

73



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

IMPERMEABILIZACION DE TUNELES CON  
GEOMEMBRANA DE PVC-p.

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
PRESENTA

JAVIER LOPEZ TAPIA



DIRECTOR DE TESIS: DR. RAFAEL MORALES Y MONROY

CIUDAD UNIVERSITARIA

2002



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Mi Madre Mather**

**A la UNAM por brindarme una oportunidad en sus instalaciones,  
así como conocer infinidad de profesores que me ayudaron a  
prepararme como profesionista y lograr una de mis anheladas  
metas en mi vida.**

**A mis Padres**

**Por darme la vida y apoyarme en los primeros momentos  
así como realizarme responsable en mis actividades  
cotidianas.  
gracias.....lo logre.**

**A mi Hermana**

**Paty, gracias por el apoyo moral, y los consejos que me  
brindaste en los momentos cuando mas lo necesitaba así como  
la comprensión que me tuviste y por aceptarme de acuerdo a  
mi ideología.**

## **A mi Amigo**

**Javier mi amigo, gracias por el apoyo que me brindaste en todo momento, el enseñarme a no vencerme en los momentos más difíciles de mi vida, a impulsarme para terminar mi principal meta en la vida.**

**Te agradezco tu amistad que no tiene precio y que sabes ser un gran amigo no cambies.**

**Recuerda el que sabe corresponder a un favor recibido es un amigo que no tiene precio.**

**Gracias Antonio.**

**Soco y Julia**

**Por el apoyo que me brindaron en los momentos más difíciles en  
que lo necesitaba y por soportar mis peores momentos, les doy  
gracias.**

**Marco A. Gómez R.**

**Uno de mis profesores que gracias a el llegue asta estos momentos de mi vida brindándome consejos y con un conocimiento que sabe expresar lo cual me motiva a no dejar de estudiar.**

**Dr. Rafael Morales y Monroy**

**Gracias por confiar en mi y ser mi director de tesis para obtener mi título profesional así como la paciencia que me tuvo.**

**A mis Sinodales**

**Que cada uno de ellos fue mi profesor y con sus comentarios en clase así como sus consejos, me motivaron a seguir adelante. Ya que la lectura forma al hombre; las conferencias lo alistan; y la escritura lo perfecciona. Gracias profesores de la UNAM.**

**Araceli Roldán Bernal**

**Gracias por la ayuda que obtuve de ti al realizar las figuras esquemáticas y algunas traducciones que se complicaron.**

**Sergio Olea**

**Gracias por la ayuda que me brindaste en el trabajo, que me ayudo a mantener mis estudios así como la finalización de este ejemplar que es una de mis satisfacciones.  
Gracias...**

# IMPERMEABILIZACION DE TUNELES CON GEOMEMBRANAS DE PVC-p

## INDICE

### INTRODUCCION

#### 1. GENERALIDADES

1.1 Influencia del terreno y del sistema constructivo.	1
1.2 Influencia del agua.	7
1.3 Influencia del uso del túnel.	10
1.4 Requisitos para una impermeabilización.	11

#### 2. HIDROGEOLOGIA Y AGUA SUBTERRANEA

2.1 Niveles piezométricos	14
2.2 Perfiles geológicos	14
2.3 Agua libre	17
2.4 Mantos colgados	19
2.5 Acuíferos	19
2.6 Recarga de acuíferos	21
2.7 Ríos y aguas subterráneas	21

#### 3. CAMPOS DE APLICACIÓN, TIPO Y METODOS DE IMPERMEABILIZACIÓN

3.1 Objeto de aplicación.	23
3.1.1 Túneles con revestimiento de concreto lanzado.	23
3.1.2 Túneles revestidos por dovelas.	24
3.1.3 Túneles y galerías a cielo abierto.	24
3.1.4 Otro tipo de construcciones y reparaciones.	24
3.1.5 Aplicaciones especiales.	24
3.2 Consideraciones generales.	27
3.3 Requisitos de impermeabilización de un túnel.	29
3.4 Requisitos del soporte.	34
3.5 Requisitos de la impermeabilización principal.	36
3.6 Efectos del drenaje en la capa de protección y transmisividad.	37
3.7 Consideraciones específicas.	38
3.7.1 Túneles excavados convencionalmente con sostenimiento de concreto lanzado.	38
3.7.2 Túneles con revestimiento a base de dovelas.	42
3.7.3 Impermeabilización en contra bóvedas.	42
3.7.4 Túneles excavados a cielo abierto.	43

#### **4. MATERIALES DE IMPERMEABILIZACIÓN**

4.1 Materiales para la impermeabilización primaria.	45
4.2 Materiales para la impermeabilización principal.	46
4.2.1 Geotextil	46
4.2.1.1 Elección del tipo de Geotextil.	47
4.2.1.2 Recepción y colocación del Geotextil.	49
4.3 Geocompuestos drenantes.	49
4.3.1 Elección del tipo de geocompuesto.	50
4.3.2 Recepción y colocación.	50
4.4 Laminas de impermeabilización.	51
4.5 Membranas de protección.	53
4.6 Soportes de la impermeabilización.	53
4.6.1 Protección.	54
4.6.2 Regularización.	54

#### **5. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LA IMPERMEABILIZACIÓN**

5.1 Tratamientos preliminares.	55
5.1.1 Drenes.	55
5.2 Preparación del soporte.	56
5.3 Impermeabilización principal.	57
5.3.1 Geotextil.	57
5.3.2 Geomembrana.	58
5.3.3 Uniones y remates longitudinales.	62

#### **6. SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN.**

6.1 Pruebas.	64
6.2 Mediciones.	65
6.3 Especificaciones.	65

#### **7. CASO ESTUDIO.**

#### **CONCLUSIONES**

#### **BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS**

## **INTRODUCCIÓN**

Dentro de la Ingeniería Civil uno de los campos más complicados debido a la exigencia de estudios geológicos, como de su construcción, son los túneles y las galerías subterráneas. Todo túnel es una obra que se desarrollará en el interior del terreno y la geología es la ciencia que estudia la naturaleza y disposición del mismo.

Esto significa que el primer problema dentro de un túnel es geológico.

Normalmente la impermeabilización de los túneles tiene una gran importancia tanto en el campo técnico como económico, debido a la complejidad de elementos que la componen lo cual contribuye a la calidad y durabilidad de las obras.

Durante la planificación y ejecución, así como a la hora de diseñar la impermeabilización, habrá que tener en cuenta los siguientes factores:

- Condiciones del terreno y tipo de construcción.
- Presencia de agua y estado en que se encuentra el terreno.
- Grado de impermeabilización requerido y tipo de servicio que prestará el túnel.
- Acciones a las que puede estar expuesta la impermeabilización.
- Tamaño y vida del túnel.

Los campos de aplicación de este tema comprenderán los túneles de carretera y ferroviarios, así como las galerías hidráulicas y cavernas, y en general las obras subterráneas.

La presencia de agua en túneles u obras subterráneas, como filtraciones o humedades en general, incide negativamente tanto en las fases de construcción como durante la vida de la obra, por lo cual es necesario disponer de una red de drenaje efectiva, como un sistema de impermeabilización fiable, seguro y de larga duración.

En la realización de la obra una vez acabada la excavación y el sostenimiento del túnel se procederá a colocar la impermeabilización y a construir el drenaje y el revestimiento definitivo.

Con la impermeabilización se evitara el ingreso de agua al interior del túnel y mediante la evacuación de las filtraciones que pudieran producirse.

La impermeabilización principal estará integrada por un geotextil y una membrana que son instalados en la fase final de los trabajos, es decir cuando la excavación y el sostenimiento han sido realizados, incluso las operaciones preliminares de recogidas de agua (drenajes) y regularización; y siempre antes del revestimiento estructural.

Una de las áreas más importantes en el campo de la impermeabilización de túneles son los construidos sin sostenimiento de hormigón proyectado, es decir con elementos prefabricados en acero u hormigón.

Otro tipo de túneles son los ejecutados a cielo abierto (open cut) en el cual se utilizan membranas contra las filtraciones de agua.

Por encima, en lugar de una capa filtrante mineral, se colocara un geotextil con la finalidad de proteger mecánicamente la membrana y evacuar agua de filtración en su plano, incluso bajo fuertes presiones del terreno de relleno.

# **1. GENERALIDADES**

## **1.1 Influencia del terreno y del sistema constructivo**

El terreno tiene una importancia decisiva; por un lado, en el sistema de construcción y, por otro, en el tipo de revestimiento utilizado en el túnel. Estas influencias determinan la elección de la impermeabilización, dentro de la cual se pueden distinguir tres tipos de macizos rocosos:

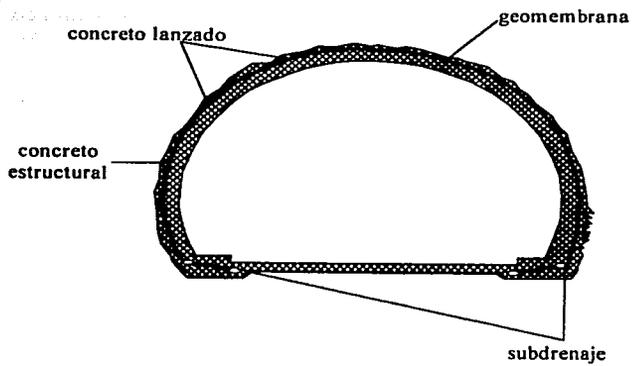
a) Roca sana

b) Roca fracturada

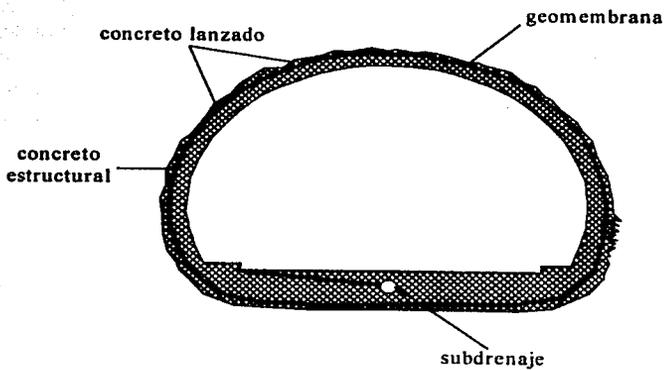
c) Roca triturada

a) Roca sana

En el caso de roca sana, se emplean procedimientos y excavaciones en grandes bloques y dada la naturaleza del terreno el túnel es estable (por lo menos por cierto tiempo), no siendo necesario un apuntalamiento previo, aunque a veces se utilice para mayor seguridad. En estos casos no hace falta el uso de revestimientos que soporten el terreno y establezcan un equilibrio, basta con eliminar irregularidades y rellenar fisuras mediante concreto lanzado y aplicar después el sistema de impermeabilización. Después se revestirá con concreto, estructural o lanzado, si es necesario formar la estructura de soporte del túnel, teniendo en cuenta la presión del terreno e incluso del agua.



**Impermeabilización contra filtraciones**

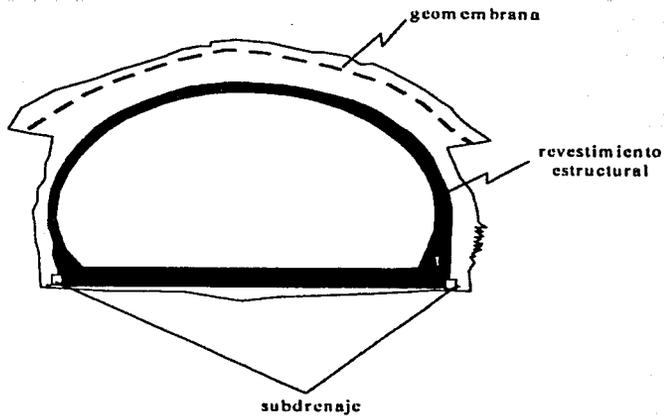


**Impermeabilización contra filtraciones a presión**

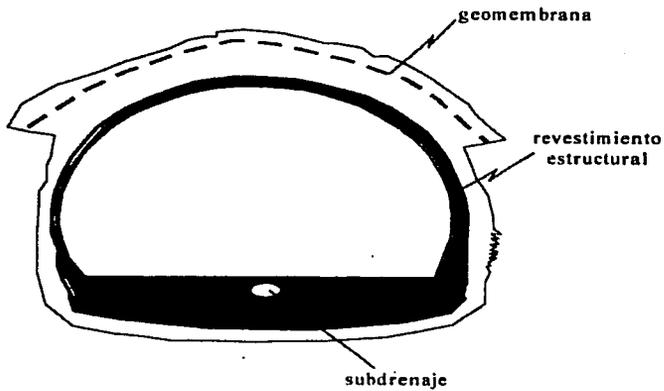
**Fig. 1 Roca Sana**

#### **b) Roca fracturada**

En el caso de roca fracturada, no se puede construir el túnel a sección completa, es preciso hacerlo por etapas sucesivas dando lugar a varios tipos de avance (nuevo método austriaco, belga, inglés, etc.), necesiéndose siempre la realización de un apuntalamiento previo en cada fase, que garantice la seguridad del túnel y, por tanto, del avance (p.e. cerchas, anclas, concreto lanzado, etc.). Es sobre este soporte y antes del revestimiento estructural, donde se colocará el sistema de impermeabilización.



**Impermeabilización contra filtraciones**



**Impermeabilización contra filtración a presión**

**Fig. 2 Roca fracturada**

### **c) Roca triturada**

En el caso de roca triturada o suelos (plásticos), el túnel tiene que construirse en el espacio creado por máquina tuneleadora y por tanto, es preciso resaltar que la construcción del soporte se ha de efectuar de inmediato en dicho espacio. Existen dos formas de conseguir la impermeabilización en este tipo de terrenos:

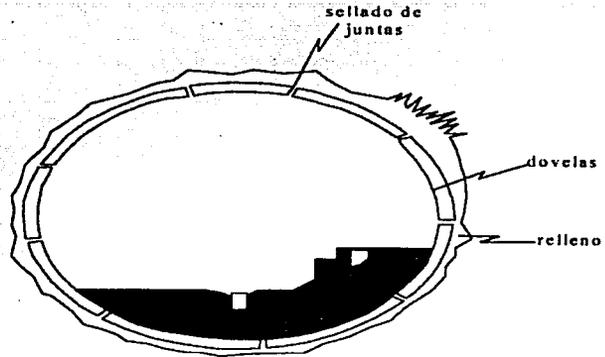
- 1) sellado de juntas entre dovelas o,
- 2) un sistema de impermeabilización de superficies de dicha dovelas (en el caso de dovelas reticulares o metálicas, es necesario primero igualar la superficie como soporte del sistema de impermeabilización).

