



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES "ACATLÁN"**



**"SELLADO DE FILTRACIONES EN TÚNELES A BASE DE  
INYECCIONES DE SILICATOS DENTRO DE UN MACIZO  
ROCO SO DE ORIGEN ÍGNEO."**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A**

**MARÍA DELFINA ROSALES HERNÁNDEZ**



**ASESOR: M.I. IVÁN LUGO OLMOS**

**MARZO, 2004**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

---

---

## ÍNDICE.

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1. ANTECEDENTES.....	5
1. 1. Investigaciones previas.....	6
1. 2. Patrón de esfuerzos alrededor de la excavación del túnel.....	7
1. 2.1. Estabilidad de la excavación.....	8
1. 3. Secciones y revestimiento en túneles.....	9
1. 4. Excavación y soporte.....	11
1. 5. Riesgos geológicos.....	13
CAPITULO 2. CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO.....	15
2.1. Naturaleza discontinua del macizo rocoso.....	16
2.2. Clasificación litológica del macizo.....	18
2.2.1. Características y origen de las rocas ígneas.....	18
2.3. Propiedades de las rocas.....	21
2.3.1. Propiedades índice.....	21
2.3.2. Propiedades geomecánicas.....	23
2.4. Clasificación geomecánica.....	28
CAPITULO 3. PROBLEMAS DEL FLUJO DE AGUA.....	33
3.1. Filtración y circulación de agua a través de un macizo rocoso fisurado.....	33
3.1.1. Permeabilidad de una fractura aislada.....	35
3.2. Efectos del agua; alteración mecánica y química debido a su circulación.....	37
3.3. Influencia de la humedad sobre la resistencia de las rocas.....	38
3.4. Estado de esfuerzos provocado por las presiones del nivel freático.....	39
3.5. Determinación de la permeabilidad de un macizo rocoso.....	39
3.6. Filtraciones hacia túneles.....	41
3.6.1. Casos de filtraciones en túneles.....	43
3. 6.2. Técnicas de sellado (Inyección).....	44
CAPITULO 4. MEZCLAS DE INYECCIÓN A BASE DE SILICATOS, PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS.....	47
4.1. Definición de las mezclas en base a silicatos.....	48
4.1.1. Clasificación de los geles.....	50
4.1.2. Aplicaciones de los geles en rocas.....	51
4.2. Propiedades y características de las mezclas.....	52
4.2.1. Resistencia al corte.....	52
4.2.2. Sinéresis.....	54
4.2.3. Durabilidad.....	54
4.2.4. Tiempo de fraguado.....	54
4.2.5. Contenido de agua.....	58
4.2.6. Deslavado.....	58
4.2.7. Permeabilidad de los geles.....	58
4.2.8. Inyectabilidad de las mezclas.....	59
4.3. Parámetros de diseño.....	59
4.3.1. Viscosidad.....	59
4.3.2. Radio efectivo.....	63
4.3.3. Tiempo de inyección.....	63
4.3.4. Presión de inyección.....	64
4.4. Técnicas de inyección.....	66

---

---

<b>CAPITULO 5. PROCEDIMIENTO DE SELLADO DE FILTRACIONES A BASE DE SILICATOS</b>	
<b>ALREDEDOR DEL PERÍMETRO DE UN TÚNEL.....</b>	<b>69</b>
5.1. Tipos de inyección según la mejora del terreno.....	69
5.1.1. Inyecciones de impregnación (Sello).....	69
5.1.1.1. Método de ejecución.....	70
5.1.1.2. Ventajas.....	72
5.1.1.3 Control.....	72
5.1.1.4. Ejemplos de sellado en rocas.....	72
5.1.2. Inyecciones de compactación o desplazamiento.....	72
5.1.2.1. Aplicaciones.....	73
5.1.2.2. Método de ejecución.....	73
5.1.2.3. Ventajas.....	73
5.1.2.4. Control.....	74
5.1.2.5. Ejemplos de estabilización en roca.....	74
5.1.3. Inyecciones con fracturación.....	74
5.1.3.1. Presión de inyección.....	75
5.1.3.2. Ejemplos de estabilización en roca.....	75
5.1.3.3. Método de ejecución.....	76
5.1.3.4. Control.....	76
5.2. Equipos necesarios en los tratamientos de inyección.....	76
5.2.1. Equipos de perforación.....	77
5.2.2. Equipos de Inyección.....	77
5.2.2.1. Central de mezclado.....	78
5.2.2.2. Sistema de transporte de la mezcla.....	79
5.2.2.3. Equipo de inyección.....	79
5.2.2.4. Líneas de circulación y obturadores.....	81
5.3. Barrenos.....	83
5.3.1. Procedimientos de perforación.....	83
5.3.2. Separación de los barrenos.....	84
5.3.3. Diámetro de los barrenos.....	84
5.3.4. Inclinación de los barrenos.....	84
5.3.5. Métodos de inyección de los barrenos.....	84
5.4. Procedimiento general al realizar la inyección.....	90
5.4.1. Estudios preliminares.....	90
5.4.1.1. Información del terreno.....	90
5.4.1.2. Selección de la clase de inyección y definición de las mezclas.....	91
5.4.1.3. Pruebas de inyectabilidad.....	91
5.4.1.31. Ensayos de agua.....	91
5.4.1.32. Ensayos de inyección.....	92
5.4.1.4. Lavado del terreno.....	94
5.4.1.5. Presiones de inyección.....	95
5.4.1.6. Métodos para el confinamiento de la inyección.....	95
5.4.1.61. Resurgencias.....	96
5.4.1.7. Planos de barrenos y fases de perforación.....	96
5.4.1.8. Prescripciones e instrucciones para la ejecución de las inyecciones.....	97
5.4.2. Ejecución.....	98
5.4.2.1. Preparación de los geles.....	98
5.4.2.2. Inyección de los geles.....	98
5.4.2.21. Programa de trabajos.....	98
5.4.2.22. Replanteo de barrenos.....	99
5.4.2.23. Perforación de barrenos y pruebas.....	99
5.4.2.24. Accesos, instalaciones, obras y medios auxiliares.....	99
5.4.2.25. Ejecución de la inyección.....	100
5.4.2.25.1. Dosificación y preparación de las mezclas.....	100

---

5.4.2.25.2. Transporte de la mezcla desde la mezcladora hasta la bomba de inyección.....	101
5.4.2.25.3. Limpieza y comprobación de los barrenos a inyectar.....	101
5.4.2.25.4. Colocación de obturadores en los barrenos.....	101
5.4.2.25.5. Bombeo de la mezcla a los barrenos.....	101
5.4.2.25.6. Retirada de equipos y limpieza de tajos.....	102
5.4.2.25.7. Precauciones y vigilancia durante las inyecciones.....	102
5.4.2.25.8. Toma y registro de los datos de inyección.....	103
5.4.3. Control.....	103
5.4.3.1. Control de calidad de las mezclas de inyección.....	103
5.4.3.2. Control de la inyección.....	104
5.4.3.2.2. Medida de la permeabilidad después de la inyección.....	104
5.4.3.3. Control de recepción.....	105
5.4.3.4. Control de producción.....	105
5.4.4. Informes.....	106
5.4.4.1. Informes periódicos.....	106
5.4.4.2. Informe final.....	106
5.4.5. Medición y abono.....	106
CONCLUSIONES.....	109
BIBLIOGRAFÍA.....	111
ANEXOS.....	113
Anexo 1. Terminología.....	113
Anexo 2. Tipos de mezclas de inyección.....	117
Anexo 3. Inyecciones del terreno con mezclas de cemento.....	119
Anexo 4. Perforación de barrenos.....	125

---



## INTRODUCCIÓN.

La construcción de obras subterráneas, y el caso especial de túneles a través de formaciones rocosas, ha constituido siempre una empresa de gran complejidad, al estar incluidos en un medio desconocido y en ocasiones inaccesible durante la etapa de su estudio; es por ello, que la construcción de túneles se ve condicionada por factores de riesgo que deben ser tenidos en especial consideración. Pese a todo, la necesidad de este tipo de obras, obliga a afrontar las dificultades que implican su diseño, construcción y puesta en operación.

