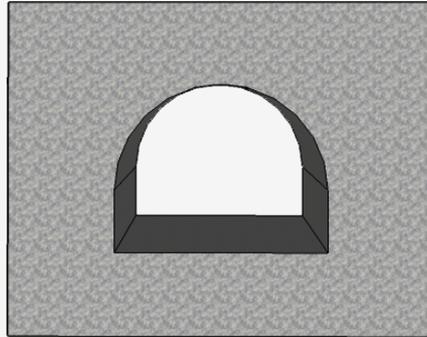
Tipos y características

Clasificación en base a la sección

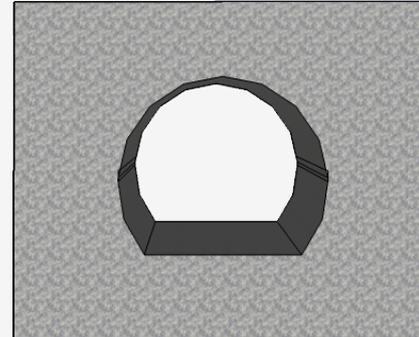
HERRADURA



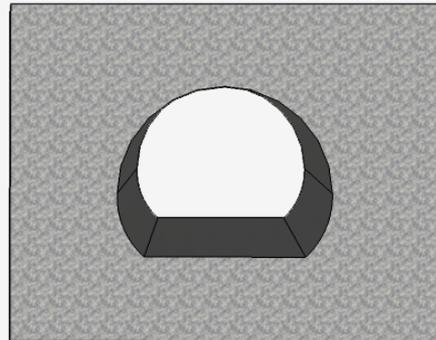
Herradura real



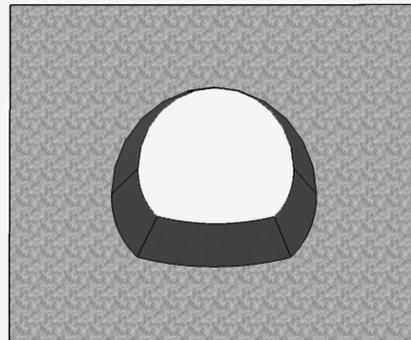
Medio punto



Circular truncada o parcial



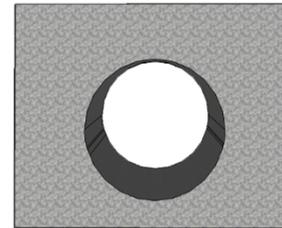
3 centros de solera plana



3 centros con contrabóveda

- Herradura.
- Circular.
- Rectangular.
- Otras.

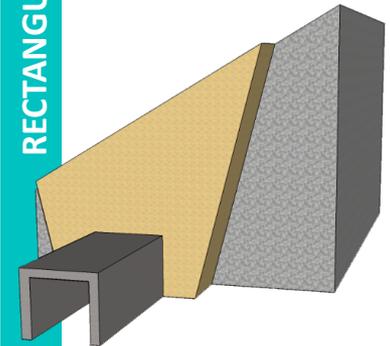
CIRCULAR



En casos en que la sección de herradura es insuficiente estructuralmente, o se apliquen tuneladoras.

RECTANGULAR

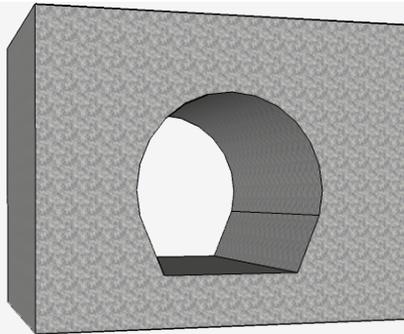
Falsos túneles.



