

CUADERNOS INTEMAC

Impermeabilización de túneles

Tunnel waterproofing

Pablo Usillos Espín

Geólogo. Jefe de la Sección de
Obras Subterráneas de INTEMAC

Geologist. Heads of Intemac's
Underground Works Section



METIRE UT SCIAS

INTEMAC

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

N.º 71

3.º TRIMESTRE '08



METIRE UT SCIAS

INTEMAC

INSTITUTO TÉCNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

CONTROL DE PROYECTO

CONTROL DE OBRA

GARANTÍA DE CALIDAD

(O.C.T.) CONTROL PARA EL SEGURO DE DAÑOS

INFORMES DE PATOLOGÍA, REHABILITACIÓN Y REFUERZOS DE CONSTRUCCIONES

OBRAS PÚBLICAS
EDIFICACIÓN
INSTALACIONES



INTEMAC
A U D I T

AUDITORIA TÉCNICO-ECONÓMICA DE CONSTRUCCIONES

- ASESORÍA EN EL PLANTEAMIENTO Y EN LA CONTRATACIÓN DE LA OBRA
- SEGUIMIENTO DE COSTOS Y PLAZOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN
- VALORACIONES DE TERRENOS, INMUEBLES Y CONSTRUCCIONES
- AUDITORÍAS DE TRABAJOS PARCIALES Y DE LIQUIDACIÓN DE LA OBRA



INTEMAC
E C O

AUDITORÍA TÉCNICA MEDIOAMBIENTAL

CONTROL DE IMPACTO AMBIENTAL

Obras Públicas

Edificación

Instalaciones

CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL

Aire

Agua

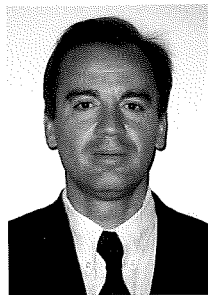
Ruido

AUDITORÍA MEDIOAMBIENTAL

ASESORAMIENTO EN MATERIA DE MEDIO AMBIENTE

IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES

TUNNEL WATERPROOFING



Pablo Usillos Espín

Geólogo
Jefe de la Sección
de Obras Subterráneas de INTEMAC

Geologist
Heads of Intemac's
Underground Works Section

Copyright @ 2008, INTEMAC

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida o distribuida de ninguna manera ni por ningún medio, ni almacenada en base de datos o sistema de recuperación, sin el previo permiso escrito del editor.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

ISSN 1133 - 9365

Depósito legal: M-49879-2004

Invoprint, s.l.

CONTENTS

1. INTRODUCTION
2. FACTORS TO BE CONSIDERED IN TUNNEL WATER-PROOFING PLANNING AND DESIGN
 - 2.1. EFFECT OF TERRAIN AND CONSTRUCTION SYSTEM
 - 2.2. EFFECT OF WATER
 - 2.2.1. CLASSIFICATION BASED ON UNDERGROUND WATER ZONES
 - 2.2.2. EFFECT OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE WATER AND THE SOI
 - 2.3. DETERMINING FACTORS IN THE CHOICE OF WATER-PROOFING
 - 2.4. WATERPROOFING REQUIREMENTS
 - 2.5. WATERPROOFING STAGES
 - 2.6. CHOICE OF WATERPROOF MEMBRANE MATERIALS
3. DESCRIPTION OF SEVERAL SOLUTIONS FOR WATERPROOFING UNDERGROUND WORKS
 - 3.1. INTEGRAL TUNNEL WATERPROOFING SYSTEMS
 - 3.2. CONTINUOUS MEMBRANE WATERPROOFING FOR TUNNELS
 - 3.3. BENTONITE GEOCOMPOSITE WATERPROOFING FOR UNDERGROUND WORKS
 - 3.4. SELF-ADHESIVE MEMBRANE WATERPROOFING:
 - 3.5. CONCRETE CONSTRUCTION JOINT WATERPROOFING AND SEALING
 - 3.6. OTHER SYSTEMS OF WATERPROOFING IN CUT-AND-COVER TUNNELS
 - 3.6.1. RUBBER MEMBRANE WATERPROOFING
 - 3.6.2. WATERPROOFING WITH GEOMATS
 - 3.7. COMBINED WATERPROOFING AND STRUCTURAL STRENGTHENING SYSTEMS
 - 3.7.1. IMPREGNATION WATERPROOFING
 - 3.7.2. ET GROUTING
4. CONCLUSIONS
5. REFERENCES

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. FACTORES A CONSIDERAR EN LA PLANIFICACIÓN Y PROYECTO DE LA IMPERMEABILIZACIÓN DE UN TÚNEL
 - 2.1. INFLUENCIA DEL TERRENO Y DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO
 - 2.2. INFLUENCIA DEL AGUA
 - 2.2.1. CLASIFICACIÓN SEGÚN LA ZONIFICACIÓN DEL AGUA EN EL TERRENO
 - 2.2.2. INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA Y DEL TERRENO
 - 2.3. FACTORES DETERMINANTES EN LA ELECCIÓN DE LA IMPERMEABILIZACIÓN
 - 2.4. REQUISITOS PARA UNA IMPERMEABILIZACIÓN
 - 2.5. FASES DE LA IMPERMEABILIZACIÓN
 - 2.6. ELECCIÓN DE LOS MATERIALES DE LAS LÁMINAS DE IMPERMEABILIZACIÓN
3. DESCRIPCIÓN DE VARIAS SOLUCIONES PARA LA IMPERMEABILIZACIÓN DE OBRAS SUBTERRÁNEAS
 - 3.1. SISTEMAS INTEGRALES DE IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES
 - 3.2. IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES CON PROYECCIÓN DE MEMBRANAS CONTINUAS
 - 3.3. IMPERMEABILIZACIÓN DE OBRAS SUBTERRÁNEAS CON GEOCOMPUESTOS DE BENTONITA
 - 3.4. IMPERMEABILIZACIÓN A BASE DE LÁMINAS AUTO-ADHESIVAS
 - 3.5. IMPERMEABILIZACIÓN Y SELLADO DE JUNTAS DE HORMIGONADO
 - 3.6. OTROS SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE FALSOS TÚNELES
 - 3.6.1. IMPERMEABILIZACIÓN CON MEMBRANAS DE CAUCHO
 - 3.6.2. IMPERMEABILIZACIÓN CON GEORREDES
 - 3.7. SISTEMAS COMBINADOS DE IMPERMEABILIZACIÓN Y REFUERZO ESTRUCTURAL
 - 3.7.1. IMPERMEABILIZACIÓN MEDIANTE INYECCIONES DE IMPREGNACIÓN
 - 3.7.2. JET GROUTING
4. CONCLUSIONES
5. BIBLIOGRAFÍA

ABSTRACT

The significant intensification of civil construction in recent decades has led to rapid technological progress in all areas of the industry, driven by research and development and the exchange of experiences both within and across national borders. Government bodies, associations and professional committees as well as specialized companies have participated in that progress. The result, in the area of underground waterproofing and drainage, has been the perfection of traditional options and the appearance on the market of new alternatives that contribute to improving construction processes while ensuring high performance and longer durability throughout the service life of facilities.

The Spanish National Weatherproofing Association (Spanish initials, ANI) and the Centre for Studies and Experimentation in Public Works (Spanish initials, CEDEX) are devoting considerable effort to waterproofing research, standardization, quality and expansion, covering issues related to design, materials and installation. The present article is based on a conference delivered at the 2nd National Waterproofing Congress sponsored by these two institutions and held at Palma de Majorca in April 2008.

1.- INTRODUCTION

Any number of complications, primarily in connection with terrain instability, may arise in underground construction. In most cases one of the determining factors is the presence of water, which may add to the complexities generated by the appearance of unfavourable stone formations. The consequences may be events not envisaged in the design, that may have an adverse effect on both works safety and costs.

As a rule, difficult situations occurring during tunnel construction are handled internally, within the scope of the works themselves and the respective professions. At the same time, a tunnel completed with no major complications during excavation generates enormous satisfaction at all levels among all the actors involved in its construction.

In either case, what ultimately affects tunnel users is the finish, and in that regard proper waterproofing is imperative to ensure that tunnels remain dry. This in turn calls for determining the waterproofing and drainage measures best suited to each situation during the design phase and their adaptation during the works as necessary. This will prevent seepage through the lining, roadway or carriageway that would compromise optimal use of the works.

Any number of waterproofing solutions may be adopted in underground facilities. The best choice should be based on the factors discussed below, which depend on the type of work in question.

The publication of Spanish standard UNE 104424 in 2000 ⁽¹⁾, covering the installation of P-PVC waterproofing membranes, provided Spanish engineers with a sound reference for applying this type of waterproofing, one of the systems most commonly used in underground works.

Other texts, such as European standard UNE-EN 13491, published in 2005, on geosynthetic barriers and the requirements for their use in underground works and standard UNE-EN 13526 released in 2001 on geotextiles and related products used as waterproofing membranes in tunnel construction, supplemented and expanded information on the use of such products.

RESUMEN

El gran desarrollo de las obras civiles en las últimas décadas ha derivado en una rápida evolución de la tecnología constructiva en todos sus campos, promovida por los procesos de investigación y desarrollo y por el intercambio de experiencias dentro y fuera de nuestras fronteras. En estas labores han participado tanto los organismos oficiales, asociaciones y comités profesionales como las empresas especializadas del sector. La consecuencia de todo esto dentro del campo de la impermeabilización y drenaje de las obras subterráneas, ha sido el perfeccionamiento de las opciones clásicas y la aparición en el mercado de nuevas alternativas, que contribuyen a mejorar los procesos constructivos y permiten tener una alta efectividad y una mayor durabilidad durante el periodo de explotación.

La Asociación Nacional de la Impermeabilización (ANI) y el CEDEX están desarrollando un trabajo muy importante en la investigación, normalización, calidad y expansión de todos los temas relacionados con la impermeabilización, tanto en el diseño y la puesta en obra como en el de los materiales. El trabajo que aquí se expone tiene como base la ponencia presentada en el II Congreso Nacional de Impermeabilización, organizado por estas entidades, que se desarrolló en Palma de Mallorca en abril de 2008.

1.- INTRODUCCIÓN.

En las obras subterráneas, son muchas las complicaciones que pueden darse durante el proceso constructivo, principalmente relacionadas con la inestabilidad del terreno. En la mayoría de los casos la presencia del agua es un factor determinante, que a su vez puede combinarse con la aparición de litologías desfavorables. Todo esto suele derivar en fenómenos a veces no previstos en el proyecto, y tener una repercusión tanto en la seguridad como en el coste y plazo de la obra.

Todas las situaciones difíciles vividas durante la construcción de un túnel suelen quedar, por regla general, dentro de la propia obra, y no trascender más allá del ámbito profesional. Por otro lado, un túnel acabado sin grandes complicaciones durante su excavación, reporta una gran satisfacción a todos los niveles, en todos los involucrados en su construcción.

En cualquiera de los dos casos, lo que realmente incidirá sobre el usuario del túnel, será el acabado de éste, dentro del cual se encuentra la necesidad de conseguir un túnel seco por medio de una buena impermeabilización. Para lograrlo, es imprescindible contemplar en la fase de proyecto y adaptar durante la obra, si fuera necesario, las medidas de impermeabilización y drenaje más convenientes en cada situación. Con esto evitaremos la presencia de filtraciones a través del revestimiento, de la plataforma o del vial, que comprometan la correcta explotación de la obra ejecutada.

Son muchas las soluciones que pueden plantearse a la hora de aplicar una impermeabilización en una obra subterránea. Para realizar una óptima elección debemos tener en cuenta varios factores, que se expondrán a continuación, condicionados por el tipo de obra que se esté realizando.

La aparición en el año 2000 de la norma UNE 104424 ⁽¹⁾, cuyo contenido recoge la puesta en obra de los sistemas de impermeabilización con láminas de PVC-P, ha proporcionado a los técnicos españoles una buena referencia para la aplicación de este tipo de impermeabilización, ya que se trata de uno de los sistemas más utilizados dentro del ámbito de las obras subterráneas.

Otras normas, como la europea UNE-EN 13491 del 2005, referente a las barreras geosintéticas y los requisitos para su utilización en obras subterráneas y la norma UNE-EN 13256 del 2001, sobre geotextiles y productos relacionados utilizados como membranas de impermeabilización frente a fluidos en la construcción de túneles, han complementado y ampliado las referencias sobre su utilización.

This Article reviews traditional approaches to tunnels, water and waterproofing and describes the various alternatives and solutions that can be applied, depending on specific needs.

2.- FACTORS TO BE CONSIDERED IN TUNNEL WATERPROOFING PLANNING AND DESIGN. (2,3,4,10)

The numerous factors involved in good tunnel drainage and waterproofing design and planning depend on many variables:

- Terrain and water (hydrogeological) conditions with respect to the construction system.
- Environmental constraints → impact on aquifers.
- Concrete typology in underground works → tunnel use.
- Degree of waterproofing required.
- Choice of most suitable waterproofing system.
- Waterproofing performance and durability.

Several of these factors are discussed below.

2.1.- EFFECT OF TERRAIN AND CONSTRUCTION SYSTEM

The nature of the terrain, along with the presence and conditions of the water it contains, largely determine the choice of the construction and structural systems adopted, and concomitantly the waterproofing measures required.

Normally, three major types of terrain can be distinguished:

- 1) **Hard rock:** Excavation generally involves blasting and/or, where the abrasiveness of the mineralogical components of the rock allows, the use of partial face machines. This type of terrain is regarded to be highly stable and calls for little or no support.

Waterproofing may be installed after the surfaces are blinded either with localized repairs or a thin layer of shotcrete. A final lining may subsequently be applied, where suitable, which may consist in gunned or bulk concrete or precast panels.

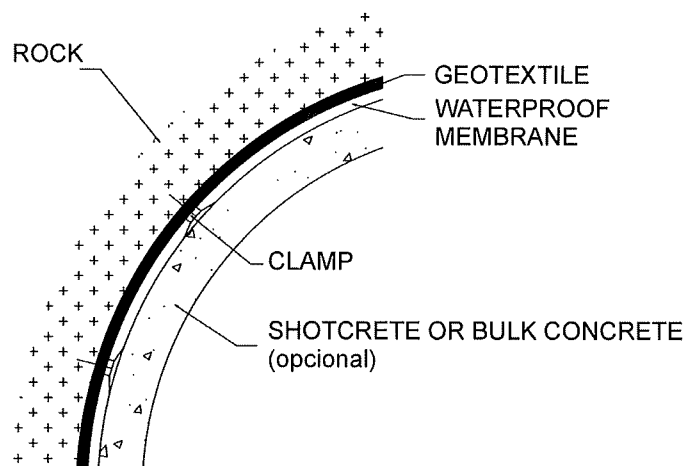
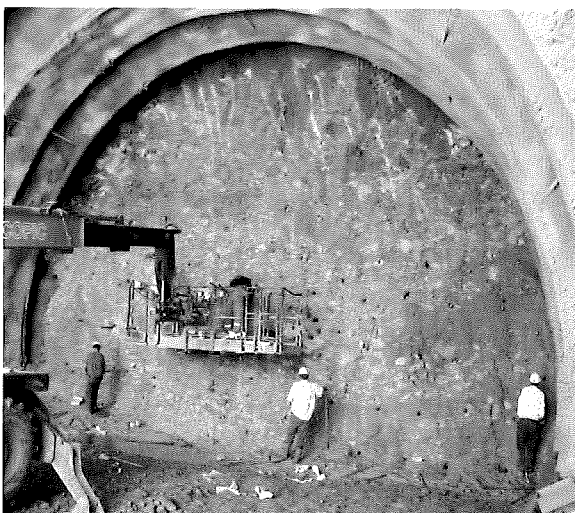


Figure 1. Cross-section of standard support and waterproofing in hard rock

En este Cuaderno se realizará un repaso de los conceptos clásicos relacionados con los túneles y el agua y su relación con la impermeabilización, y se describirán varias alternativas y soluciones, que podrán aplicarse según sean las necesidades.

2.- FACTORES A CONSIDERAR EN LA PLANIFICACIÓN Y PROYECTO DE LA IMPERMEABILIZACIÓN DE UN TÚNEL.^(2,3,4,10)

Los factores que influyen para realizar una buena planificación y diseño de las medidas de drenaje e impermeabilización de un túnel, son muy numerosos y dependen de muchas variables:

- Condiciones del terreno y del agua (hidrogeología) respecto al sistema constructivo.
- Exigencias medioambientales → Afección a acuíferos.
- Tipología concreta de la obra subterránea → Uso del túnel.
- Grado de impermeabilización requerido.
- Elección del sistema de impermeabilización más adecuado.
- Efectividad y durabilidad de la impermeabilización.

A continuación se tratarán algunos de los factores enumerados en la relación anterior.

2.1.- INFLUENCIA DEL TERRENO Y DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO

La naturaleza del terreno y la presencia y condiciones del agua que contenga, será un elemento determinante en la elección de los sistemas constructivos y estructurales que se adopten, y como tal en las medidas de impermeabilización que se requieran.

Normalmente y de manera simplificada se distinguen tres tipos de terreno, que a continuación se describen:

- 1) **Terreno duro:** Para su excavación se emplean habitualmente voladuras y/o máquinas de ataque puntual, si lo permite la abrasividad de los componentes mineralógicos de la roca. El sostenimiento aplicado suele ser muy ligero o nulo, ya que el terreno se considera estable.

La impermeabilización puede colocarse después de regularizar la superficie, bien con saneos localizados o con la aplicación de una ligera capa de hormigón proyectado. Posteriormente, si se considera adecuado, irá un revestimiento final, que podrá ser de hormigón proyectado, en masa o con paneles prefabricados.

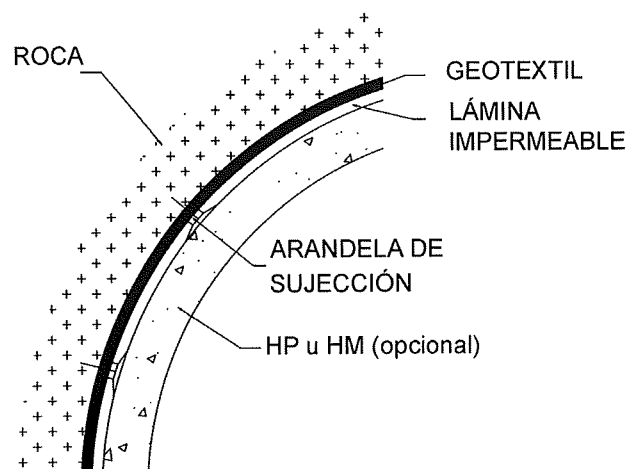
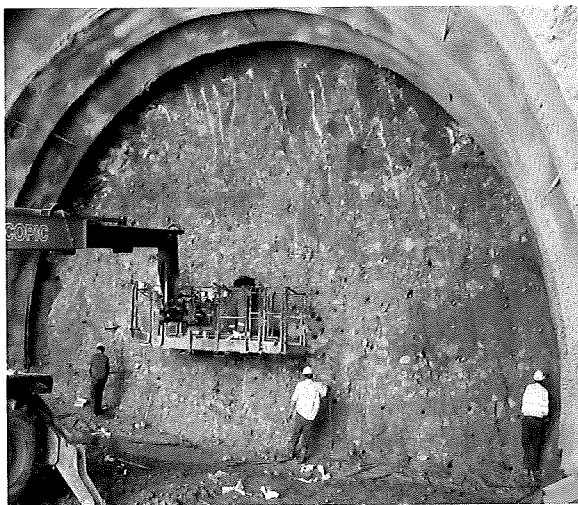


Figura 1. Sección tipo sostenimiento- impermeabilización en terreno duro

- 2) **Soft rock:** This type of terrain must be excavated by stages, installing the support best suited to the tunnelling method used (Austrian, Belgian, German, Bernold or others). The waterproofing material is placed over the support and ultimately covered by the last layer of lining.

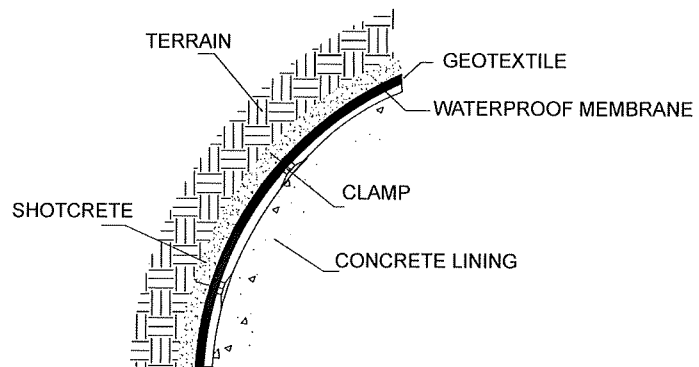


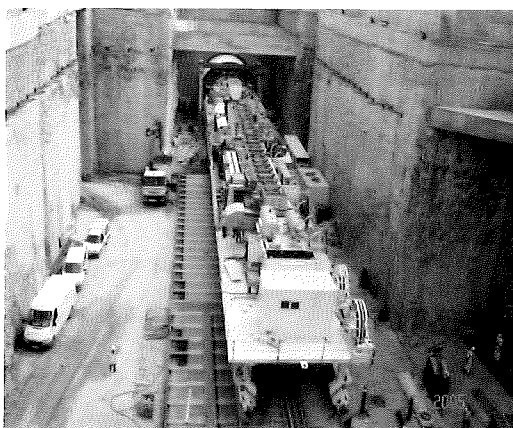
Figure 2. Cross-section of standard support and waterproofing un soft rock

- 3) **Soft ground:** Several tunnelling methods may be used in this type of ground. At present, integral TBM-type machines, and more specifically the earth pressure-balanced or EPB variety of such shields, are very popular for their high performance in all respects. In this case the lining, which must be placed immediately after excavation, consists in rings normally regarded to be watertight because of the elastomeric joints between their component segments. The mortar subsequently injected into the gap between the extrados of the ring and the ground serves a dual purpose: as a fill and as waterproofing.

When for any of a series of reasons (need to erect rings due to deviations between the design and actual layouts, damage to segment corners and similar) subsequent waterproofing is required, the solution usually involves treatments to compact the ground surrounding the ring (injection), channelling the water or sealing the joints between segments (injection, membranes or similar).

For tunnels below the water table and/or subjected to high hydrostatic pressure, a further layer of concrete lining is sometimes required on the interior to bear the water pressure. In such cases the waterproof membrane must be placed between the two linings to ensure the entire assembly is watertight.

In the event, injected waterproofing and jet grouting treatments (seals and pile walls) may also prove to be useful.



SEGMENTED PRECAST RINGS

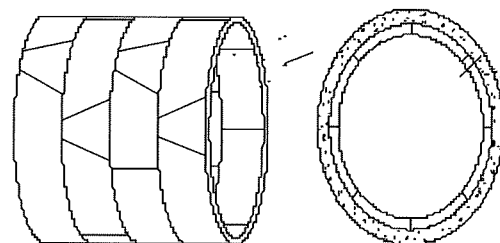


Figure 3. Cross-section of standard support and waterproofing in ground tunnelled with a tbn

- 2) **Terreno quebradizo:** En este tipo de terreno es necesario realizar la excavación en varias fases e ir aplicando el sostenimiento más idóneo según el sistema constructivo que se use (austriaco, belga, alemán, Bernold, etc.). Sobre el sostenimiento se colocará la impermeabilización, que será cubierta posteriormente por el revestimiento definitivo.