Son muchos los objetivos utilitarios de los túneles, y dependerá de éstos y principalmente del medio en que se desee construir que existirán dificultades particulares para cada obra, uno de los principales inconvenientes se deriva de la presencia de agua en el terreno y el consecuente problema de filtraciones hacia el interior de la excavación. Afortunadamente, el desarrollo de la técnica de túneles, ha marchado a la par con el adelanto de la geología y con las técnicas de reconocimiento del terreno, con lo cual, hoy nos es posible tener una idea clara y completa del medio en el cual se realizará el proyecto.

Por tratarse el macizo rocoso de un medio discontinuo, siempre existe la posibilidad de encontrar numerosos accidentes geológicos, que condicionarán que al trabajar por debajo del nivel freático, se propicien filtraciones hacia el interior del túnel, lo cual no solo afecta los trabajos de perforación y construcción, sino que perjudica de diferentes maneras a la formación rocosa, y a su estabilidad, y impidiendo se cumpla de manera satisfactoria el objetivo para el cual se proyecta el túnel, llegando incluso a constituirse en un factor de riesgo para la obra en sí misma y para los posibles usuarios.

En rocas encontraremos fenómenos como: fracturamientos, fisuramientos, o fallas; dichos fenómenos pudieron presentarse durante su formación, o son debidos a intemperización física y química, e incluso también pueden ser causados por los explosivos empleados durante su excavación. Estas discontinuidades o fisuras pueden ser de dimensiones variables, contener o no rellenos producto de la descomposición de la misma roca, etc. La existencia de estos huecos en el macizo constituyen vías por las que el agua se puede mover. Se dice entonces que el terreno es permeable. En la mayoría de las rocas, la permeabilidad estará regida por las juntas y fisuras existentes en la misma y en menor grado, debido a su porosidad natural

El presente trabajo busca describir los elementos principales en la construcción de un túnel, los factores que condicionan el comportamiento hidráulico de los macizos rocosos y en especial las características de las rocas de origen ígneo, algunas de las cuales propician filtraciones cuando se excava en el interior del macizo.

Cuando se trata de rocas ígneas, éstas deben la variación de sus características hidrológicas a las diferencias en su composición química, y a las condiciones en que solidificaron; por lo tanto, lo importante será el fracturamiento que presente el macizo en su totalidad, ya que con ello se inducirá un flujo de agua hacia el interior del macizo. En México, las rocas ígneas que presentan una permeabilidad alta, son las formaciones volcánicas jóvenes que sufrieron un proceso muy rápido en su enfriamiento, lo que condiciona un fisuramiento general en este tipo de formaciones.

Actualmente existen diversas formas de contener la afluencia del agua freática al interior de un túnel. El método mayormente empleado es la Inyección, la cual se usa regularmente en obras subterráneas e hidráulicas, reportando éstas resultados satisfactorios.



Los tratamientos de inyección permiten obturar las fisuras existentes y con ello contener la irrupción de agua hacia la excavación subterránea, contribuyendo con esto a un mejor comportamiento del macizo en cuanto a resistencia, estabilidad y funcionalidad.

Para determinar el método de inyección y la naturaleza de la mezcla a inyectar, mejor adaptada al tratamiento que se proyecte, es necesario establecer algunas precisiones sobre el estado de fisuración de la roca y sobre la forma en que circulan las aguas.

Son muchos los factores que determinan el uso de las técnicas de inyección y más aún la elección del tipo de mezcla de inyección a emplear. Existen actualmente a disposición una gran variedad de lechadas y cada una de ellas presenta diferentes propiedades y características, tanto en el desarrollo de la inyección como en la forma que se comportan una vez introducidas al terreno. Toca entonces al Ingeniero decidir cual es la más apropiada, dependiendo del estado de fisuración, el tipo de formaciones, grado de estanqueidad deseada y, por supuesto, los costos.

Las inyecciones en roca normalmente requieren el empleo de una lechada constituida de cemento y agua, sin embargo, la roca finamente fisurada (de aberturas muy reducidas, menores a los 0.5 mm) puede acusar una absorción elevada de agua y, sin embargo, no ser susceptible de tratamiento con lechadas de agua cemento, porque los granos de éste tienen un diámetro mayor que las aberturas de las grietas. Por lo anterior expuesto, entre los diferentes tipos de mezclas existentes destaca una de tipo químico; los geles de silicato de sodio y sus reactivos, los cuales presentan un comportamiento aceptable, tanto en el transcurso de la inyección como en los beneficios que ofrecen en la impermeabilización del medio tratado, llegando a obturar fisuras extremadamente reducidas (0.01 mm).

Los silicatos son productos químicos inorgánicos en forma de cristales amorfos, químicamente son similares al vidrio pero con la característica de disolverse en agua. Se producen en hornos de alta temperatura, mezclando carbonatos de sodio y potasio con arena silícea. Como resultado de esta reacción se obtiene silicato de sodio sólido, que posteriormente puede disolverse y dar lugar a una gran variedad de productos con diferentes propiedades.

El objetivo del presente trabajo es mostrar la alternativa de tratamiento por medio de inyecciones de lechadas en base a silicatos para la obturación de fisuras, fracturas y cualquier tipo de discontinuidad, presentadas en túneles excavados en macizos rocosos de origen ígneo. Se describirán los diferentes procedimientos de inyección, así como las características de las mezclas basadas en silicatos y el equipo necesario para llevar a cabo los trabajos.

En la realización de las técnicas de inyección, se requiere de una información detallada sobre el tipo de obra y el grado de estanqueidad que ésta requerirá, por ello el Capítulo 1 introduce al conocimiento de los principales factores en la construcción de un túnel que de alguna manera se verá afectado con la existencia de flujo de agua en el interior del macizo en que se realizará su excavación, los riesgos que pueden presentarse y se introduce en el problema de filtración de agua hacia el interior de túneles.

El Capítulo 2 muestra las características más importantes de los macizos rocosos, que podrían ser condicionantes de las filtraciones de agua al interior de éstos y cuyo conocimiento es importante para el diseño apropiado de las lechadas y los procedimientos de inyección.

La circulación del agua en el medio es de difícil determinación, el Capítulo 3 busca proporcionar la idealización de cómo ocurre la circulación a través de las fisuras en las rocas y los daños que provoca al macizo y a la estabilidad del túnel, e introducir en el método de inyección para el sellado de filtraciones hacia el interior del túnel.





Las mezclas de inyección en base a silicatos presentan propiedades y un comportamiento característico que debe tenerse en consideración para su correcta aplicación, ésto, además de los parámetros de diseño y las técnicas de inyección para una mezcla química, son presentados en el Capítulo 4.

El Capítulo 5 presenta el procedimiento adecuado de sellado en rocas, el equipo necesario y el control requerido, dependiendo la finalidad que se persigue, siempre desde el punto de vista técnico.

Toda la información contenida en el presente trabajo podrá ser corroborada en las referencias presentadas en la bibliografía incluida al final del mismo. Se incluyeron además, los términos técnicos más usuales en el proceso de inyección, los cuales son presentados en el Anexo 1, las alternativas principales de mezclas en el proceso de inyección, expuestas en el Anexo 2, así mismo, dado que la inyección de cemento es la más empleada, el Anexo 3 ofrece una referencia general de sus aplicaciones y procedimientos. Por último, las técnicas de barrenación y el procedimiento general de perforación se encuentran en el Anexo 4, en caso de requerirse una mayor información sobre estos temas.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: María Delfina Rosales Hernández

FECHA: 30/mar/30/2004

FIRMA:



## CAPITULO 1. ANTECEDENTES.

**Objetivo: “Describir en forma general el comportamiento de túneles excavados en roca de origen ígneo, así como las consideraciones más importantes en la construcción y operación de éstos”.**

La construcción de túneles debe haber sido una de las primeras obras del hombre; es muy posible que los túneles naturales y otros accidentes producidos por la acción del agua, dieran al hombre primitivo la idea de abrirse paso artificialmente a través de las rocas. Un túnel puede definirse como: aquella excavación subterránea hecha en suelo o roca, que se construye por la necesidad de unir dos puntos separados por un accidente geográfico. Se caracteriza por ser una estructura ingenieril con una relación longitud frente a sección muy alta (es decir, eje longitudinal largo con poco desarrollo a lo ancho y a lo alto). Las partes componentes de la sección de un túnel son:

- **Bóveda:** arco superior.
- **Paredes:** laterales del túnel.
- **Piso:** zona inferior. Puede ser horizontal o redondeada (contrabóveda).