Cuando la unión entre dovelas y la impermeabilización no sea suficiente para soportar la presión del agua, será necesario construir un revestimiento interior con concreto armado.

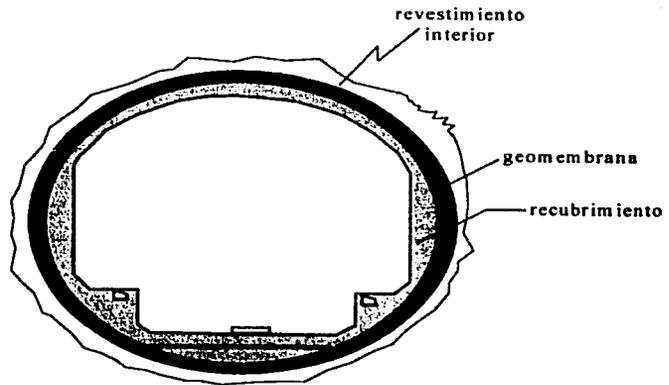
Es importante añadir que una impermeabilización interior efectuada sobre un soporte de sostenimiento, no puede protegerlo de las acciones perjudiciales del agua y del terreno, al contrario de lo que ocurre en otros casos como impermeabilizaciones exteriores, donde la impermeabilización está unida al terreno por la presión que éste ejerce.

Para impermeabilizaciones exteriores es importante el papel que juega la interacción entre el terreno, el revestimiento y el procedimiento de construcción.

Definidos los procedimientos de impermeabilización, según la influencia del terreno, es importante resaltar la determinación de consecuencias por la elección del material idóneo de impermeabilización. Con revestimientos rígidos sólo se necesita un material de flexibilidad muy pequeña. Sin embargo, en revestimientos flexibles (p.e. dovelas), sólo se pueden utilizar materiales con un alto grado de elasticidad.



**Impermeabilización contra filtraciones**



**Impermeabilización contra filtraciones a presión**

**Fig. 3 Roca triturada o terreno inestable**

## **1.2 Influencia del agua**

Es obvio afirmar que una impermeabilización esta influenciada en alto grado por el tipo y calidad del agua del terreno. El agua que penetra en el suelo tiende a profundizarse progresivamente siguiendo la trayectoria de los poros y fisuras hasta que encuentra un estrato impermeable sobre el cual corre o se estanca, según sea la posición de dicho estrato; el agua se equilibra formando el manto freático. Cuando este manto no tiene su superficie superior limitada por un estrato impermeable, sino que este nivel superior es libre, toma el nombre de nivel freático.

Se detallara en el capitulo 2.

Pero no todo el agua que se infiltra se reúne en este manto; parte es retenida por encima del nivel freático y forma una sutil membrana que cierra cada uno de los poros del terreno, formando la zona capilar, por debajo de la cual existe una zona de saturación y por encima se encuentra sucesivamente una zona de aireación y una zona de evaporación.

En general, se puede distinguir entre túneles situados en zonas de aguas subterráneas, en zonas de saturación o en la zona capilar. La agresividad del agua contra el revestimiento depende del tipo de agua subterránea y puede manifestarse de dos maneras: agua capilar o agua freática.

Según esta división existe una clasificación de las medidas a tomar en cuanto a las técnicas de impermeabilización, así:

- Impermeabilización en zona capilar
- Impermeabilización en zonas de saturación
- Impermeabilización en aguas subterráneas

Las diferencias se basan sobre todo en el modo y tipo de impermeabilización, de acuerdo a los puntos siguientes.

### **1. Impermeabilización en zona capilar**

Debe ser efectuada en toda construcción subterránea, ya que deben cerrar los poros para evitar que la humedad llegue al interior según la leyes de la capilaridad.

### **2. Impermeabilización en zonas de saturación**

Debe de ser una impermeabilización flexible y resistente a la presión del agua. Se debe desviar el agua para que no se forme presión; generalmente esta agua desviada se recoge en un dren longitudinal del túnel.

### **3. Impermeabilización en aguas subterráneas**

Debe de ser una impermeabilización flexible, cerrada y resistente a la presión del agua subterránea. Durante la construcción es necesario abatir el nivel freático o estabilizarlo mediante aire comprimido. Es indispensable, para la elección del material de impermeabilización, el conocimiento de la composición química y condiciones físicas de agua y del terreno, ya que ciertas sustancias disueltas en ambos pueden atacar la impermeabilización o el revestimiento. De acuerdo con la Norma DIN 4030 los límites perjudiciales se relacionan en las Tablas 1 a 3 que a continuación se mencionan:

Tabla 1. Límites perjudiciales de las sustancias en aguas subterráneas (DIN 4030)

Sustancia	LÍMITES PERJUDICIALES	
	Concreto (mg/l)	Acero (mg/l)
Sulfatos	> 200	> 300
Nitratos	> 500	> 50
Anhidrido Carbónico	Con cantidades mínimas	
Acido Sulfhídrico	>1	-
Cloros	-	> 100
Acidos y Grasas	-	> 5 a 10
Oxígeno	-	>4
Magnesio	> 100	-
Fenoles	Muy perjudiciales	

Tabla 2. Límites perjudiciales para la valoración de la agresividad de las aguas (DIN 4030)

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	300-1500	>1500
Amonios	15-30	30-60	>60
Sulfatos	200-600	600-3000	>3000
Dureza Agua en grados alemanes	5-3	<3	-

Tabla 3. Límites perjudiciales para la valoración de la agresividad de los suelos (DIN 4030)

Factores perjudiciales	GRADO DE AGRESIVIDAD	
	Débil	Fuerte
Grado de acidez. Baumann-Gully	> 20	-
Sulfatos en mg./l. De suelo seco	2000-5000	> 5000

### 1.3 Influencia del uso del túnel

Las exigencias que se requieren en cuanto al grado de impermeabilización de un túnel dependen esencialmente del tipo de uso del mismo. Es aconsejable no tener una exigencia innecesariamente alta que no esté en relación con la función del uso del túnel porque ello tendrá importantes consecuencias, tanto para las especificaciones como para el costo de la obra.

Tabla 4. Definición de impermeabilización para el diseño de túneles y galerías.

Grado de impermeabilidad	Características de humedad	Uso y necesidades de la Obra	Filtraciones de agua, l/m en 24 horas
1	No permitida la difusión de vapor desde el exterior	Lugares Secos Locales Refrigerados Presencia continua de personas Almacenes sensibles a la humedad (papel, elementos....)	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 (alta velocidad)	<0.01
5	Filtraciones Capilares	Estacionamientos 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

## **1.4 Requisitos para una impermeabilización**

Los requisitos básicos para diseñar una impermeabilización son:

- a) Recubrimiento total de las zonas por proteger
- b) Debe estar entre dos partes firmes de la construcción
- c) Debe seguir las deformaciones del soporte
- d) Quedar bien fija al soporte para evitar desplazamientos antes de construir el revestimiento estructural
- e) Resistir a las aguas agresivas, variaciones de temperatura y presión del agua
- f) Resistencia a microorganismos
- g) El soporte estará exento de humedades puntuales y permitirá las difusas

### **1. Soporte para una impermeabilización**

Para una buena impermeabilización, además de los requisitos anteriormente citados, se necesita preparar un soporte adecuado donde vaya fijada.

### **2. Fases de impermeabilización**

Según las influencias, requisitos y soportes, los trabajos de impermeabilización constarán de varias fases:

- Tratamientos preliminares
- Preparación de soporte
- Impermeabilización con geomembranas de PVC
- Acabados del sistema de impermeabilización

Según las filtraciones existentes y el tipo de revestimiento previsto para el túnel, la impermeabilización puede comprender desde una hasta cuatro de las fases expresadas, sucesivamente y en el orden indicado.

### *Tratamientos preliminares*

Son los trabajos provisionales de taponamiento y conducción de aguas que permiten la ejecución posterior, en su caso, de otras fases de impermeabilización.

Fundamentalmente consisten en el taponamiento y drenaje de filtraciones localizadas. El tratamiento se completa con la formación sistemática o discontinua de drenes superficiales permanentes, en forma de espina de pescado medias cañas, tuberías, etc., para la captación de agua y su conducción a las cunetas.

### *Preparación del soporte*

Son los trabajos posteriores a los tratamientos preliminares mediante la aplicación de concreto lanzado. La preparación del soporte puede ser protección o de regularización.

Protección: es la aplicación de un concreto lanzado armado, de un espesor adecuado en toda la superficie por tratar, así se consigue una protección de los tratamientos preliminares elegidos, ya que de no efectuarlo, y debido a los acelerantes de fraguado empleados, los drenes, taponamientos etc., quedarían fisurados.

Regularización: la finalidad de este método es servir de soporte a un sistema de impermeabilización y su soporte suele oscilar entre 5 cm. y 25 cm. También puede cumplir la finalidad de sostener provisionalmente la excavación del túnel o galería.

### *Impermeabilización con geomembranas formadas por láminas sintéticas prefabricadas*

Es la instalación de láminas sintéticas prefabricadas que garanticen la absoluta estanqueidad de la galería o túnel. Las láminas se aplican sobre todo el perímetro o parte del mismo.

La elección del espesor y tipo de material dependerá del terreno, el caudal de agua, tipo de soporte, tipo de concreto estructural y el tipo de protección.

*Acabados del sistema de impermeabilización*

**Son los trabajos posteriores a la instalación de las láminas sintéticas impermeabilizantes que conducen posteriormente a la estanqueidad de la construcción.**

## **2. HIDROGEOLOGIA Y AGUA SUBTERRENEA**

### **2.1 Niveles piezométricos**

El nivel piezométrico de una cierta masa de suelo es el lugar geométrico de las elevaciones que alcanzaría el agua en un conjunto de piezómetros instalados en dicha masa. Si  $h$  es la elevación piezométrica en un determinado punto de la masa, la presión de poro del agua en ese punto valdrá:

$$u = h \gamma_w$$

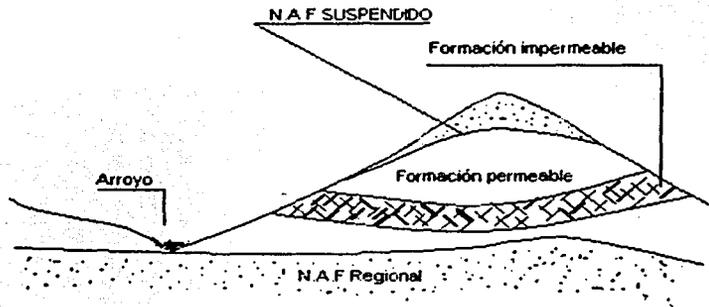
Cada época de lluvias suele traer consigo una elevación  $h$  y, correspondientemente, un descenso del factor de seguridad de la ladera o el talud; estos cambios periódicos pueden no tener ninguna influencia importante en las condiciones de estabilidad consideradas dentro del marco de la vida útil de la estructura, a no ser que el proceso continuado de aumento y disminución de los esfuerzos actuantes y el opuesto a la resistencia produzcan un descenso gradual e irreversible de la resistencia o que un aumento excepcional del contenido de agua haga disminuir también excepcionalmente el parámetro cohesión.

### **2.2 Perfiles geológicos**

Es claro que los problemas ligados a uno u otro tipo de valles serán bien distintos cuando haya de excavar cortos en las laderas, por lo que convendrá siempre definir el tipo geológico del valle de que se trata para normar adecuadamente el criterio de proyecto y construcción.

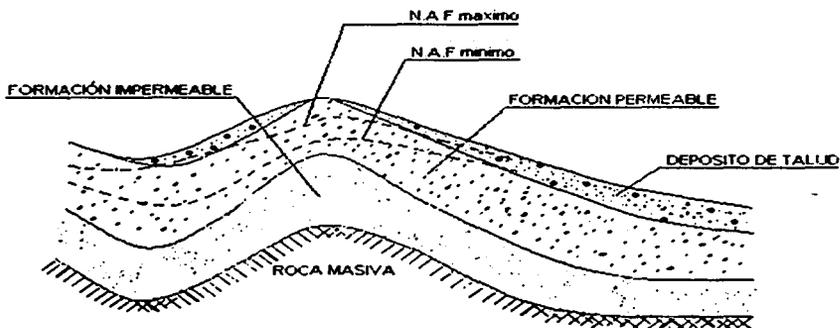
La figura 4 muestra un perfil geológico típico de los que propician la formación de un nivel freático suspendido, que puede ser causa de presencia de grandes cantidades de agua en laderas en que no se sospecharía tal, de no tener en cuenta esta condición. Basta decir que una

exploración geológica oportuna que permita anticipar esta situación puede evitar muchos problemas durante la etapa de construcción o de conservación.

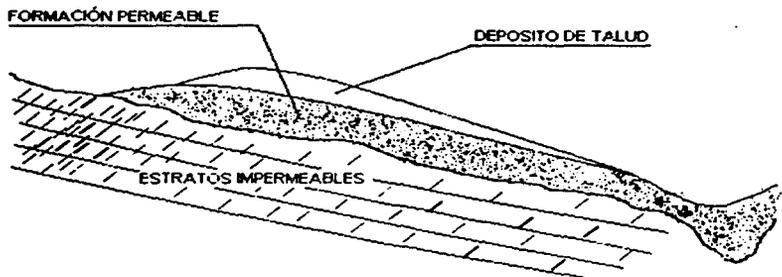


**Fig. 4. Perfil geológico que propicia la formación de un N.A.F. suspendido**

La Fig. 5 muestra algunos casos muy típicos y esquematizados de perfiles geológicos que propician la aparición de agua en laderas naturales. De ninguna manera se pretende agotar los perfiles, que son de variedad infinita, sino simplemente ilustrar el tipo de secuencia geológica que es común encontrar en conexión.



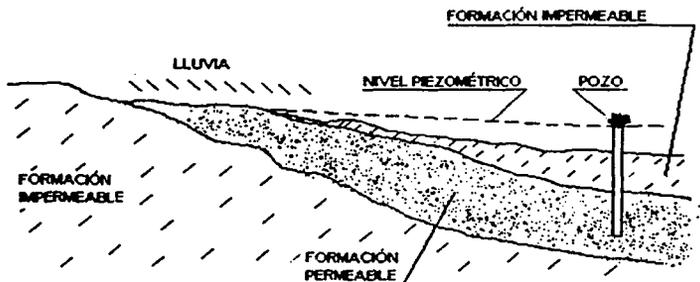
La formación impermeable propicia el almacenamiento de agua en las formaciones permeables y en los depósitos de talud.