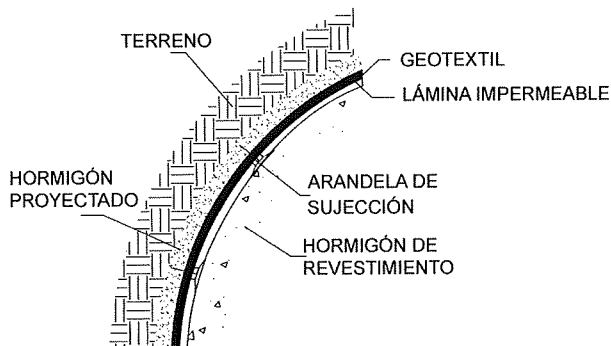


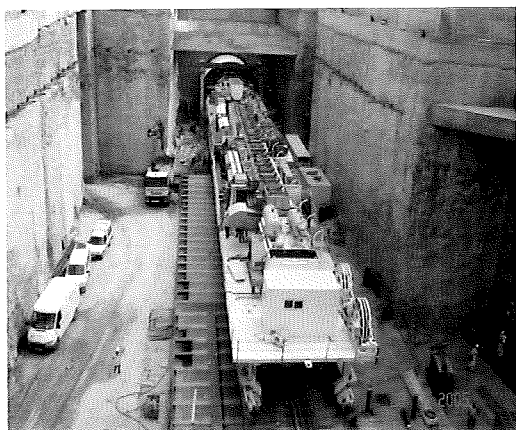
Figura 2. Sección tipo sostenimiento-impermeabilización en terreno quebradizo

- 3) **Terreno blando:** Son varios los sistemas de ejecución de túneles que se pueden utilizar para este tipo de terreno. Actualmente está muy extendido el uso, por su alta efectividad en todos los conceptos, de las máquinas integrales tipo TBM y, concretamente los escudos en la variedad de presión de tierras (EPB). En este caso el revestimiento se coloca inmediatamente posterior a la excavación y está formado por anillos de dovelas, que se presuponen estancas en la mayoría de los casos, ya que llevan unas juntas elastoméricas en la unión de cada segmento. Posteriormente se realiza una inyección de mortero en el gap existente entre el trasdós del anillo y el terreno, que le proporciona tanto el efecto de relleno como el de impermeabilización.

Cuando por diversas circunstancias (colocación forzada de los anillos por la desviación entre el trazado y el guiado, daño en las esquinas de las dovelas, etc.) es necesario aplicar un tipo de impermeabilización posterior, se suelen utilizar tratamientos de consolidación de la franja del terreno que rodea el anillo (inyecciones), o bien el sellado o canalización del agua en las juntas entre dovelas (tratamiento por inyección, láminas, etc.)

Para el caso de túneles bajo el nivel freático y/o con grandes presiones hidrostáticas, es a veces necesario crear un nuevo revestimiento de hormigón armado en el interior, que soporte las presiones de agua existentes. En este caso la lámina de impermeabilización se colocará entre los dos revestimientos, buscando la estanqueidad total del conjunto.

Para estos casos también es muy útil, en algunas situaciones, la utilización de inyecciones de impermeabilización del terreno y tratamientos a base de jet grouting (tapones y pantallas de cierre).



ANILLOS PREFABRICADOS DE DOVELAS

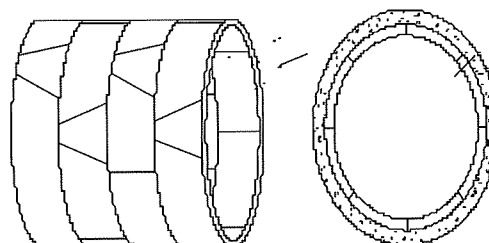


Figura 3. Sección tipo sostenimiento-impermeabilización en terrenos realizados con tbm.

2.2.- EFFECT OF WATER

Both the quality of the water and its location with respect to the tunnel to be waterproofed clearly condition the type of solutions that should be applied. The existing classification is based on the underground water pressure zone distribution.

2.2.1.- Classification based on underground water zones

Waterproofing in the capillary fringe

Seepage water is retained in this area above the water table, forming a capillary membrane in the inter-granular voids.

An aeration and an evaporation zone are located above this fringe, while the zone below is the saturation zone.

The general recommendation in this case is to waterproof all the underground elements in this zone with paint or primers and membranes.

Waterproofing in saturation zones

The saturated zone calls for a flexible system able to resist the water pressure and duly channel it to the longitudinal drainage system in the tunnel.

Waterproofing in the presence of underground water

Here waterproofing must be flexible and able to resist the underground water pressure.

Depending on the circumstances, existing water flows may have to be retained or diverted.

2.2.2.- Effect of the chemical composition of the water and the soil

Information on the chemical composition of the water and the soil is requisite to the choice of the most suitable materials for each case, and to identifying the substances that may damage such materials.

The following tables, copied from Spanish standard UNE 104424:2000⁽¹⁾, and originally published in German standard DIN 4030⁽²²⁾, give the limits for each case.

| Factor | Aggressiveness | | |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|
| | Slightly aggressive | Heavily aggressive | Very heavily aggressive |
| pH value | 6.5 – 5.5 | 5.5 – 4.5 | < 4.5 |
| lime-dissolving carbonic acid | 15 - 30 | 30 – 60 | > 60 |
| Magnesium | 100 – 300 | 300 – 1 500 | > 1 500 |
| Ammonium | 15 – 30 | 30 – 60 | > 60 |
| Sulphates | 200 – 600 | 600 – 3 000 | > 3 000 |
| Water hardness in German degrees | 5 – 3 | < 3 | |

Table 1. Limiting values for evaluating the aggressiveness of substances in underground water (in mg/l) ^{(1),(22)}

2.2.- INFLUENCIA DEL AGUA.

Tanto la calidad del agua como la zona en la que ésta se encuentre respecto al túnel que ha de impermeabilizarse, condicionarán con claridad al tipo de soluciones que se deben de usar. Existe una clasificación al respecto, que se basa en la zonificación de los niveles piezométricos distribuidos en el terreno.

2.2.1.- Clasificación según la zonificación del agua en el terreno

Impermeabilización en franja capilar

El agua de filtración en esta zona es retenida por encima del nivel freático, formando una membrana capilar entre los espacios intergranulares.

Por encima se sitúa una zona de aireación y una zona de evaporación y por debajo está la zona de saturación.

Las recomendaciones generales en este caso, consisten en realizar una impermeabilización en todas las construcciones subterráneas que se realicen, a base de pinturas o imprimaciones y de membranas.

Impermeabilización en zonas de saturación

La zona saturada requiere un sistema flexible y resistente a la presión de agua y que sea canalizado convenientemente al drenaje longitudinal del túnel.

Impermeabilización en aguas subterráneas

El sistema de impermeabilización debe ser flexible y resistente a la presión del agua subterránea.

Según las circunstancias, pudiera ser necesario usar métodos de retención o desvío de las fluencias de agua existentes.

2.2.2.- Influencia de la composición química del agua y del terreno

Para la elección de los materiales más idóneos a colocar en cada caso, es indispensable tener un conocimiento de la composición química del agua y del terreno, para saber qué sustancias pueden causar afección a dichos materiales usados en los tratamientos.

Las tablas siguientes, recogidas en la norma UNE 104424:2000⁽¹⁾ y procedentes de la DIN 4030⁽²²⁾, muestran los límites aceptados en cada caso.

| Factores perjudiciales | Grado de agresividad | | |
|--------------------------------|----------------------|-------------|------------|
| | Débil | Fuerte | Muy fuerte |
| Factor pH | 6.5 – 5.5 | 5.5 – 4.5 | < 4.5 |
| Anhidrido Carbónico | 15 - 30 | 30 – 60 | > 60 |
| Magnesio | 100 – 300 | 300 – 1 500 | > 1 500 |
| Amonios | 15 – 30 | 30 – 60 | > 60 |
| Sulfatos | 200 – 600 | 600 – 3 000 | > 3 000 |
| Dureza agua en grados alemanes | 5 – 3 | < 3 | |

Tabla 1. Límites perjudiciales de las sustancias en aguas subterráneas (valores en mg/l). ⁽¹⁾, ⁽²²⁾

| | Limiting value | |
|----------------|-------------------------|--------------|
| | Concrete (mg/l) | Steel (mg/l) |
| Sulphates | > 200 | > 300 |
| Nitrates | > 50 | > 50 |
| Carbonic acid | Traces | |
| Sulphuric acid | > 1 | - |
| Chlorides | - | > 100 |
| Oil and grease | - | > 5 to 10 |
| Oxygen | - | > 4 |
| Magnesium | > 100 | - |
| Phenols | Very heavily aggressive | |

Table 2. Limiting values for evaluating the aggressiveness of water ⁽¹⁾

| Factor | Aggressiveness | |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------|
| | Slightly aggressive | Heavily aggressive |
| Acidity according to Baumann-Gully | > 20 | - |
| Sulphates in per kg of air-dry soil | 2 000 – 5 000 | > 5 000 |

Table 3. Limiting values for evaluating the aggressiveness of soils ^(1,22)

2.3.- DETERMINING FACTORS IN THE CHOICE OF WATERPROOFING

The waterproofing system applied to each tunnel should be in keeping with tunnel type and function.

The following Table, copied from the Spanish standard ⁽¹⁾, gives certain recommendations for the design of tunnel and underground gallery waterproofing, which are ranked on a scale of 1 to 7 depending on tunnel use.

| Waterproofing rating | Damp characteristics | Intended use of facility | Water seepage l/m ² in 24 h |
|----------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 | Must resist diffusion of external water vapour | Dry places - Air-conditioned premises - Continued human presence - Damp sensitive warehouses (paper, food...) | 0 |
| 2 | DRY water vapour diffusion allowed | - Military facilities and damp premises (bathrooms...) - Premises with power supply facilities (substations) - Underground premises for general use | 0 |
| 3 | DRY | - Warehouses and retail establishments - Underground stations | < 0.001 |
| 4 | NEARLY DRY | - Motorway tunnels - Mountain tunnels - High speed railway tunnels | <0.01 |
| 5 | Capillary seepage | - Car parks - Road and hard rock tunnels | <0.1 |
| 6 | Slight leakage | - Railway tunnels - Underground lines | <0.5 |
| 7 | Leakage | - Sewer tunnels | <1.0 |

Table 4. Definition of waterproofing for tunnel and underground gallery design ⁽¹⁾

| | Límites perjudiciales | |
|---------------------|------------------------|--------------|
| | Hormigón (mg/l) | Acero (mg/l) |
| Sulfatos | > 200 | > 300 |
| Nitratos | > 50 | > 50 |
| Anhídrido Carbónico | Con cantidades mínimas | |
| Ácido Sulfúrico | > 1 | - |
| Cloros | - | > 100 |
| Aceites y Grasas | - | > 5 to 10 |
| Oxígeno | - | > 4 |
| Magnesio | > 100 | - |
| Fenoles | Muy perjudicial | |

Tabla 2. Límites perjudiciales para la valoración de la agresividad de las aguas. (1)

| Factores Perjudiciales | Grado de agresividad | |
|-------------------------------------|----------------------|---------|
| | Débil | Fuerte |
| Grado de acidez según Baumann-Gully | > 20 | - |
| Sulfatos en mg/kg de suelo seco | 2 000 – 5 000 | > 5 000 |

Tabla 3. Límites perjudiciales para la valoración de la agresividad de los suelos. (1,22)

2.3.- FACTORES DETERMINANTES EN LA ELECCIÓN DE LA IMPERMEABILIZACIÓN

Los sistemas de impermeabilización que se apliquen a cada túnel, deben estar acordes con el tipo de uso al que se someta y como tal a la función que han de desempeñar.

La siguiente Tabla, incluida en la norma UNE (1), refleja ciertas recomendaciones para el diseño de la impermeabilización de túneles y galerías, aplicando unos grados del 1 al 7 según el uso del túnel.

| Grado de impermeabilidad | Características de humedad | Utilización de la obra | Filtraciones de agua l/m2 en 24 h |
|--------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | No permitida la difusión de vapor desde el exterior | Lugares secos - Locales refrigerados - Presencia continua de personas - Almacenes sensibles a la humedad (papel, alimentos...) | 0 |
| 2 | SECO Permitida la difusión de vapor | - Instalaciones militares y locales húmedos (baños...) - Locales con instalación de suministro de energía (subestaciones) - Locales subterráneos de uso general | 0 |
| 3 | SECO | - Almacenes y locales comerciales - Estaciones de metro | < 0.001 |
| 4 | CASI SECO | - Túneles de autopista - Túneles de montaña - Túneles ferroviarios de alta velocidad | <0.01 |
| 5 | Filtraciones capilares | - Aparcamientos - Túneles de carretera y en roca | <0.1 |
| 6 | Ligero goteo de agua | - Túneles de ferrocarril - Líneas de metro | <0.5 |
| 7 | Goteo de agua | - Túneles de alcantarillado | <1.0 |

Tabla 4. Definición de impermeabilidad para el diseño de túneles y galerías. (1)

According to the above Table, tunnel use can be used as a criterion for the type of waterproofing required:

- Railway tunnels: need not be entirely watertight. Damp or minor seepage does not affect train traffic. The location of moisture is important, however, for it must not affect electrical systems (catenaries and so on) or damage the support. Ice formation may be another consideration.

Waterproofing must consist of at least a primary, an intermediate and a main system.

- Road and pedestrian tunnels: the degree of waterproofing is more demanding than above, while the systems to be applied are the same (primary, intermediate and main).
- Hydraulic tunnels: must be fully waterproofed, especially in the lower section, to prevent outward or inward leakage (minimum, primary and intermediate).
- Suburban tunnels, access galleries to hydraulic facilities: must meet all the same specifications as the above, particularly at the crown, to prevent condensation and damp that might affect electrical facilities and control equipment (primary, intermediate and main, and sometimes *a posteriori* waterproofing).
- Underground shelters and warehouses: require a high degree of waterproofing (primary, intermediate and main).

2.4.- WATERPROOFING REQUIREMENTS

The basic requirements for designing waterproofing are:

- a) Full coverage of all the areas to be protected.
- b) Sandwiching between two sturdy parts of the structure (if today's highly perfected integral systems are used, this may be omitted).
- c) Adaptability to the support surface (elasticity).
- d) Attachment mechanisms to ensure the material will not move before the lining is built.
- e) Resistance to aggressive water as well as to fluctuations in temperature and pressure.
- f) Durability.
- g) Resistance to micro-organisms.
- h) Choice of system appropriate for the support.
- i) Choice of most cost-effective procedure.

2.5.- WATERPROOFING STAGES

Four operational waterproofing stages have been defined and should be selectively applied depending on needs, existing seepage, type of support and the lining to be used, as follows:

- 1) **Primary waterproofing:** includes sealing off, collection and channelling work prior to intermediate and main and *a posteriori* waterproofing.

The most common systems include: fibrecement or plastic half rounds in a fishbone array all around the perimeter, protected during placement with ultrafast setting cement paste (Oberhasli system).

Drainage ditches lined with fast setting cement paste and the combination of the latter with shot-

Considerando la Tabla anterior, se puede establecer una diferenciación en función del uso del túnel:

- Túneles de ferrocarril: No tienen por que ser completamente estancos. Las humedades o pequeñas filtraciones no influyen en el tráfico de trenes. La ubicación de estos fenómenos es importante, ya que no deben afectar a los sistemas eléctricos (catenarias, etc.), ni provocar deterioros en el sostenimiento. La formación de hielo puede ser también un problema a considerar.

Se requiere una impermeabilización primaria, intermedia y principal.

- Túneles carreteros y de peatones: El grado de impermeabilización es más exigente que el anterior, con los mismos requerimientos respecto a los sistemas a aplicar (primaria, intermedia y principal)
- Túneles hidráulicos: Han de ser impermeables en su totalidad, fundamentalmente en la sección inferior, para evitar la fuga de agua o la entrada desde el exterior (mínimo primaria e intermedia).
- Túneles suburbanos, galerías de acceso a instalaciones hidráulicas: Han de tener las mismas características que los anteriores, sobre todo en bóveda, para evitar la condensación y la humedad, que pudiera afectar a las instalaciones eléctricas y equipos de control (primaria, intermedia y principal, a veces posterior)
- Refugios y almacenes subterráneos: Requieren un alto grado de impermeabilidad. (Primaria, intermedia y principal)

2.4.- REQUISITOS PARA UNA IMPERMEABILIZACIÓN

Los requisitos básicos para diseñar una impermeabilización:

- a) Recubrimiento total de las zonas a proteger.
- b) Estar entre dos partes firmes de la estructura (si se usa un sistema integral, actualmente muy perfeccionados, puede no aplicarse)
- c) Adaptabilidad a las superficies del soporte (elasticidad)
- d) Fijación adecuada que evite desplazamientos antes de construir el revestimiento.
- e) Resistencia a las aguas agresivas, y a las variaciones de temperatura y presión.
- f) Durabilidad.
- g) Resistencia a microorganismos.
- h) Elección del sistema adecuado en función del soporte.
- i) Adecuada elección del procedimiento en función del coste.

2.5.- FASES DE LA IMPERMEABILIZACIÓN

Desde el punto de vista operativo, se han definido cuatro fases de impermeabilización, que se aplicarán selectivamente según sean las necesidades, en función de las filtraciones existentes, del tipo de soporte y del revestimiento que se vaya a colocar:

- 1) **Impermeabilización primaria:** Son los trabajos de taponamiento, recogida y conducción de aguas, previos a los trabajos posteriores de impermeabilización intermedia y principal.

Los sistemas más usuales son: las medias cañas de fibrocemento o de material plástico, adosadas al contorno o perímetro, en forma de espina de pez, protegidas en su colocación con pasta de cemento con acelerante ultrarrápido (Sistema Oberhasli).

crete and lengths of hose cut and adapted for installation at the water outlet areas.

Drainage membranes applied to the area of the support where seepage is detected.

Both systems must be duly protected with sprayed mortar or shotcrete.

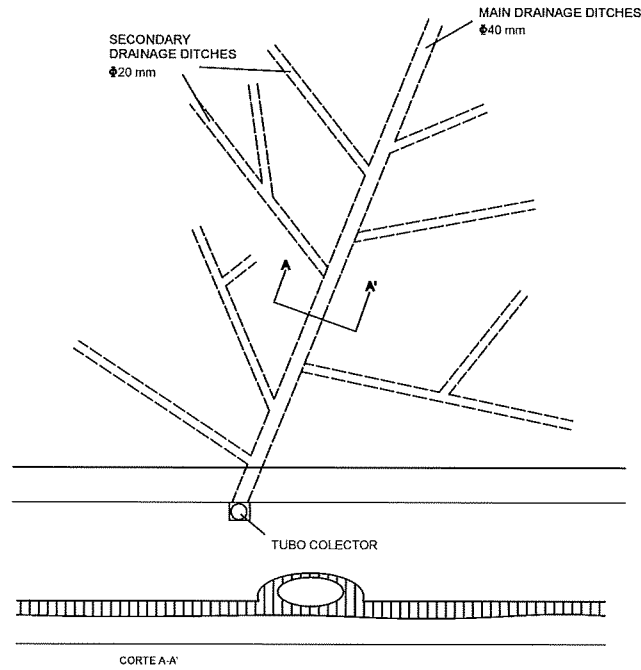


Figure 4. Oberhasli system

- 2) **Intermediate waterproofing:** consists of the application of mortar and shotcrete after primary waterproofing is completed. There are two types: protection and blinding.

Protection: reinforced sprayed mortar or shotcrete, with thicknesses of ≤ 7 cm to protect the primary system and prevent it from cracking.

Blinding: Sprayed mortar or shotcrete to serve as a support for the main waterproofing. The thickness may range from 1 to 25 cm.

- 3) **Main waterproofing:** consists in the installation of whatever type of system that guarantees the required degree of waterproofing and drainage. A number of solutions may be applied:

THERMOPLASTIC MATERIALS

-Prefabricated plastified polyvinylchloride (P-PVC) membranes (Spanish standard UNE 104424:2000).

-Polyolefin membranes: polyethylenes with different densities (HDPE, LDPE, VLDPE), polypropylenes (PP), co-extruded polyethylenes (COEX PE).

-Ethylene and vinyl acetate (EVA) copolymer membranes.

ELASTOMERIC MATERIALS

-Rubber (IRR butyl, EPDM, chloroprene), chlorosulphonated PE.

Los drenes formados con pasta de cemento y acelerante ultrarrápido, y la unión de este último con gunita y mangueras retiradas para formar el dren en si mismo.

Láminas drenantes colocadas sobre la zona del soporte que tenga filtraciones.

Ambos sistemas han de ser protegidos adecuadamente mediante mortero u hormigón proyectado.

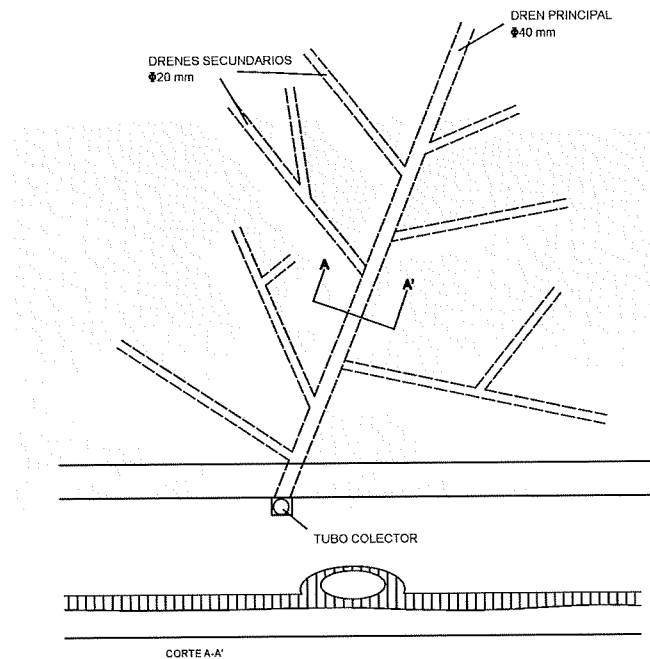


Figura 4. Sistema Oberhasli.

- 2) **Impermeabilización intermedia:** Son los trabajos posteriores a la impermeabilización primaria, que se efectúan mediante la aplicación de hormigones proyectados y morteros. Pueden ser de protección o de regularización.

Protección: Hormigón o mortero proyectado armado, con espesores ≤ 7 cm a modo de protección del sistema primario, para evitar la fisuración de éste.

Regularización: Proyección de hormigón o morteros para servir de soporte a la impermeabilización principal. Su espesor estará comprendido entre 1 y 25 cm.

- 3) **Impermeabilización principal:** Consiste en la colocación de un sistema, de cualquier tipo, que garantice la impermeabilización y drenaje en el grado requerido. Pueden usarse diferentes soluciones:

MATERIALES TERMOPLÁSTICOS

-Láminas sintéticas prefabricadas de Policloruro de Vinilo Plastificado, PVC-P (norma UNE 104 424:2000).

-Láminas a base de Poliolefinas: Polietilenos con diferentes densidades (PEAD, PEBD, PEMBD), Polipropilenos (PP), Polietilenos coextruidos (PE COEX).

-Láminas de Copolímeros de Etileno y Acetato de Vinilo (EVA)

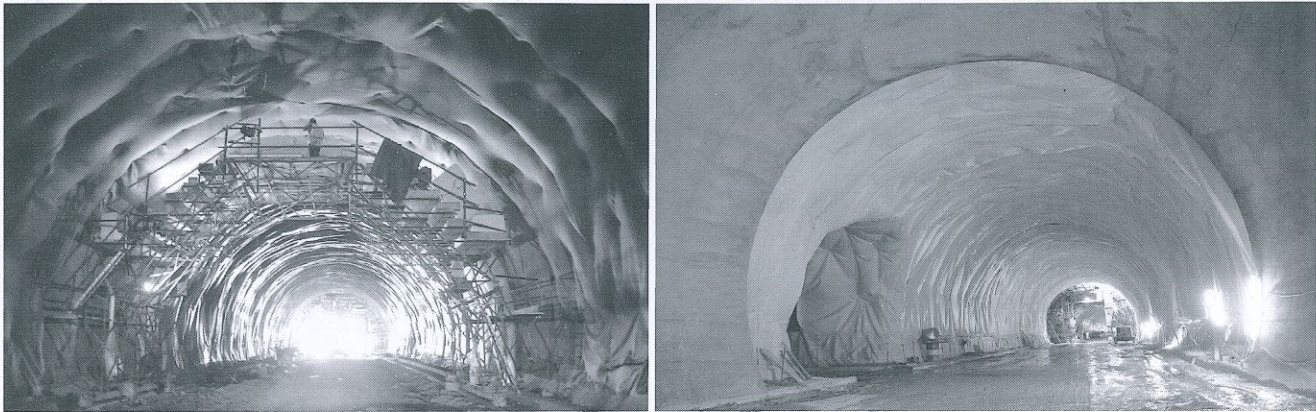
MATERIALES ELASTÓMEROS

-Cauchos (Butilo IRR, EPDM, Cloropreno), PE Clorosulfonado.