Hoy en día los túneles siguen usándose para los mismos fines que antaño; facilitar los transportes y la conducción de agua; pueden encontrarse usos excepcionales, pero, en general, los túneles pueden todavía clasificarse en acueductos y viaductos.

Los túneles se podrían clasificar según su propósito, en dos grupos principalmente:

Túneles para tráfico (Viaductos).

1. Túneles carreteros.
2. Túneles ferroviarios.
3. Túneles urbanos y suburbanos.
4. Túneles para peatones.

Túneles para conducción (Acueductos).

1. Túneles para conducción de aguas negras o potables.
2. Túneles para navegación.
3. Túneles en presas y plantas hidroeléctricas.

La extensión del uso de los canales y la invención de los ferrocarriles iniciaron el gran avance de los últimos cien años, durante los cuales se han construido la mayoría de los túneles ahora en uso. La necesidad de túneles se impone en la construcción de carreteras, ferrocarriles, y canales. Las soluciones dependen especialmente de la naturaleza del terreno, de su resistencia y de la posible presencia de agua.

El proceso de construcción de un túnel resulta ser un problema complicado para el Ingeniero Civil, dadas las dificultades que se presentan en el desarrollo del mismo. Es por esto que en todos los casos se requiere de la suficiente información previa que permita determinar las características del subsuelo, la cantidad de agua que se pueda infiltrar y el aspecto relativo a los deslizamientos que puedan presentarse; para así poder seleccionar el trazo y el equipo de perforación que resulte conveniente en la excavación del mismo.



## 1. 1. Investigaciones previas.

La fase más importante de los trabajos preliminares en el proyecto de túneles, es la exploración cuidadosa de las condiciones geológicas del medio, dado que éstas generarán el conjunto de cargas actuantes en el túnel y serán indicativas del procedimiento constructivo a ser empleado. Es aquí donde se requerirá del asesoramiento del geólogo al considerar la primera alternativa del proyecto, puesto que su trabajo servirá como marco de referencia en la investigación previa de las condiciones en que se anticipa el desarrollo del tuneleo.

La base previa de la investigación consiste en el levantamiento de cortes geológicos exactos a lo largo de todos los trazados posibles del túnel en proyecto. Un buen corte geológico proporciona una predicción correcta sobre la litología, agua, esfuerzos, discontinuidades, fallas, cabalgamientos, diques. Además, habrá que conocer las propiedades de cada unidad: resistencia, contenido en abrasivos, situación del nivel piezométrico, etc.

El paso siguiente, es el conocimiento de las características de la roca que va a encontrarse, decidir si es práctica y económicamente posible la perforación del túnel proyectado, determinar que espesor de roca debe dejarse entre la superficie del terreno y el túnel cuando se trate de conducir agua a presión, juzgar la necesidad y tipo de revestimiento artificial y la de cementar la roca contigua, el porcentaje de arrastre superfluo, programa y métodos de construcción, y el hallazgo de agua subterránea. De modo que es de importancia capital en la construcción de túneles hacer un profundo estudio geológico, antes de comenzar los trabajos. Los problemas geológicos son los únicos que afectarán al trazado y a los métodos de perforación, una vez que se ha fijado la situación aproximada del túnel y sus dimensiones básicas. El número de sondeos de exploración efectuados dependerá de cada caso.

La secuencia del estudio geológico en términos generales, se puede dividir en tres etapas:

1ª. Investigaciones de carácter general, anteriores al proyecto, las cuales incluyen estudios bibliográficos y estadísticos referentes a la morfología, petrografía, estratigrafía e hidrología de la zona. Éstas serán complementadas mediante interpretaciones fotogeológicas y reconocimientos de campo, de donde se podrán obtener en términos generales, las características superficiales de la geología regional, identificando al mismo tiempo los siguientes aspectos: tipos de formaciones rocosas, ubicación de fallas, plegamientos, estructuras geológicas y contactos entre éstas; así como los aspectos hidrológicos prevalecientes, los cuales involucran la localización de ríos, arroyos y manantiales. Por otro lado las cualidades térmicas, químicas y mineralógicas de los manantiales y/o del agua superficial, pueden contribuir con una información importante respecto a la esencia y condiciones del subsuelo.

2ª: La segunda etapa del estudio consiste en la realización de exploraciones geofísicas (métodos geoelectrónicos y geosísmicos) y geotécnicas (barrenación, estudios en galerías y pruebas de laboratorio), desarrolladas paralelamente al planteamiento del proyecto pero anteriores a la construcción, con el fin de obtener una información detallada de las propiedades del subsuelo tales como: resistencia al esfuerzo cortante, deformabilidad, permeabilidad, densidad, etc. La exploración directa debe proporcionar también la ubicación de los estratos, plegamientos, fallas y juntas; y siempre que sea posible, deberán identificarse al mismo tiempo los siguientes aspectos:



- El espaciamiento entre fisuras.
- La abertura y textura de las mismas.
- El grado de alteración de estas juntas.
- Características del material de relleno, cuando exista.

Además se harán investigaciones para determinar la localización y extensión de las aguas subterráneas y en su caso, la eventual determinación de la ocurrencia de gases en el subsuelo.

3ª. La última etapa se refiere al desarrollo de investigaciones geológicas que deben de ser continuadas durante la excavación, no únicamente con el interés de verificar los datos de diseño, sino también para verificar si el método de construcción es correcto o requiere ser modificado.

### **1. 2. Patrón de esfuerzos alrededor de la excavación del túnel.**

Excavación en un macizo rocoso significa alteración de las condiciones de esfuerzos alrededor de la excavación, ya sea mediante voladuras o mediante equipo. Se conviene en denominar estado de esfuerzos virgen o natural al que existe antes de realizar cualquier obra de ingeniería. En los esfuerzos naturales están incluidas las fuerzas gravitatorias, debidas al peso de la cobertura rocosa y el efecto de los esfuerzos latentes, algunas de las cuales se han originado en procesos de cristalización, metamorfismo, sedimentación, consolidación y desecación, según los distintos tipos de rocas, mientras que otras proceden de fuerzas tectónicas y movimientos de la corteza terrestre.

Cuando se excava un macizo rocoso, se modifican las condiciones iniciales del terreno. Los materiales rocosos, en consecuencia, responden ante el cambio en sus condiciones iniciales deformándose y/o rompiéndose. La alteración de las condiciones naturales origina una redistribución de los esfuerzos. Las partículas sufren desplazamiento y se pueden generar planos de fractura a través de las rocas como respuesta a los esfuerzos que se generan al actuar sobre el medio rocoso.

En algunos casos esta alteración introduce esfuerzos que son suficientemente grandes para exceder la resistencia de la roca. En estos casos el debilitamiento de la roca adyacente a los límites de la excavación puede llevar a la inestabilidad de ésta, lo que se manifiesta por el cerramiento gradual de la excavación, derrumbes de techo y desprendimiento de paredes o en casos extremos, estallido de roca (falla frágil).

Mientras la roca esté confinada, no podrán producirse los desplazamientos interparticulares necesarios para que se desarrollen los estados de deformación correspondientes a los esfuerzos actuantes, por lo general éstos se acumulan o almacenan en el material, pudiendo llegar a valores altos. La excavación de un túnel bajo estas condiciones, representa entonces un espacio vacío hacia el que se posibilitan los desplazamientos.

El estado de esfuerzos in-situ en la corteza terrestre es reconocido como un parámetro básico necesario para obras subterráneas en ingeniería. La evaluación cuantitativa de los esfuerzos horizontales en una roca y en un sitio específico no pueden ser sacadas a partir de las fuerzas gravitatorias, y éstas son prácticamente las únicas conocidas. Por consiguiente, el único método práctico para obtener una estimación del estado de esfuerzos consiste en mediciones "in situ".