Formación susceptible de almacenar agua por estar subyacida por estratos impermeables.

Fig. 5 Perfiles geológicos

La Fig. 6 muestra un perfil típico que conduce a la aparición de artesianismo. Un pozo perforado en tal acuífero sería un pozo artesiano en el que el agua brotaría por sí misma.



**Fig. 6 Aparición de un pozo artesiano**

### 2.3 Agua libre

El agua que rellena los poros de una capa freática bajo el nivel hidrostático no es estacionaria. Al igual que las masas de aire de distintas alturas y densidad, se desplaza lentamente bajo la acción de la gravedad. La tendencia es, por una parte, a rebajar los puntos elevados del nivel hidrostático, y por otra, a elevar los bajos o a expulsar al exterior al agua de estos. Cuando las lluvias no reponen el contenido líquido de la capa freática, el nivel hidrostático se suaviza poco a poco hasta tornarse por último una superficie horizontal y lisa.

La velocidad y dirección del movimiento del agua entre dos puntos dados del nivel hidrostático están determinados por la permeabilidad de las rocas y por el gradiente hidráulico (razón que existe entre la diferencia de la altitud o desnivel  $h$ , y la distancia horizontal entre ambos puntos). Los gradientes de las aguas subterráneas son bajos.

Con excepción de las grandes cavernas y fisuras, el agua del subsuelo escurre en forma casi exclusivamente laminar. Hagen (1839) y Poiseuille (1840), mostraron que la velocidad del escurrimiento en tubos capilares es proporcional a la pendiente  $S$  del gradiente de energía. Darcy (1856), confirmó la aplicabilidad de este principio al escurrimiento en áreas uniformes y la siguiente ecuación

$$V=KS$$

es comúnmente llamada Ley de Darcy. La velocidad  $V$  es una velocidad aparente , esto es,

$$V=Q/A$$

en la cual  $Q$  es el ritmo o gasto del escurrimiento que pasa a través de una sección transversal de área  $A$  de un acuífero. El término coeficiente  $K$  en la ley de Darcy se refiere a la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad. La pendiente  $S$  es adimensional, como las cargas de velocidad son despreciables en el escurrimiento del agua del subsuelo,  $S$  también es la pendiente del nivel freático o de la superficie piezométrica.

La velocidad real varía de punto a punto a través del medio. En promedio, la velocidad real con la cual el agua se mueve a través de un acuífero, esta dada por la siguiente expresión

$$V_{real} = Q/A_{real} = Q/pA = V/p$$

en donde  $p$  es la porosidad del medio expresada en forma decimal. La literal  $V_{med}$  representa, en promedio, la velocidad con la cual una sustancia trazadora se movería a través de un medio permeable.

#### **2.4 Mantos colgados.**

En ciertas condiciones, una masa de agua en material poroso o permeable, puede quedar como colgada, o suspendida, dentro de la zona de aireación, por encima del nivel de agua principal. Estos núcleos de agua generalmente se encuentran por encima de una masa de roca impermeable de forma irregular, sobre capas de arcilla formando una cuenca o en masas lenticulares de arena y grava que recogen y sostienen el agua que penetra. Estos niveles de agua colgada se presentan generalmente en regiones áridas y pueden constituir importantes fuentes de agua.

#### **2.5 Acuíferos**

Las formaciones que contienen y transmiten agua del subsuelo, se conoce con el nombre de acuífero. La cantidad o volumen de agua del subsuelo que puede obtenerse en una cierta área, depende del carácter del acuífero subyacente y de la cantidad y frecuencia de la recarga. La capacidad que tiene una formación para contener agua se mide por la porosidad o relación entre el volumen total de la formación. Los poros varían en tamaño, desde las grandes aberturas

submicroscópicas en las arcillas y esquistos, hasta las grandes cavidades o cavernas y galerías de las formaciones calcáreas y de lava.

La siguiente tabla, indica la variación de la porosidad para los materiales más comunes de las formaciones del subsuelo.

POROSIDAD MEDIA APROXIMADA, RENDIMIENTO ESPECIFICO Y PERMEABILIDAD DE MATERIALES			
Material	porosidad	rendimiento	permeabilidad
	por ciento	especifico por ciento	gpd/pie <sup>2</sup>
Arcilla	45	3	1
Arena	35	25	800
Grava	25	22	15000
Grava y arena	20	16	2000
Areniscas	15	8	700
Calizas, pizarras	5	2	1
Cuarcita, granito	1	0.5	0.1

Una alta porosidad no indica que un acuífero rendirá o producirá grandes volúmenes de agua a un pozo. La cantidad de agua que puede obtenerse del acuífero, únicamente es la que escurrirá o fluirá por gravedad.

Los acuíferos más importantes económicamente son los depósitos de arenas y de grava que tienen un rendimiento específico más bien alto.

El rendimiento específico, es el volumen de agua que se drenará libremente del acuífero.

## **2.6 Recarga de acuíferos**

La cantidad de agua que penetra a la tierra queda determinada por varios factores:

1. Cantidad y tipo de precipitación.
2. Ritmo de precipitación. Cuando más rápidamente, menos agua penetra, pues se satura la superficie del terreno.
3. Declive superficial. La infiltración es mayor en terrenos más planos, a los que corresponden velocidades de escurrimiento superficiales menores.
4. La porosidad de los suelos y las rocas.
5. La permeabilidad de los suelos y las rocas. Una formación muy porosa no es necesariamente muy permeable.
6. La estructuración de suelos y rocas, en lo que se refiere a fracturación, estratigrafía y a la secuencia de los estratos permeables y los impermeables.
7. Cantidad y tipo de vegetación.
8. Humedad atmosférica. Si la humedad es baja, gran parte del agua caída se evapora antes de penetrar en el terreno.

## **2.7 Ríos y aguas subterráneas**

El agua que se encuentra en el subsuelo tiene usualmente cualquiera de 3 orígenes. En primer lugar, puede ser meteórica, caída de la atmósfera en forma de lluvia o nieve. En segundo lugar, puede ser agua de formación, que es la que ocupa los espacios entre sedimentos que

quedaron en el fondo de océanos y lagos; esta agua es generalmente salada, pues los sedimentos formados en aguas marinas son los más abundantes entre los que hoy pueden encontrarse. Finalmente, se tiene el agua magmática o de la condensación de vapores derivados de magmas profundos.

El agua subterránea puede almacenarse de varias maneras. La mayor parte se encuentra en los vacíos entre las partículas de suelo o en las cavidades, fracturas y fallas de las rocas; una parte menor puede formar ríos y lagos subterráneos.

### **3. CAMPOS DE APLICACIÓN, TIPOS Y METODOS DE IMPERMEABILIZACIÓN**

#### **3.1 Objeto de aplicación**

Este inciso tiene como objeto definir las exigencias para la construcción y conservación de los sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con geomembranas, abarcando los materiales, equipos, características mecánicas, ensayos previos, operaciones preliminares, técnicas de aplicación y control de calidad.

Las técnicas y procedimientos descritos están basados en años de experiencia, sin embargo, los procedimientos de aplicación pueden variar de un lugar a otro, siendo necesario realizar ajustes de ellos para ceñirse a las necesidades reales de cada obra.

Los campos de aplicación comprenden los túneles carreteros y ferroviarios, así como las galerías hidráulicas, cavernas y en general las obras subterráneas.

##### **3.1.1 Túneles con revestimiento de concreto lanzado**

La mayoría de las aplicaciones de geotextiles y geomembranas en la construcción de túneles comprenden la impermeabilización ejecutada según los métodos subterráneos de trabajo usuales. En este caso la impermeabilización la integran un geotextil y una geomembrana, que se colocan en la fase final de los trabajos, es decir cuando la excavación y el apuntalamiento han sido realizados, incluso las operaciones preliminares de recolección de aguas (drenajes) y regularización, y siempre antes del revestimiento estructural.

### **3.1.2 Túneles revestidos por dovelas**

Un campo importante de la impermeabilización de túneles son los construidos sin revestimiento con concreto lanzado, pero sí con dovelas, es decir elementos prefabricados en concreto reforzado o acero.

### **3.1.3 Túneles y galerías excavados a cielo abierto**

La impermeabilización de túneles ejecutados a cielo abierto (open cut) constituye una importante aplicación de geotextiles y geomembranas. Este tipo de obras se impermeabilizan contra las filtraciones de agua mediante geomembranas. Por encima, en lugar de una capa filtrante de agregados pétreos, se coloca un geodren o un geotextil, con la doble finalidad de proteger mecánicamente la geomembrana y evacuar agua de filtración a lo largo de su plano, incluso bajo fuertes presiones del terreno de relleno.

### **3.1.4 Otro tipo de construcciones y reparaciones**

Las aplicaciones de geotextiles y geomembranas, semejantes a las aplicadas en los túneles a cielo abierto, se presentan en multitud de obras de edificación, (ejemplo: estacionamientos subterráneos). Estas impermeabilizaciones exigen otras características adicionales en el campo de la física y las técnicas de construcción, que no se contemplan en este trabajo.

En los casos donde el gálibo lo permita o la rasante pueda ser rebajada, los túneles existentes pueden impermeabilizarse de manera análoga a los de nueva construcción.

### **3.1.5 Aplicaciones especiales**

Las galerías de presión de desagüe hidráulicas se impermeabilizan de la misma manera: contra las aguas de filtración en roca, pero no contra la presión hidrostática exterior, y sí contra una presión interior y sobre todo en los casos de pérdida de agua de explotación.

En los casos de pisos raramente interviene la impermeabilización. El sistema no sometido a la presión de agua, se transforma en un sistema con carga hidrostática.

Otra aplicación especial se refiere a los pozos de ventilación, frecuente en los túneles carreteros, así como a los nichos, donde las deformaciones posibles son particularmente grandes.

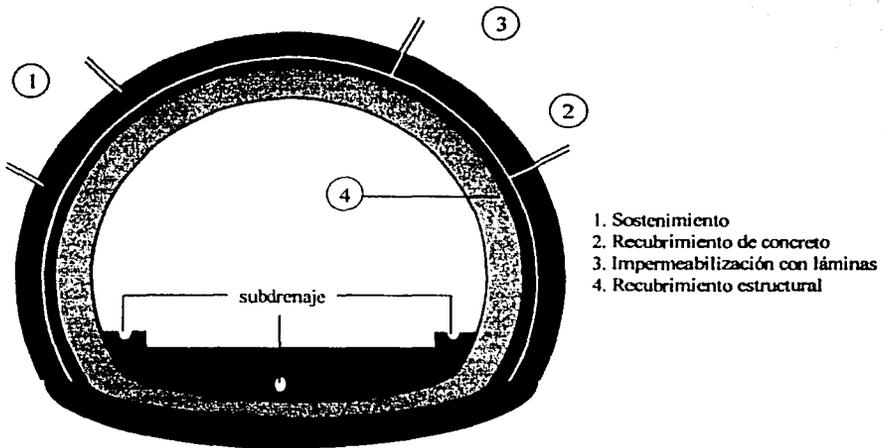


Fig. 7 Sistema de la impermeabilización

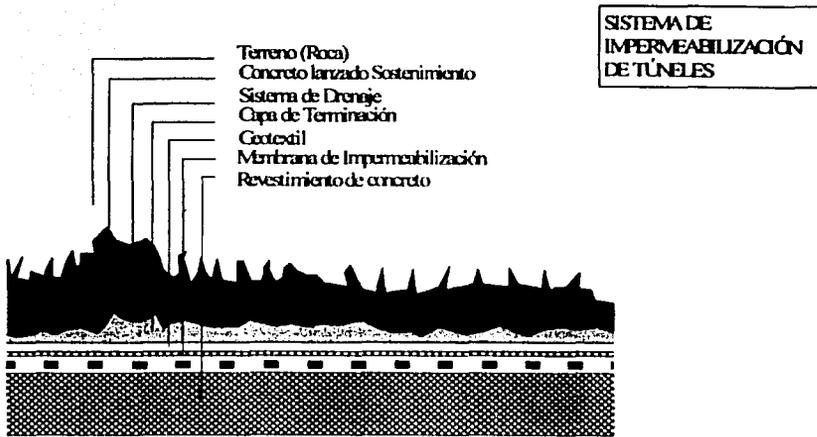


Fig. 8 Sistema de impermeabilización

### **3.2 Consideraciones generales**

Es muy importante, al diseñar el tipo de impermeabilización de túneles y galerías, asegurar la estanqueidad y buen funcionamiento en el tiempo, puesto que:

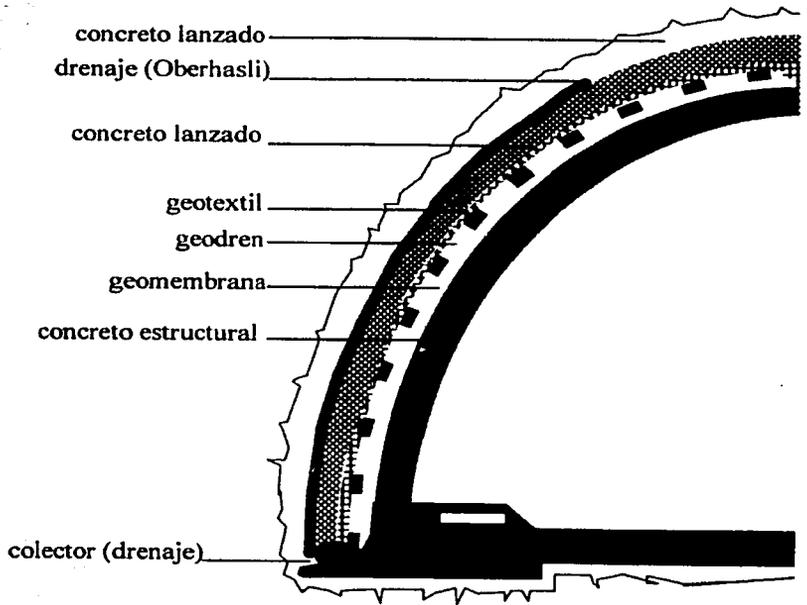
- La penetración de agua por las fisuras de la roca amenaza el revestimiento de concreto o mampostería, tanto en las boquillas como en los túneles cortos.
- El agua de filtración conduce a la formación de charcos en la superficie de rodamiento, con el consiguiente peligro para la circulación de vehículos.
- El agua de filtración da lugar a eflorescencias y concreciones calcáreas sobre la superficie interior del revestimiento, con la consiguiente lixiviación del concreto o la destrucción de la mampostería.
- La impermeabilización asegura la protección del revestimiento de concreto, contra la agresividad del agua de filtración, por ejemplo sulfatos.