OTHER SYSTEMS

-Sprayed membranes, bentonite geocomposites, shotcrete, bituminous materials, epoxy resins, dry mix mortars, different types of geosynthetic products (Spanish and European standard UNE-EN 13491) and so forth.

Spanish standard UNE 104424:2000 lays down the requirements for installing prefabricated plastified PVC membranes in waterproof tunnels, which is presently the system most often specified in underground work design and therefore the one most commonly used.



Photos 1 and 2. Installation of main waterproofing membrane

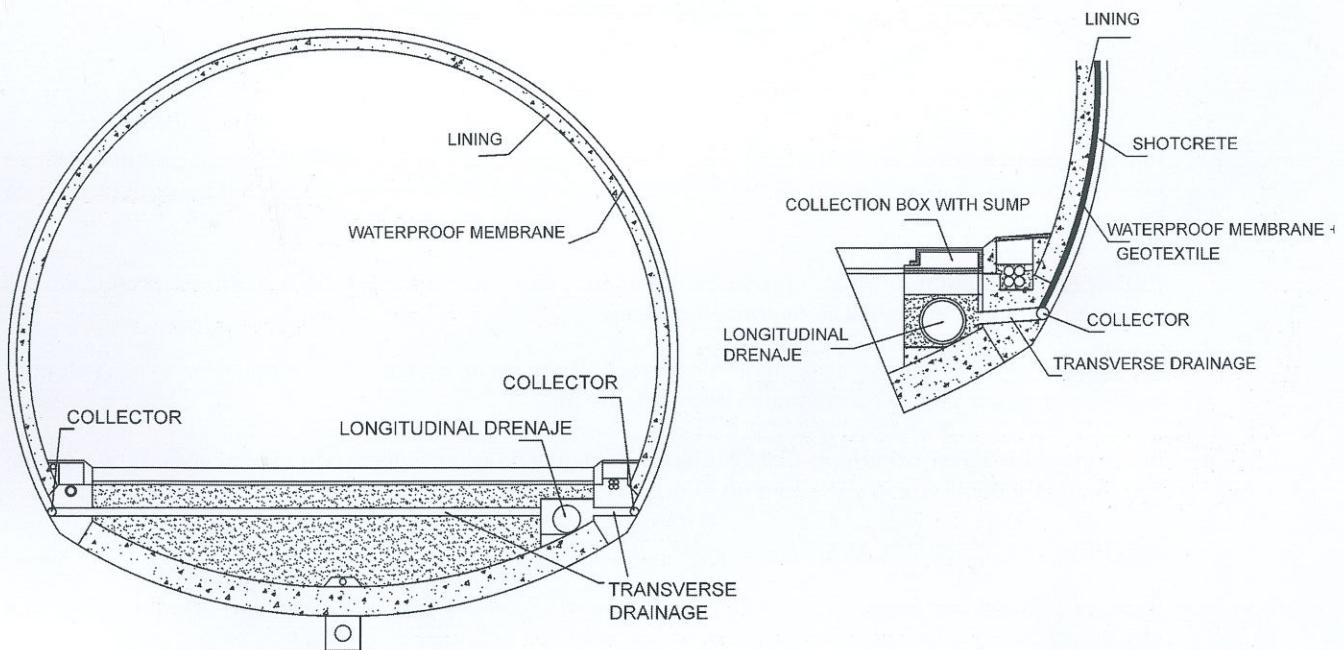


Figure 5. Cross-sections of traditional tunnel waterproofing and drainage

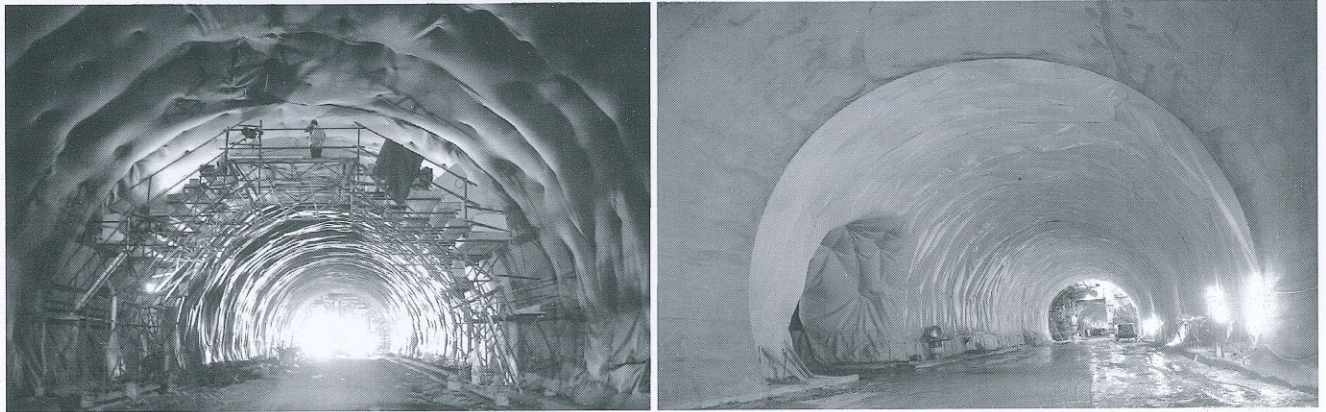
- 4) **A posteriori waterproofing:** work, planned or otherwise, to supplement the main waterproofing or repairs to achieve watertightness not previously attained.

Exposed or injected membranes, dry mix mortars, shotcrete, crack sealing and plugging, drainage, joint treatment, RC rings + membranes or geocomposites can all be used.

OTROS PROCEDIMIENTOS

-Membranas proyectables, geocompuestos de bentonita, hormigón proyectado, materiales bituminosos, resinas epoxi, morteros predosificados, geosintéticos de diferentes tipos (norma UNE-EN 13491), etc.

La norma UNE 104 424:2000, establece las exigencias para la puesta en obra de los sistemas de impermeabilización de túneles con láminas sintéticas prefabricadas de PVC-P, que actualmente son los sistemas más reflejados en los proyectos de las obras subterráneas y como tal los más usados.



Fotos 1 y 2. Colocación de membrana en la impermeabilización principal.

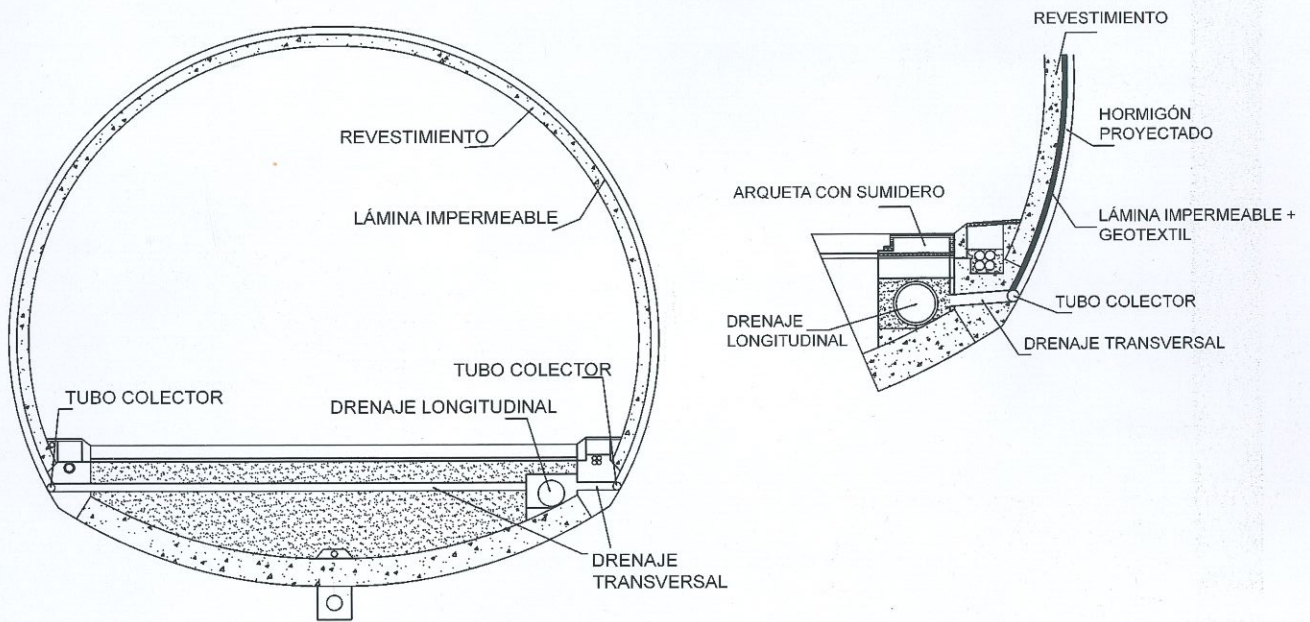


Figura 5. Secciones clásicas de impermeabilización y drenaje de un túnel.

- 4) **Impermeabilización posterior:** Son los trabajos complementarios, previstos o no, a la impermeabilización principal, o las labores de reparación, buscando una estanqueidad no alcanzada con anterioridad.

Pueden aplicarse láminas a cara vista, inyecciones, morteros predosificados, proyecciones de gunita, sellados y taponamientos de grietas, drenajes, tratamiento de juntas, anillos de HA + lámina o geocompuesto, etc.



Photos 3 and 4. A posteriori injected waterproofing in a segment-lined tunnel

2.6. CHOICE OF WATERPROOF MEMBRANE MATERIALS

The different thermoplastic and elastomeric materials that can be used in waterproofing membranes in tunnels and civil works in general, can be ranked by their performance with respect to different properties, as in the scheme below:

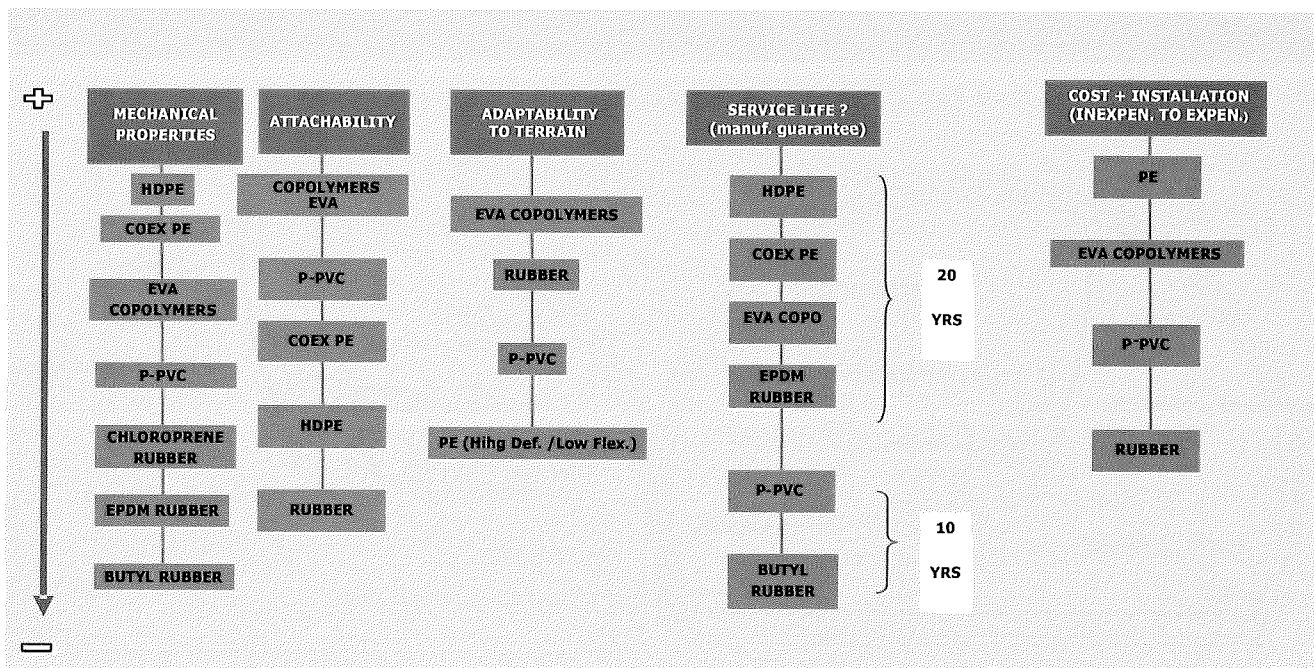


Figure 6. Properties of thermoplastic and elastomeric waterproofing membranes

As the above scheme shows, the materials with the highest mechanical strength are high density and co-extruded polyethylenes, with P-PVC occupying an intermediate position and the various types of rubber ranking lowest.

Attachability is greatest in EVA and P-PVC and lowest in the HDPE and rubber materials.

The thermoplastic materials perform better than the elastomers with respect to both these properties.

Membrane adaptability to the terrain can be evaluated on the grounds of deformability and flexibility, considered together. In this case, EVA copolymers, the various types of rubber and P-PVC rank higher than the polyethylenes.



Fotos 3 y 4. Inyecciones de impermeabilización posterior en un túnel de dovelas.

2.6. ELECCIÓN DE LOS MATERIALES DE LAS LÁMINAS DE IMPERMEABILIZACIÓN

Respecto a los diferentes materiales de tipo termoplástico y elastómero que se usan en las láminas de impermeabilización, tanto en túneles como en ingeniería civil en general, se puede realizar una representación de manera esquemática donde se refleja la gradación de varias propiedades:

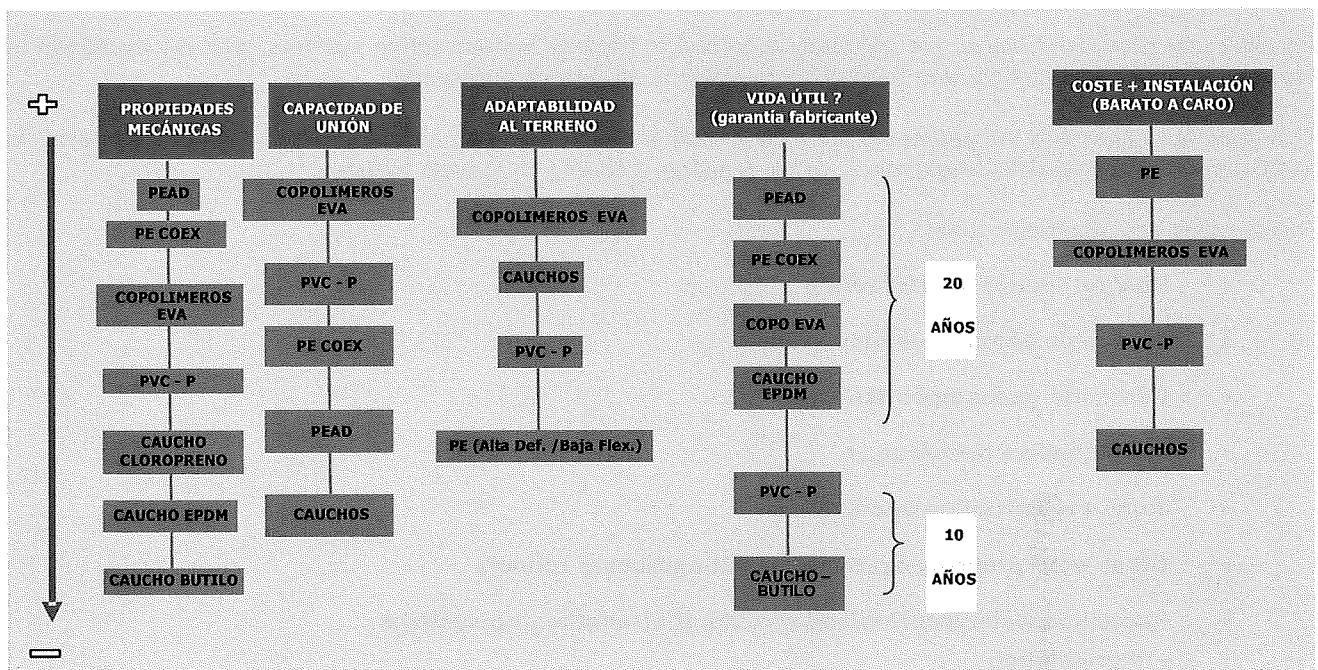


Figura 6. Propiedades de las láminas de impermeabilización termoplásticas y elastoméricas.

Según puede observarse en el esquema anterior, los materiales que presentan mejores propiedades mecánicas son los polietilenos de alta densidad y los coextruidos, estando el PVC-P en una situación intermedia y los cauchos en la posición más baja respecto a dicha propiedad.

La capacidad de unión es superior en los EVA y PVC-P y menor en los PEAD y Cauchos.

Ambas propiedades son mejores en los materiales termoplásticos que en los elastoméricos.

Si combinamos la capacidad de deformación y la flexibilidad podemos establecer la valoración de las láminas respecto a su adaptabilidad al terreno. En este caso los Copolímeros EVA, los Cauchos y el PVC-P están por encima de los Polietilenos.

The service life of a membrane is difficult to predict, for it depends on many external factors. The parameter most readily available is the manufacturer's guarantee, which is usually 10 or 20 years, as shown on the chart.

Membrane cost, which includes both material and installation, may vary widely depending on a number of factors, but as a general rule is lower in thermoplastic than elastomeric products.

Of the materials listed above, the elastomers, polyvinylchloride, high density polyethylene and co-extruded HDPE and other PEs are standardized in Spain under the UNE system, namely numbers 53586, 53402, 104300 and 104311, respectively.

EVA copolymer geomembranes are not standardized and to date have not been very extensively used in Spain, in stark contrast to the rest of Europe and America.

In choosing the most suitable membrane all the foregoing, along with the characteristics of the underground works in question, must be taken into account.

3.- DESCRIPTION OF SEVERAL SOLUTIONS FOR WATERPROOFING UNDERGROUND WORKS.⁽¹⁰⁾

As noted earlier, standard UNE 104424:2000 lays down all the requirements for P-PVC membrane waterproofing in tunnels and underground galleries. This section aims not to comment on those requisites, but to describe several commonly used waterproofing systems as general or specific solutions for waterproofing in different types of underground construction.

The solutions discussed below, are generally regarded to be main waterproofing systems, with the exception of impregnation and jet grouting, and joint sealing, which is an *a posteriori* system.

This does not mean that the geomembranes described above cannot be used *a posteriori*. Integral systems, in particular, were specifically developed to solve seepage problems in tunnels in use.

The systems described below are:

- **Integral tunnel waterproofing**
- **Sprayable continuous membranes**
- **Bentonite geocomposites**
- **Self-adhesive membranes**
- **Joint waterproofing and sealing**
- **Other waterproofing systems for cut-and-cover tunnels**
- **Combined waterproofing and structural strengthening systems:**
 - **Impregnation**
 - **Jet grouting**

3.1.- INTEGRAL TUNNEL WATERPROOFING SYSTEMS.^(5,6,7,10)

Definition: integral tunnel waterproofing is understood to be any system that covers all drainage, insulation and waterproofing needs with a single product.

Applications: these systems, applied in main and *a posteriori* waterproofing, can compete with standard PVC- and polyolefin-based solutions, but they were developed primarily for use in situations where such alternatives are unfeasible or less advantageous, such as:

- Waterproofing in tunnels with a low clearance, where the use of a membrane plus a further layer of shotcrete must be ruled out.

Al hablar de vida útil de la lámina, que es difícil de predecir ya que depende mucho de los factores externos; lo que verdaderamente se puede acotar es la garantía que en general ofrecen los fabricantes. Esta suele estar fijada en 10 o 20 años, según puede observarse en el esquema anterior.

Los costes de la lámina, donde se incluye el material y la instalación, pueden fluctuar mucho dependiendo de varios factores, pero se puede hablar en términos generales de que serán menores en los materiales termoplásticos que en los elastoméricos.

De los materiales antes mencionados, están normalizados en España bajo norma UNE los elastómeros (53 586), el policloruro de vinilo (53 402), el polietileno de alta densidad (104 300) y el PEAD coextruido con otros PE (104 311).

Las geomembranas de copolímero EVA no están normalizadas en España y todavía no tienen un uso muy extendido, al contrario que en el resto de Europa y América.

La elección que se pretenda realizar sobre el tipo de lámina a aplicar, deberá tener en cuenta lo anteriormente expuesto, y las características particulares de la obra subterránea que vaya a ejecutarse.

3.- DESCRIPCIÓN DE VARIAS SOLUCIONES PARA LA IMPERMEABILIZACIÓN DE OBRAS SUBTERRÁNEAS.⁽¹⁰⁾

Como ya se ha comentado con anterioridad, la norma UNE 104424:2000 recoge todas las prescripciones sobre los sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas de PVC-P. No es objeto de este Apartado el incidir sobre lo ya reflejado en esa norma, sino hacer una descripción de varios sistemas de impermeabilización que habitualmente se usan como soluciones generales o concretas para la impermeabilización en diferentes tipologías de construcciones subterráneas.

Las soluciones a describir a continuación, dejando aparte las inyecciones de impregnación y el jet grouting, se consideran en general como impermeabilizaciones principales, excepto el sellado de juntas que suele ser una impermeabilización posterior.

Esto no excluye que cualquiera de las láminas o geomembranas descritas puedan utilizarse como impermeabilizaciones posteriores, especialmente los sistemas integrales, que se desarrollaron a partir de las necesidades de impermeabilizar un túnel en servicio con grandes filtraciones.

Los sistemas a describir son los siguientes:

- **Sistemas integrales de impermeabilización de túneles**
- **Proyección de membranas continuas**
- **Geocompuestos de bentonita**
- **Láminas autoadhesivas**
- **Impermeabilización y sellado de juntas**
- **Otros sistemas de impermeabilización de falsos túneles**
- **Sistemas combinados de impermeabilización y refuerzo estructural:**
 - Inyecciones de impregnación
 - Jet grouting

3.1.- SISTEMAS INTEGRALES DE IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES.^(5,6,7,10)

Definición: Se entiende por sistemas integrales de impermeabilización en túneles aquellos que, con la colocación de un único producto, garantizan las necesidades de drenaje, aislamiento e impermeabilización.

Aplicaciones: Se aplica para impermeabilizaciones principales y posteriores. Estos sistemas pueden competir con las soluciones estándar, a base de PVC y Poliolefinas, pero su uso se ha desarrollado fundamentalmente para situaciones donde no son viables o son menos ventajosas éstas, tales como:

- Impermeabilización de túneles con el gálibo escaso, que no permiten la aplicación de una lámina más una nueva capa de hormigón proyectado u otro revestimiento posterior.

- Tunnel construction on a very tight timetable, requiring speedy as well as technically and economically feasible solutions.
- Tunnels at high elevations with a risk of ice formation.

Installation: Three types of installations can be defined:

- Exposed: repair or rehabilitation of old tunnels, respecting the clearance, and in new tunnels directly on the rock or the support, where the design calls for no bulk concrete lining.
- Sandwich: as an alternative to the traditional method in tunnels where a final concrete lining is required.
- Cut-and-cover tunnels: placement in cut-and-cover tunnels with no need to install geotextile protection thanks to high membrane strength.