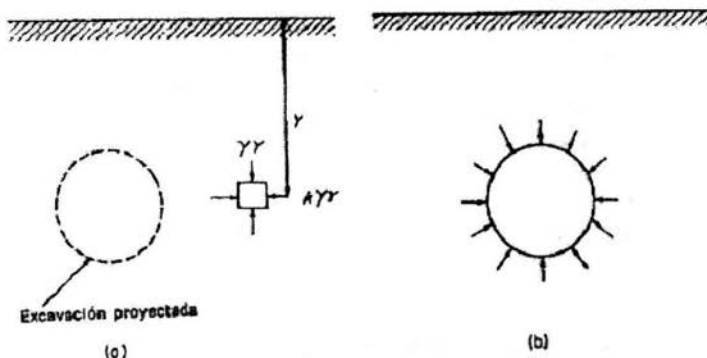


Fig. 1.1 Cálculo de los esfuerzos en las proximidades de una excavación. Se parte del sistema inicial de esfuerzos y se calcula el sistema de esfuerzo – deformación provocado por la eliminación de esfuerzos sobre el contorno de la excavación. (a) Esfuerzos iniciales; (b) Eliminación de la carga de contorno.

Uno de los métodos más comúnmente utilizados para las mediciones “in situ” del estado de esfuerzos, es el de fractura hidráulica. La manera en que se toman los esfuerzos en este método es por medio de barrenos verticales.

Este método básicamente se divide de dos partes. La primera consistiría en una descarga de fluido a una presión controlada en un intervalo del barreno vertical que estamos estudiando, la segunda sería tomar las presiones necesarias para producir los inicios de fractura, cerrado de fractura, mantenimiento de apertura de fractura, o bien la reapertura de una fractura que fue abierta en un ciclo anterior.<sup>1</sup> Esta técnica es una de las muchas que pueden utilizarse en el cálculo de los esfuerzos en una excavación.

### 1. 2.1. Estabilidad de la excavación .

Todo macizo rocoso está sometido a esfuerzos; al modificar el medio, los esfuerzos se liberarán. Al construir un túnel, el sistema responde redistribuyendo los esfuerzos que tienden a deformar el contorno de la excavación, dando lugar a inestabilidades. La estabilidad depende de la resistencia de los materiales, de los esfuerzos y del agua.

Factores influyentes en la estabilidad:

- **Estructura.** Aspectos geológicos estructurales (estructura del macizo rocoso, zonas de unión o juntas, fallas, ángulo de buzamiento)
- **Litología, estratigrafía.** Tipo de roca. Es importante conocer si la discontinuidad es lisa o rugosa y si tiene algún tipo de relleno, y caracterizar geomecánicamente a cada uno de los materiales ( $c$ ,  $\gamma$ ,  $\phi$ ) y estructuras del macizo, así como sus propiedades elásticas ( $E, \mu$ ).
- **Comportamiento hidrogeológico.** Es importante conocer si el material es permeable o impermeable, el tipo de porosidad (1ª o 2ª) o si es un buen drenante.
- **Propiedades mecánicas de resistencia y deformación.** Es muy importante la resistencia de las discontinuidades. Se deben realizar ensayos de resistencia al corte.

<sup>1</sup> Toma de tensiones in situ mediante fractura hidráulica. Luis Manuel de Arriba Segurado. [www.ingenieriageologica.com](http://www.ingenieriageologica.com)



- **Estado tenso - deformacional.** El propio del macizo rocoso; en una excavación de un túnel los esfuerzos tectónicos acumulados tenderán a ser liberados por el hueco creado.
- **Cargas dinámicas y estáticas.** Cargas dinámicas por ondas sísmicas y estáticas. Cualquier tipo de movimiento sísmico, voladura, etc. va a favorecer el deslizamiento del material.

Una de las principales causas de la inestabilidad del terreno en la excavación de un túnel puede provenir de que dicha excavación se haga por debajo del nivel freático de la zona

### 1. 3. Secciones y revestimiento en túneles.

El perfil transversal depende de la función de la obra, que condiciona las dimensiones del galibo libre interior que constituye su hueco, y de la naturaleza del terreno, que determina el revestimiento necesario para proteger el vacío interior. En principio, y salvo en terrenos rocosos compactos de excelente comportamiento, los túneles deben revestirse siempre.

Por lo tanto, intentando hacer una descripción de los principales factores que intervienen en la determinación de la geometría de la sección y revestimiento del proyecto, se puede decir lo siguiente:

#### a) La finalidad o uso específico que se va a dar al túnel.

Al iniciar el proyecto se debe definir el objetivo del mismo, con lo cual queda establecido el servicio que va a prestar el túnel. Según su propósito un túnel puede clasificarse en dos grupos principales, ya definidos:

- Túnel para tráfico (Viaductos).
- Túnel para conducción (Acueductos).

Estos dos grupos comprenden los diferentes tipos de túneles, para cada uno de ellos existen especificaciones particulares que permiten limitar las dimensiones máximas o mínimas que pueden tener estos, dependiendo de su propósito.

En los túneles de acueductos, la sección circular es la más económica desde el punto de vista hidráulico, pero, atendiendo a las necesidades de la construcción, suele preferirse la sección en forma de herradura con una contrabóveda convexa. Usualmente la bóveda de los túneles es un arco semicircular, incluso en roca completamente sólida, pero el resto de la sección obedece a consideraciones económicas.

#### b) Geología de la zona correspondiente al trazo del túnel.

El contorno de la sección transversal definitiva de un túnel depende de la roca en que se abra. Éste es uno de los aspectos de mayor importancia en lo relativo al dimensionamiento geométrico, dado que las condiciones geológicas imperantes en el sitio por el cual se intente construir el túnel, determinan las propiedades mecánicas del subsuelo circundante al mismo, lo cual conduce finalmente a definir las condiciones de carga que se desarrollarán sobre el revestimiento a emplearse. La magnitud de las cargas externas, por ejemplo: la presión de roca, depende de la resistencia de la masa rocosa, y por otro lado, puede estar totalmente sujeta a la



relación entre las presiones verticales y horizontales que actúan en la masa en que se excavará el túnel.

Los perfiles transversales difieren según el terreno. En buen terreno (roca sana) se utilizan generalmente bóvedas de medio punto (Fig. 1.2). En terrenos menos resistentes se utilizan secciones más aproximadas a la forma ovoidal, ensanchándolas, inclinando los muros y añadiendo una solera interior. En otros casos, se realiza la bóveda dándole una forma ojival. En las ciudades es frecuentemente forzoso, a causa de la falta de altura, rebajar las bóvedas aumentando su espesor, como ocurre en los túneles urbanos.



Fig. 1.2 Secciones transversales en túneles en base al tipo de terreno.

### c) Método constructivo a emplear.

Este es otro aspecto importante en lo relativo al dimensionamiento geométrico de la sección; ya que el método constructivo a ser empleado deberá seleccionarse de acuerdo con las condiciones geológicas del macizo rocoso en el cual será excavado dicho túnel, considerando la disponibilidad del equipo más conveniente para llevar a cabo la construcción, así como tiempo y costo.

Se puede presentar el caso en que dadas las condiciones geológicas del subsuelo y la disponibilidad de equipo, el método constructivo determine la geometría de la sección. Tal es el caso que se presenta cuando se decide la utilización de excavadoras integrales (TBM o rozadoras) en masas rocosas, pues estos equipos obligan a una sección circular del túnel.

Cuando se utilizan métodos convencionales con uso de explosivos, se tiene mayor flexibilidad en la selección de la geometría de la sección excavada, pero aún así, los equipos de barrenación y rezaga pueden influir en la forma de la sección aparte de las condiciones mecánicas de la masa rocosa, las cuales juegan un papel principal en estos casos.

### d) Características del revestimiento a emplear.

El material excavado debe ser protegido, cuando sea necesario, contra la continua exposición al agua y, posiblemente, al aire.

Podemos considerar el revestimiento de los túneles desde dos puntos de vista, que corresponden a los dos principales usos a que se destinan estas obras. En túneles para carreteras o ferrocarriles puede ser necesario un revestimiento para sostener la presión del terreno en que se ha excavado y, asimismo, para recubrir la roca que queda expuesta, a fin de proteger contra la meteorización (y, acaso, también contra los gases y vapores desprendidos por las locomotoras y los automóviles). Los túneles para conducción de agua deben revestirse con frecuencia para que presenten una superficie lisa al paso del agua. También puede ser necesario un revestimiento impermeable para impedir las infiltraciones de agua de las rocas contiguas, si éstas son porosas o



están fisuradas. En resumen, los túneles dedicados a conducir agua se revisten generalmente sin tener en cuenta la clase de roca que atraviesan, mientras que los destinados al tráfico pueden o no necesitar esta medida adicional para su terminación.