Los túneles insuficientemente impermeabilizados necesitan una importante inversión en mantenimiento, debido a la lixiviación y los desperfectos de las paredes de concreto del túnel.

El diseño de la impermeabilización de un túnel debe de tener en cuenta los drenajes y su protección.

El geotextil tiene la misión de proteger la impermeabilización, en su fase de colocación, pero también posteriormente durante su vida útil, tanto en los posibles daños internos y externos; además tiene la misión de hacer circular el agua de filtración hacia el exterior de la impermeabilización, sin que se produzca presión hidrostática.

El drenaje asegura la evacuación sin presión de las aguas de filtración a través de los drenes longitudinales. Dicho dren deberá tener el diámetro suficiente ( $\geq 20$  cm) y sus aberturas de entrada proporcionales al agua de filtración esperada.



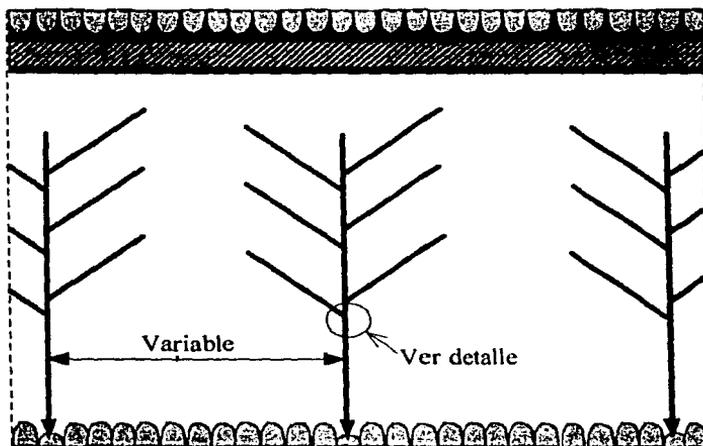
**Fig. 9** Sección tipo de un sistema de impermeabilización

### **3.3 Requisitos de impermeabilización de un túnel**

La impermeabilización de un túnel comprende a la membrana como elemento impermeable y el geotextil como capa de protección, tanto anterior como posterior, tanto para los daños mecánicos como para la evacuación de las aguas de filtración.

Cuando sea necesario, dependiendo de los caudales de filtración y previamente, se efectuará una impermeabilización primaria a base de drenes en forma de espina de pescado (sistema Oberhasli) para recoger y conducir las grandes aportaciones de agua a los drenes longitudinales. Este sistema se efectuará sistemáticamente en zonas con flujo generalizado. En zonas con flujo localizado su aplicación será puntual

Los drenes tienen carácter de provisionales y su misión es, además de recoger el agua, presentar soportes adecuados para la impermeabilización definitiva posterior. Se aceptarán superficies húmedas difusas, pero se tratará de eliminar los chorros de agua y en general aportaciones continuas. (Ver figura N° 10).



ESQUEMA

DRENAJE OBERHASLI

*NOTA: La distancia y el diámetro de los drenes dependerá de la cantidad de agua por evacuar*

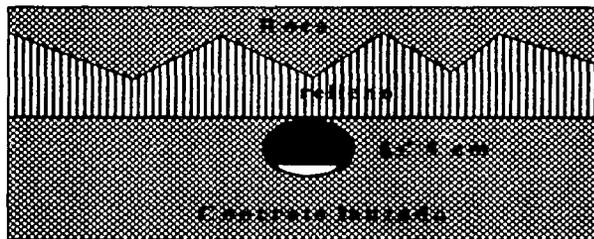
Fig. 10 Esquema de disposición de drenes

Los sistemas de impermeabilización primaria más usuales son:

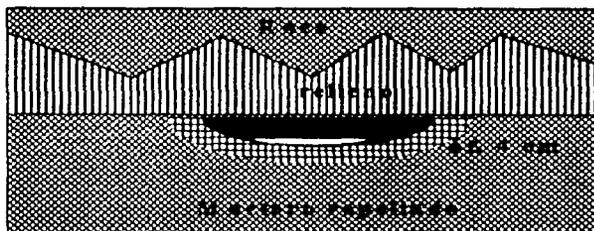
- Medias cañas de material plástico, adosadas al contorno o perímetro, en forma de espinas de pescado protegidas en su colocación mediante concreto con acelerante ultra rápido, capaz de fraguar en presencia de agua y a su vez proteger la media caña.
- Dren autoformado mediante concreto y acelerante ultrarrápido, en forma de espina de pescado, capaz de fraguar y sellar en presencia de agua.
- Dren autoformado mediante concreto con acelerante ultrarrápido sobre mangueras para formación del dren.

La configuración de los drenes y su distribución se reflejan en las figuras N° 10 y 11.

Toda impermeabilización primaria (drenaje) debe de estar protegida con mortero o concreto, debido a la provisionalidad y a la utilización de acelerantes de fraguado, tanto para evitar su fisuración como para conseguir un soporte adecuado para fijar la impermeabilización con geomembrana.

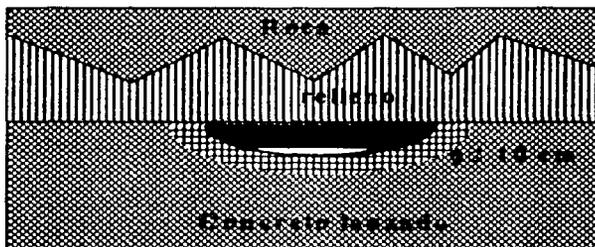


**Tubería de HDPE perforada  
Drenaje con tubería**

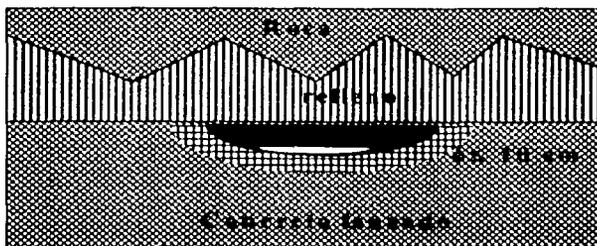


**Media caña; manual  
Drenaje manual**

**Fig. 11a. Detalle de los tipos de drenes**



**Drenaje media caña**



**Drenaje mecánico**

**Fig. 11b. Detalle de los tipos de drenes**

### **3.4 Requisitos del soporte**

- No existirán irregularidades con un radio inferior a 20 cm.
- La profundidad de una irregularidad no deberá ser superior a 15 cm respecto a la superficie de terminación.
- En una gran irregularidad la relación profundidad / extensión debe ser igual o inferior a 1/5.
- Los elementos de anclaje que sobresalgan del soporte se cortarán en su parte no funcional, tratándose las irregularidades según lo expuesto en los puntos anteriores (Fig. 12).

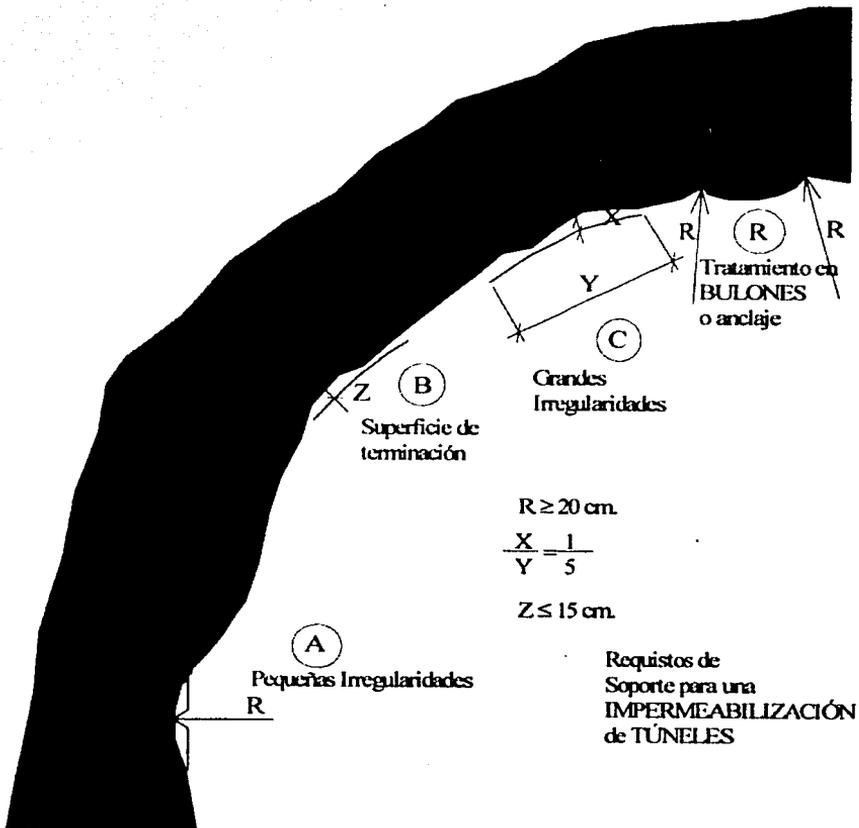


Fig. 12 Requisitos de soporte

### **3.5 Requisitos de la impermeabilización principal**

- La impermeabilización debe proteger y envolver la superficie de la obra a tratar, de manera durable contra el agua de filtración.
- La impermeabilización se debe adaptar sin problemas a las irregularidades del soporte, preparado según los requisitos anteriores (normalmente de concreto lanzado), y ser capaz de deformarse para puentear las desigualdades. La resistencia y alargamiento de la impermeabilización deberán ser suficientes para no ser perforada.
- La membrana de impermeabilización deberá ser suficientemente resistente para continuar siendo estanca después de las sollicitaciones mecánicas resultantes del proceso de revestimiento posterior.
- El geotextil debe garantizar la evacuación del agua de filtración, sin generar presiones, de manera durable hacia los drenes longitudinales, sin riesgo de incrustaciones.
- La impermeabilización debe ser construida de manera sencilla, racional y económica, sin interrumpir el desarrollo de los trabajos posteriores, e independientemente que el soporte esté húmedo.
- La impermeabilización y el drenaje deberán resistir las cargas de la cimbra y andamios, así como del rocoso sobre la bóveda interior definitiva. De hecho, el empleo de concreto lanzado y las velocidades de ascensión elevadas que se presentan en la construcción de túneles, necesitan presiones de hasta  $200 \text{ kN/m}^2$  ( $20 \text{ Ton/m}^2$ )
- La impermeabilización debe resistir los movimientos de contracción y fluencia, así como las deformaciones por temperatura, y las vibraciones, sin que el efecto impermeable disminuya.

- Los componentes principales de la impermeabilización (geotextil, geomembrana) deben ser imputrescibles, resistir al envejecimiento, ser químicamente inalterables y duraderos al contacto con el concreto y aguas de filtración así como otros materiales del soporte y revestimiento.

- Las láminas con las que se confecciona la geomembrana impermeabilizante, deben ser soldables y sus uniones deberán poder ser verificadas mediante un control de soldadura.

- Se procura que los materiales utilizados en la impermeabilización sean auto extingüibles para evitar riesgos de incendio durante la fase de construcción.

- Se evitará la realización de trabajos próximos a la impermeabilización que puedan producir chispas, llamas o calor radiante.

### **3.6 Efecto del drenaje en la capa de protección y transmisividad**

En los túneles el geotextil desempeña las siguientes funciones:

- protección: el geotextil evita la perforación de la geomembrana en las aristas y puntos salientes y facilita el deslizamiento de la misma cuando se le solicita, por posibles movimientos del soporte a la protección.

Drenaje: el geotextil evacua el agua en un plano, para evitar la formación de subpresión y el aire hacia el drenaje longitudinal, como consecuencia del revestimiento.

El geotextil desempeña fundamentalmente la función de capa de protección. Como capa de drenaje es variable según las condiciones del terreno y la eficacia de la impermeabilización primaria.

Para la función de protección destinadas a impermeabilizar túneles excavados o a cielo abierto con gran cantidad de agua de filtración y en particular con riesgo de incrustaciones, es

recomendable una modificación a favor de geotextiles de gran transmisividad o de geocompuestos drenantes, del tipo tejido.

La transmisividad merece una consideración especial; la misma no debe de estar afectada por una compresión lateral, es decir que deben ser capaces de evacuar el caudal esperado y diseñado bajo una presión de hasta 200 kN/cm<sup>2</sup>, permaneciendo ésta propiedad a lo largo del tiempo. Ningún efecto de corte del caudal debe provenir del geotextil. Conviene eventualmente efectuar los ensayos complementarios para los casos particulares que determinen la compresión y su caudal de agua.

Los geotextiles de poros abiertos (tejido) son juzgados particular y favorablemente ya que evitan el riesgo de las incrustaciones que se producen donde la solubilidad de la cal en el agua disminuye, cuando:

- La temperatura del agua de filtración se modifica en los taponamientos del drenaje.
- El agua de filtración se coloca bajo presión y se detiene; por lo que o entra en contacto con el aire, en el sistema de drenaje o, la velocidad disminuye considerablemente.

Cuando ambos casos se producen simultáneamente existe un gran riesgo de incrustaciones, por lo que se aconseja verificar en cada caso particular las condiciones de riesgo en caso de obturación.

### **3.7 Consideraciones específicas**

#### **3.7.1 Túneles excavados convencionalmente con sostenimiento de concreto lanzado.**

En los casos de la construcción tradicional de túneles con avance por medio de explosivos y apuntalamiento con concreto lanzado, la geomembrana de impermeabilización estará

protegida contra daños mecánicos por capas de igualación y drenaje a base de geotextil.

Por analogía las indicaciones que a continuación se detallan son aplicables a las construcciones con doble revestimiento, así como para túneles excavados con máquina tuneleadora.

La fijación de la geomembrana en la bóveda del túnel implica un soporte autoportante y cerrado que mantenga suficientemente su forma. Como soporte se la impermeabilización se requiere una capa de concreto lanzado de un espesor mínimo de 4 cm, siendo 7 cm el más usual, formando una capa de igualación capaz de sostener los elementos de fijación.

La colocación del concreto lanzado se regirá por las especificaciones empleadas en el recubrimiento, tanto para regulación de soporte como para protección de la impermeabilización primaria.

La edad de la impermeabilización intermedia (concreto lanzado) para recibir, colocar y fijar la impermeabilización principal será de al menos 28 días.