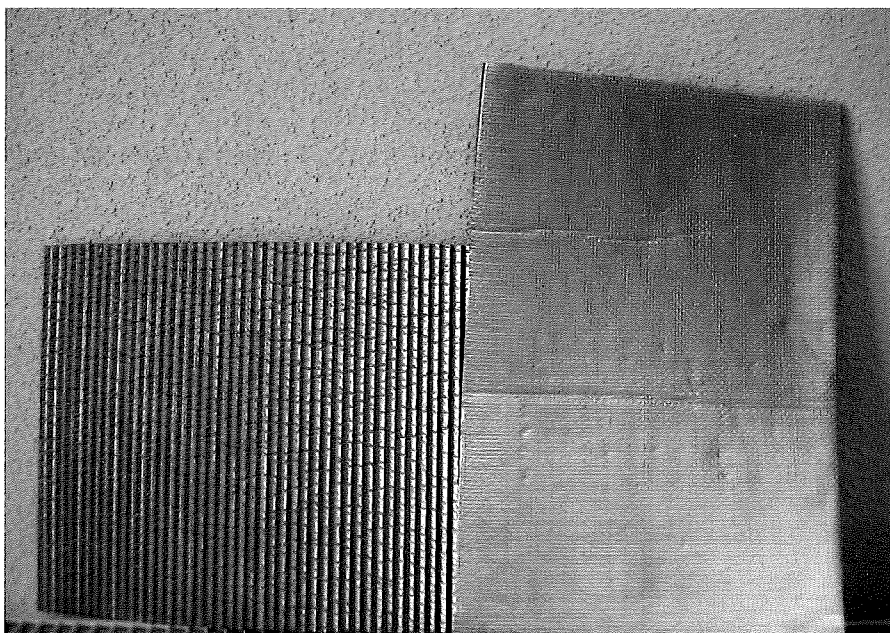


Photo 5. Detail of the inner and outer sides of exposed membrane, showing grooves and aluminium reinforcement

Membrane characteristics and composition: these membranes are made of physically webbed polyethylene, reinforced on the inner side with grooved polyethylene to facilitate drainage (10 litres/second/m²). The outer side is reinforced with plastified raffia, to which a film of aluminium can be added for better fire resistance.

Physical and chemical properties: these materials afford the membrane the following physical and chemical properties:

- Impermeability: the membrane exhibits mass impermeability.
- Conductivity: UNE 92202- 0.034 kcal/h·m·°C
- Vapour barrier: low water vapour diffusivity, as per ISO 1663 (0.48 g/m² in 24 h) > 3000 m factor.
- Mechanical strength: meets the 50-N tear resistance requirement laid down in Spanish standard UNE 53358 and has good static and dynamic punching shear strength.
- Fire resistance: meets M1 class requirements as per Spanish standard UNE 23727:1990, is self-extinguishing and gives off no toxic fumes when ignited

- Ejecución de túneles con plazo ajustado, que requieren una solución rápida, que sea viable técnica y económicamente.
- Túneles de alta montaña con riesgo de formación de hielo.

Instalación: En función de esto, se pueden definir tres formas de instalar estos productos:

- En cara vista: Reparación o rehabilitación de túneles antiguos respetando el gálibo y en túneles nuevos que no estén proyectados con revestimiento de hormigón en masa, bien sobre la roca o sobre el sostenimiento.
- En sándwich: Como alternativa al método tradicional, en túneles donde se requiera revestimiento final de hormigón.
- En falsos túneles: Colocación en falsos túneles sin necesidad de instalar geotextil de protección, debido a las altas resistencias de la lámina.

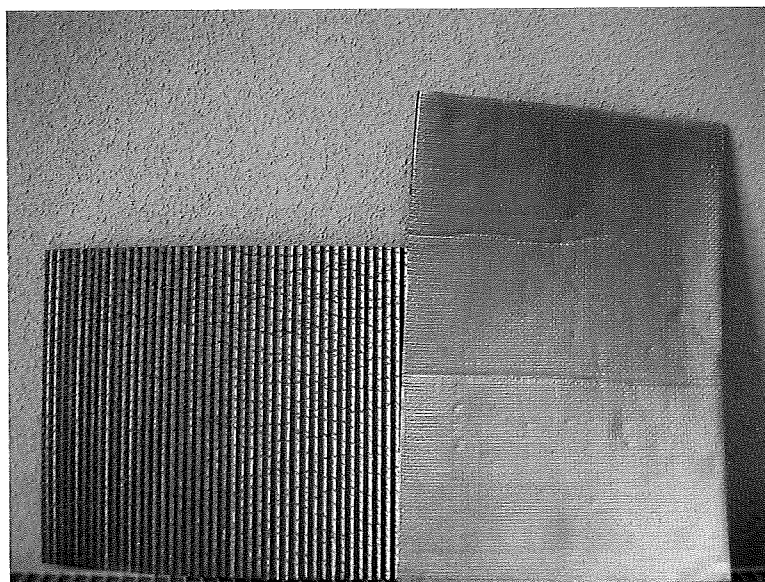


Foto 5. Detalle de las caras interior y exterior de la lámina vista, con las acanaladuras y el refuerzo de aluminio.

Características y composición de la lámina: Son láminas de espuma de polietileno reticulado físicamente, reforzado en su cara interior con film de polietileno con acanaladuras para favorecer el drenaje (10 litros/segundo/m²). La cara exterior está compuesta por rafia de refuerzo plastificada, a la que se puede añadir un film de aluminio para mejorar la resistencia al fuego.

Propiedades físicas y químicas: Estos materiales confieren a la lámina las siguientes propiedades físicas y químicas:

- Impermeabilidad: La lámina es impermeable en masa.
- Conductividad: UNE 92 202- 0,034 Kcal/h m °C
- Barrera de vapor: Bajo grado de difusión de vapor de agua, según ISO 1663 (0,48 gr/m² 24 hr. > 3000 factor μ .
- Resistencias mecánicas: Presentan resistencias al desgarro según UNE 53358 de 50 N y buenas resistencias al punzonamiento estático y dinámico.
- Resistencia al fuego: Clasificación M1 según la norma UNE 23727:1990. Es autoextinguible y sin humos tóxicos en su ignición.

- Inalterability and durability: performs well, with scant ageing, when exposed to chemical attack and unfavourable environmental conditions (damp, changing weather).
- Resistance to chemical agents: resists water with dissolved minerals, contact with construction materials, fumes and so on.

| FIRE REACTION CLASSES FOR WALL AND CEILING LININGS, THERMAL OR ACOUSTIC INSULATION AND PIPES | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Class required under standard UNE 23727:1990 | Class required under standard UNE 13501-1:2002 ⁽¹⁾ | |
| | Wall or ceiling lining, (non-linear) thermal and acoustic insulation and pipes | Linear products for thermal insulation in pipes |
| M0 | A1 or A2-s1, d0 | A1L or A2L-s1, d0 |
| M1 | B-s3, d0 | BL-s3, d0 |
| M2 | C-s3, d0 ⁽²⁾ | CL-s3, d0 ⁽²⁾ |
| M3 | D-s3, d0 | DL-S3, d0 |

(1) Any class whose indices are better than or equal to the indices for another class is regarded to cover the requirements of the latter. In the main (A1, A2, B, C, D or E), smoke emission (s1, s2 or s3) and drip/ignited particle indices, the higher the value, the more unfavourable.

(2) Materials in this class with a thickness of under 1.0 mm and a mass of under 1.0 kg/m² are also valid for applications requiring class M1 specifications.

Table 5₍₈₎

Membrane installation is similar to standard product placement. Sheets are fastened in place with several rows, normally three (centre and both sides), of (polypropylene or polyamide) rust-proof bolts. From three to six bolts are used per m², depending on whether the membrane is exposed or sandwiched in between other materials. The lapping and fasteners are then heat-welded.

The technological development of these products was driven by the needs arising in the Cadí Tunnel. In the interim, systems with the aforementioned characteristics and suitable for similar conditions have been brought to market by several companies.

3.2.- CONTINUOUS MEMBRANE WATERPROOFING FOR TUNNELS.^(9,10)

Definition: the aim pursued with sprayable, continuous non-flammable waterproofing is to create a membrane with no overlaps or anchorage points, thereby eliminating such weak points, characteristic of other types of waterproofing. These membranes ensure impermeability, durability, bonding to the support and fire protection, while providing for faster, safer and cleaner installation.

The system consists in a readily applied acrylic polymeric, water- and single component-base, elastic, non-flammable, sprayable membrane.

Applications: to concrete or rock structures as an alternative to P-PVC, polyolefin membranes and similar. It is particularly useful in certain cases:

- Sandwiched between layers of shotcrete or *in situ* concrete.
- Tunnels with complex cross-sections.
- To cover steel components (anchorage, bars, vent supports and so on).

Installation: it is applied over shotcrete. A standard section of this product may be described as follows:

three mm of waterproof membrane are sprayed over 3-mm of anchored geotextile, both extending down to the invert drainage system, for a total cover of 6 mm.

- Inalterabilidad y durabilidad: Buen comportamiento al envejecimiento por ataques químicos y condiciones ambientales desfavorables (humedades, cambios climáticos)
- Resistencia a los agentes químicos: Resistente a los ataques de aguas con cargas minerales disueltas, al contacto con diferentes materiales de construcción, humos, etc.

| CLASES DE REACCIÓN AL FUEGO DE REVESTIMIENTO DE PAREDES Y TECHOS, DE AISLAMIENTOS TÉRMICOS O ACÚSTICOS Y DE CONDUCTOS | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Clase exigida conforme a la norma UNE 23727:1990 | Clase que debe acreditarse conforme a la norma UNE EN 13501-1:2002 ⁽¹⁾ | |
| | Revestimiento de paredes o techos, aislamientos térmicos (no lineales) acústicos y conductos | Productos lineales para aislamiento térmico en tuberías |
| M0 | A1 ó A2-s1, d0 | A1L ó A2L-s1, d0 |
| M1 | B-s3, d0 | BL-s3, d0 |
| M2 | C-s3, d0 ⁽²⁾ | CL-s3, d0 ⁽²⁾ |
| M3 | D-s3, d0 | DL-S3, d0 |

- (1) Se admite que toda clase cuyos índices sean iguales o más favorables que los índices correspondientes de otra clase, satisfice las condiciones de ésta. Tanto el índice principal (A1, A2, B, C, D o E) como el de producción de humo (s1, s2 o s3) y el de caída de gotas/partículas inflamadas (d0, d1 o d2) son más desfavorables en sentido creciente.
- (2) Cuando esta clase pertenezca a un material cuyo grosor sea menor de 1.0 mm y cuya masa sea menor de 1.0 kg/m² también será válida para aquellas aplicaciones para las que exija clase M1

Tabla 5 ⁽⁸⁾

La instalación de la lámina es similar a la estándar. Las fijaciones son mediante pernos inoxidables (polipropileno o polyamida) en varias filas, normalmente en tres (centro y ambos lados). Se usarán de 3 a 6 pernos por m², según sea la lámina en sándwich o cara vista. A continuación se realiza la soldadura por termofusión en los solapes y en las fijaciones.

El desarrollo tecnológico de estos productos partió a raíz de las necesidades surgidas en el túnel del Cadí, y desde entonces han sido varias las empresas que han comercializado un sistema válido para aplicar en casos similares, que responden a las características técnicas anteriormente comentadas.

3.2.- IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES CON PROYECCIÓN DE MEMBRANAS CONTINUAS. ^(9,10)

Definición: El objetivo del sistema de impermeabilización a base de membranas proyectables, continuas y no inflamables, es crear una lámina continua, como su nombre indica, evitando solapes y puntos de anclaje, eliminando así la presencia de estos puntos débiles existentes en el uso de las láminas. Con el uso de estas láminas, se sigue garantizando la impermeabilización, la durabilidad, la adherencia y la protección contra el fuego, y se gana rapidez, seguridad y limpieza.

El sistema de impermeabilización se basa en el desarrollo de una membrana polimérica acrílica de fácil aplicación, en base agua y monocomponente, elástica, no inflamable y proyectable.

Aplicaciones: Sobre estructuras de hormigón o sobre roca, como alternativa a las láminas de PVC-P, poliolefinas, etc. Es un sistema muy útil en ciertos casos:

- Tipo sanwich entre capas de hormigón proyectado u hormigón "in situ".
- Túneles con secciones complejas.
- Cubrición de elementos metálicos del túnel (anclajes, barras, soportes de la ventilación, etc.)

Puesta en obra: La aplicación se realiza sobre hormigón proyectado. La descripción de una sección tipo de este producto sería la siguiente:

In local applications, the geotextile finish may be sealed with a quick-setting waterproof mortar, polyurethane foam or the membrane itself.

Finally, a second layer of shotcrete, no thicker than 2 cm, is sprayed onto the geotextile layer and waterproof membrane to prevent the geotextile from moving or vibrating. In a subsequent stage, this layer of shotcrete may be thickened to attain the required arch.

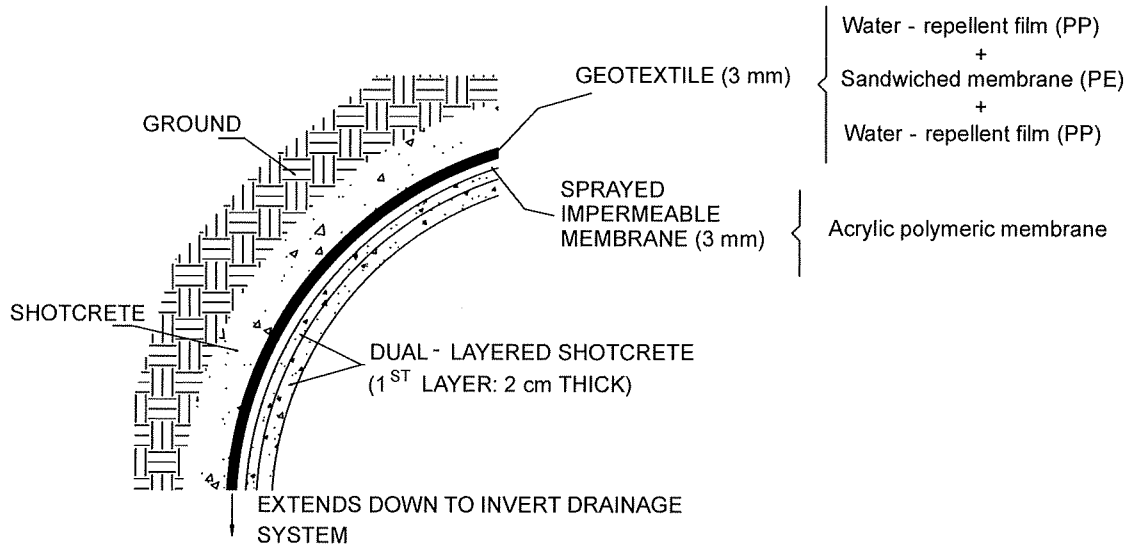


Figure 7. Standard cross-section of sprayable continuous membranes for waterproofing

The geotextile drains the flowing water and the sprayed membrane affords total impermeability, completely sealing off all zones and serving as a bonding layer for the next course of lining.

The membrane is sprayed with a shotcrete robot, which can be later washed with liberal amounts of plain water. No additives are required for cleaning, given the low toxicity of this product.

Physical and chemical properties:

| | |
|----------------------------------------------|------------------------------|
| State: | Powder (solid) |
| Colour: | Greenish grey |
| Density: | 0.61 g/cm³ |
| Product demand per m²/mm: | 0.72 kg/mm |
| Thickness: | 2-10 mm |
| T during application: | 5-40 °C |
| Upper P threshold for effectiveness: | 2-4 MPa (20 °C) |
| Maximum stretch: | >100% at 20 °C |
| 7-day bonding strength (to concrete): | 1.2 MPa |
| Hardness: | 80+ Shores |
| Flammability: | Self-extinguishing |

Sobre geotextil anclado de 3mm y extendido hasta el sistema de drenaje de la solera, se proyectan otros 3 mm de la membrana impermeable (6mm en total).

La terminación del geotextil, en caso de aplicaciones locales, puede sellarse con un mortero rápido impermeable, con espuma de poliuretano o con la misma membrana.

Finalmente sobre la capa de geotextil y membrana impermeable, se aplica una segunda capa de hormigón proyectado, no superior a los 2 cm, para evitar el movimiento y la vibración del geotextil. Posteriormente ya se podrán aplicar los centímetros requeridos de hormigón proyectado, para conseguir el arco deseado.

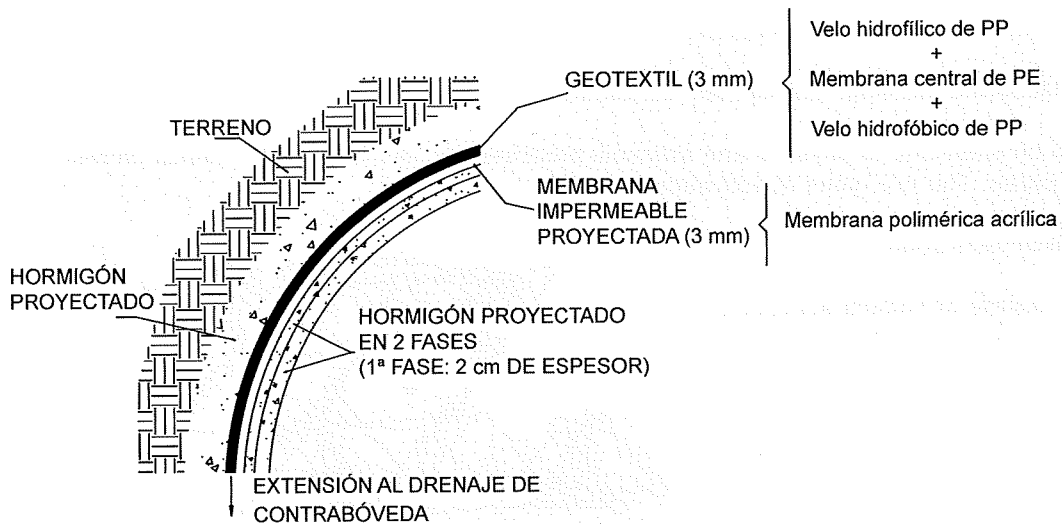


Figura 7. Sección tipo del sistema de impermeabilización con membranas proyectables continuas.

El geotextil provoca el efecto drenante del agua en circulación y la membrana proyectada proporciona una total impermeabilización, sellando por completo todas las zonas y sirviendo como puente de unión a la siguiente capa del revestimiento.

Para su puesta en obra se necesitará un robot de proyección de hormigón, que podrá lavarse con agua abundante para realizar su limpieza, sin necesidad de añadir productos especiales, debido a la baja toxicidad de esta mezcla.

Propiedades físicas y químicas:

| | |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------|
| Estado Físico: | Polvo (sólido) |
| Color: | Gris verdoso |
| Densidad: | 0,61 gr/cm³ |
| Consumo por m²/mm: | 0,72 kg/mm |
| Espesor de aplicación: | 2-10 mm |
| T de aplicación: | 5-40 °C |
| P de pérdida de funcionalidad: | 2-4 MPa (20°C) |
| Estiramiento máximo: | >100% a 20°C |
| Resistencia a la adhesión sobre el hormigón: | 1,2 MPa (7 días) |
| Dureza: | 80+ Shores |
| Inflamabilidad: | Autoextinguible |

3.3.- BENTONITE GEOCOMPOSITE WATERPROOFING FOR UNDERGROUND WORKS.^(10,11)

Definition: bentonite is a natural clay that can absorb water, expanding to several times its volume. It can be used in waterproofing when contained within interwoven geotextiles that ensure system stability.

When confined, it forms a dense gel that obstructs the water flow.

According to Patterson and Murray (1983), three main types can be distinguished:

- High-swelling sodium bentonite.
- Low-swelling calcium bentonite.
- Moderate-swelling, intermediate bentonite.

Bentonite can be subjected to physical and chemical processes or "activation" to enhance certain properties for industrial purposes. The two types of activation are:

- Acid activation.
- Alkaline or sodium activation.

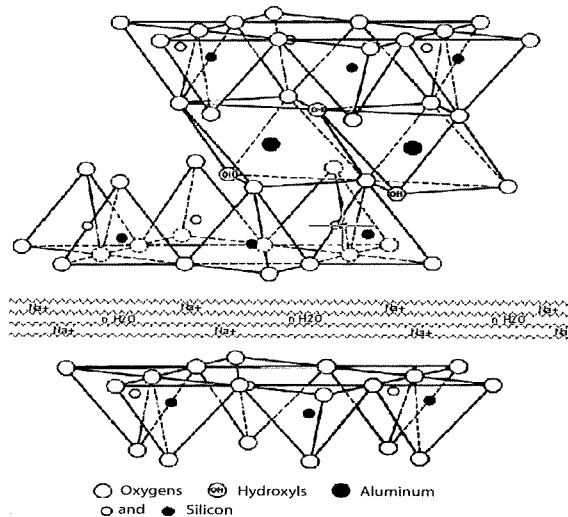


Figure 8. Molecular structure of bentonite

Applications in underground structure waterproofing: sodium bentonite is the form most commonly used, for its high swell properties.

Bentonite must be used in capsulated form, for water converts it into a gel-like substance difficult to contain. Traditionally made of cardboard, this outer protection now consists in geotextiles and/or high density polyethylenes to form what is known as a "geocomposite". Since geotextiles are permeable, the water is able to reach the bentonite, which then acts as a seal.

Quality and installation: the characteristics and performance of the composite material depend on the type, quantity and quality of the bentonite used, the type of geotextiles and the bond between the two.

Composite stability is a function of material durability, tear resistance, interlayer bonding, geotextile weight and composition, bentonite distribution and composite workability (folding and cutting).

Geocomposites are usually bonded by heat welding, stapling, pasting or stitching.

Use of geocomposites and bentonite derivatives for waterproofing underground structures: they are widely used for application to concrete structures. They are particularly well suited for areas with a constant high humidity, where underground structures are below the water table:

3.3.- IMPERMEABILIZACIÓN DE OBRAS SUBTERRÁNEAS CON GEOCOMPUESTOS DE BENTONITA.^(10,11)

Definición: La bentonita es una arcilla natural con la capacidad de absorber el agua y expandir varias veces su volumen. Se puede emplear en impermeabilización cuando esté contenida en un sistema de geotextiles entrelazados entre si que asegure la estabilidad del conjunto.

Cuando está confinada, en contacto con el agua forma un gel denso que bloquea el paso del agua.

Según Patterson y Murray (1983) se distinguen tres tipos principales:

- Bentonitas sódicas altamente hinchables.
- Bentonitas cálcicas poco hinchables.
- Bentonitas intermedias, moderadamente hinchables.

Existe la posibilidad de someter a las bentonitas a procesos físicos y químicos con el objeto de potenciar algunas propiedades con finalidades industriales. Estos procesos se denominan "Activación" y pueden ser de dos tipos:

- Activación ácida.
- Activación sódica

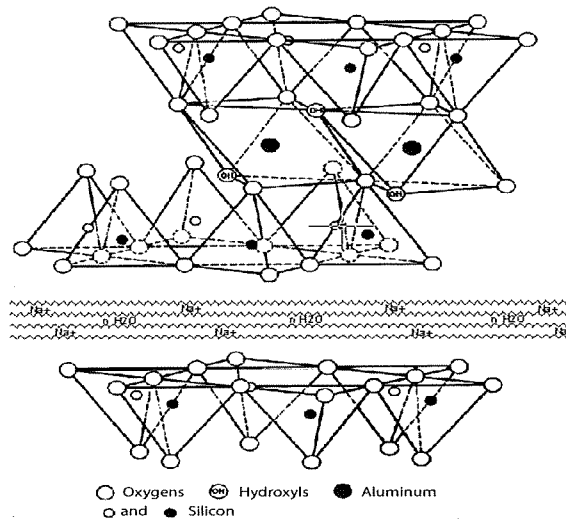


Figura 8. Estructura molecular de la bentonita.

Aplicaciones en la impermeabilización de estructuras subterráneas: Las bentonitas más utilizadas para este fin son las sódicas, por su mayor capacidad de hinchamiento.

La bentonita ha de usarse encapsulada, ya que el agua la convierte en una sustancia gelatinosa difícil de contener. Normalmente estas láminas estaban compuestas por cartón, que actualmente ha dejado paso a los geotextiles y/o polietilenos de alta densidad, formando lo que se denomina un "Geocompuesto". Al ser permeable el geotextil, permite que la bentonita se hinche en contacto con el agua, ejerciendo su labor de sellado.