#### e) Tipo de soporte.

Éste será otro de los aspectos que habrá que considerar en el dimensionamiento geométrico, puesto que partiendo de la magnitud de los esfuerzos que se puedan desarrollar, deberá seleccionarse el tipo de soporte más adecuado a las condiciones de carga a las que vaya a estar sujeto, tomando en cuenta las características específicas de resistencia a la compresión, flexión, y tensión del material que constituya dicho soporte

La aplicación sistemática de una metodología de análisis de todos los factores antes descritos, llevará a establecer la geometría de la sección y el revestimiento más conveniente a las condiciones y propósitos del proyecto.

### 1. 4. Excavación y soporte.

#### Excavación.

En la terminología de la construcción se aplica la palabra roca a un agregado natural de partículas minerales que requiere de explosivos para su excavación. Cuanto más dura sea la roca mejores condiciones tiene pero será más caro extraerla, especialmente si tiene alto contenido en abrasivos como el cuarzo.

La roca tiene que fracturarse con voladura antes de poder excavarla. De hecho no puede separarse la historia de las obras en roca de la historia de los explosivos. La roca ígnea, como el granito o el basalto, se disgregan con cierta facilidad y requieren menos explosivos que las rocas blandas. Adicionalmente en la roca ígnea dura se transmiten las ondas de choque a mayor distancia que en los materiales más blandos o menos densos. Las rocas ígneas de grano fino suelen romperse más cerca de la sección teórica.

Dentro de los métodos de excavación de túneles la excavación mecánica, entendiéndose como tal la que se realiza a plena sección mediante la acción directa y continuada de útiles y herramientas de corte sobre el terreno a excavar es sin duda, la que ofrece mayores posibilidades de desarrollo y expansión. Permite realizar la excavación alterando en pequeña medida las características resistentes iniciales del terreno, integrando desde el primer momento el revestimiento al proceso constructivo.

Ahora bien, el o los métodos de perforación que se utilicen en la excavación de un túnel dependerán de las características que presente el subsuelo, del equipo disponible y de la geometría del mismo.

Una clasificación de los métodos de perforación comúnmente empleados puede ser la siguiente:

#### a) Métodos convencionales de barrenación y voladura.

- Método de Sección Completa.
- Método de Galería y Banqueo (media sección).
- Método de Túnel Piloto.





b) Método con equipo integral.

- Método con TBM.
- Método con rozadora.

Los costos y los riesgos físicos de la excavación en roca dependen de que la roca esté sana, fracturada o intemperizada.

**Soporte.**

Las obras que se realizan en roca requieren a menudo del empleo de soportes artificiales para sostener la presión y contrarrestar los esfuerzos, generados alrededor de la excavación.

Para mantener estable la excavación subterránea suele ser necesario emplear elementos auxiliares de retención, los cuales modifican el estado de esfuerzos creados por la excavación, de tal modo que sea aceptable a las condiciones esfuerzo – deformación de la roca y a las características del sistema de soporte empleado.

La selección del sistema de soporte que se requiera para la estabilización de un túnel dependerá específicamente de las propiedades del macizo rocoso, de la forma y tamaño de la excavación y del método constructivo empleado. Los sistemas de soporte pueden clasificarse en dos grupos principalmente de acuerdo a su función, siendo estos:

- a) Provisionales, cuya función principal es mantener estable la excavación durante el tiempo de construcción,
- b) Definitivos, con los cuales se da el acabado y protección final de la excavación.

Otra distinción que puede hacerse entre estos soportes, se refiere al hecho de que algunos de éstos son soportes externos y otros son internos. Los primeros son aquellos que se colocan en el exterior de la masa rocosa manteniéndola estable, y los segundos son aquellos en los que se lleva a cabo un reforzamiento interno de la masa rocosa ya sea mediante la aplicación de inyecciones o utilizando sistemas de anclaje y concreto lanzado, en donde la aplicación de estos últimos ha tenido un amplio desarrollo en la construcción de túneles europeos excavados en roca y suelos duros.

Las características que debe satisfacer un sistema de soporte son:

- Ser compatible con los métodos de construcción, es decir, debe colocarse en congruencia con el o los métodos de excavación, y programado de tal forma que su instalación sea lo más fácil y rápidamente posible de acuerdo con el avance y ciclos de trabajo.
- Tener flexibilidad y resistencia adecuada. O sea, que el sistema de soporte tenga la flexibilidad que permita que los bloques de roca en la vecindad de la excavación se muevan lo que requiera la redistribución de esfuerzos generada. Además, deberá tener una resistencia suficiente para soportar la carga debida al aflojamiento del subsuelo.

Por otra parte, no existe ningún procedimiento que se considere preciso para diseñar el o los sistemas de soporte. Puesto que si una teoría resulta razonable para una situación idealizada, su utilidad práctica está casi siempre restringida al caso en que se apoyó su desarrollo, debido a la



variación de parámetros que intervienen en el comportamiento del subsuelo y en los procedimientos de construcción empleados.

Por tanto, de la experiencia obtenida hasta el momento en la construcción de túneles, los sistemas de soporte comúnmente empleados son los siguientes:

- Marcos metálicos.
- Concreto lanzado y sistemas de anclaje.
- Dovelas de concreto.
- Concreto simple o armado.

### 1. 5. Riesgos geológicos.

Las condiciones ideales de un túnel son encontrar una sola clase de roca fácilmente excavable, que no tuviera grietas llenas de agua y que no se descompusiera expuesta al aire. Desgraciadamente, esto es imposible por lo que entre los riesgos a considerar se encuentran:

- **Alterabilidad.** Naturaleza de los productos de alteración de la roca, afecta sólo a las zonas de poco recubrimiento y presencia de agua.
- **Fracturas.** No es un riesgo pero sí un problema potencial de filtraciones. Las fallas y la descomposición de la roca disminuyen rápidamente con la profundidad.
- **Riesgo sísmico.** El movimiento sísmico del suelo se debe al paso a su través de ondas elásticas producidas al liberarse bruscamente la energía acumulada en un punto o foco. Las causas de estos movimientos pueden ser muy variadas: explosiones, deslizamientos, actividad volcánica, inyección o extracción de fluidos del terreno, llenado de embalses, actividades mineras, y actividades tectónicas. Vibraciones debidas a movimientos sísmicos, pueden reducir la resistencia al corte de materiales debidamente cementados, en un túnel se siente menos, ya que las ondas superficiales que son las dañinas no afectan a los túneles que se encuentran bajo superficie.
- **Filtraciones.** Es uno de los riesgos principales; no solo interfiere en la fase constructiva del túnel, dificultando enormemente los trabajos, sino que podría repercutir en la operación óptima e incluso presentar inseguridad en el uso de este tipo de estructuras. Este aspecto será analizado detalladamente en el presente trabajo.

Ahora bien, la presencia de tales infiltraciones durante la construcción del túnel se dará en los casos en que éste atraviese formaciones acuíferas, que generalmente están formadas por rocas fracturadas; o sea, que la magnitud de estas infiltraciones será determinada principalmente por la formación rocosa en la que se excave el túnel; es decir, la estratigrafía, tipo de roca o su grado de alteración, que definen las características específicas para el problema en cuestión y que son la permeabilidad y la porosidad. Las fallas, anticlinales, sinclinales y otras estructuras geológicas pueden acumular agua, por lo que deberán tenerse en especial consideración.

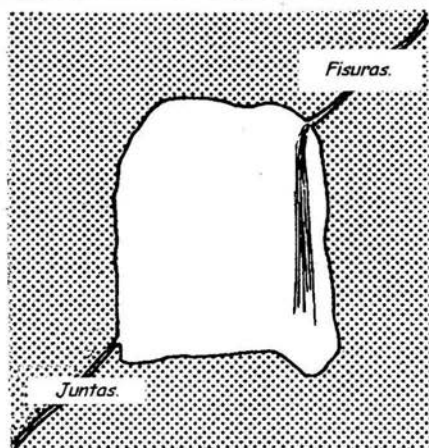


Fig. 1.3 Idealización de la filtración de agua desde una fisura hacia la excavación.