En los casos de túneles excavados con tuneleadoras, se puede fijar la impermeabilización a la propia roca, pero los ángulos y aristas del perfil excavado deben ser atenuados mediante una capa de regularización para evitar los elementos salientes de los anclajes, cerchas, armaduras, etc., Su geometría y terminación estará de acuerdo con los requisitos de soporte para la impermeabilización de túneles (inciso 1.4).

Las captaciones de filtraciones de agua importantes se efectuarán mediante una impermeabilización primaria a base de drenes (sistema Oberhasli), según se describe en "Requisitos de la impermeabilización" (inciso 1.4). El geotextil debe asegurar el efecto de protección y drenaje (transmisividad), exigido bajo presión de ensaye de 200 kN/m<sup>2</sup>.

En la operación de revestimiento, posterior a la colocación de la impermeabilización, el aire se expulsa hacia la bóveda, siendo el efecto no deseado de formación de balón, produciéndose bolsas en los casos donde la permeabilidad al aire del geotextil no es suficiente para dejar escapar el mismo por los drenes.

En función de FS para drenaje se considera que, como mínimo, debe ser el valor exigido también para una presión lateral de  $200 \text{ kN/m}^2$  (2 bar). Sin drenaje, se puede crear una presión hidrostática detrás de la membrana y cargar considerablemente la bóveda interiormente. Esta presión hidrostática podrá tener un valor elevado según las fisuras del terreno existentes y el espesor de roca subyacente. El drenaje debe garantizar la evacuación, si fuera posible, sin presión en el exterior de la membrana, y del agua de filtración en los drenes longitudinales.

Las filtraciones importantes o difusas deben recogerse en superficie mediante captaciones por drenes colectores según una impermeabilización primaria, y dirigidas hacia los drenes longitudinales como evacuación de las mismas. Efectuada esta etapa, el terreno excavado estará recubierto por una capa de concreto lanzado de una red de drenajes superficiales, capaz de recibir la impermeabilización.

Normalmente, el caudal posterior a la primera impermeabilización ejecutada no es muy importante, sin embargo, unas fuertes precipitaciones de agua darán como consecuencia la necesidad del drenaje, que definirá la transmisividad requerida al geotextil.

El efecto de drenaje a largo plazo implica una capacidad drenante permanente (apertura de entrada, diámetro, pendiente etc.) por lo que una planificación y una buena ejecución de la transición del geotextil a los drenes longitudinales, evitarán las obturaciones e incrustaciones.

La reducción de la presión del agua, su temperatura, el aire o la evaporación, tienen influencia en su solubilidad, produciéndose depósitos calcáreos. Esta ley física fundamental se

manifiesta de manera acentuada a la salida de las aguas de filtración en un estado exento de presiones en los drenes, por lo que la formación de cal libre en forma de partículas blancas, llevan a los drenes y conducciones a la obturación completa. Esta formación de incrustaciones se produce en particular en los terrenos calcáreos, cuando los caudales de agua son débiles o las velocidades de desagüe son lentas.

Por esta razón se permitirán huecos tan grandes como sea posible entre el terreno o soporte y el geotextil, para no favorecer la creación de incrustaciones. El acceso a los conductos de drenaje figura en los proyectos de manera particular, con el fin de permitir los controles posteriores de mantenimiento del túnel. El geotextil debe ser resistente al:

- contacto con los morteros y concretos
- al agua de filtración (por ejemplo sulfatos)
- al  $\text{CaH}(\text{OH}_2)$  = Hidróxido de Calcio
- pH comprendidos entre 2 - 13
- pérdida de masa por el proceso de hidrólisis

La inalterabilidad química - biológica de los geotextiles debe ser alta, utilizando para ello fibras puramente sintéticas, no recicladas, imputrescibles y sin contener fibras de celulosa que son destruidas por procesos biológicos. La durabilidad mecánica de la impermeabilización se exigirá contra las sollicitaciones de:

- fase de construcción: durante la construcción y resistir la presión del concreto estructural de revestimiento.
- a largo plazo: bajo las deformaciones del revestimiento estructural del túnel, debido a los cambios de temperatura y filtraciones de agua.

### **3.7.2 Túneles con revestimiento a base de dovelas**

En este método hay pocas diferencias con respecto al anterior, salvo en las captaciones de agua mediante drenes, que en muchos casos serán por inyección. En lo que respecta a los geotextiles hay que tener en cuenta:

#### **Función protección:**

El geotextil no juega un papel de protección salvo en la fase de construcción, para evitar que se dañe la gomembrana.

Las dovelas o segmentos no presentarán desigualdades que sobrepasen 10 mm. Si se presentasen serán igualadas o se incorporará un geotextil que proporcione la protección de esos segmentos.

#### **Función drenante:**

La evacuación de las aguas de filtración se realiza entre dovela y terreno o por las juntas de las dovelas.

### **3.7.3 Impermeabilización en contra bóvedas**

Las obras subterráneas construidas bajo nivel freático, se diseñan con impermeabilización en la contrabóveda. Dicha impermeabilización tiene como misión, sobre todo en suelos plásticos, evitar que el agua entre en contacto con el suelo, para limitar su expansión.

Para la colocación de geotextiles en contrabóvedas y en contacto con la roca o terreno recién excavado, es necesario tener en cuenta ciertos aspectos:

- En túneles ferroviarios es muy importante para evitar la contaminación del balasto debido a la presencia de agua y arcilla.

- La compensación de las cargas dinámicas por tráfico ferroviario, hacen que los filtros bien graduados sean eficaces, siendo normalmente necesaria una sobreexcavación de 20 a 30 cm; esta excavación puede ser completamente evitada con el empleo de geotextiles de peso pesado.

-La utilización de membranas de impermeabilización necesita en todos los casos un geotextil de protección interior y exterior, ya que el colado del concreto de revestimiento, por gravedad, puede dañar físicamente las membranas.

#### **3.7.4 Túneles excavados a cielo abierto**

El túnel se reviste previamente, por lo que la capa de protección y drenaje se colocarán posteriormente a la geomembrana de impermeabilización.

Las características de la superficie de concreto, como soporte para dicha impermeabilización serán:

- superficie sin aristas vivas y resaltos
- sin disgregación de los agregados
- independientemente, la superficie puede estar húmeda o mojada

Como capa exterior de protección, además de un geotextil, se suele colocar concreto lanzado o membrana de protección.

**Para dimensionar este geotextil exterior, en cuanto a su función de drenaje, es preciso tener en cuenta los gastos por evacuar y considerar la presión exterior producida por el relleno de la excavación.**

**Es importante que la geometría del concreto de revestimiento inicial disponga de superficies intermedias a contrapendiente, para evitar o disminuir el riesgo de deslizamientos del geotextil y la membrana, ya que los ángulos de fricción para estos materiales suelen ser bajos.**

#### **4.- MATERIALES DE IMPERMEABILIZACIÓN**

Un sistema de impermeabilización es el conjunto de capas, caracterizado por la naturaleza de cada una de ellas, su número, su forma de colocación y sus dimensiones. Para evitar daños mecánicos, el sistema de impermeabilización (geotextil y geomembrana deberán tener altos valores de resistencia a la perforación (>1.500 N) (> 150 kgf) (ASTM D 4833). El sistema está constituido por todos o algunos de los elementos indicados en las figuras 7 y 8.

La calidad de los materiales por utilizar, el lugar y condiciones de trabajo, y por último el equipo empleado, influyen en la calidad de la impermeabilización.

##### **4.1 Materiales para la impermeabilización primaria**

Los materiales generalmente usados para una impermeabilización primaria son:

- Cementos
- Agua
- Aditivos

##### **4.1.1 Cementos**

Se usarán cementos expresamente indicados en los planos o especificaciones. En caso de que condiciones especiales locales lo aconsejaran, se podrán utilizar cementos especiales con la aprobación de los diseñadores de la obra. De ser posible el cemento será de un mismo tipo y de la misma marca, y se fabricará en la misma planta. En los casos en que los drenes recojan aguas subterráneas con una alta concentración de sulfatos, deberá emplearse cemento resistente a sulfatos.

#### **4.1.2 Aguas**

El agua para mezclar y curar debe ser limpia y estar exenta de sustancias que puedan dañar al concreto o al acero. En los casos en que revista importancia la estética, el agua de curado deberá carecer de elementos que produzcan manchas.

#### **4.1.3 Aditivos**

El principal aditivo utilizado en el tratamiento preliminar es un impermeabilizante de fraguado rápido.

Los principales utilizados en la preparación de soporte corresponden a los necesarios para el concreto lanzado. El aditivo principal utilizado en el concreto lanzado, por vía seca y húmeda, es el acelerante de fraguado.

La acción de los acelerantes en el fraguado inicial y en el endurecimiento del cemento difieren mucho en función de la clase y tipo de cemento, cantidad de agua y de la temperatura ambiente, por lo que se hace necesario la realización de ensayos previos. Estos ensayos de laboratorio previos, deben complementarse con pruebas preliminares en obra, para tener en cuenta la influencia de todas las variables de la misma. La incorporación de acelerantes produce aumento en las resistencias iniciales y disminución en las finales, con respecto a un concreto sin aditivos.

### **4.2 Materiales para la impermeabilización principal**

#### **4.2.1 Geotextiles**

Durante la construcción de túneles se modifica el estado de esfuerzos del arco excavado, se producen movimientos de convergencia del conjunto del terreno, que exponen a la geomembrana a esfuerzos mecánicos muy fuertes, lo que puede causar la ruptura de la misma.

Para evitar esto se colocan capas intermedias adicionales, compensadoras, bajo o sobre la membrana.

El geotextil utilizado en el sistema de impermeabilización, que sirve simultáneamente, como capa protectora y compensadora, tiene una función importante como desagüe superficial de aguas de filtración.

#### **4.2.1.1 Elección del tipo de geotextil**

Los geotextiles por utilizar serán siempre no-tejidos de 100% polímeros sintéticos, sin embargo, no se permitirá el uso de geotextiles de poliéster.

El peso y el espesor del geotextil por utilizar dependerán en cada caso de las propiedades mecánicas e hidráulicas contempladas en la siguiente tabla:

**Tabla 5.- Definición de las propiedades mecánicas e hidráulicas mínimas del geotextil, según tipo de túnel**

			Túnel a ciclo Abierto	Túnel excavado con concreto lanzado			Túnel con dovelas
Características	Unidad	Norma		Agregado 0-4 mm A	Agregado 0-8 mm B	Agregado 0-16 mm	
Resistencia a la tensión (1)	kN/m	ISO 10319	> 7	> 15	> 18	> 21	> 7
Alargamiento a la ruptura (2)	%	ISO 10319	> 80	> 80	> 80	> 80	> 80
Resistencia CBR	N	ISO 12336	> 1500 150 Ton	> 2500	> 2300	> 4000	> 1500
Transmisividad o permeabilidad en el plano (3)	m <sup>2</sup> /s a 200kp	ISO 12958	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>

(1) En sentido de fabricación y en sentido perpendicular a la fabricación.

(2) Valor en sentido fabricación y en sentido perpendicular a la fabricación.

(3) Los valores reflejados corresponden a condiciones normales de caudal. Para casos especiales, se deberá hacer un cálculo específico para corroborar o corregir este valor, que puede indicar la necesidad de emplear un geocompuesto drenante.

#### **4.2.1.2.- Recepción y colocación del geotextil**

Los geotextiles vendrán presentados en rollos convenientemente empaquetados y con etiquetas en las que aparezca de forma legible: la marca, el tipo, las dimensiones del rollo y el número de lote de fabricación.

La colocación se realizará mediante taqueteado, grapas o disparos al soporte de sostenimiento, en los cuales irá colocada la arandela que posteriormente servirá de sujeción a la geomembrana.

Los geotextiles se unirán mediante traslape o termofusión, siendo el traslape mínimo de 20 cm, con el fin de que toda la superficie quede cubierta y la geomembrana protegida.

#### **4.3.- Geocompuestos drenantes**

Los geocompuestos son los formados por dos o más geosintéticos. La función principal del geocompuesto drenante (geodren) es evacuar líquidos o gases. El parámetro principal que se utiliza para su dimensionamiento será la transmisividad bajo carga para un gradiente hidráulico determinado. Con el fin de simplificar, se utilizará como gradiente hidráulico: 1. En cada caso, será necesario conocer:

- Gasto del líquido por evacuar.
- Carga a la que estará sometida el geocompuesto drenante (geodren).

Con estos datos se elegirá un producto tal que sea capaz de evacuar el volumen necesario bajo la carga establecida, es decir, cuya transmisividad bajo carga sea la requerida.

#### 4.3.1.- Elección del tipo de geocompuesto (geodren)

El geocompuesto por utilizar deberá cumplir las propiedades mecánicas e hidráulicas contempladas en la siguiente tabla:

*Tabla 6.- Definición de las propiedades mecánicas e hidráulicas mínimas del geocompuesto*

Propiedades	Unidad	Norma	Valor
Resistencia Tensión	kN/m	pr EN 30319	> 7
Alargamiento ruptura	%	pr EN 30319	> 40
Resistencia a compresión	kPa	ASTM D 1621	> 500
Transmisividad (bajo 200 kPa)	$10^{-3}$ m <sup>2</sup> /s	ASTM D 4716	> 0,8- $10^{-3}$

#### 4.3.2.- Recepción y colocación

Los geocompuestos drenantes (geodrenes) vendrán presentados en rollos convenientemente empaquetados y con etiquetas en las que aparezca de forma legible, la marca, el tipo, las dimensiones del rollo y el número del lote de fabricación.

Los geocompuestos drenantes (geodrenes) se colocarán de modo que los geotextiles queden traslapados como mínimo 10 cm, para asegurar la continuidad del fieltro.

#### **4.4.- Láminas de impermeabilización**

Para las aplicaciones presentes en la construcción de túneles, se tendrán en cuenta los criterios siguientes:

##### ***a) Construcción de túneles con superficies lisas en:***

- Concreto, dovelas o galerías perforadas con máquina tuneleadora a plena sección.
- Lámina armada o sin armar.

##### ***b) Construcción de túneles con avance convencional mediante explosivos, o con máquina excavadora de sección parcial***

- Lámina sin armar (capaz de adaptarse a las irregularidades del terreno y de su sostenimiento con concreto lanzado).