Calidad y puesta en obra: Las características y aptitudes del compuesto dependerán del tipo, cantidad y calidad de la bentonita empleada, así como de los tipos de geotextiles y la unión entre ellos.

La estabilidad del compuesto estará en función de la durabilidad del material, resistencia al desgarro y unión entre capas, gramaje y composición del geotextil, distribución de la bentonita y manejabilidad del compuesto (doblado y corte).

La unión de los geocompuestos puede ser por termosoldadura, cosidos, pegados o agujeteados.

Usos de geocompuestos y derivados de bentonita en la impermeabilización de estructuras subterráneas: Su uso está muy extendido en la aplicación de estructuras de hormigón. Está muy indicado para zonas con humedad constante, donde las estructuras subterráneas queden por debajo del nivel freático:

1. Tunnels built in-between continuous slurry or pile walls.

The membrane must always be confined between two concrete structures, one being the slurry wall, segment ring or similar, and the other an inner layer of reinforced concrete laid over the membrane.

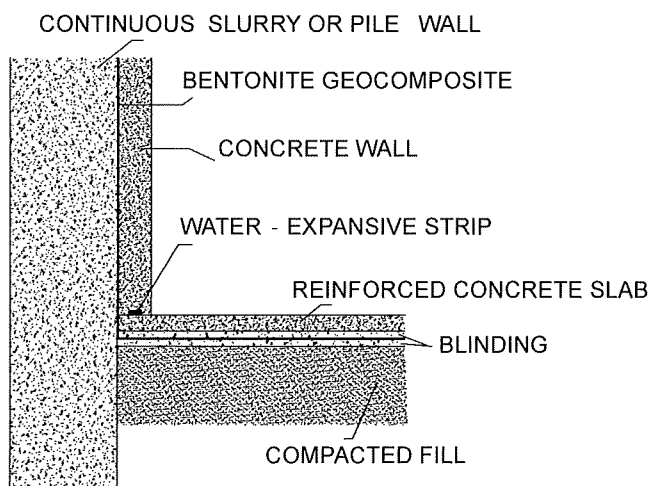


Figure 9. Standard cross-section of a tunnel inside slurry walls, with bentonite geocomposites and strips

2. Galleries

The composite must be highly workable for installation on the existing surface, readily foldable and correctly positionable for subsequent shotcreting.

3. Tunnels and cut-and-cover tunnels

Geocomposites consisting of geotextiles and bentonite, in conjunction with low density polyethylene membranes, provide extremely resistant, convenient to install and very safe waterproofing.

4. Construction joints

Bentonite-based waterstops are applied to vertical and horizontal concrete joints at the abutment between new and existing walls (between slurry walls and invert, tunnel bottom slabs and so on) .

They are especially designed for use with ≥ 20 MPa reinforced concrete and must be at least 75 mm thick on both sides.

5. Beneath slabs in any underground structure.

They are recommended for structural reinforced concrete slabs with a thickness of 150 mm or over, lying directly on the ground, over compacted fill or a 50-mm blinding.

3.4.- SELF-ADHESIVE MEMBRANE WATERPROOFING.^(10,11)

Definition: self-adhesive membranes constitute a waterproofing system based on a pre-formed product that adheres to the support to be protected with no need for welding or pasting. They comprise an impermeable membrane (HDPE, bituminous rubber) attached to an adhesive compound that bonds to the support when pressure is applied. They can be protected by an outer layer of strong material.

No sophisticated tools or specialized labour are required for installation, minimizing human factor risk. These products ensure full waterproofing of the element to be protected.

Applications: used to protect accessible surfaces after construction or during erection in elements that will be

1. Túneles realizados al abrigo de pantallas continuas y pilotes.

La lámina debe de quedar siempre confinada, por lo que se requiere la construcción de dos estructuras de hormigón, una de ellas el propio muro pantalla, anillos de dovelas o etc, y la otra un nuevo muro o resistimiento de hormigón armado construido por la parte interior sobre la lámina.

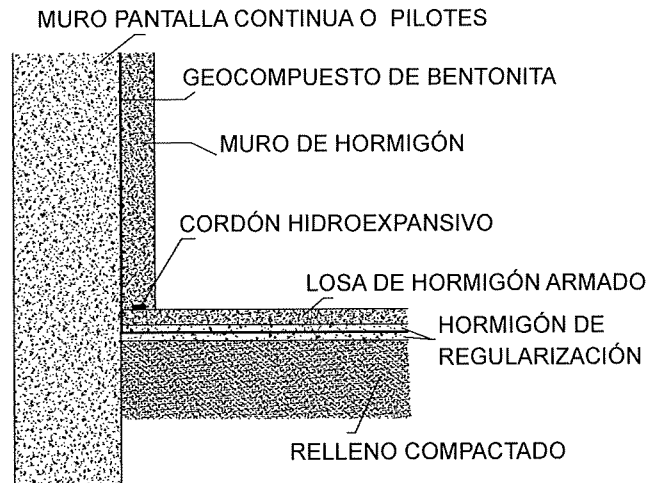


Figura 9. Sección tipo de un túnel entre pantallas con utilización de geocompuestos y cordones de bentonita.

2. Galerías.

Se requiere una alta manejabilidad del compuesto para su colocación sobre el paramento existente, con facilidad de doblado y una correcta fijación para la posterior aplicación del hormigón proyectado.

3. Túneles y falsos túneles.

Los geocompuestos formados por geotextiles y bentonita, unidos a láminas de polietileno de baja densidad, proporcionan un sistema impermeabilizante extremadamente resistente, de fácil instalación y gran seguridad.

4. Juntas de hormigonado.

Las juntas waterstop de bentonita se aplican para juntas de hormigón verticales y horizontales, en las uniones de muros de nueva construcción con otros existentes (unión de muros pantalla con contrabóvedas, losas de fondo o soleras, etc.).

El diseño es especial para colocar en hormigón armado de resistencias a partir de 20 Mpa y requiere un recubrimiento mínimo de 75 mm por ambos lados.

5. Bajo losas y soleras en cualquier estructura subterránea.

Están recomendados para soleras estructurales de hormigón armado a partir de 150 mm de espesor, apoyados sobre el terreno, sobre un relleno compactado o un hormigón de limpieza de espesor mínimo de 50 mm.

3.4.- IMPERMEABILIZACIÓN A BASE DE LÁMINAS AUTOADHESIVAS.^(10,11)

Definición: Las láminas autoadhesivas se basan en un sistema de impermeabilización con un producto preformado que se adhiere al soporte que se desea proteger, sin la realización de trabajos de fundido ni utilización de colas. Se componen de una lámina impermeable (PEAD, caucho betún) unida a un compuesto adhesivo que proporciona la unión al soporte mediante presión. Se le puede añadir una capa protectora resistente.

Para su colocación no se precisan herramientas sofisticadas ni mano de obra muy especializada, lo que minimiza el riesgo debido al factor humano. Con su aplicación se puede garantizar la total estanqueidad del elemento a proteger.

inaccessible upon completion.

This is a basic method, designed to supplement waterproofing with geocomposites, membranes and/or water-stops in construction joints.

It is applied in:

- Bored or cut-and-cover tunnels.
- Tunnels built between slurry or pile walls.
- Underground galleries.

Installation: these membranes can be installed in two ways:

1- *A priori* application systems, attached to both horizontal (blinding or compacted fill) and vertical (formwork or adjacent structures) concrete.

Installation requirements:

Support: must be sturdy, even and smooth.

Environment: optimal application temperatures $> 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (at $T < 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ use hot air during installation).

Lapping: $>75\text{ mm}$, with self-adhesive tape.

Concrete reinforcement and casting: the protective plastic layer must be removed before positioning the reinforcing steel. The concrete should be cast within 42-52 days.

Formwork removal: when $f_{ck}(t) > 10\text{ N/mm}^2$.

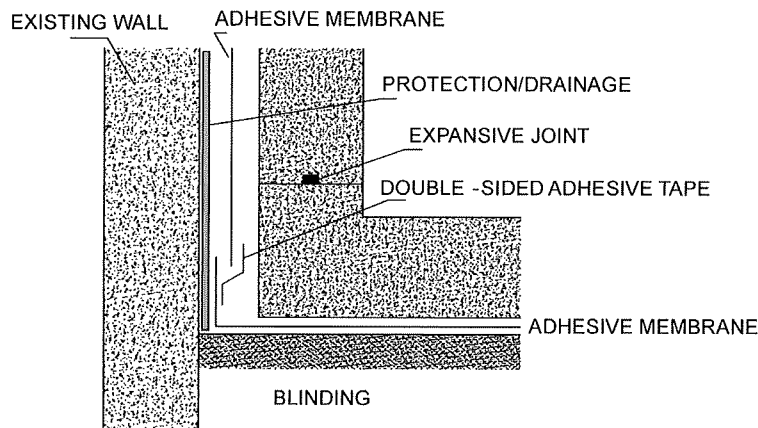


Figure 10. Standard cross-section of adhesive membranes prior to concrete casting

2- Systems applied directly to the tunnel surface

Installation requirements:

Support: dry, flat, smooth surfaces with no bulges or voids.

Installation: primer coat (dry) + membrane (brushed to remove air and improve bonding).

Environment: $-10\text{ to }35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (inflammable at a critical T of $25\text{-}30\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Aplicaciones: Se emplea para proteger superficies accesibles posteriormente a su construcción o bien antes de la misma en elementos que no tendrán dicho acceso.

Se trata de un método básico complementario a una impermeabilización con geocompuestos, láminas y/o waterstop en las juntas.

Se aplican en:

- Túneles en mina o artificiales
- Túneles al abrigo de pantallas continuas o pilotes
- Galerías enterradas

Puesta en obra: Pueden colocarse de dos formas distintas:

1- Sistemas de aplicación previa adheridos al hormigón, tanto horizontal (sobre hormigones de limpieza o rellenos compactados) como verticalmente (sobre encofrados o estructuras adyacentes).

Características de colocación:

Soporte: Han de ser sólidos, uniformes y regulares.

Ambiente: Temperaturas de aplicación óptimas $> 4^{\circ} \text{C}$ (con $T < 4^{\circ} \text{C}$ usar aire caliente en la instalación).

Solapes: $> 75 \text{ mm}$, con cintas autoadhesivas.

Armado y hormigonado: Hay que proceder a la retirada del plástico protector antes de realizar la colocación de la armadura. No deben de pasar más de 42-52 días hasta el vertido del hormigón.

Desencofrado: Con $f_{ck}(t) > 10 \text{ N/mm}^2$

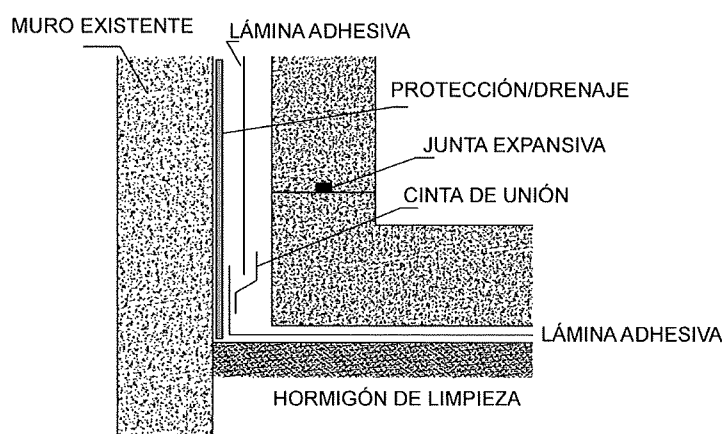


Figura 10. Sección tipo de aplicación de láminas adhesivas previas al hormigonado.

2- Sistemas aplicados directamente sobre el paramento del túnel.

Características de colocación:

Soporte: Superficies secas, lisas, regulares, sin salientes ni huecos.

Colocación: Capa de imprimación (secado) + Aplicación de la lámina (cepillado para extracción de aire y mejorar la adherencia)

Ambiente: -10 a 35°C (inflamable a T crítica $25-30^{\circ} \text{C}$).

Lapping: 50 mm (between membranes).

Protection: special panels.

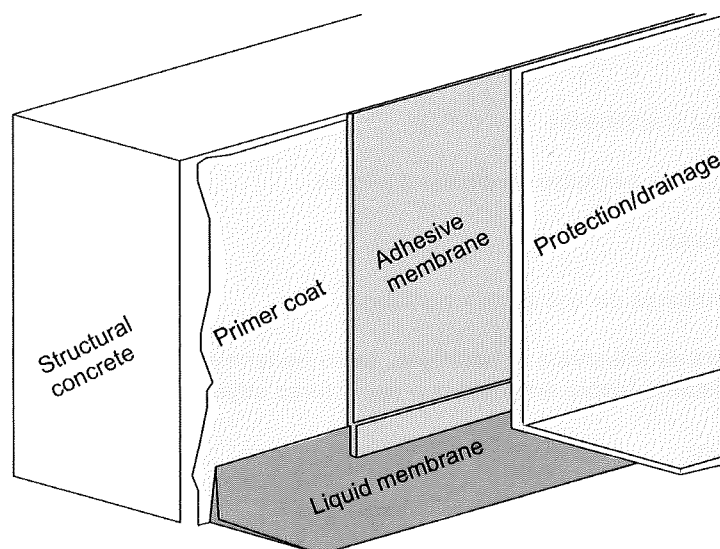


Figure 11. Standard cross-section of adhesive membranes attached to the surfaces of structural members

General membrane specifications:

Thickness: 1.5 mm.

Hydrostatic pressure: > 70 m.

Water vapour transmission rate: 0.06 g/m²/day.

Tensile strength: lengthwise: 30.6-48.4 N/mm²; crosswise: 40.9-45.4 N/mm².

Punching shear strength: 235-280 N.

Bonding strength: to concrete 2.06 N/mm; to itself: 2.08 N/mm.

Stretch: L-190%. C-120%

3.5.- CONCRETE CONSTRUCTION JOINT WATERPROOFING AND SEALING_(10,11,12)

In addition to their role in the serviceability and durability of the concrete structure *per se*, joints are of major importance in ensuring tunnel dryness.

The four main types of joints (Calavera and González Valle, 1984) are:

- a) Construction joints.
- b) Contraction joints.
- c) Expansion joints.
- d) Settlement joints.

In the final analysis, joints are needed to control and minimize concrete cracking caused by shrinkage during

Solapes: 50 mm (entre láminas).

Protección: Tableros especiales.

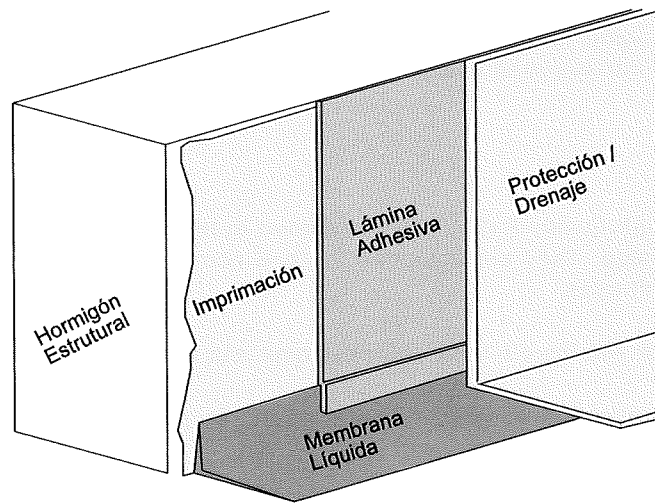


Figura 11. Sección tipo de aplicación de láminas adhesivas adheridas a paramentos estructurales

Características técnicas generales de las láminas:

Espesor: 1,5 mm

Presión Hidrostática: > 70 m

Coefficiente de transmisión de v. de agua: 0,06 g/m²/día

Resistencia a tracción: Long. 30,6-48,4 N/mm². Trans. 40,9-45,4 N/mm²

Resistencia a punzonamiento: 235-280 N

Adhesión: Hormigón 2,06 N/mm. Sobre sí misma 2,08 N/mm

Estiramiento: L-190%. T-120%

3.5.- IMPERMEABILIZACIÓN Y SELLADO DE JUNTAS DE HORMIGONADO.^(10,11,12)

Las juntas tienen especial importancia a la hora de conseguir un túnel seco, aparte de la influencia en el funcionamiento y durabilidad de la propia estructura de hormigón.

Esencialmente existen cuatro tipos de juntas (Calavera y González. Valle ,1984):

- a) Juntas de trabajo
- b) Juntas de contracción
- c) Juntas de dilatación
- d) Juntas de asiento

Las juntas al fin y al cabo son necesarias para controlar y minimizar la fisuración del hormigón debido a los cambios de volumen por retracción durante el fraguado y el curado, por esfuerzos de compresión o flexión al estar sometidos a cargas, o por efectos de contracción-dilatación debidos a cambios térmicos.

setting and curing; compression or bending forces when loaded; or temperature-mediated contraction and expansion.

In underground works, whether bored or cut-and-cover, joints are located at the abutments between bulk concrete lining modules and at the invert or tunnel bottom slab. When a tunnel is built with a tunnelling shield and lined with precast rings, joints exist between segments or rings and, in the event of tunnels protected by slurry walls, in between the various modules and between these modules and the tunnel invert and crown slabs.

Joint sealing systems:

- 1) PVC joints: flat, high quality PVC strips embedded in the concrete on both sides of the joint. They constitute a waterstop. They are designed to bond correctly to the concrete and come in different formats for different uses.

They have a longer service life than other systems, but must be installed by specialists.

- 2) Bentonite joints: described above. They are nailed or pasted to concrete joints, forming a self-expanding seal.

They must be tightly fastened to the joint surface, for any change in position during concrete casting would compromise their effectiveness. It is likewise important to keep the material dry prior to placement and install it immediately before pouring the concrete, for any exposure to leaks or damp would activate its expansive properties, damaging the concrete. Since these joints have a limited number of dry-damp cycles, they are poorly suited to tunnels with fluctuating humidity.

- 3) Metal seals: these consist in steel, copper or bronze waterstops that obstruct water seepage. They are embedded in the concrete along the joints.

Their use is limited to tunnels where joint require structural strength or must be highly resistant to chemical attack.

- 4) Crystallization seals: these seals consist of cementitious shapes with a high concentration of microcrystals that grow when wet. They are installed prior to casting to seal and waterproof joints. These shapes are readily installed, obviating the need for specialized technicians. They can seal tiny concrete fissures.

They provide dual protection: a physical waterstop in conjunction with the chemical barrier provided by the microcrystals.

- 5) Injection tube joint sealing systems: this is based on the use of a microperforated tube, stapled to one of the sides of the joint to be treated before casting. Each length of tube has two holes through which a low viscosity polyurethane resin is injected, providing the joint with both an elastic seal and a capillary seal at the interface with the concrete.

The product must be injected after the concrete reaches its characteristic strength and has had time to cure and accommodate structural shrinkage and settling.

This system can be used as an active seal or as an *a posteriori* treatment for possible future leaks or seepage.

For the system to be effective, the tube must be flexible, easy to work with on site and adaptable to the surface. The resin injected must exhibit very low viscosity to ensure that it will flow along the entire joint and must also be innocuous to the concrete and reinforcement. The reaction time must be slow, and the resin must cure whether dry or wet; some slight reactivity with water is recommended to obstruct seepage during the injection process.

En las obras subterráneas, las juntas coinciden con la unión de los diferentes módulos del revestimiento de hormigón en masa y la unión con la contrabóveda o solera, sean en mina o artificiales. Cuando el túnel se realiza con tuneladora y se reviste con anillos prefabricados, las juntas se encuentran en la unión entre las dovelas o anillos de éstas y, en el caso de túneles realizados al abrigo de pantallas, entre los diferentes módulos y en las uniones con la losa de fondo y de cubierta.

Sistemas de sellado de juntas:

- 1) Juntas de PVC: Bandas planas de PVC de alta calidad, colocadas embebidas en el hormigón en ambas caras de la junta. Proporcionan una barrera física al paso del agua. Están diseñadas para tener una correcta adherencia al hormigón y se presentan en diferentes formatos en función de su utilización.

Su vida útil es superior a la de otros sistemas, pero requiere una mano de obra especializada para su colocación.

- 2) Juntas de Bentonita: Ya han sido descritas anteriormente, Se colocan en la junta clavada o pegada al hormigón. Es un sistema de sellado autoexpansivo.

Es importante que queden bien fijadas a la superficie de la junta, ya que pueden sufrir desplazamiento durante la fase de hormigonado, comprometiendo su efectividad. Es a su vez importante que, previamente a su puesta en obra, el material se mantenga en condiciones secas y su colocación se haga justo antes de hormigonar, ya que cualquier exposición a filtraciones o humedades puede activar sus propiedades expansivas, causando daños en el hormigón. Es importante tener en cuenta que al tener un número de ciclos limitados de sequedad-humedad, resulta poco adecuado para su aplicación en túneles donde estas condiciones presenten muchas variaciones.

- 3) Sellados metálicos: Se realizan interponiendo elementos metálicos de acero, cobre o bronce como barreras físicas para evitar las filtraciones de agua. Se colocan embebidas en el hormigón a lo largo de las juntas.

Su uso se limita a túneles donde se requiera una resistencia estructural de la junta o alta resistencia a los ataques químicos.

- 4) Sellados por cristalización: Consiste en la colocación, antes del hormigonado, de un perfil cementoso con un alto contenido en microcristales que crecen en contacto con el agua, sellando e impermeabilizando la junta. Es de muy fácil colocación por lo que no requiere de personal técnico especializado. Tiene la capacidad de sellar pequeñas fisuras en el hormigón.

Pueden disponer de una doble protección compuesta por una barrera física de protección y otra la química con los microcristales.

- 5) Sellado de juntas mediante tubo de inyección: Se basa en la colocación de un tubo microperforado, colocado antes de hormigonar y sujeto con grapas metálicas a una de las caras de la junta a tratar. Cada tramo de tubo lleva dos orificios a través de los cuales se inyecta una resina de poliuretano de baja viscosidad, proporcionando un sellado elástico de la junta y un sellado capilar del hormigón de contacto.

La inyección tiene que realizarse a partir de que el hormigón haya alcanzado su resistencia característica, momento en el cual ha tenido tiempo de curarse y sufrir las retracciones y asentamientos propios de la estructura.

Este sistema puede usarse como sellado activo o como aplicación posterior para sellar posibles futuras filtraciones.

Para que el sistema sea eficaz, ha de tener un tubo flexible, fácil de colocar en obra y adaptable a la superficie. La resina que se usará para la inyección, será de muy baja viscosidad, para su correcta circulación por toda la junta, e inocuas para el hormigón y armaduras. El tiempo de reacción será lento, con capacidad de la resina de curar en seco o en presencia del agua, aconsejándose una ligera reactividad con el agua para frenar filtraciones durante la inyección.

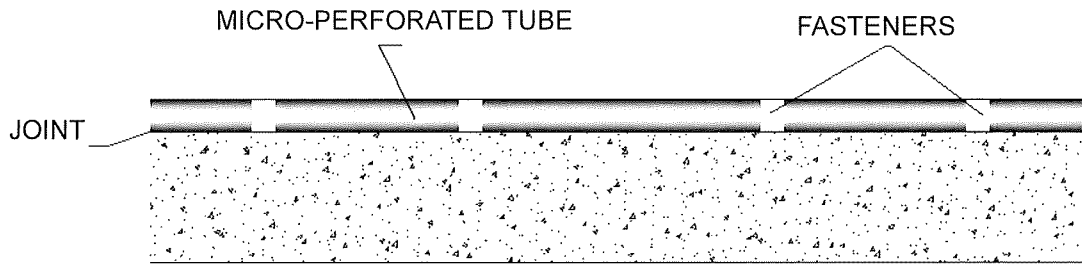


Figure 12. Injection tube joint sealing

- 6) Injected resin treatment for joints: joints can be waterproofed by injecting different types of resins, including polyurethanes, organominerals and so forth. These may consist of one or two components, and need to be activated with water or mixed with a catalyst to trigger the reaction and control product hardening.

The properties of such resins vary, for they may be expansive or not, non-flammable or not, self-extinguishing or not, elastic or stiff, and so on. Application procedures depend on the type of problem to be solved and worksite conditions.