Por lo tanto, no debe emprenderse ningún gran trabajo de ingeniería mientras no se conozca algo sobre el nivel del agua subterránea y su probable caudal en el lugar de las obras.

Por lo anteriormente expuesto, el conocimiento del macizo rocoso es de importancia capital en la realización de cualquier proyecto de excavación, pues sus características influirán de manera determinante en la realización del mismo; en el capítulo siguiente se exponen las propiedades a considerar para el estudio del macizo rocoso que de muchas maneras influyen en el comportamiento hidráulico del mismo.

## CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO.

**Objetivo:** “Describir las características principales que definen el comportamiento hidráulico dentro de macizos rocosos, para determinar los factores que influyen en las filtraciones a un túnel.”

El hombre ha tenido que enfrentarse desde edades prehistóricas con las propiedades físicas de los macizos rocosos. Pero es recientemente cuando los ingenieros se han visto obligados a considerar en detalle las propiedades de los macizos rocosos, ya que es ahora cuando las estructuras tienden a alterar los esfuerzos existentes en las rocas de manera significativa.

### Contraposición "Roca intacta" — "Macizo rocoso"

*Macizo Rocosos = Roca Intacta + Discontinuidades.*

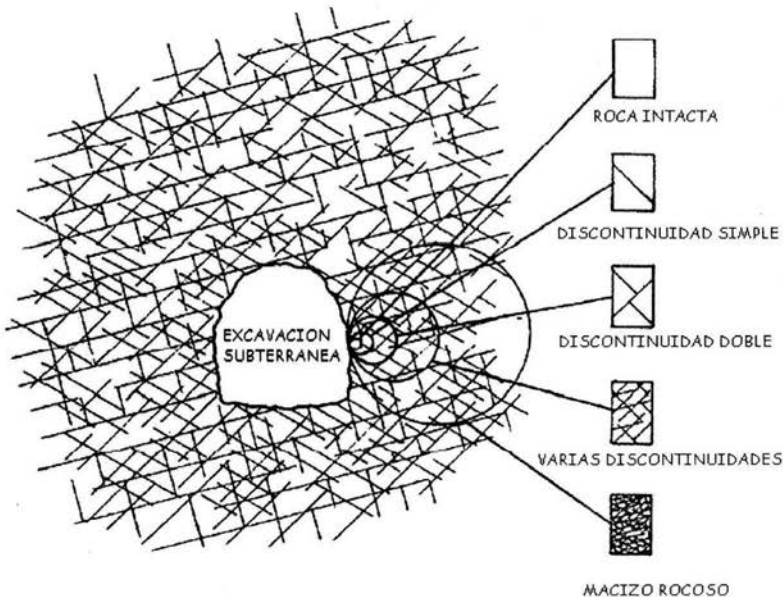


Fig. 2.1 "Lo importante en el macizo rocoso es lo que no es roca"

*Roca intacta.* Se entiende por roca intacta aquella de la cual pueden tomarse muestras para su ensayo en el laboratorio, no presentando características estructurales de gran escala, como discontinuidades, planos de estratificación, fracturas y zonas milonizadas.

*Macizo Rocosos.* Conjunto de la matriz rocosa o bloques de roca intacta y de las discontinuidades de diversa génesis y tipología. En un macizo rocoso puede haber agua en las discontinuidades y/o en los poros de la matriz rocosa.



## Comparación de algunas propiedades:

Resistencia:  
Muestra intacta > macizo rocoso  
Permeabilidad:  
Muestra intacta < macizo rocoso  
Deformabilidad:  
Muestra intacta > macizo rocoso

### 2.1. Naturaleza discontinua del macizo rocoso.

En su mayoría, las rocas de la corteza terrestre muestran varios tipos de discontinuidades geológicas:

- a) Folioaciones primarias. Tienen su origen antes de la litificación, es decir durante la deposición. Ejemplos: estratos, flujo magmático.
- b) Folioaciones secundarias. Tienen su origen después de la litificación: todos los planos, los cuales se han formado a causa de fuerzas tectónicas presentes en la corteza terrestre. Ejemplos: discontinuidades, fallas, fracturas y fisuras.

**Discontinuidad:** es el término utilizado para designar cualquier plano de discontinuidad mecánica o de origen en un macizo rocoso con una resistencia a la tracción muy baja o nula.

La presencia de discontinuidades de diverso tipo confieren al macizo rocoso un comportamiento discontinuo con propiedades geomecánicas heterogéneas y carácter anisótropo, dependiendo fundamentalmente de la orientación y frecuencia de los planos de discontinuidad. También la propia matriz rocosa presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral.

En un macizo rocoso la resistencia de los materiales depende de las discontinuidades. La intersección de discontinuidades es desfavorable para la seguridad. La resistencia resulta de la suma de la resistencia de la matriz y la del macizo.

La importancia relativa de cada uno de estos factores sobre el comportamiento de la roca depende principalmente de la relación entre las dimensiones de la obra de ingeniería a realizar y la separación entre las discontinuidades.

#### Terminología descriptiva para la separación entre c/u de las discontinuidades.

Término descriptivo.	Separación
Muy juntas.	Menor de 5 cm.
Próximas.	5 cm. – 30 cm.
Bastante próximas.	30 cm. – 1 m
Separadas.	1 m a 3 m
Muy separadas.	Mayor de 3 m

Tabla 2.1 Separación entre discontinuidades.

Las fracturas simples, según las cuales se observa que no ha ocurrido desplazamiento alguno, se llaman juntas o uniones. Una junta puede ser abierta o cerrada y puede no ser visible. Las juntas que presentan las rocas ígneas tienen relación con la contracción que sufrieron al enfriarse o los cambios estructurales de las mismas. Las fracturas están algunas veces rellenas con rocas ígneas más modernas que han penetrado en las grietas en estado fluido, o con minerales



que se han separado de la solución por cristalización, se encuentran notables formaciones intrincadas de este tipo con fisuras rellenas tan pequeñas que apenas son visibles.

Anchura de la abertura	Descripción
< 0.1 mm	Muy estrecha
0.1 a 0.5 mm	Estrecha
0.5 a 2.5 mm	Moderadamente ancha
2.5 a 10 mm	Ancha
> 10 mm	Muy ancha
1 a 10 cm	Grande
10 a 100 cm	Muy grande
> 1 m	Cavernosa

Tabla 2.2 Clasificación de las aberturas.

La presencia de discontinuidades estructurales a diversas escalas en el macizo rocoso complica su comportamiento en alto grado. Al describir una fisura o discontinuidad se deben comprender las siguientes observaciones sobre las características superficiales:

- Echado.
- Dirección.
- Continuidad.
- Espesor y naturaleza del material de relleno.
- Separación entre discontinuidades.



Fig. 2.2 Medición del rumbo y echado.

Los dos términos, echado y dirección, se utilizan para describir la posición espacial de las capas de roca respecto a la superficie del suelo. La dirección de un estrato es la de una línea horizontal trazada en el plano de estratificación. El echado es el ángulo que con el horizonte forma la línea de máxima pendiente de la capa; de modo que nos mide su inclinación con relación a un plano horizontal, como se muestra en la Fig. 2.2.

Se requiere esta información si se proyecta una excavación en roca o se requiere calcular la resistencia de un macizo rocoso.

## 2.2. Clasificación litológica del macizo.

La génesis condiciona las propiedades y el comportamiento geomecánico de las rocas y macizos rocosos, así como en ocasiones los sistemas de discontinuidades que los afectan

### Clasificación

Desde el punto de vista genético

- Sedimentarias
- Metamórficas
- Ígneas

El ingeniero tiene un interés natural en el estudio de las rocas por el uso que ha de hacer de ellas, no solo como materiales de construcción, sino también como fundamento de muchas de las estructuras que proyecta y erige. La composición mineral y el tipo y origen de las rocas es también importante para el ingeniero, pues afecta en cierto grado a todas las aplicaciones de la ingeniería.

### 2.2.1. Características y origen de las rocas ígneas.

Las rocas ígneas se han formado por el enfriamiento de partes de la masa de material fundido, llamado, en general, magma, que ha surgido de la corteza o quedado atrapado en ella.