##### ***c) Construcción de túneles a cielo abierto***

- Láminas armadas (sin contracción, incluso a grandes diferencias de temperatura)
- Láminas no armadas (resistentes al punzonamiento, sin capa de protección)

La membrana para la impermeabilización de túneles se formará con láminas termoplásticas de PVC-p, cuyas características mínimas serán las siguientes:

**MEMBRANA DE PVC-p PARA LA IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES  
( en túneles excavados y a cielo abierto )**

<b>Características</b>	<b>Valor</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Norma UNE</b>
Espesor	1,5 mm	mínimo	53.221
Resistencia a la tensión	> 12 Mpa > 900 N/50 mm	No armadas Armadas	53.165
Alargamiento a la rotura	min. 300 % min. 10 %	No armadas Armadas con hilos sintéticos	53.165
Plegado a bajas temperaturas	Sin fisuras	a - 20°C	53.358
Resistencia al desgarre	> 60 N > 120 N	No armadas Armadas con hilos sintéticos	53.358
Comportamiento al calor	< 2 %	(sin formación de burbujas)	53.358
Envejecimiento térmico	Pérdida de masa < 2%	Disminución del alargamiento a rotura <15%	53.358
Resistencia a la percusión	Impermeable para una altura de > 750 mm.		53.358
Comportamiento al fuego	Autoextinguible	No necesario túneles a cielo abierto	53.358
Color	Capa señalizadora	Translúcida	53.127
Resistencia a microorganismos	Resistente		53.421
Resistencia a perforación de raíces	Resistente		53.420

En caso de utilizar láminas armadas para emboquillados, puntos singulares o túneles excavados a cielo abierto con máquinas tuneadoras, su alargamiento al punto de tensión máximo será como mínimo del 10%.

Se aconsejarán anchos de lámina que permitan realizar el mínimo de soldaduras en el interior del túnel y la longitud de los rollos será acorde con el perímetro del mismo. Asimismo, se podrán prefabricar las láminas antes de su colocación en anchos múltiplos de dos metros, en el caso de utilización de máquinas automáticas especiales de colocación.

#### **4.5.- Membranas de protección**

Cuando se arme el concreto estructural de revestimiento y para evitar daños en la membrana de impermeabilización se deberá colocar adicionalmente una membrana de protección (sacrificio), con un espesor mínimo de 1.5 mm., para evitar posibles perforaciones durante la colocación de dichas armaduras.

Su colocación se efectuará posterior a los trabajos definitivos del sistema de impermeabilización, colocándose soldadas por puntos a la membrana principal, sin efectuar ninguna perforación. Se aconseja que su color sea diferente para control.

#### **4.6.- Soportes de la impermeabilización**

El soporte de la impermeabilización de túneles es importante ya que en él va fijada la impermeabilización. Los puntos más importantes son:

- Ser resistente y estar libre de partículas.

Su geometría y terminación estará de acuerdo con la descripción en el inciso 1.4.

Los trabajos posteriores a los tratamientos preliminares o impermeabilización primaria serán

mediante la aplicación de concreto lanzado. La preparación del soporte puede ser de protección o de regularización.

#### **4.6.1. Protección**

Es la aplicación de concreto lanzado armado de un espesor no inferior a 5 cm en toda la superficie por tratar; así se consigue una protección de los tratamientos preliminares elegidos, ya que de no efectuarlo, y debido a los acelerantes de fraguado empleados, los drenes, taponamientos, etc., quedarían fisurados.

#### **4.6.2. Regularización**

La finalidad de este método a base de concreto lanzado es cumplir con la geometría detallada en la figura No. 10 y servir de soporte a una lámina termoplástica prefabricada (geomembrana). El espesor depende del sistema de sostenimiento (anclas, cerchas, etc.) suele oscilar entre 4 y 25 cm. También puede cumplir la finalidad de sostener provisionalmente la excavación del túnel o galería.

## **5. APLICACIÓN DE LA IMPERMEABILIZACIÓN**

La aplicación de la impermeabilización será efectuada por personal especializado en cada una de las fases.

En general cada una de las fases tendrán las siguientes etapas:

### **5.1 Tratamientos preliminares**

#### **Preparación de superficies**

Se deberán eliminar partículas mal adheridas o sueltas y se deberá limpiar con agua la superficie por tratar.

#### **5.1.1 Drenes**

La geometría de la "espina de pescado" vendrá determinada por las filtraciones de agua. Pero principalmente se recomienda realizar drenes principales con una frecuencia de:

Filtraciones altas: 2 metros

Filtraciones medias: 3 metros

Filtraciones bajas: 5 metros

La disposición de los drenes principales en el túnel será transversal desde la bóveda al piso, y a los mismos se irán conectando ramales inclinados, con la frecuencia de las aportaciones de agua.

A título de ejemplo, el dren puede formarlo un tubo media caña de 150 mm de diámetro, compuesto por una membrana de material plástico o PVC, alambre y geotextil interior en rollo, contra incrustaciones, de manera que se pueda adoptar a las irregularidades del soporte. Una vez colocado sobre la configuración del terreno se irá sujetando mediante pasta de cemento y acelerante rápido.

#### **Mezclado**

El acelerante deberá emplearse solamente con cemento Portland fresco. Verter el producto en un recipiente limpio, añadir el cemento y mezclar durante unos segundos.

#### **Aplicación**

El conjunto de drenes, sistemático o no, tendrá una salida de filtraciones, recogiendo las aguas a través de los drenajes y llevándolas a las cunetas. Es importante añadir que la finalidad de realizar una sistematización de drenajes es recoger toda filtración presente o futura, y, en líneas generales, dejar colectores para conducir el agua a las cunetas longitudinales.

### **5.2 Preparación del soporte**

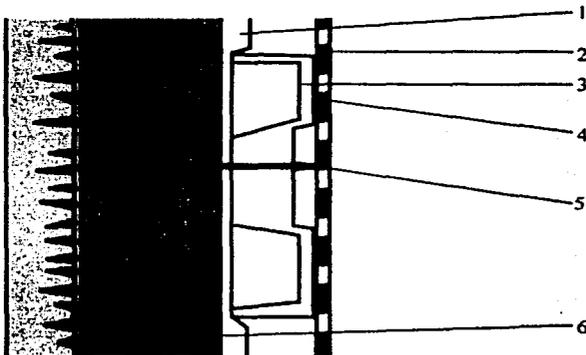
#### **Concreto lanzado**

La colocación del concreto lanzado se regirá por las especificaciones empleadas en el sostenimiento, tanto para regulación de soporte como para protección de la impermeabilización primaria. Su edad, en tratamientos preliminares, antes de proceder a la realización de la impermeabilización principal, será al menos de 28 días.

### 5.3 Impermeabilización principal

#### 5.3.1 Geotextil

Su colocación se efectuará sujetándose por medio de arandelas, botones o discos de PVC. Tendrán una superficie mínima de 60 cm<sup>2</sup>. La superficie de unión con la lámina deberá ser como mínimo de 40 cm<sup>2</sup>. La densidad de anclajes dependerán de la configuración y geometría del perímetro del túnel. (Fig. 13).



- 1.- Geotextil de drenaje y protección
- 2.- Membrana de PVC
- 3.- Discos de PVC
- 4.- Soldadura por aire caliente
- 5.- Clavo y argolla metálica
- 6.- Concreto lanzado

Fig. 13 Anclaje del geotextil y soldadura de la membrana

Se deberá adaptar a la geometría del soporte, con el menor número de pliegues, y con traslapes del 15% mínimo.

Se tendrán en cuenta los remates, tanto en su encuentro con los drenes longitudinales como en la terminación en boquillas.

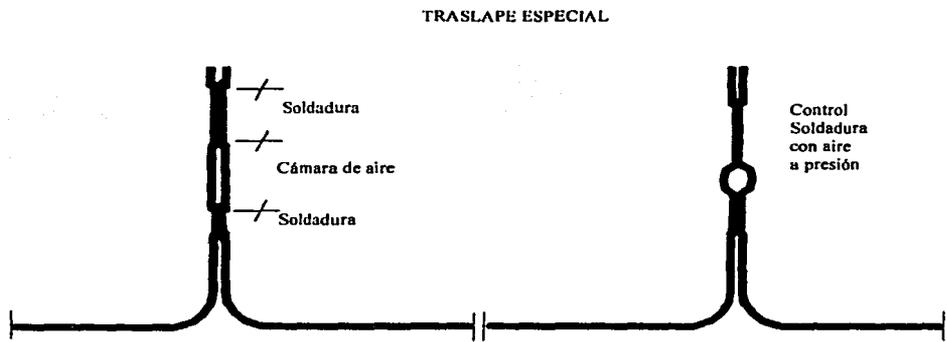
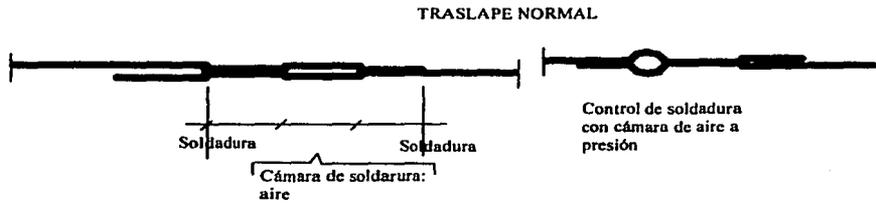
### **5.3.2 Geomembrana**

Su colocación se efectuará transversalmente, sujeta a las arandelas anteriormente colocadas, soldadas termoplásticamente (sin ninguna perforación) por medio de soldador simple o de doble soldadura, con canal central para control de impermeabilidad.

Siempre se evitará el menor número de soldaduras para lo cual se aconseja prefabricar anchos de colocación de por lo menos 4 metros. Esta prefabricación se efectuará fuera del túnel y en un local apropiado, donde el control de soldadura se efectúe con seguridad.

En las zonas de contrabóveda o puntos singulares se protegerá dicha membrana con un geotextil de calibre pesado, contra perforación. En contacto con el terreno recién excavado se aplicará un recubrimiento de concreto simple de 5 cm de espesor antes de vaciar el concreto estructural, como protección mecánica.

La soldadura tendrá un traslape mínimo de 8 cm. El control de cada una de las soldaduras, se efectuará posteriormente mediante una prueba con aire comprimido, a 2 kg/cm<sup>2</sup> de presión durante 15 minutos, permitiéndose durante el ensaye una pérdida del 10%, debido a la flexibilidad de la membrana. (Norma UNE 104-481/3-2). (Fig. 14a, 14b y 14c).



**Fig. 14b**      **Traslape especial con canal central**

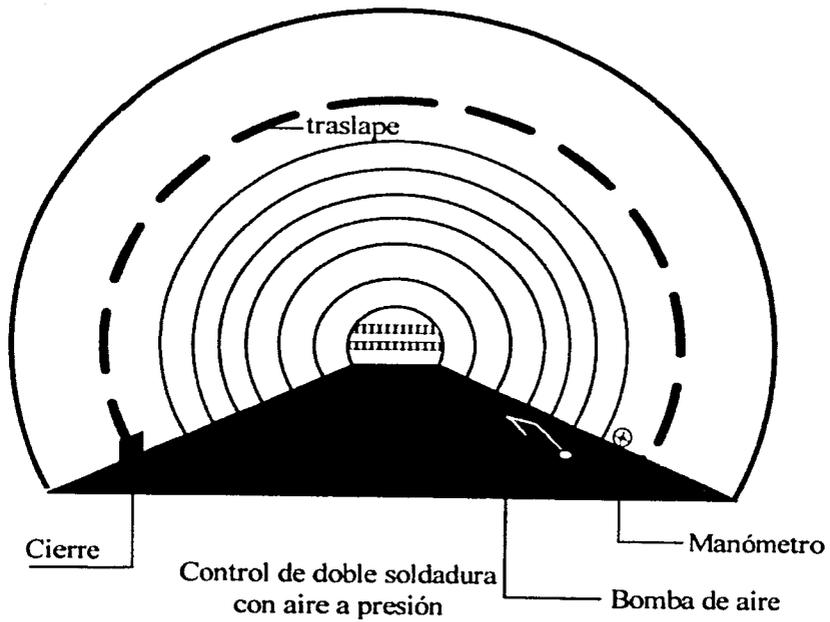


Fig. 14c Control de soldadura

Su colocación se podrá efectuar manualmente, mecánicamente, con andamios fijos o con andamios motorizados. (Fig. 15).

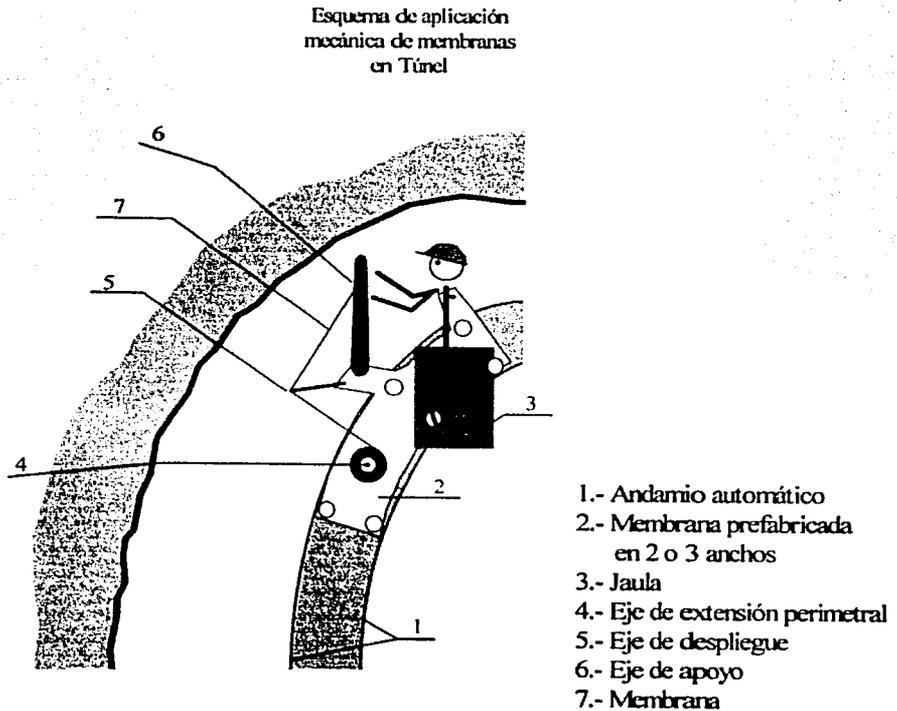


Fig. 15 Esquema tipo de andamiaje para colocación automática

### 5.3.3 Uniones y remates longitudinales

El sistema de impermeabilización comprenderá, tanto las uniones con las boquillas, los finales parciales de la impermeabilización así como el remate en cunetas o drenaje y el revestimiento, como se ilustra en las figuras 16 y 17 (túneles convencionales o a cielo abierto respectivamente).