The effectiveness of this waterproofing system is based on its high penetrability in any existing voids (intergranular or cracks), where the resins expand and harden to fill gaps, obstructing seepage through and ultimately sealing any type of joint.

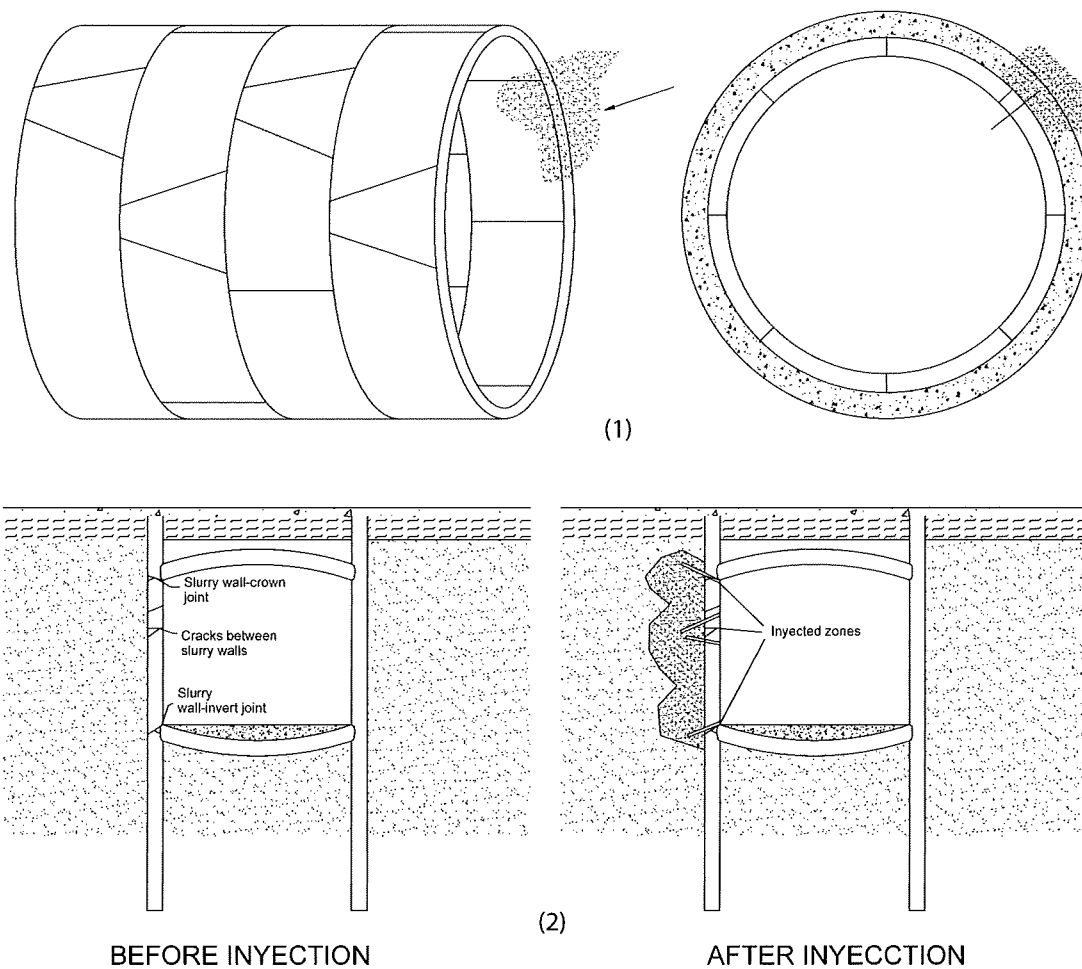


Figure 13. Cross-sections showing injected waterproofing in tunnels with segment ring lining (1) and built between slurry walls (2).

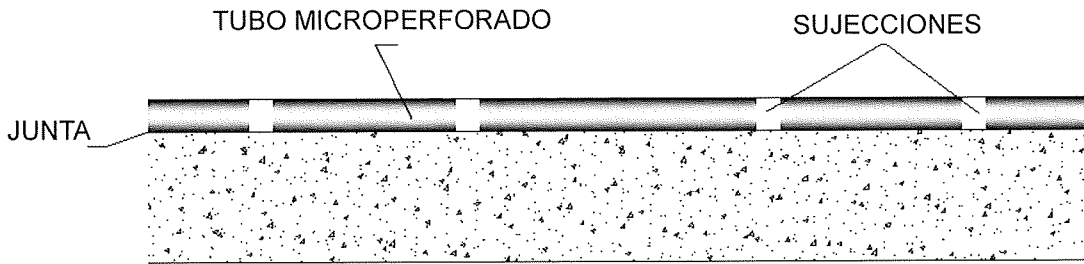


Figura 12. Sistema de sellado de juntas mediante tubo de inyección.

- 6) Tratamiento de juntas mediante inyecciones: La impermeabilización de juntas se puede realizar mediante inyecciones de resinas de diferente composición: poliuretanos, organominerales, etc. Pueden ser mono o bicomponentes, y necesitar para su activación el contacto con el agua, mezclándose o no con un catalizador para controlar el inicio de la reacción y el endurecimiento del producto.

Las resinas tienen distintas propiedades y como tal pueden ser o no expansivas, ignífugas, autoextinguibles, elásticas o rígidas, etc. Su aplicación se diferenciará según el tipo de problema que queramos solucionar y las condiciones del lugar de trabajo.

La efectividad de este sistema de impermeabilización, está basado en su alta capacidad de penetración entre los espacios existentes (intergranulares o fracturas), desarrollando su expansión y endurecimiento para permitir rellenar las cavidades y frenar el flujo de agua a través de cualquier tipo de junta, acabando con un sellado de la misma.

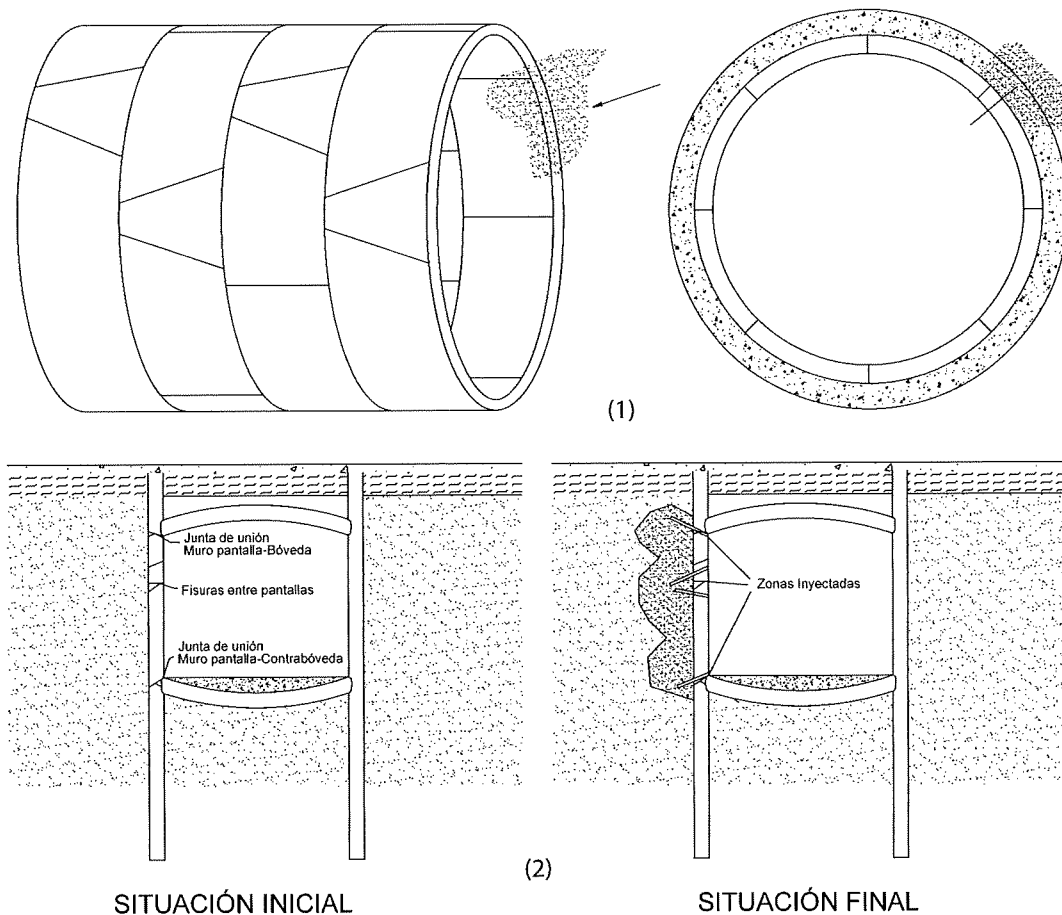


Figura 13. Secciones de túneles con aplicación de inyecciones de impermeabilización: Revestido con anillos de dovelas (1) y entre pantallas (2).

Its use ranges from mere soil compacting to obstructing water flows in any part of the tunnel (face, invert and so on).

The procedure consists, firstly, in drilling the joint with holes whose diameter, length, spacing and angle are to be determined for each individual case. Joints are to be rotary or rotary-percussion drilled with diameters on the order of 16 to 40 mm and depths of up to 1 m, i.e., across the entire thickness of the concrete and into the ground at the extrados of the tunnel.

Drill holes are normally spaced at 50 cm along the entire joint, or less where the water flow is copious. Vertical joints are to be drilled 30 cm below the water course.

The drill holes are cleaned with compressed air and capped with a shutter. The resin is injected through the shutters, which are fitted with a shutoff cock.

Vertical joints are normally injected from the bottom up, while in horizontal joints injection is begun where the water flow is heaviest.

Pressure is monitored with pressure gauges, with the shutters on the adjacent drill holes open. The criterion generally followed is that injection can be concluded in each drill hole when the pressure is 10 kg/cm²; alternatively an injection cut-off of 25 kg may be established.

3.6.- OTHER WATERPROOFING SYSTEMS IN CUT-AND-COVER TUNNELS.⁽¹⁰⁾

Several of the systems described above, along with the P-PVC membranes set out in standard UNE 104424:2000, as well as polyolefins and classic bituminous membranes are particularly well suited for cut-and-cover tunnels, as noted.

Other systems that have now become very popular for waterproofing cut-and-cover tunnels are described below.

3.6.1.- Rubber membrane waterproofing

Definition and characteristics: the membrane used is made of EPDM rubber, a highly durable elastomer that is environmentally safe thanks to its inert properties that prevent component migration.

These membranes are impermeable, flexible and wholly elastic, i.e., able to recover their initial shape without creep, fracture or narrowing after being subjected to force, expansion, vibration or settling.

Installation: the membrane must be installed on a clean, dry support over a 300-g layer of polypropylene geotextile.

Rubber membranes may be 1.2, 1.5 or 2.0 metres thick. Modules may measure up to 900 m², facilitating work-site decision-making with respect to size and enhancing installation efficiency.

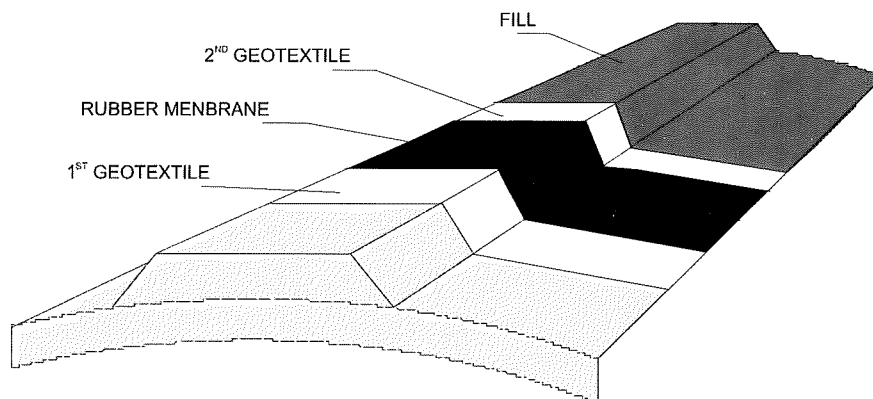


Figure 14. Rubber membrane waterproofing. Cross-section

Su uso puede extenderse a la simple consolidación del terreno para frenar vías de agua, aplicada en cualquiera de las partes integrantes del túnel (frente, contrabóveda, etc.)

El procedimiento del tratamiento de juntas es realizar en primer lugar unos taladros de diámetro, longitud, separación e inclinación a determinar en cada caso. El sistema de perforación será a rotación o rotopercusión con diámetros del orden de 16 a 40 mm y hasta 1 metro de profundidad, atravesando el espesor de la estructura de hormigón hasta conectar con el terreno existente en el trasdós del túnel.

El espaciado de los taladros normalmente no superará los 50 cm a lo largo de la junta, distancia que podrá reducirse si el flujo de agua es muy importante. En las juntas verticales los taladros se efectuarán unos 30 cm por debajo de la vía de agua.

Una vez realizados los taladros se limpian con aire a presión y se colocan los obturadores mecánicos. La inyección se realiza a través de dichos obturadores provistos de llave de cierre.

Normalmente se inyecta en las juntas verticales de abajo a arriba y en las horizontales empezando por la que más caudal de agua tenga.

La presión se controlará por medio de manómetros y teniendo los obturadores de los taladros contiguos abiertos. El criterio general de conclusión de la inyección por cada taladro, será alcanzar los 10 Kg/cm² de presión o tener admisiones de 25 Kg. de inyección.

3.6.- OTROS SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE FALSOS TÚNELES.⁽¹⁰⁾

Varios de los sistemas anteriormente descritos, junto con las láminas de PVC-P que refleja la norma UNE 104424, las poliolefinas y las láminas clásicas de productos bituminosos, tienen su campo de aplicación en túneles artificiales, tal y como se ha reseñado.

A continuación se describen otros sistemas de impermeabilización de falsos túneles, que actualmente tienen extendido su uso en este tipo de obras.

3.6.1.- Impermeabilización con membranas de caucho

Definición y características: La membrana que se utiliza está fabricada a base de caucho EPDM, que es un material elastomérico de gran durabilidad y respetuoso con el medio ambiente, debido a sus propiedades inertes que lo preservan de migraciones de elementos propios.

Se trata de una membrana impermeable, flexible y totalmente elástica. Tiene una gran capacidad de recuperación de su formato inicial, sin fluencias ni quebraduras, y pérdidas de grueso, después de haber sido sometida a esfuerzos, dilataciones, vibraciones y asentamientos.

Puesta en obra: La colocación de la lámina necesita un soporte limpio y seco sobre el que se colocará un geotextil de fibras de polipropileno, mínimo de 300g.

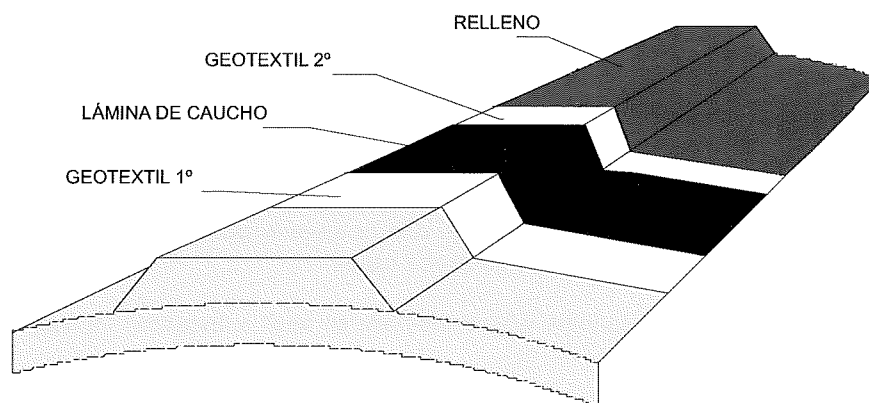


Figura 14. Sección de impermeabilización con membrana de caucho.

Membrane lapping must measure 20-cm and both sides must be clean before coating with a primer to which self-adhesive strips are applied on both sides. The cold chemical fusion attained ensures system elasticity while avoiding the need for fire, thereby minimizing worksite hazards. The ends are attached to the formwork mechanically in keeping with standard practice.

A final layer of geotextile, similar to the first, is then applied. The particle size distribution of the fill immediately above the structure, and therefore the waterproofing, must be chosen conscientiously to prevent impact by stones, and in any event the fill should not be spilled from a distance of over 30 cm. An alternative would be to use an impact-resistant geotextile (geodrains or geotextile mats).

3.6.2.- Waterproofing with geomats.⁽¹¹⁾

Definition and characteristics: drainage geomats are relatively thin, economical and readily installed geocomposite systems able to drain large volumes of water.

They consist in two intertwined strands of high density polyethylene (HDPE) with a high grid capacity, even when subjected to heavy loads. These strands are bonded to one or two non-woven (polypropylene, polyester or HDPE) geotextiles that fulfil protective, separating and filtering functions, all in a single product. They may also feature a built-in impermeable PE film for enhanced performance.

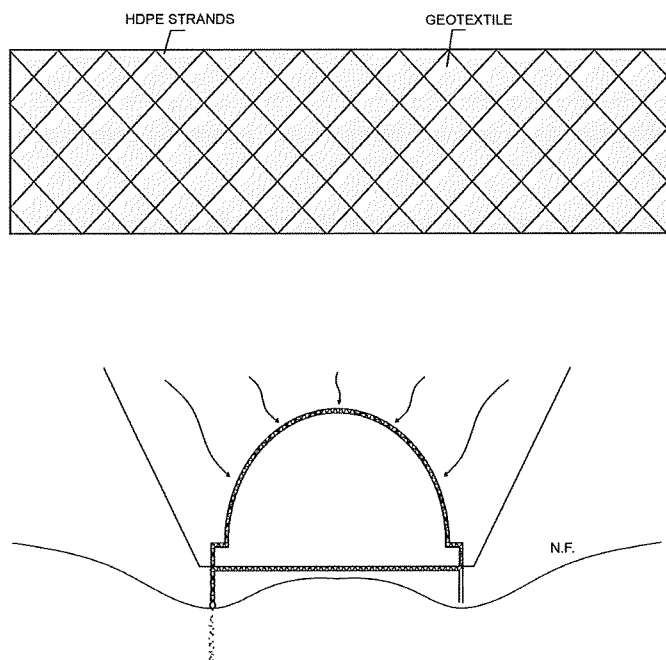


Figure 15. Drainage geomat. Detail and standard cut-and-cover tunnel cross-section

These geomats are sturdy (1000 kPa, equivalent to a 50-m column of soil) and durable, undergo only minor reduction in thickness under loads, thereby guaranteeing drainage capacity, exhibit high tensile strength, and are environmentally safe. Lightweight and flexible, they ship easily and can be installed at a reasonable cost.

Installation: they may be applied as a **single product** consisting in the geotextile filter, drainage geomat and impermeable film. They may also be applied **separately**: one or several geotextiles plus the geomat on the one hand and the impermeable film as an added product on the other.

They are ideal for use in cut-and-cover tunnels where they are to bear substantial fill heights and a system of the above characteristics is needed.

They are also suitable for bored tunnels or cut-and-cover tunnels where invert or tunnel bottom slab uplift may compromise structural stability or durability.

Posteriormente se coloca la lámina impermeabilizante de caucho, según el grueso elegido (1,2; 1,5; 2,0 metros). Las dimensiones de los módulos pueden llegar hasta los 900 m², lo que proporciona una gran autonomía y rapidez en obra, tanto para elegir el tamaño como para agilizar su colocación.

El solape de la lámina ha de ser de 20 cm, con las dos caras limpias, y cubiertas con una imprimación a la que se aplica una banda autoadhesiva en las dos caras. Con esto se consigue tener una fusión química en frío, sin que el sistema pierda elasticidad y se evita el uso de elementos de fuego, minimizando el riesgo para los trabajadores. Los extremos se fijan al encofrado o mediante un sistema mecánico elaborado al uso.

Finalmente se coloca otra capa de geotextil, similar al anterior. En las capas de relleno inmediatamente superior a la estructura y como tal al sistema de impermeabilización, hay que cuidar la granulometría, para evitar verter piedras o hacerlo desde alturas superiores a los 30 cm. Como alternativa, puede colocarse un elemento de protección frente a impactos (geodrenes o redes con geotextil).

3.6.2.- Impermeabilización con georredes.⁽¹¹⁾

Definición y características: Los geocompuestos con georred drenante son sistemas económicos y de fácil y rápida instalación, capaces de desaguar grandes volúmenes con un espesor reducido.

Están formados por dos hilos superpuestos de polietileno de alta densidad (HDPE) que forman canales con alta capacidad de evacuación, incluso sometidos a grandes cargas. Llevan incorporados uno o dos geotextiles no tejidos (de polipropileno, poliéster o HDPE) que ejercen la función protectora, separadora y filtrante, formando un solo producto. Puede llevar incorporado un film impermeable de PE, aumentando sus prestaciones en la utilización.

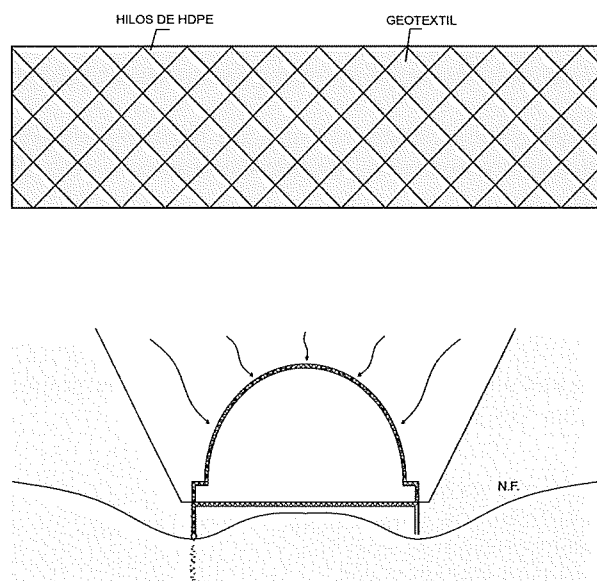


Figura 15. Geocompuesto con georred drenante. Detalle y sección tipo de falso túnel.

Las características principales de estos geocompuestos destacan por su robustez (1000 kPa, equivalente a 50 m de altura de tierras), mínima pérdida de espesor bajo carga que garantiza la capacidad drenante, durabilidad, elevada resistencia a tracción, respeto por el medio ambiente, ligereza y flexibilidad para el transporte y fácil colocación a coste razonable.

Puesta en obra: Puede aplicarse en un solo producto formado por geotextil filtro, georred drenante y film impermeable. También por separado con uno o varios geotextiles más la georred por un lado, y la instalación de una lámina impermeable como producto añadido.

Su campo de aplicación en los falsos túneles es idóneo, cuando han de soportar alturas de relleno importantes y se busca que el sistema cumpla alguna de las características mencionadas anteriormente.

También puede ser una alternativa interesante para túneles en mina o artificiales con subpresiones en la contrabóveda o solera, donde se pueda comprometer la estabilidad y durabilidad de la estructura.

3.7.- COMBINED WATERPROOFING AND STRUCTURAL STRENGTHENING SYSTEMS

3.7.1.- Impregnation waterproofing.^(7,11,13)

Definition: impregnation consists in replacing interstitial water or gas in a porous or fractured medium with injected material, usually **stable cement grout** (OPC/HSC, bentonite-cement, sand-cement, micro-cement) or **chemical grouts** (sodium silicate, acrylates, polyurethanes and so on) to strengthen and waterproof the ground.

Application: the system is used primarily to prevent or eliminate seepage in tunnels where the water table or an unforeseen, abrupt rise in its elevation constitutes a problem.

Installation: Material may be injected from inside or outside the tunnel.

Small diameter hoses are used for injection, which is performed at a very low pressure to prevent the ground from shifting.

The main criterion for the choice of the most suitable product is ground permeability. Micro-cement is optimal, for instance, when permeability values range from 10^{-1} to 10^{-3} cm/s, while the lower limit for cement-bentonite blends is 10^{-2} cm/s. Particle size distribution in relation to the voids or cracks to be filled is another consideration.