Son de dos clases principales: extrusivas (que han salido a la superficie) e intrusivas (grandes masas de rocas que se han consolidado sin contacto con la atmósfera). Se presentan en diferentes formas, cuyos principales tipos están indicados en la Fig. 2. 3.

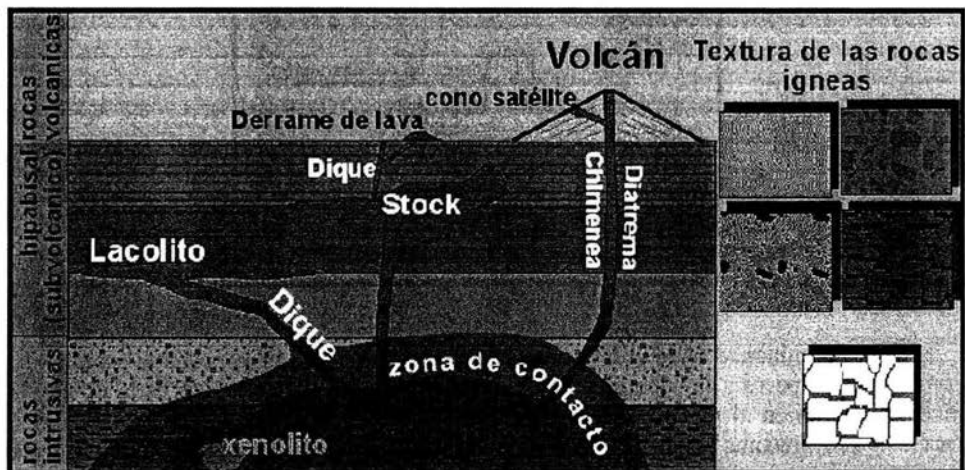


Fig. 2.3 Diversas disposiciones de las rocas ígneas.

Inicialmente, ambas clases eran rocas fundidas, su estado presente es resultado directo del modo como se solidificaron. Si ocurrió una violenta erupción volcánica, pudo ser lanzado a la atmósfera algo de material junto a emanaciones gaseosas, enfriarse en ella rápidamente y caer al suelo en forma de polvo y cenizas volcánicas.



El principal producto de la acción volcánica es del tipo de la colada lávica, emitida como corriente fundida que se desliza sobre la superficie del suelo hasta que se solidifica. Las rocas extrusivas suelen distinguirse por su textura y por el recocado de los estratos rocosos sobre los que hayan corrido.

Las rocas intrusivas, que se enfrían y solidifican a grandes profundidades y presiones, encierran gases y suelen ser, en general, completamente cristalinas (holocristalinas) pues esas condiciones de enfriamiento favorecen la formación de cristales. Tales rocas se presentan en masas de gran extensión y a veces alcanzan profundidades desconocidas. Aunque siempre se forman a gran profundidad, las rocas intrusivas afloran en grandes extensiones a causa de los movimientos de la corteza terrestre y de los procesos de erosión.

Las rocas hipoabisales ocupan un lugar intermedio entre las extrusivas y las intrusivas profundas, y, es por eso, en general, que tienen textura parcialmente cristalina.

La composición química y mineral, en combinación con su proceso de solidificación, se ha adoptado como base para la clasificación general de las rocas ígneas, como se presenta en la Tabla 2.3. El bióxido de silicio (sílice), con frecuencia cristalizado en forma de cuarzo, es uno de los principales constituyentes minerales de las rocas ígneas. Las rocas ígneas como el granito, se formaron por el sobrecalentamiento, bajo grandes presiones de elementos básicos, y con el enfriamiento lento natural de esa materia fundida después de haberse introducido entre otras rocas. El enfriamiento lento permitió la formación de cristales grandes o fenocristales. Ciertas rocas ígneas, como el basalto, difieren del granito, del cual han salido por extrusión, de los volcanes o de las fisuras existentes en la corteza terrestre, formando corrientes o lagos de lava en los alrededores. Cuando el enfriamiento es demasiado rápido, la roca resultante es afanítica.

	Ácidas	Neutras		Básicas
	Con cuarzo abundante	Con poco o ningún cuarzo		Sin cuarzo
<b>Minerales más comunes</b>	Ortoclasa Oligoclasa Mica Hornblenda Augita	Ortoclasa Biotita Hornblenda Augita	Plagioclasa Biotita Hornblenda Augita	Plagioclasa Olivino Hiperstena Augita
<b>Plutónicas</b>	Granito	Sienita	Diorita	Gabro
<b>Hipoabisales</b>	Pórfido riolítico	Pórfido de sienita porfídica o pórfido sienítico	Pórfido diorítico o andesítico	Dolerita
<b>Volcánicas</b>	Riolita	Traquita	Andesita	Basalto

Tabla 2.3 Clasificación de rocas ígneas.

La mayoría de las rocas ígneas tienen una estructura densa, bien encajada, con muy pequeñas diferencias de su dirección en las propiedades mecánicas (con excepción, de muchas rocas volcánicas superficiales, rocas intrusivas subsuperficiales, y algunas intrusivas profundas, como los granitos gnéisicos, que presentan una estructura riolítica en la periferia de la intrusión).





Por tanto, en las rocas ígneas hay que diferenciar entre las volcánicas y las plutónicas. Los dos grupos pueden tener propiedades hidrogeológicas muy diferentes, que influyen de manera distinta en la posibilidad de filtraciones.

Las propiedades hidrogeológicas pueden ser muy variables entre las rocas volcánicas. Éstas pueden poseer una porosidad pero también vacíos de otro tipo. Se puede esperar varios tipos de vacíos que pueden producir una permeabilidad elevada de la roca ígnea extrusiva, como por ejemplo:

- **Burbujas:** Provocadas por los gases en la lava. Si las burbujas (poros) son conectados entre sí, la roca puede ser permeable (tezontle, espumas basálticas).
- **Flujos:** En zonas de basalto hay que esperar varios estratos de diferentes corrimientos de lava uno encima del otro. Algunas de estas capas pueden ser más porosas que otras. El contacto entre dos flujos puede ser una zona favorecida para el traspaso de agua, sobre todo, cuando hay una diferencia de la edad notable entre los distintos mantos. En este caso se puede esperar la formación de suelos o la deposición de sedimentos aluviales en la parte superior del estrato antiguo, los cuales quedan enterrados posteriormente por una capa de lava más joven. Estas intercalaciones de sedimentos pueden representar zonas permeables dentro de una secuencia de basaltos. También se pueden imaginar intercalaciones de rocas piroclásticas (probablemente con una permeabilidad más alta que el basalto) entre dos flujos de lava. Dependiendo de la composición de la lava y del modo de la erupción, se observan mantos de lava muy líquida ("pahoehoe") o corrimientos de lava más viscosa que forma bloques ("aa"). La lava tipo "aa" puede tener más vacíos (y entonces una mayor permeabilidad) que la lava tipo "pahoehoe". La presencia de una colada de lava basáltica puede indicar la posible presencia de un diaclasado columnar y llamar la atención sobre los problemas con él relacionados.
- **Fisuras:** Durante el enfriamiento de la lava se pueden abrir grietas que atraviesan gran parte de la roca (otras fisuras, fallas y discontinuidades se pueden abrir posteriormente como en cualquier otra roca consolidada). El enfriamiento de la superficie del flujo volcánico puede formar arrugas y grietas que pueden ser enterrados y conservados por erupciones posteriores.
- **Tubificación:** Por debajo de la superficie fría de la lava, el material se puede mantener líquido. Estos flujos de lava subsuperficiales pueden dejar tubos o túneles de gran extensión que son ideales para la escorrentía del agua subterránea.
- **Cojines:** Erupciones subacuáticas forman "cojines de lava", bloques más o menos redondos. Entre estos glóbulos se pueden mantener espacios vacíos y el contacto entre los "cojines" puede ser una zona más débil con una permeabilidad elevada comparada con el "cojín".

En general, se puede decir que una lava que produce flujos extensos tiene una mayor probabilidad de formar algunos de los vacíos nombrados, en cambio, en el caso de una lava más viscosa que no produce grandes flujos (como lava riolítica o dacítica) no se espera una gran cantidad de estos tipos de vacíos y por lo tanto tampoco una gran permeabilidad.