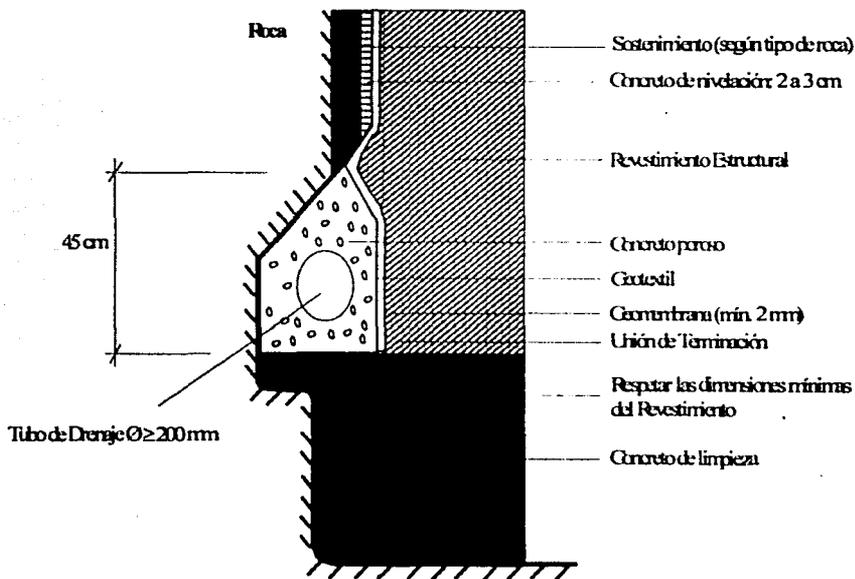


Fig. 16 Remate longitudinal de la impermeabilización de túneles convencionales

### 5.3.3 Uniones y remates longitudinales

El sistema de impermeabilización comprenderá, tanto las uniones con las boquillas, los finales parciales de la impermeabilización así como el remate en cunetas o drenaje y el revestimiento, como se ilustra en las figuras 16 y 17 (túneles convencionales o a cielo abierto respectivamente).

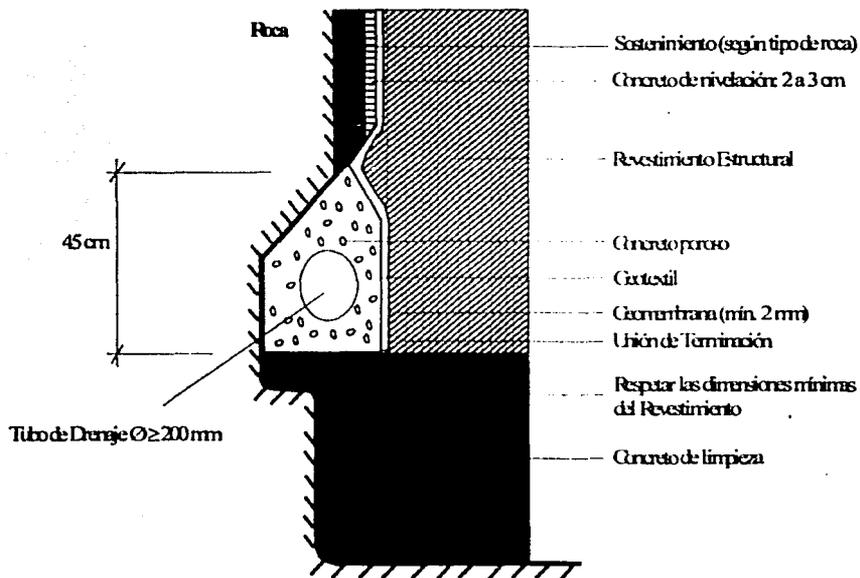


Fig. 16 Remate longitudinal de la impermeabilización de túneles convencionales

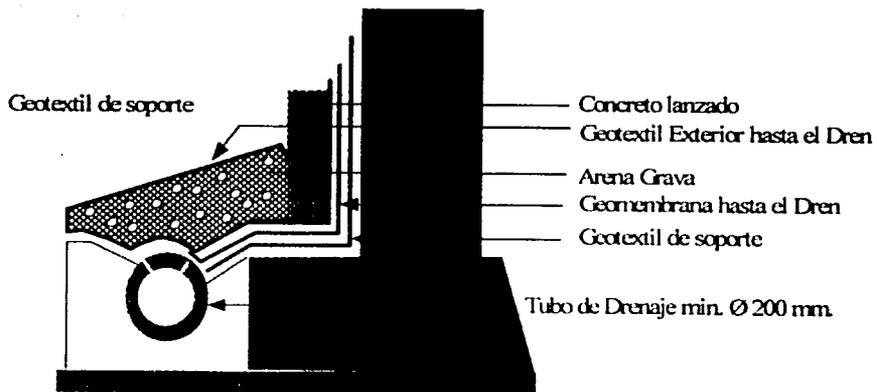


Fig. 17 Remate longitudinal en túnel a cielo abierto

## **6. SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN**

### **6.1 Pruebas.**

Las membranas de impermeabilización una vez colocadas y soldadas, serán probadas, en cuanto a su unión, con doble soldadura con canal central mediante aire comprimido (Norma UNE 104-481 3-2).

En los casos de uniones ortogonales de varias membranas, y donde no sea posible un control con aire comprimido, se podrá utilizar puntualmente una campana de vacío. Dicha campana estará rellena de un líquido especial (agua con jabón). Efectuando un vacío de 0.5 bar sobre el punto a controlar, provocará la formación de burbujas fácilmente observables, cuando exista un defecto de soldadura o en la propia membrana. Un resultado de vacío sin burbujas será considerado como aceptable.

El sistema de impermeabilización deberá tener una resistencia a la perforación mayor que 1500 N, de acuerdo con el ensaye ASTM-D-4595.

## 6.2 Mediciones

Las mediciones de harán según se detalla en la siguiente tabla:

UNIDAD DE OBRA	UNIDAD DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
Drenaje	m	Longitud total terminada
Geotextil	m <sup>2</sup>	En desarrollo *
Geocompuesto drenante	m <sup>2</sup>	En desarrollo *
Geomembrana	m <sup>2</sup>	En desarrollo *
Membrana de protección	m <sup>2</sup>	En desarrollo *
Remates perimetrales	m	Longitud total terminada

*\* La medición en el perímetro del túnel incluirá el sistema de impermeabilización completo y el desarrollo corresponderá ala línea de abono de excavación.*

## 6.3 Especificaciones

Los siguientes detalles deberán incluirse en las especificaciones:

- \* En el caso de excavaciones, deberán considerarse las posibles diferencias entre los perfiles teóricos y reales de la excavación.
- \* El exceso de concreto de sostenimiento, debido a interrupciones, condiciones geológicas adversas, así como dificultades provocadas por problemas en el lanzado, deberán tenerse en cuenta.
- \* En aquellos casos de irregularidades, salientes, rocas sanas, el recubrimiento del concreto lanzado puede reducirse hasta un tercio del espesor especificado.

\* El número de ensayos de control de calidad debe adaptarse al volumen de la obra (Los detalles se deberán presentar en tablas). Previamente deberá establecerse quién se hace responsable de estos ensayos de control (ejecución, costo, etc.)

\* Los siguientes conceptos deberán ser incluidos en las especificaciones:

- Tipo de concreto
- Espesores de concreto lanzado por aplicar y comprobaciones correspondientes.
- Tipos de agua de filtración
- Tipo de terreno
- Especificaciones especiales, en relación con la composición de los concretos, morteros, aditivos, geotextiles, geomembranas p. Ej.: tipos de cemento, acelerantes, membranas y otros aditivos.
- Detalles de curado.
- Definición del sistema de medición aplicable.
- Disposiciones en casos de defectos de calidad y/o espesores insuficientes.
- Acabados superficiales.
- Definición de unidad de obra, para efecto de pago.

## **7. CASO ESTUDIO**

En este caso se presenta un túnel en la república de Colombia, el cual se describe someramente su problemática, la cual fue complicada por la presencia del agua. Se hace énfasis en la impermeabilización del túnel usando para ello geomembranas de PVC-p.

### **GENERALIDADES Y PROBLEMATICA**

El túnel El Boquerón está situado en Colombia, a la salida de Bogotá, en la carretera Bogotá-Villavicencio, en el km 13+500. Tiene una longitud de 2400 m y se encuentra a una altura de 3060 msnm, con una pendiente del 2.6% en el sentido de Villavicencio. Tiene un radio libre de 4.93 m y tres nichos de estacionamiento de 38 m de longitud y 3 m de sobreancho. Existen además otros dos nichos para transformadores.

El perfil geológico puso de manifiesto la presencia de lutitas expansivas, carboníferas, con presencia de gas metano, en los 700 metros que correspondían al portal de salida. Los primeros 200 metros de túnel fueron clasificados como terreno tipo V, formado por un colubión, por lo que se avanzó con una preconsolidación del terreno con Jet-Grouting.

Del perfil geológico se dedujeron los tipos de terreno que se atravesarían (de acuerdo al CSIR, Barton) (Hoek E.& Brown E. T., 1980) y con ellos los procedimientos necesarios de apuntalamiento para cada tipo de terreno, los medios de excavación requeridos y sus rendimientos, así como las instalaciones de ventilación, iluminación, etc. requeridas para la operación, con lo que se pudo calcular el costo y tiempo de ejecución. Los tipos de terreno previstos fueron desde la roca muy buena, Tipo I, a la roca muy mala, Tipo V, siendo la mitad del Tipo III.

La impermeabilización del túnel se realizó en todo su longitud, lo mismo que la colocación de los marcos de apuntalamiento, el concreto lanzado, la malla electrosoldada y la inyección y colocación de anclaje. La separación circunferencial y longitudinal del anclaje sistemático, dependió del tipo de terreno y de la longitud del anclaje, siguiendo la filosofía de Nuevo Método Austriaco de Tuneleo, NATM.

El incidente más significativo que se presentó durante la excavación del túnel, fue un derrumbe que acaeció de forma repentina en una zona que ya estaba estabilizada. A pesar de los controles de convergencia y observaciones rutinarias de sostenimiento, el 26 de Abril de 1998 se produjo un derrumbe de 38 m de largo, a la altura de un nicho de estacionamiento, en el km 15+232, zona que se había excavado 6 meses antes, en un terreno de la formación Guaduas, constituido por lutita gris verdosa, blanda y fracturada, con intercalaciones delgadas de carbón y bancos de hasta 7 m de arenisca de dureza media a deleznable. El hundimiento se produjo de una forma brusca y únicamente en la clave, dejando los hastiales intactos. Sus dimensiones, de unos 10 m por encima de la clave, sobrepasaron ampliamente las dimensiones de las anclas.

Las labores de recuperación de la zona hundida se iniciaron primeramente con el sello de todo el escombro con el equipo del Jet-Grouting, terminándolo, en ambos lados del hundimiento, con una capa de concreto lanzado de 30 cm de espesor y reforzada con malla electrosoldada. Posteriormente se perforó en el escombro, comenzado desde la parte baja, en una longitud de 26 metros, inyectando lechada de cemento en retroceso, con el fin de ir estabilizando el derrumbe de abajo hacia arriba. Al terminar, se realizó la excavación para recuperar la sección, sin ningún problema, con avances de metro en metro y colocación de marcos, malla electrosoldada y lanzado neumático. El apuntalamiento colocado consistió en:

- Cercha metálica separada a cada 1 m.
- Concreto lanzado, con un espesor mínimo de 0.20 m y malla electrosoldada.
- Anclaje sistemático de  $L = 4.00$  m, con separación circunferencial de 1.50 m.

Las características geomecánicas de la roca en cuestión fueron:

Tabla 1. Características geomecánicas de la roca.

Peso unitario	Roca intacta 2,490 kg/m <sup>3</sup>	Macizo rocoso 2,490 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a la compresión simple	163.8 kg/cm <sup>2</sup>	75 kg/cm <sup>2</sup>
Ángulo de fricción	34°	23°
Módulo de deformación	24,800 kg/cm <sup>2</sup>	13,640 kg/cm <sup>2</sup>

Según la clasificación de Bieniawski (Hoek E.& Brown E. T., 1980), se atribuye a las lutitas de la formación Guaduas un RMR de 42, correspondiente a roca media (41 a 60) si bien, prácticamente, en la frontera de roca mala (21 a 40). Según Barton (Hoek E.& Brown E. T., 1980), se obtuvo una calidad de la roca Q de 0.63, que correlacionándola con el Rock Mass Rating RMR, mediante la expresión  $RMR = 9\text{Log}_e Q + 44$ , arroja un  $RMR = 40$ , con lo cual se comprueba que el macizo en cuestión estaba en la frontera entre roca media y roca mala (Tabla 1).

En opinión de los constructores, un flujo de agua procedente de la superficie, a partir de las lluvias que se tuvieron pocos días antes del incidente, infiltrado a partir del contacto arenisca-lutita pudo haber provocado la falla.

Se puede decir, que el comportamiento en el resto del túnel, en las zonas en las que se detectaron movimientos graduales, se estabilizó colocando canalizaciones Hekerly, subdrenaje en centro y paredes del túnel, aumentando el apuntalamiento de inicio, hasta conseguir su estabilización, siendo necesario, en algunos casos particulares, emplear inyecciones de consolidación.

## IMPERMEABILIZACION DEL TÚNEL

El túnel, de manera general, presentaba una sección con un diámetro de 10 m y un perímetro de aproximadamente 29 m de desarrollo (Figura 1). El gasto total, obtenido de la sección del túnel era  $Q = 120$  l/s. El sistema de impermeabilización consistió de la combinación de un geotextil de  $500 \text{ gr/m}^2$  de polipropileno blanco fijado de manera mecánica al concreto lanzado con el que se habían recubierto las paredes del túnel y una geomembrana de PVC, homogénea, calidad túnel (Alkorplan, 1995), de 1.5 mm de espesor (Figura 2).

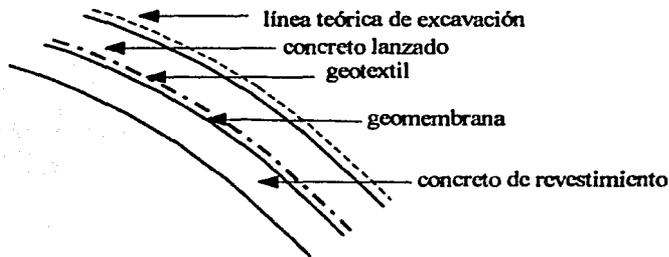


Figura 2. Detalle de la impermeabilización en la bóveda.