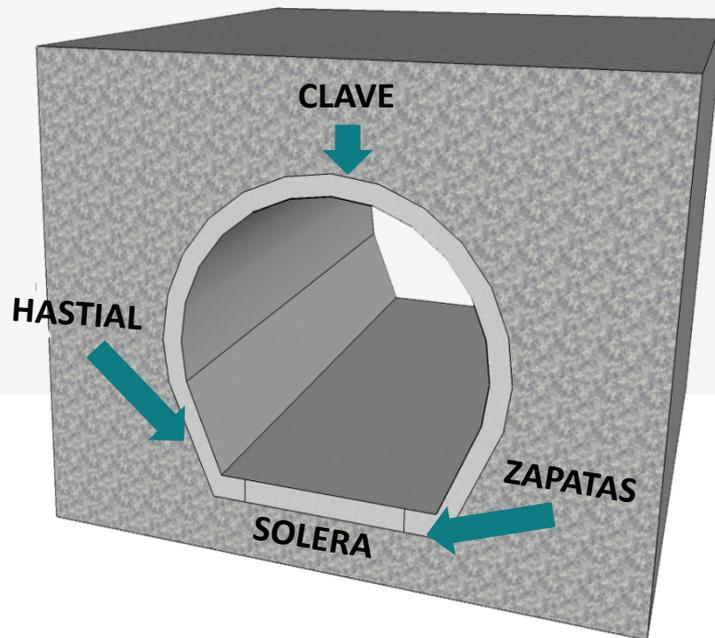
Tipos y características

Clasificación en base a la sección

HERRADURA



Herradura real



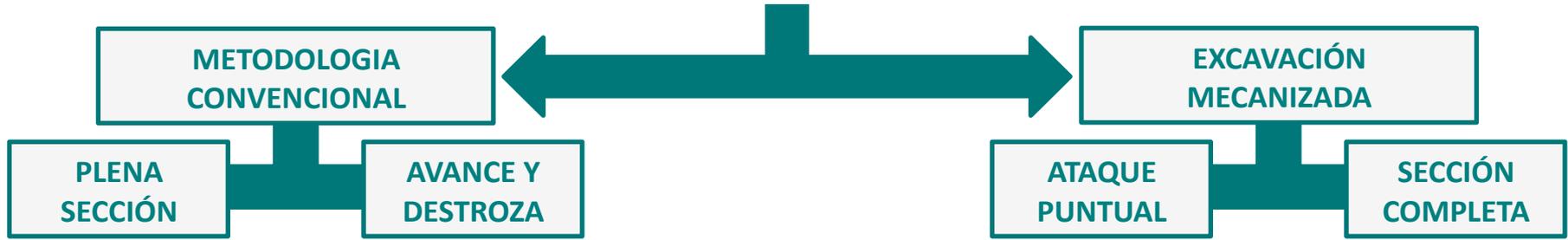
Constituye una de las secciones clásicas por el aprovechamiento del gálibo y la conveniencia estructural. A mayor sea la curvatura del techo, mejor respuesta por antifunicularidad ofrecerá, trabajando a axil y, en menor medida, a flexión.

A menor sea la competencia de los hastiales, mayor deberá ser la curvatura de los hastiales, que reciben un fuerte empuje axil.

La menor competencia hará adoptar contrabóvedas en lugar de soleras planas.

Tipos y características

Clasificación en base al método constructivo



<https://www.flickr.com/photos/mikelo>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0>.
<https://www.youtube.com/watch?v=ZNOU0iOxec4>.



<https://www.flickr.com/photos/barrenera>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0>.
<https://www.youtube.com/watch?v=QvittkyF5im0>.



<https://www.flickr.com/photos/pacgov>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0>.
<https://www.youtube.com/watch?v=MuydnzcOXhk>.
<https://www.youtube.com/watch?v=U3lI2H5GGIU>.
<https://www.youtube.com/watch?v=XpOc2ZQ7X1o>.
<https://www.youtube.com/watch?v=126-O3BQWmQ>.

Tipos y características

Clasificación en base a la ubicación del túnel con respecto al entorno



«Pasaje de Peña», Santiago S.V.
<https://www.flickr.com/photos/neluco>.
<https://flic.kr/p/jeGGc7>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0>.



«A-4, Despeñaperros (Jaen)», Ministerio de Fomento.
<https://www.flickr.com/photos/fomentogob>.
<https://flic.kr/p/9VcPVg>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0>.

Tipos y características

Clasificación en base a la ubicación del túnel con respecto a otros

- 🕒 Simple.
- 🕒 Túneles gemelos.
- 🕒 Túneles múltiples. ➔

La multiplicidad puede venir determinada por los túneles del propio proyecto, o de múltiples obras en un mismo emplazamiento.



Túneles múltiples



Túneles gemelos

«Eurotunnel (Calais)».
<https://www.flickr.com/photos/87079797@N02>.
<https://flic.kr/p/dcMjzL>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0>.
<https://www.youtube.com/watch?v=ozsdZ8CbEAg>.

51 Km, 38 bajo fondo marino. Dos túneles de vía única y un tercero de servicio.

«Brunel's Thames Tunnel Walk», Ministerio de Fomento.
<https://www.flickr.com/photos/wirewiping>.
<https://flic.kr/p/nsSvU5>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0>.

Opción habitual en túneles carreteros de autovías en la actualidad.

La apertura de un hueco de excavación implica una rotura en el equilibrio de fuerzas existentes en el macizo con anterioridad a la ejecución del mismo.

Las características geológicas y geotécnicas del macizo jugarán un papel importante en el desarrollo de las obra, por lo que su adecuada definición resulta de vital importancia. Una adecuada campaña de sondeos con los pertinentes ensayos puede contribuir a definir de forma adecuada una serie de secciones tipo a aplicar en tramos concretos de la obra, debiendo por tanto tramificar la misma en función de las condiciones existentes.

Estos tramos deberán considerar tanto los avances más adecuados para ejecutar la excavación en condiciones de seguridad, como las pertinentes medidas de sostenimiento.

La aplicación para la que una determinada obra subterránea se desarrolle condicionará aspectos básicos, como su trazado o sección, si bien ésta última podrá igualmente estar condicionada por aspectos constructivos, debiendo en ocasiones excavar geometrías extralimitadas con respecto a las secciones útiles que serán aprovechadas finalmente.