The injection equipment for these materials consists of the same components as traditional injection systems: turbine agitator, mixer and injection pump.

Design: a number of variables must be considered in impregnation waterproofing design to optimize efficacy:

- **Cut-offs envisaged:** in injected waterproofing, cut-offs are normally expected to range from 20 to 40% of the volume to be treated, but where available, empirical evidence on the use of the same method in similar terrains is more reliable.
- **Effective radius:** this is directly related to the injection pressure. While traditional fluid propagation equations take account of viscosity as a function of time, the general recommendation is to determine the radius on the grounds of practical experience.

The effective radius has a substantial effect on the total cost of the solution, for the number of injection holes to be drilled depends on this parameter.

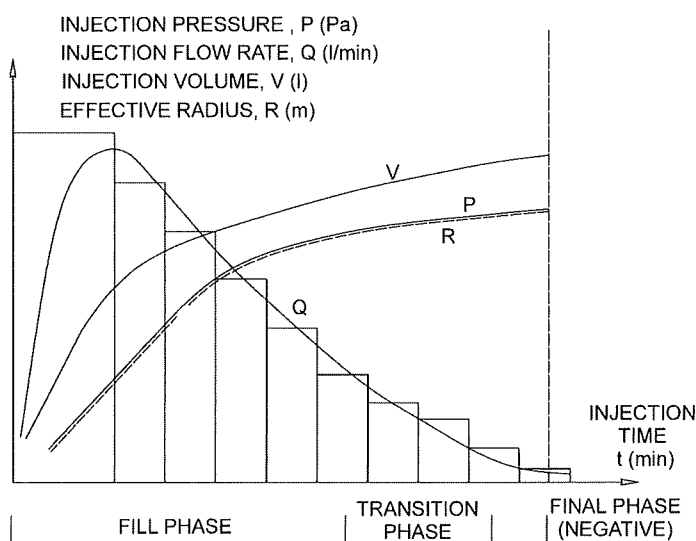


Figure 16. Classical fill injection graph (Kutzner, 1996)

3.7.- SISTEMAS COMBINADOS DE IMPERMEABILIZACIÓN Y REFUERZO ESTRUCTURAL

3.7.1.- Impermeabilización mediante inyecciones de impregnación.^(7,11,13)

Definición: Las inyecciones de impregnación se basan en la sustitución del agua o gas intersticial en un medio poroso o fracturado, por un material inyectado, que suele ser **lechadas estables de cemento** (CPO/CER, cemento-bentonita, cemento-arena, microcemento) o **químicas** (silicato sódico, acrilatos, poliuretanos, etc.) con el objeto de proporcionar una cohesión al terreno que ejerza efectos tanto de refuerzo como de impermeabilización.

Aplicación: El campo de aplicación está extendido principalmente, para prevenir o eliminar filtraciones en los túneles que se encuentren con la presencia del nivel freático o con un ascenso inesperado del mismo no previsto.

Puesta en obra: La inyección puede ejecutarse desde el interior y/o exterior del túnel.

La inyección se realiza a través de tubos manguito a muy baja presión, para garantizar que el terreno no sufra desplazamiento.

El criterio fundamental para realizar la elección del producto a utilizar es la permeabilidad del terreno. Por ejemplo, el uso de microcemento es más óptimo con valores de permeabilidad del terreno de 10^{-1} y 10^{-3} cm/s, mientras el límite inferior para las mezclas de cemento-bentonita es de 10^{-2} cm/s. Además se deberá considerar su granulometría en relación a los huecos o fisuras que se quiera rellenar.

El equipo de inyección para poner en obra estas mezclas, contiene los mismos elementos que para las inyecciones clásicas: agitador de alta turbulencia, mezclador de homogenización y bomba de inyección.

Diseño: En el diseño de una inyección por impregnación, entran en juego diversas variables a considerar, para que el método se aplique con la mayor efectividad posible:

- **Admisiones previstas:** Para las inyecciones de impermeabilización se establece normalmente una previsión de admisiones de entre el 20 y el 40% del volumen a tratar, pero es más fiable basarse en lo puramente empírico, en el caso de que existan experiencias contrastadas de la aplicación del mismo método en terrenos similares.
- **Radio efectivo:** Está directamente relacionado con la presión de inyección. Existen ecuaciones clásicas de propagación de fluidos, que tienen en cuenta la viscosidad en función del tiempo, aunque, generalmente se recomienda estudiarlo a partir de experiencias prácticas.

El radio efectivo tiene mucha incidencia sobre el coste total de la solución, ya que condiciona el número de perforaciones a realizar en la inyección.

- **Presión de inyección:** Condiciona los otros factores implicados. Se aplica de una forma creciente, hasta alcanzar la llamada "presión de cierre".

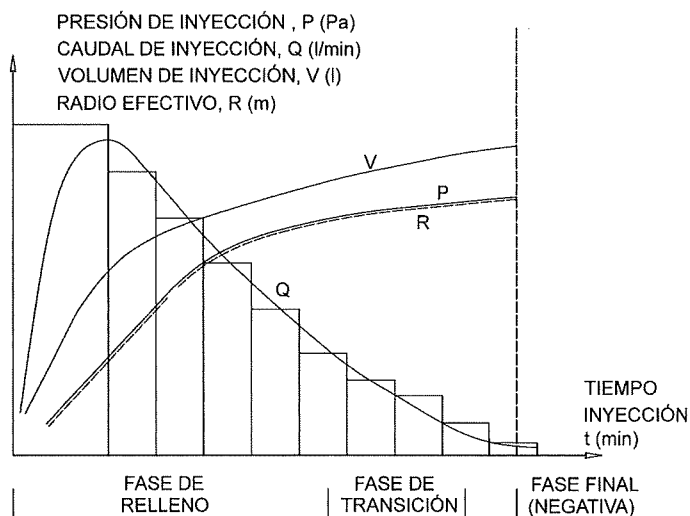


Figura 16. Gráfico de una inyección de relleno clásica (Kutzner, 1996).

- Injection pressure: conditions the other factors involved. It is gradually increased until the so-called “locking pressure” is reached.
- Material viscosity and hardening: application of these products improves the physical and rheological properties of the terrain. Grout gel times vary from 30 to 120 minutes, depending on the product used and the proportions of the blend.
- Injection time: the considerations set out in the preceding point condition injection time, which is likewise related to the above factors.

In the absence of prior experience with this type of injection in the terrain where it is to be applied, a test run is regarded to be imperative to define the most suitable values.

STANDAR CROSS -SECCTION OF IMPREGNATION WATERPROOFING

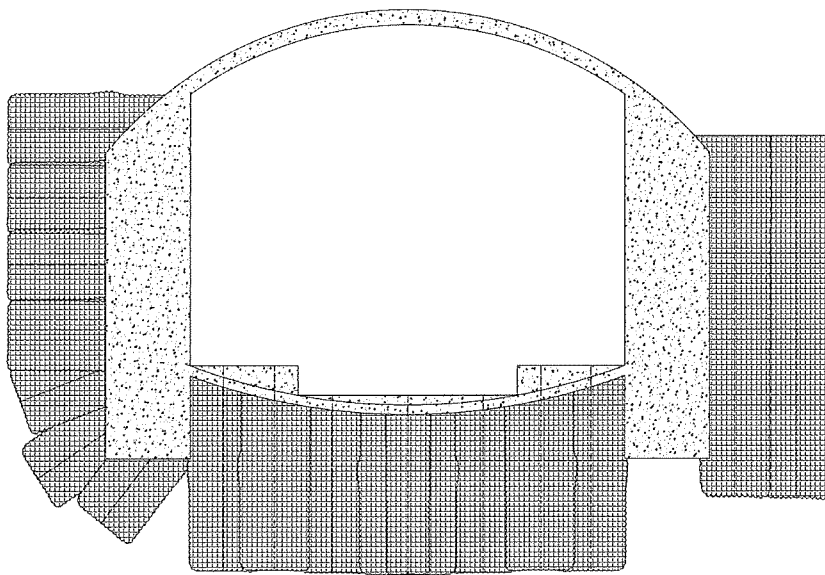


Figure 17

3.7.2.- Jet grouting^(13,14)

Definition: this method, simply explained, consists in injecting material into a terrain at a very high pressure to break or disaggregate the ground around the perforation. Disaggregation is achieved by laterally launching a high pressure jet flux that separates the ground and either blends with it to form a single component or replaces it with grout. In both cases terrain strength and impermeability are greatly improved.

Applications: in bored or cut-and-cover tunnels (primarily between slurry walls) below the water table or where the table may rise, seeking both the prevention and elimination of seepage and reduction or elimination of invert or tunnel bottom slab uplift.

The inference to be drawn is that jet grouting may not only raise the strength of the material, but reduce its permeability. Depending on the technique used, seals or barriers that obstruct water seepage may be generated.

- 1) Bottom seals: one of the uses of jet grouting in waterproofing is to form a **bottom seal** beneath underground excavations dug between slurry walls. This is achieved by overlapping the drill holes so the columns form a continuum.

At the same time, bottom seals fulfil structural functions: constituting permanent shoring for the slurry walls, they reduce the necessary wall thickness and depth.

- **Viscosidad y endurecimiento de materiales:** Con la aplicación de estos productos se mejoran las propiedades físicas y reológicas del terreno. Los tiempos de gelificación de las lechadas varían en función de los productos utilizados y de las proporciones de las mezclas, entre 30 y 120 minutos.
- **Tiempo de inyección:** Lo expuesto en el punto anterior condiciona el tiempo de inyección, que a su vez está relacionado con los factores previamente enumerados.

Si no existen experiencias previas de este tipo de inyección en los terrenos en que se vaya a aplicar, se considera fundamental realizar una prueba, para poder definir los parámetros adecuados a establecer en la realización definitiva de los trabajos.

SECCIÓN TIPO DE INYECCIÓN DE IMPREGNACIÓN

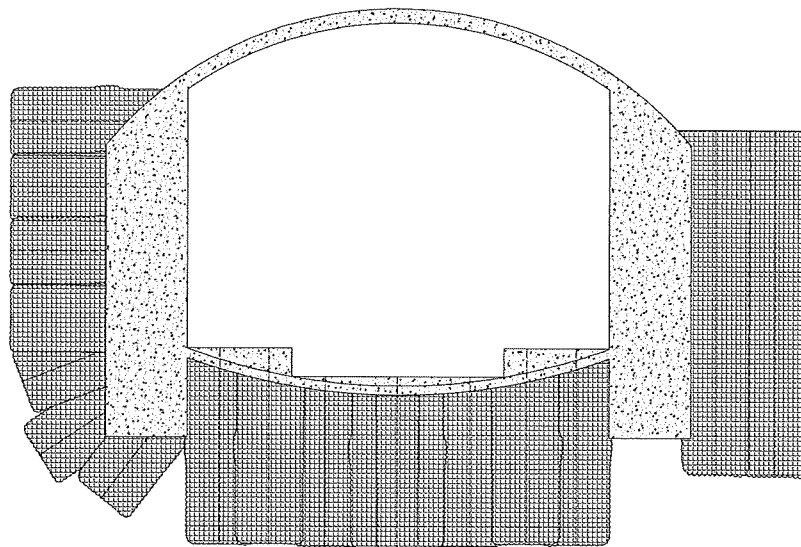


Figura 17.

3.7.2.- Jet groutin.^(13,14)

Definición: El método, explicado de una manera sencilla, se basa en la inyección de un material en el terreno a una presión muy elevada, por medio de un chorro, con la finalidad de conseguir la rotura o disgregación del terreno existente alrededor de la perforación. La disgregación se produce con una lanza lateral de inyección a alta presión, que se une al terreno arrancándolo y formando un único componente con la mezcla de ambos o bien sustituyéndolo por una lechada. En ambos casos las características de resistencia y permeabilidad del terreno resultan ampliamente mejoradas.

Aplicaciones: En túneles en mina o artificiales (pantallas principalmente) bajo el nivel freático o con posibles ascensos del mismo, buscando tanto la prevención y eliminación de filtraciones como la disminución o eliminación de las subpresiones en la losa de fondo o contrabóveda.

Como tal se deduce que la aplicación de jet grouting en el terreno no sólo puede tener como función un aumento de la resistencia del material, sino la disminución de la permeabilidad. Según sea la técnica utilizada se podrá conseguir la creación de tapones o barreras que impidan el paso del agua.

- 1) **Tapones de fondo:** Uno de los usos que puede tener el jet grouting para el control del agua es la aplicación masiva, con el objeto de formar un **tapón de fondo** bajo una excavación subterránea realizada al abrigo de pantallas. Esto se alcanza solapando las perforaciones para conseguir que las columnas queden unidas entre si.

A su vez, el tapón de fondo ejercerá sus funciones estructurales, constituyendo un arriostamiento permanente para las pantallas, evitando así que los espesores y las profundidades de éstas sean superiores.

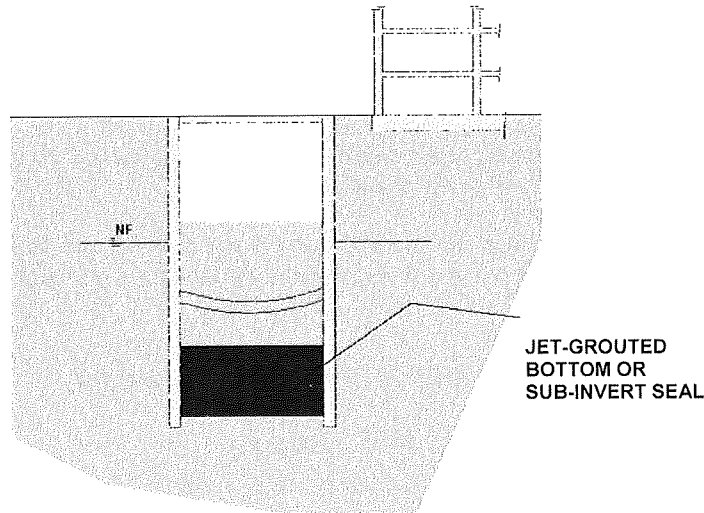
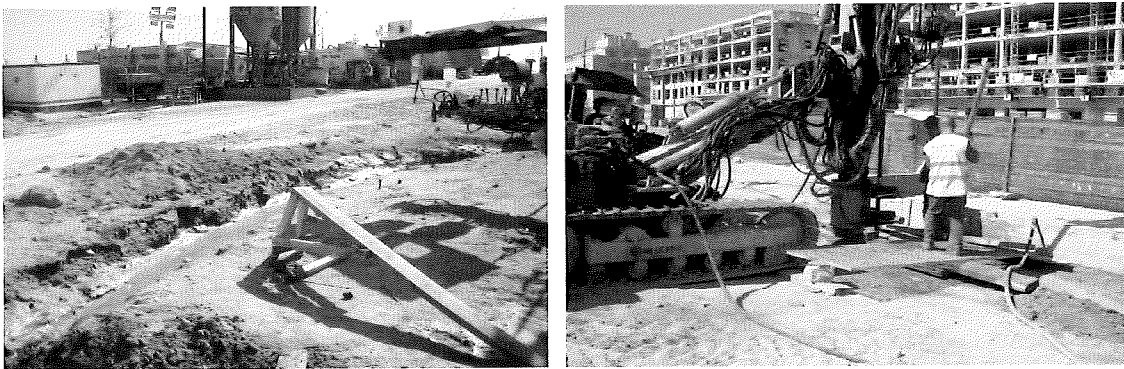


Figure 18. Jet-grouted bottom seal

They also limit possible uplift due to unloading, thereby minimizing the risk of surface settling.

- 2) Pile walls: another possibility is to build a secant **pile wall** with one or several rows of piles. The piles may be built separately, in which case reinforcement elements are needed, such as anchorages if they are to contain soil, or round rebar placed to increase bending strength. The wall may also be built behind a row of piles already in place, tangentially to their edges to obstruct water seepage as effectively as possible.



Photos 6 and 7

Jet-grout column waterproofing, filling the gaps between a group of piles, during the enlargement of the Madrid underground

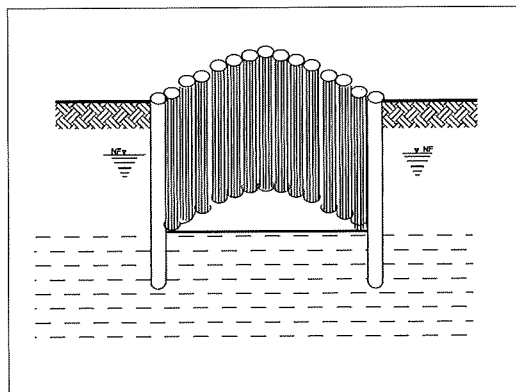


Figure 19. Jet grouted piles forming a pile wall

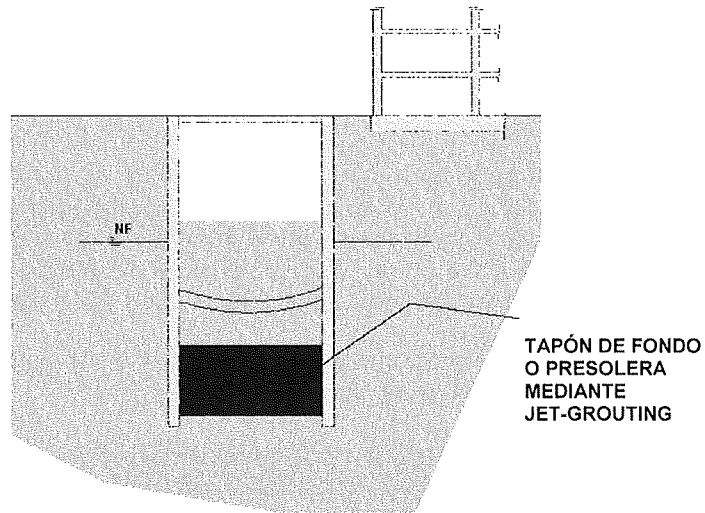
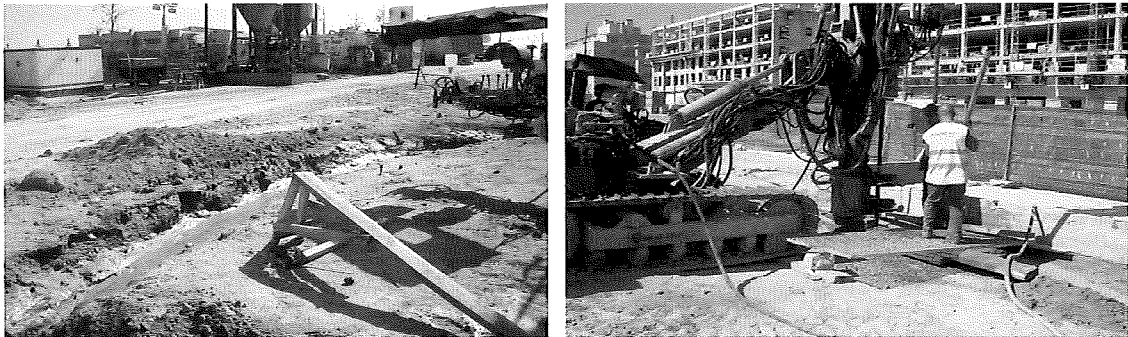


Figura 18. Tapón de fondo mediante jet-grouting.

También limitará el posible levantamiento del fondo por descarga, minimizando el riesgo de asientos en superficie.

- 2) Pantallas de cierre: Por otro lado, es posible ejecutar las columnas a modo de **pantalla de cierre**, por medio de una o varias filas secantes. Pueden ejecutarse independientemente, lo que requerirá algún elemento de refuerzo, tipo anclaje si van a contener tierras o introduciendo en la columna un redondo para aumentar la resistencia a la flexión, o bien ejecutarse tras una fila de pilotes ya ejecutados, buscando la tangencia con los bordes de los mismos, para conseguir un cierre lo más efectivo posible al paso del agua.



Fotos 6 y 7.

Ejecución, en obras de metro, de impermeabilización a base de columnas de jet grouting, como cierre de un recinto de pilotes.

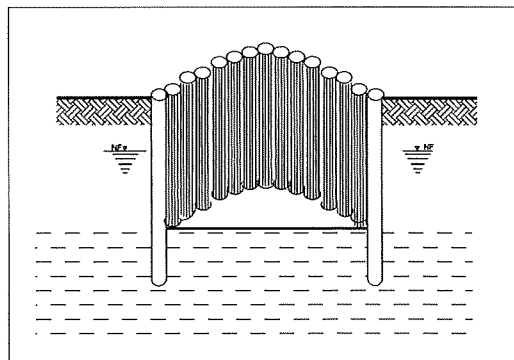


Figura 19. Columnas de jet grouting como pantalla de cierre.

4.- CONCLUSIONS

Briefly, the conclusion to be drawn from the foregoing is that the major factors to be considered for proper waterproofing design in underground are:

- The results of a thorough **hydrogeological survey**, which must form part of the tunnel project, including the respective field work (area surveillance, reconnaissance and testing) needed to ensure the choice and application of the right analytical (Goodman, Heuer) and numerical (MODFLOW...) calculation methods to yield the most accurate estimate possible of the hydraulic flows and loads acting on the tunnel. This will serve to choose the most suitable waterproofing as well as to design tunnel supports and lining.
- Adoption of the **existing standards** (UNE 104424:2000 and similar) and the **technical specifications** formulated by industry specialists as a guide to be followed at all times.
- The need for the fullest possible **understanding** of all **tunnel waterproofing alternatives and solutions** available on the market and their applications, constituent materials and installation. Written with that objective in mind, this article attempts to cover the most common of such methods.

5.- REFERENCES

- 1.- AENOR. *NORMA UNE 104424*. (2000).
- 2.- RIVAS, J. L. *Túneles y Obras Subterráneas*. Sika S.A. (1996).
- 3.- VARIOS AUTORES. *Manual de Túneles y Obras Subterráneas*. C. López Jimeno E.T.S.I.M. (1997).
- 4.- VARIOS AUTORES. *Curso de Ingeniería Geotécnica de Túneles*. Junta de Andalucía. Granada (1998).
- 5.- VARIOS AUTORES. *Congreso Internacional AETOS: Los túneles, factor de transformación..* AETOS. Madrid (2007).
- 6.- Revista; *Arte y Cemento* nº 1761. Read Bussines Information (Enero 1995).
- 7.- *Revista INGEPRES*. Números: 14 (Noviembre. Diciembre 1993) 53 (Septiembre 1997), 64 (Octubre 1998), 126 (Mayo 2004). Entorno Gráfico, S.L.
- 8.- BOE N°79 (2 de Abril de 2005).
- 9.- BETTOR MBT. *Revista: Hormigón preparado*. N° 51 (Noviembre 2001) N° 67 (Abril 2004). A.N.E.F.H.O.P.
- 10.- VARIOS AUTORES. *Publicaciones del 1^{er} y 2^o Congreso Nacional de Impermeabilización*. A. N. I. , CEDEX. Madrid (2005) y Palma de Mallorca (2008).
- 11.- *Revista: Subsuelo y Obra Urbana*. Números: Especial Túneles (Junio 2005 y 2006), 3 (Mayo-Junio 2003), 9 (Mayo-Junio 2004), 10 (Julio-Agosto 2004), 21 (Mayo-Junio 2005) (24 (Noviembre-Diciembre 2006). Pastrana Roperó Comunicación S.L.
- 12.- CALAVERA, J Y GONZÁLEZ VALLE, E. *Cuadernos INTEMAC: "Juntas en construcción de hormigón"*. INTEMAC Publicaciones (1994).
- 13.- BIELZA, A. *Manual de técnicas de mejora del terreno*. C. López Jimeno E.T.S.I.M. (1999).
- 14.- VARIOS AUTORES. *Curso de Ingeniería Geotécnica de Túneles*. I.C.O.G. Madrid (1996).
- 15.- VARIOS AUTORES. *II Simposio Nacional de Geosintéticos*. A. T. C. Madrid (2002).
- 16.- CORREDERA, L. ET AL. *Control de Calidad en las impermeabilizaciones*. Comisión Tecnológica del C.O.A.A.T.M. (1988).