El concreto lanzado tuvo, entre otras funciones, la de regularizar la superficie irregular de las paredes del túnel y de recubrir los pernos de las anclas, para evitar que pudieran lastimar a la geomembrana.

El geotextil, que tenía, entre otras funciones, servir como dren y como colchón amortiguador para evitar punzonamientos de la geomembrana, se colocó sobre del concreto lanzado y sobre los pernos de anclaje. Fue fijado a las paredes por medio de “botones” de PVC, taqueteados por medio de un martillo especial. Estos botones de PVC se colocaron a razón de cuatro por metro cuadrado en promedio.

Encima del geotextil, se colocó la geomembrana de PVC, de 1.5 mm de espesor, la cual, su única y exclusiva función es la de impermeabilizar. Esta geomembrana fue fijada a las paredes soldándola directamente a los botones de PVC por medio de calor, a través de soldadores eléctricos que inyectan aire caliente a 400° C. Entre un lienzo de la geomembrana y el siguiente, se dejó un traslape de 7 cm. La soldadura que se hizo, dada la importancia de la obra, fue doble, dejando un canal intermedio de comprobación. Esta comprobación se hizo inyectando aire a presión, a 2 bares de presión (196 kN/m<sup>2</sup>), sosteniéndolo, sin que disminuya su presión, durante 2 horas, mínimo. Esto con el fin de asegurar la calidad de la soldadura y garantizar la ausencia de fugas. Se deben de revisar el 100% de las soldaduras.

Después de la perforación del túnel, luego de alcanzar la línea de pago ó línea teórica de excavación, de los sitios en donde las fisuras y/o fracturas permiten fugas de agua importantes, se colocan “chupones” y tuberías de 1” a 2”, según el gasto, para tratar de conducir ese gasto hacia las paredes del túnel y hacia el subdren colector, colocado en este caso, bajo las banquetas. Estas canalizaciones se colocan encima de la superficie que deja el concreto lanzado, como preparación previa a la impermeabilización.

La geomembrana de impermeabilización recubre las paredes y la bóveda del túnel, conduciendo el agua recolectada hasta los subdrenes colectores, pasando por debajo de ellos y subiéndolo hasta por encima de la altura del tubo ranurado, formando con ello un nuevo canal, que pudiera asegurar la adecuada conducción de las aguas, en dado caso de así requerirse (Figura 3). Debajo de las banquetas van distintas conducciones: subdrenaje, aire de ventilación, fibra óptica, teléfonos, electricidad, etc.

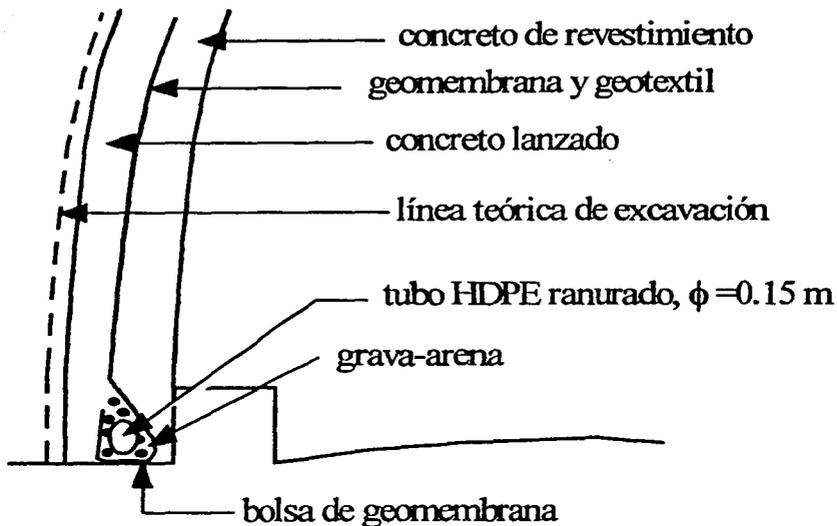


Figura 3 Detalle de la bolsa del colector

Para la colocación de los geosintéticos se utilizó un andamiaje móvil, a base de ruedas autopropulsadas y retráctil, a base de un sistema hecho de una plataforma montada sobre de una tijera, que permitía desplazarse fácilmente a lo largo del túnel y alcanzar sin mayores penurias los lugares más recónditos del mismo. La instalación del geotextil, y posteriormente de la geomembrana, se realizó con seguridad y facilidad, lográndose avances de hasta 30 m por día, en el mejor de los casos, y de 23 m por día, como promedio.

Para el cálculo de la cantidad de geomembrana y geotextil utilizados se debió incrementar en un 25% para el geotextil y un 25% para la geomembrana, debido a los traslapes, los

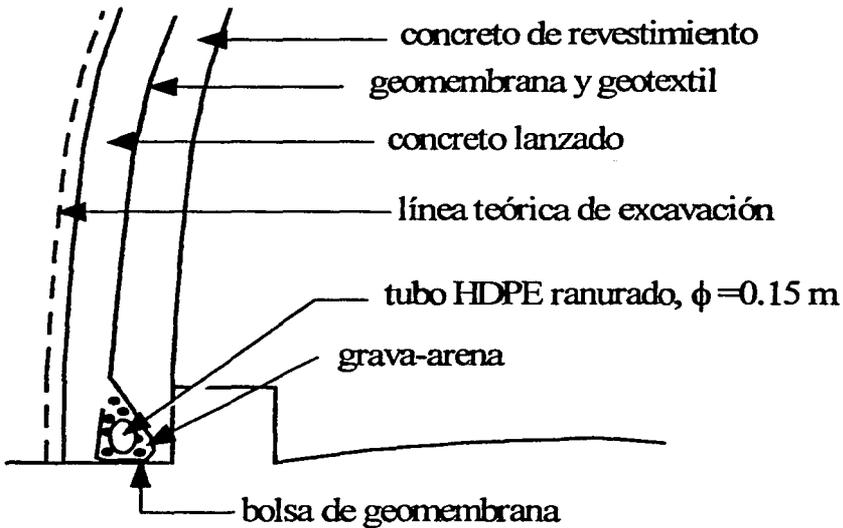


Figura 3 Detalle de la bolsa del colector

Para la colocación de los geosintéticos se utilizó un andamiaje móvil, a base de ruedas autopropulsadas y retráctil, a base de un sistema hecho de una plataforma montada sobre de una tijera, que permitía desplazarse fácilmente a lo largo del túnel y alcanzar sin mayores penurias los lugares más recónditos del mismo. La instalación del geotextil, y posteriormente de la geomembrana, se realizó con seguridad y facilidad, lográndose avances de hasta 30 m por día, en el mejor de los casos, y de 23 m por día, como promedio.

Para el cálculo de la cantidad de geomembrana y geotextil utilizados se debió incrementar en un 25% para el geotextil y un 25% para la geomembrana, debido a los traslapes, los

“abolsados” que se dejaban en zonas de cavidades, las irregularidades de la bóveda excavada y los desgarres y parches que pudieran aparecer. Estos abolsados son muy útiles para poder evitar la generación de tensiones en la geomembrana al momento de colocar el adcm de concreto definitivo por encima de la geomembrana.

Todas las perforaciones, roturas y cortadas que se generen en la geomembrana, accidentales o provocadas, deben de parcharse, soldados, por medio de calor, el accidente, colocando lámina de geomembrana adicional y en un ancho mayor en 20 cm al del accidente, para poder garantizar, de manera adecuada, su estanqueidad. Esto se hace con soldadores de aire caliente manuales y con ayuda de un rodillo manual, a diferencia de la soldadura de los paneles completos, que se realiza con máquinas automáticas, que sueldan la geomembrana por medio del calor generado por una resistencia eléctrica que va dentro de una zapata metálica y que avanzan reptando automáticamente, asidas de los paños de las dos geomembranas que están siendo soldadas.

## **DISCUSION**

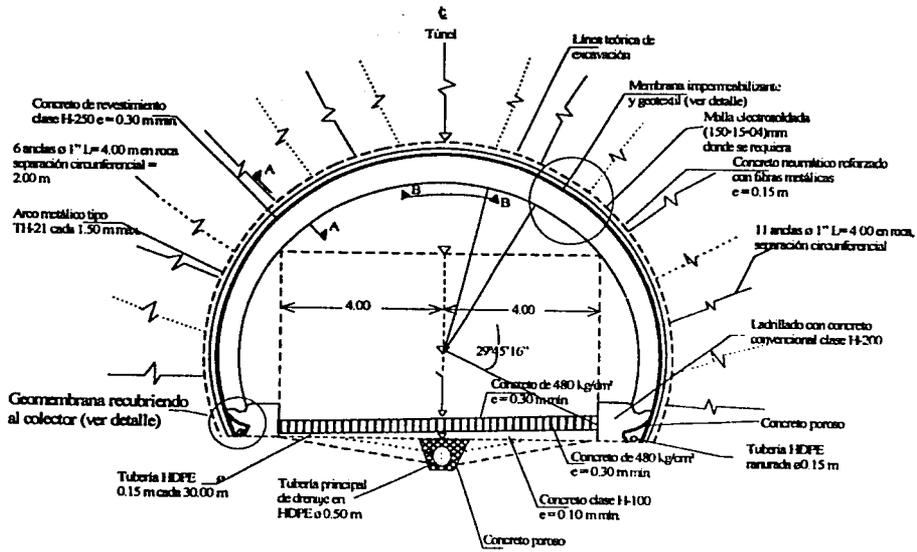
El sistema de impermeabilización utilizado, a base de geosintéticos pudo haber sido llevado a un punto óptimo al incluir un geodren al menos para las zonas de alta infiltración, con lo cual hubiera aumentado el área hidráulica de conducción de agua hacia los colectores laterales, sin embargo, el problema de las economías tan austeras y limitadas de los países latinoamericanos restringe sensiblemente la eficiencia y calidad de los proyectos por desarrollar.

En Europa, la práctica común es el uso de una doble membrana, además del geotextil y el geodren, dejando a una primera membrana como de sacrificio o membrana primaria.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

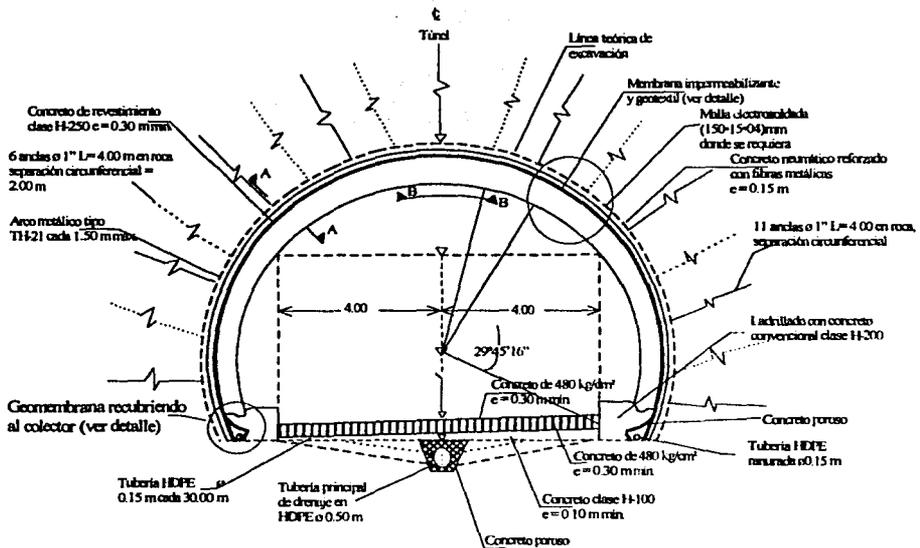
**La instalación de este tipo de impermeabilización, lograda con ayuda de geosintéticos: geotextil no tejido, de polipropileno y geomembrana de PVC, calidad túnel, fue realizada de una manera rápida y secuencial, logrando resolver de manera sobresaliente las filtraciones provenientes del macizo rocoso, conduciéndolas hacia los colectores laterales y de ahí conducir las hacia un tanque de tratamiento de aguas para, posteriormente, reincorporarlas a la red de agua de la comunidad de Chipaque, vecina a la obra.**

**Actualmente no existe una reglamentación ni especificaciones precisas y definidas sobre la impermeabilización de túneles en Latinoamérica. Se considera que debe trabajarse sobre de este aspecto, fundamental en la vida útil de los túneles, especialmente los carreteros y urbanos.**



SECCION TIPO III

Figura 1 Croquis "tipo" de la sección del túnel"



### SECCION TIPO III

Figura 1 Croquis "tipo" de la sección del túnel

## **CONCLUSIONES.**

En este tema se dieron explicaciones con las cuales se puede realizar una impermeabilización en cualquier tipo de obra subterránea, siendo que para los ingenieros es muy importante aislar el agua ya que es nuestro principal problema y canalizarla a una línea de conducción que tenga la eficiencia para retirar el agua a una zona que no nos perjudique.

Se detalla la calidad de los materiales de impermeabilización tanto primaria como principal y los métodos para la aplicación de dichas fases.

Con lo que se mencionó en los capítulos es para darse cuenta que todos los problemas de impermeabilización no son siempre iguales ya que influye como principal restricción el uso del túnel y el gasto que se tiene, ya que también se controlaría la presión la cual es función del gasto.

El caso estudio que se presenta es un claro ejemplo de los problemas que se pueden presentar en la vida diaria por lo que es muy importante los estudios preliminares y la aplicación de la impermeabilización.

El procedimiento realizado en el túnel del caso estudio es el básico para toda impermeabilización de toda obra subterránea.

Las principales medidas que se tienen que tomar en una impermeabilización son las especificaciones del geotextil y geomembrana para evitar fallas como rupturas y se presenten escurrimientos que puedan perjudicar la obra.

## **BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS**

**Alkorplan. 1995. *Túneles y Obras subterráneas*, Grupo Solvay, España.**

**Calafat, E. 1998. *Dragados y Construcciones, S.A.*, Colombia.**

**Hoek E. & Brown E. 1980. *Excavaciones subterráneas en Roca*. Ed. Mc Graw Hill, México.**

**Linsley E. Ray 1980. *Ingeniería de los Recursos Hidráulicos*, Ed. Continental, México.**

**Rico Rodríguez Alfonso. 1983. *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres***

**Gilluly James & Waters A. 1979. *Principios de Geología*. Ed. Aguilar.**

**Emmons William. 1975. *Geología: Principios y Procesos*. Ed. Mc Graw Hill.**

**AENOR. . 1995. *Sistema de Impermeabilización de Túneles y Galerías*. Norma Española**