4.- CONCLUSIONES

Como conclusiones breves a este trabajo, se podría establecer que para el diseño adecuado de la impermeabilización de una obra subterránea, son muy importantes los siguientes factores:

- Elaboración de un buen **estudio hidrogeológico**, que ha de estar integrado en el proyecto del túnel, en el cual se desarrollen los correspondientes trabajos de campo (recorridos por la zona, reconocimientos y ensayos) que deriven en la correcta elección y aplicación de los métodos de cálculo tanto analíticos (Goodman, Heuer,...) como numéricos (MODFLOW, etc...), que nos lleven a una estimación lo más acertada posible de los caudales y cargas hidráulicas que soportará el túnel. Esto nos servirá tanto para elegir la impermeabilización más adecuada, como para diseñar los sostenimientos y revestimientos del túnel.
- Tomar como referencia y seguimiento en todo momento, las **normativas existentes** (UNE 104 424, etc.) y las **prescripciones técnicas** elaboradas por los especialistas del sector.
- Tener un **conocimiento** lo más amplio posible **de todas las alternativas y soluciones de impermeabilización de túneles** existentes en el mercado, respecto a sus aplicaciones, materiales y puesta en obra. Con esta finalidad se ha desarrollado este trabajo, que ha intentado recoger los métodos de uso más extendido dentro de este campo.

5.- BIBLIOGRAFÍA

- 1.- AENOR. *NORMA UNE 104424*. (2000).
- 2.- RIVAS, J. L. *Túneles y Obras Subterráneas*. Sika S.A. (1996).
- 3.- VARIOS AUTORES. *Manual de Túneles y Obras Subterráneas*. C. López Jimeno E.T.S.I.M. (1997).
- 4.- VARIOS AUTORES. *Curso de Ingeniería Geotécnica de Túneles*. Junta de Andalucía. Granada (1998).
- 5.- VARIOS AUTORES. *Congreso Internacional AETOS: Los túneles, factor de transformación..* AETOS. Madrid (2007).
- 6.- Revista; *Arte y Cemento* nº 1761. Read Bussines Information (Enero 1995).
- 7.- Revista *INGEOPRES*. Números: 14 (Noviembre. Diciembre 1993) 53 (Septiembre 1997), 64 (Octubre 1998), 126 (Mayo 2004). Entorno Gráfico, S.L.
- 8.- BOE Nª79 (2 de Abril de 2005).
- 9.- BETTOR MBT. *Revista: Hormigón preparado*. Nº 51 (Noviembre 2001) Nº 67 (Abril 2004). A.N.E.F.H.O.P.
- 10.- VARIOS AUTORES. Publicaciones del *1º y 2º Congreso Nacional de Impermeabilización*. A. N. I. , CEDEX. Madrid (2005) y Palma de Mallorca (2008).
- 11.- *Revista: Subsuelo y Obra Urbana*. Números: Especial Túneles (Junio 2005 y 2006), 3 (Mayo-Junio 2003), 9 (Mayo-Junio 2004), 10 (Julio-Agosto 2004), 21 (Mayo-Junio 2005) (24 (Noviembre-Diciembre 2006). Pastrana Roperó Comunicación S.L.
- 12.- CALAVERA, J Y GONZÁLEZ VALLE, E. *Cuadernos INTEMAC: "Juntas en construcción de hormigón"*. INTEMAC Publicaciones (1994).
- 13.- BIELZA, A. *Manual de técnicas de mejora del terreno*. C. López Jimeno E.T.S.I.M. (1999).
- 14.- VARIOS AUTORES. *Curso de Ingeniería Geotécnica de Túneles*. I.C.O.G. Madrid (1996).
- 15.- VARIOS AUTORES. *II Simposio Nacional de Geosintéticos*. A. T. C. Madrid (2002).

-
- 17.- AGUADO. L. *Control de Calidad en la impermeabilización, control de materiales, control de ejecución.* Revista: *Estanqueidad y Aislamiento*: nº 26 (Junio 1995).Grupo A.E.S.L.
- 18.- BENDELIUS, A. "*Water Supply and Drainage Systems*". *Tunnel Engineering Handbook*..Chapmann and Hall, N.Y. (1996).
- 19.- GOODMAN, ET AL. "*Flujos de Agua en Túneles*". Bull. A. Eng. Geol. Vol 2 Nº 1. Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Springer Berlin (1965).
- 20.- VARIOS AUTORES. *Los Túneles y el Agua*. Volúmenes 1 y 3. A.E.T.O.S. (1988).
- 21.- JACOBS, J. M. ET AL. "*Achieving a dry tunnel*". *Excavation and Tunneling*. Proceedings Vol 1. Society of Mining Engineers, Inc.(1997).
- 22.- Norma DIN 4030. "Evaluation of Liquids, Soils and Gases Aggressive to Concrete".1969.

-
- 16.- CORREDERA, L. ET AL. *Control de Calidad en las impermeabilizaciones*. Comisión Tecnológica del C.O.A.A.T.M. (1988).
 - 17.- AGUADO. L. *Control de Calidad en la impermeabilización, control de materiales, control de ejecución*. Revista: *Estanqueidad y Aislamiento*: nº 26 (Junio 1995).Grupo A.E.S.L.
 - 18.- BENDELIUS, A. "*Water Supply and Drainage Systems*". *Tunnel Engineering Handbook*..Chapmann and Hall, N.Y. (1996).
 - 19.- GOODMAN, ET AL. "*Flujos de Agua en Túneles*". Bull. A. Eng. Geol. Vol 2 N° 1. Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Springer Berlin (1965).
 - 20.- VARIOS AUTORES. *Los Túneles y el Agua*. Volúmenes 1 y 3. A.E.T.O.S. (1988).
 - 21.- JACOBS, J. M. ET AL. "*Achieving a dry tunnel*". *Excavation and Tunneling*. Proceedings Vol 1. Society of Mining Engineers, Inc.(1997).
 - 22.- Norma DIN 4030. "Evaluation of Liquids, Soils and Gases Aggressive to Concrete".1969.

Relación de Personal Titulado de INTEMAC

Arquitectos

Benito Díez, María Pilar
Fernández Sáez, Ana María
Fraile Mora, Serafín
González Balseyro, María José
López-Nava Muñoz, Alberto Ignacio
Luzón Cánovas, José M^a
Sánchez Arroyo, Jesús M^a
Sevilla Bombín, Esther María
Sicilia Mañá, Beatriz

Ingenieros Aeronáuticos

Alonso Gordo, Ana
* París Loreiro, Angel
Moreno Toriz, Juan José
Rosa Tortosa, Pedro

Ingenieros de Caminos

Baena Alonso, Eva
* Barrios Corpa, Jorge
Barrios Corpa, Roberto
Brandán Gordillo, Rubén
* Calavera Ruiz, José
Calderón Bello, Enrique
Castillo Fernández, Luis Javier
Corbacho Vicioso, José Angel
Cortés Bretón, Juan María
Corral Folgado, Claudio
De la Cuerda del Olmo, Francisco Javier
De la Fuente Gómez, Ana Isabel
Dávila Sánchez-Toscano, Suyapa
Díaz Heredia, Elena
Díaz Lorenzo, Lucía
Díaz Lozano, Justo
Díaz Pavón Cuaresma, Eduardo
Encinar Arroyo, Antonio
* Fernández Gómez, Jaime Antonio
Fernández Montes, David Constantino
García Gil, Jesús Francisco
García de Diego Cano, Eva María
González González, Juan José
González Reyero, Carlos
* González Valle, Enrique
* Hostalet Alba, Francisco
* Izquierdo Bernaldo de Quirós, José M^a
Jiménez Ortiz, Gonzalo
* Ley Urzaiz, Jorge
Menéndez Martínez, Laura
Misol Moyano, Carolina
Munugarren Martínez, Miguel Angel
Pérez Blanco, José Luis
Pérez García, Noemí
Rodríguez Escribano, Raúl Rubén
* Rodríguez Romero, Jesús M^a
Rueda Contreras, Jorge Ladislao
Ruiz Jiménez-Alfaro, Felipe
Sanz Pérez, Lorenzo

Tapia Menéndez, José
Torre Cobo, María Carmen
Valdés Fernández de Alarcón, Pablo
Villanueva Ramírez, Santiago

Ingeniero en Cartografía y Geodesia

López-Canti Casas, Elisa

Ingenieros Civiles

Almeida da Silva, Pedro Miguel
De Jesús Filipe Sarabando Rei, Carolina
Giarrizzo, Roberto
Teixeira Martins, Hermano Tiago

Ingenieros Geólogos

Catalán Navarro, Antonio
Hernández Alvarez, José Luis

Ingeniero I.C.A.I.

Marín Estévez, Gonzalo

Ingenieros Industriales

* Alvarez Cabal, Ramón Amado
Argüelles Galán, Manuel
Arroyo Arroyo, José Ramón
Armengou Lacalle, María Teresa
Bayonne Sopo, Enrique
De la Cruz Morón, Diego
De la Iglesia Rodríguez, Beatriz Marta
Estrada Gómez, Rafael
García Malpartida, Javier
González Carmona, Manuel
Ibañez Mayayo, Miguel
Liébana Ramos, Miguel Angel
López Bravo, Soraya
Martos Ojanguren, Víctor
Pou Esquiús, Carles
Ramírez de la Pinta, Rubén
Rioja San Martín, Oscar
Suárez Fernández, Antonio
* Valenciano Carles, Federico

Ingeniero de Minas

Ramos Sánchez, Adelina

Ingeniero de Montes

Carrillo Bobillo, Oliva

Dra. en Geografía e Historia

Calavera Vayá, Ana María

Licenciada en Administración y Dirección de Empresas

Perales Gómez, Natalia

Licenciado en Biología

González Llanes, José Pelayo

Licenciado en Ciencias Ambientales

Gil Esteban, Luis Miguel

Licenciado en C. Económicas y Empresariales

González Chavero, Antonio

NOTA: Todo el personal de INTEMAC trabaja en dedicación completa y exclusiva, con la excepción de las personas arriba indicadas con * a las que se autoriza la dedicación a la Enseñanza Universitaria en régimen de dedicación parcial.

Licenciado en Ciencias Físicas

Salas Roa, Luis David

Licenciada en Ciencias Políticas y de la Administración

Estébanez Morer, Ana María

Licenciados en Ciencias Químicas

Grandes Velasco, Sylvia María

López Sánchez, Pedro

Morgado Sánchez, José Carlos

Licenciados en Derecho

Jarillo Cerrato, Pedro

Licenciada en Psicología

Catalá Pellón, Diana

Licenciados en Geología

Blanco Zorroza, Alberto

Carnicero Rodríguez, Ana

Casado Chinarro, Alejandro

Catalán Navarro, Antonio

López Velilla, Oscar

Martín López, Jesús Heliodoro

Tello Gay, Marta

Usillos Espín, Pablo

Licenciada en Filología Hispánica

Valentín Sierra, M^a Consuelo

Licenciado en Geografía e Historia

Fernández de Córdoba Pérez, José Antonio

Arquitectos Técnicos

Carrato Moñino, Rosa M^a

Díaz Lorenzo, Lucía

Fernández Jiménez, Amelia

Galán Rivera, Sofía

Jiménez Salado, Borja

Montejano Jiménez, María del Carmen

Muñoz Mesto, Angel

Vicente Minguela, Francisco

Ingeniero Técnico Forestal

Carrillo Bobillo, Oliva

Ingeniero Técnico en Informática de Gestión

Esteban Pérez, Ramón

Ingenieros Técnicos Industriales

Alcubilla Villanueva, Rubén

Campano Pérez, María Josefa

Díaz-Trechuelo Laffón, Antonio

García Campos, María de la Luz

Gil Ginesta, Juan Carlos

Madueño López, Javier

Madueño Moraño, Antonio

Marmolejo Mansilla, José Luis

Martos Sánchez, Rafael

Menor Céspedes, Francisco Javier

Muñoz Gonzalo, Elena

Pérez Berenguer, José Gil

Rodríguez Luque, Ana María

Ruiz Rivera, Rafael

Sáez Comet, Carlos

Santos Barrero, Francisco Javier

Taltavull Carreras, Gemma

Villar Riñones, Jesús

Ingeniero Técnico de Minas

Fernández Terán, Francisco Javier

Sillero Arroyo, Andrés

Ingenieros Técnicos Obras Públicas

Alonso Montero, Fernando

Carrero Crespo, Rafael

González Isabel, Germán

González Nuño, Luis

Llort Mac Donald, Daniel

Martínez Vicente, Cristina

Mata Soriano, Juan Carlos

Montiel Sánchez, Ernesto

Muñoz Martín, Jesús

Muñoz Mesto, Angel

Ortiz del Campo, Natalia

Pérez Zúñiga, Daniel Basilio

Pino Vaquero, José Angel

Rivera Jiménez, Marta

Romero García, Daniel

Rosa Moreno, José Andrés

Rozas Hernando, José Juan

Sánchez Tomé, Elena

Sillero Olmedo, Rafael

Vicente Girón, Susana

Ingenieros Técnicos Topógrafos

Barragán Bermejo, M^a Vicenta

Carreras Ruiz, Francisco

López de Castro, Daniel

López Jiménez, Luis

Molero Vicente, M^a Isabel

Sánchez Martín, María de la O

Torés Campos, Ana M^a

Técnicos en Administración de Empresas

Cebrián Sobrino, M^a José

González del Olmo, M^a de la Peña de F.

Técnico Superior en Internet y Correo Electrónico

Calavera Vayá, Rafael

Técnico en Publicidad

Blanco Armas, Cristina

Topógrafo

Alquézar Falceto, Ricardo

NOTA: Todo el personal de INTEMAC trabaja en dedicación completa y exclusiva, con la excepción de las personas arriba indicadas con * a las que se autoriza la dedicación a la Enseñanza Universitaria en régimen de dedicación parcial.

CUADERNOS INTEMAC



CUADERNOS INTEMAC es una publicación trimestral, bilingüe en español e inglés, en forma de monografías que recogen trabajos realizados por los técnicos del Instituto o presentados en los Cursos y Conferencias organizados por el mismo.

Los temas tratados cubren tanto el campo de las Obras Públicas como el de la Edificación y sus Instalaciones.

Precio de la suscripción Año 2007: 31€

ULTIMOS TITULOS PUBLICADOS

Cuaderno Nº 70

"Influencia de diferentes variables en el comportamiento a flexión de secciones de hormigón armado, reforzados con materiales compuestos"

Autora: Elena Díaz Heredia

Cuaderno Nº 71

"Impermeabilización de túneles"

Autor: Pablo Usillos Espín

CUADERNOS DE PROXIMA APARICION

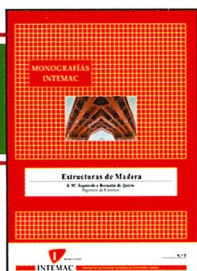
Cuaderno Nº 72

"Evaluación del sistema estructural de las cuatro torres de la Castellana (Madrid) frente a la acción del viento"

Autor: R. Álvarez Cabal

Consulte lista completa de la Colección

MONOGRAFÍAS INTEMAC



Publicación de INTEMAC con un carácter eminentemente práctico destinada a tratar temas muy concretos que, o bien presentan un nivel de problemas acusado en la práctica, o bien están insuficientemente cubiertos por la Normativa y la documentación técnica correspondientes.

MONOGRAFÍA INTEMAC Nº 5

"Mantenimiento y reparación de paramentos de hormigón".

Autores: R. Barrios Corpa, C. Beteta Cejudo, E. Díaz Heredia, Prof. J. Fernández Gómez, J. M. Rodríguez Romero.

Precio de la Monografía 38 €

MONOGRAFÍA INTEMAC Nº 6

"Patología, técnicas de intervención y limpieza de fábricas de ladrillo".

Autores: P. López Sánchez, J. M. Luzón Cánovas, I. Martínez Pérez, A. Muñoz Mesto, A. Fernández Sáez.

Precio de la Monografía 38 €

MONOGRAFÍA INTEMAC Nº 7

"Estructuras de madera".

Autores: J. M. Izquierdo y Bernaldo de Quirós.

Precio de la Monografía 38 €

NOTAS DE INFORMACIÓN TÉCNICA NIT



Con independencia de la serie Cuadernos de INTEMAC, de la que se publica un número trimestral, bilingüe en español e inglés, en INTEMAC se producen, con acentuada frecuencia, notas de información sobre aspectos concretos que pensamos que no solamente tienen una utilidad interna, sino que pueden resultar interesantes para muchos Técnicos de la Construcción.

Las Notas se envían únicamente por correo (pago por transferencia o tarjeta de crédito).

NIT-5 (06)

Influencia de la oxidación y de las manchas de mortero sobre la adherencia de armaduras de hormigón

J. Calavera Ruiz; A. Delibes; J. M. Izquierdo y Bernaldo de Quirós; G. González Isabel

Edición en español, en color. 12 páginas

P.V.P.: 14 euros

NIT-6 (07)

El previsible descenso de la seguridad en pilares con la entrada en vigor del Eurocódigo EC-2, y la necesidad de un control estricto de la calidad del hormigón en pilares

J. Calavera Ruiz

Edición en español. 10 páginas P.V.P.: 12 euros

VÍDEOS TÉCNICOS Y DVD'S

Muestreo de hormigón fresco. Fabricación y ensayo de probetas de hormigón.

Nº 2001 (1-1)

Contempla de forma completa y detallada el proceso de toma de muestras de hormigón fresco en obra, la medida de la consistencia con el Cono de Abrams, fabricación de probetas, curado en obra, transporte al laboratorio, curado en cámara, refrendado y ensayo a compresión.

Esta nueva versión del vídeo 8801 (1), introduce las modificaciones de EHE y un sistema de estudio de la distribución de presiones de la prensa sobre la probeta así como los aspectos particulares del ensayo de hormigones de alta resistencia. 30 minutos - 25 €



Fabricación y control de calidad de barras y mallas para hormigón armado.

Nº 2002 (1-2)

Muestra el proceso de laminación en fábrica de las barras y alambres, la fabricación de mallas y los ensayos de tracción, doblado, arrancamiento de nudos y determinación de las características geométricas del corrugado y el ensayo de Beam-test para la determinación de las características de adherencia. 30 minutos - 25 €



Compresión centrada en hormigón armado.

Nº 2002 (1-4)

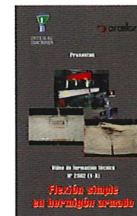
Contempla la rotura de siete pilares a escala real, variando resistencias de hormigón desde 25 N/mm² a 100N/mm², las cuantías de armaduras, la separación de estribos y la velocidad de carga conectando todo ello con las fórmulas de cálculo. 35 minutos - 25 €



Flexión simple en hormigón armado.

Nº 2002 (1-3)

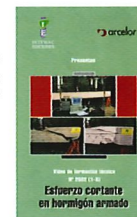
Incluye el ensayo a rotura de cinco vigas a escala real, con diferentes cuantías y diferentes desarrollos de adherencia conectando todo ello con las fórmulas de cálculo. 35 minutos - 25 €



Esfuerzo cortante en hormigón armado.

Nº 2002 (1-5)

Muestra el ensayo a rotura de cinco vigas a escala real, con diferentes formas de rotura por corte (Tracción diagonal, corte flexión, compresión diagonal, etc.) conectando todo ello con las fórmulas de cálculo. 25 minutos - 25 €



BOLETÍN BIBLIOGRÁFICO

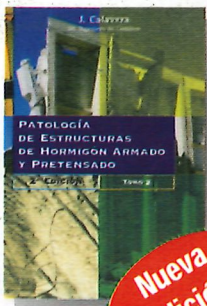
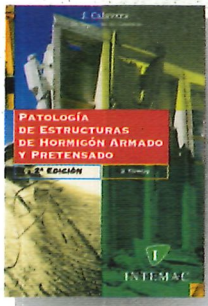
BOLETIN BIBLIOGRAFICO

INTEMAC viene realizando desde su fundación un BOLETIN BIBLIOGRAFICO para uso interno, que ofrece, en una lectura rápida, un panorama general de todas las publicaciones técnicas disponibles. Desde 1991, esta publicación bimestral, ha sido puesta a disposición del público. EL BOLETIN BIBLIOGRAFICO incluye:

Fotocopia del índice y de los resúmenes de los artículos contenidos en las 105 revistas técnicas que se reciben en el Instituto referentes a los campos de la Edificación, Instalaciones, Obras Públicas y Urbanismo. Una sección de Normativa reciente, nacional y extranjera. Secciones de Bibliografía y Cursos. Una sección de Congresos, Reuniones Técnicas y Ferias de próxima celebración en todo el mundo.

Tarifa de suscripción anual (6 números) 200 €

Consulte otras publicaciones
www.intemac.es

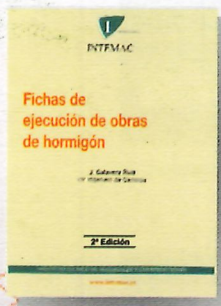


Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado

2ª edición (2 tomos)
J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 135 €

Nueva edición



Fichas de ejecución de obras de hormigón

2ª edición
J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 56 €

Nueva publicación



Ejecución y control de estructuras de hormigón

J. Calavera, P. Alaejos Gutiérrez,
J. Fernández Gómez, E. González Valle,
F. Rodríguez García

Precio: 113 €

Nueva publicación



Manual para la redacción de informes técnicos en construcción

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 80 €



Manual de Ferralla

3ª edición
J. Calavera, E. González Valle,
J. Fernández Gómez, F. Valenciano

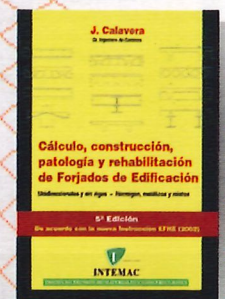
Precio: 45 €



Proyecto de estructuras de hormigón con armaduras industrializadas

J. Calavera, E. González Valle,
J. Fernández Gómez, F. Valenciano

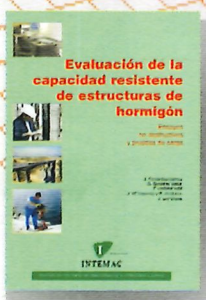
Precio: 50 €



Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación

5ª edición
J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

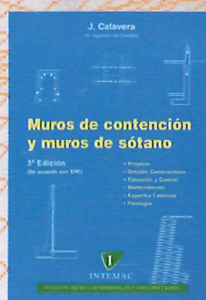
Precio: 113 €



Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón

J. Fernández Gómez, G. González Isabel,
F. Hostalet Alba, J. Mª Izquierdo, J. Ley Urzaiz

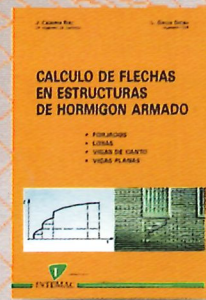
Precio: 64 €



Muros de contención y muros de sótano

3ª edición
J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 80 €



Cálculo de flechas en estructuras de hormigón armado

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)
L. García Dutari (Ingeniero Civil)

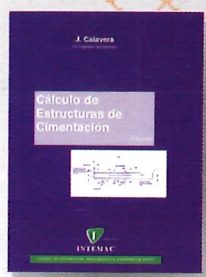
Precio: 53 €



Manual de detalles constructivos en obras del hormigón armado

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Libro: 123 € - CD-ROM 198 €



Cálculo de estructuras de cimentación

4ª edición
J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

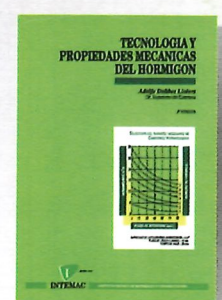
Precio: 80 €



Hormigón de alta resistencia

G. González-Isabel (Ingeniero Técnico de O. P.)

Precio: 47 €



Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón

A. Delibes (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 57 €



INTEMAC

Mario Roso de Luna, 29, Ed. 12 - 28022 MADRID
TEL.: 91 327 74 00 • FAX: 91 327 74 20
e-mail: intemac@intemac.es
www.intemac.es