Mientras las rocas volcánicas pueden tener una porosidad notable, las rocas plutónicas tienen una porosidad prácticamente nula. Cuando se analizan muestras de un granito en el laboratorio se detectan valores para el traspaso de agua de un rango de 0.01ml/día o menos. Mientras que en ensayos realizados en el terreno, en la zona de afloramiento de la misma roca indican valores de 100 mm/día o incluso más.



Las partes superiores de un plutón expuestas a la meteorización, regiones muy fracturadas por procesos tectónicos o áreas de alteraciones hidrotermales son las zonas de una roca plutónica donde se puede esperar una permeabilidad elevada. Esto significa, que cualquier permeabilidad que tenga una roca plutónica depende únicamente de las fracturas y fisuras que posee. Estos vacíos pueden ser grietas de enfriamiento tanto como otras fracturas, discontinuidades o zonas de fallas.

### 2.3. Propiedades de las rocas.

Debido a la gran variedad de rocas con diferentes estructuras, fábricas y componentes, hay un gran número de parámetros que se pueden usar para la descripción cuantitativa y clasificación geomecánica de la matriz rocosa y de la roca intacta.

#### 2.3.1. Propiedades índice.

Las propiedades físicas de las rocas se determinan de forma cuantitativa en el laboratorio con probetas de roca intacta o en ensayos de campo, para aplicaciones relacionadas principalmente con el comportamiento de la *roca matriz*, y no para el macizo rocoso (discontinuidades). Entre las propiedades índices podemos definir:

**Porosidad:** Es la proporción del volumen de huecos con relación al volumen total (%), índice de la calidad de la roca:

$$n = \frac{v_p}{v_t}$$

Valores típicos en rocas ígneas:

Factor responsable: fisuras

Normalmente:  $n < 12\%$  (0.1% en granito, diabasa)

$n$  aumenta con la edad (desgaste) hasta  $n < 20\%$  o más

Cambios de densidad al pasar del estado seco al saturado

Decrece con la profundidad y con la edad de las rocas.

Los poros pueden ser microfisuras o grietas en la matriz rocosa.

La porosidad está relacionada con las propiedades resistentes de las rocas.

**Densidad:** Peso unitario o peso específico. Añade información acerca de la composición mineralógica, tiene una relación directa con la resistencia.

**Permeabilidad:** Puede definirse como la capacidad de la roca para permitir el paso del agua. Permite evaluar la interconexión relativa de los poros. La presencia de fisuras altera radicalmente la permeabilidad de la roca matriz obtenida en el laboratorio por lo que son necesarios ensayos de bombeo "in situ"

El cambio en la permeabilidad ocasionado por cambios en los esfuerzos normales (especialmente compresión-tensión) permite estimar el grado de fisuración.

La mayoría de las rocas siguen la ley de Darcy:

$$q_x = k \frac{dh}{dx} A$$



donde:

- $q$  = caudal en la dirección  $x$  (volumen/tiempo);
- $h$  = altura hidráulica;
- $A$  = sección normal a  $x$ ;
- $k$  = conductividad hidráulica.

**Durabilidad:** Indica la tendencia a la descomposición de los componentes o estructuras, con la consecuente degradación de la calidad de la roca: tendencia a la rotura de los componentes o de las estructuras.

Las propiedades de la roca se ven alteradas debido a exfoliación, hidratación, oxidación, abrasión, etc.

**Alterabilidad:** % de material después de varios ciclos destructivos.

**Resistencia:** Determina la competencia de la matriz rocosa para mantener unidos sus componentes, competencia del material ante la rotura. Se obtiene en laboratorio o a partir de índices o ensayos de campo (PLT).

**Velocidad de transmisión de ondas:** Relativamente fácil de determinar, tanto ondas transversales como longitudinales.

La velocidad de transmisión depende en teoría únicamente de las propiedades elásticas y de la densidad.

Una red de fisuras superpuesta a la roca matriz tiene un efecto predominante. Por lo tanto, la velocidad de transmisión de ondas puede servir como índice del grado de fisuración de una roca.

El efecto de las discontinuidades del macizo rocoso puede estimarse comparando la velocidad in situ de ondas de compresión con la velocidad sónica determinada en laboratorio para un testigo inalterado extraído de la misma roca. Para una roca masiva de excelente calidad, con solo unas pocas discontinuidades cerradas, la velocidad relativa debe ser próxima a la unidad. Al aumentar el grado de fisuración y fracturación, la velocidad relativa disminuye a valores inferiores a la unidad.

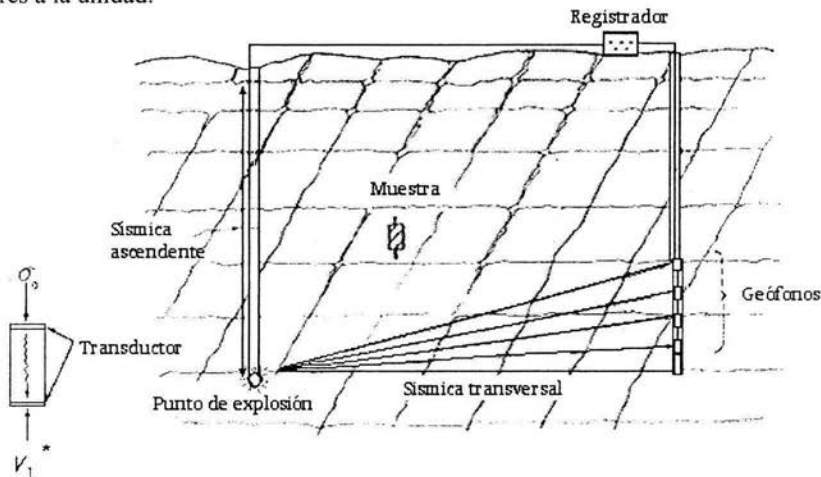


Fig. 2.4 Medida de la velocidad sónica.



**Índice de calidad:**

$$IQ(\%) = \frac{V_l}{V_l^*} \times 100\%$$

siendo  $V_l$  la velocidad real de transmisión de ondas en la muestra,

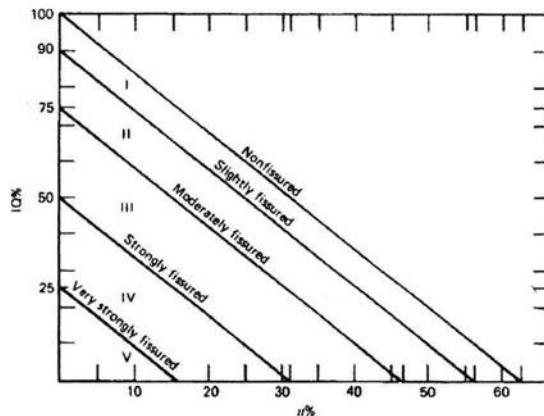
$V_l^*$  la velocidad de transmisión de ondas de una muestra del mismo material sin poros ni fisuras.

**Valor típico de  $V_l^*$  de rocas ígneas**

Roca	$V_l^*$ m/s
Basalto	6500 -7000
Granito	5500 - 6000
Gabro	7000
Diorita	4600
Sienita	5000
Peridotita	7000
Dunita	7000
Diabasa	6500

**Tabla 2.4 Velocidad de transmisión de ondas para diferentes rocas.**

Dado que el IQ depende mucho del grado de fisuración, se ha propuesto un ábaco IQ-porosidad que sirve de base para la clasificación de una muestra de roca según su grado de fisuración (fig. 2.5).



**Fig. 2.5 Sistema de clasificación por fisuración en especímenes de rocas.**

**2.3.2. Propiedades geomecánicas.**

El comportamiento deformacional y la resistencia del macizo están definidos, en primera instancia, por las propiedades y características geológicas de los materiales rocosos, anteriormente expuestas, y que son las que van a condicionar a su vez las propiedades geomecánicas, es decir las propiedades que definen el comportamiento mecánico de las rocas.



## Parámetros que definen el comportamiento geomecánico de las rocas.

**a) Resistencia:** Esfuerzos o cargas máximas que resiste una roca bajo condiciones determinadas. La resistencia viene dada por las fuerzas cohesivas y friccionantes del material que son los elementos fundamentales de la ley de resistencia que quiera utilizarse: Mohr – Coulomb, Panek, Coulomb – Nawiev, Hoek y Brown.

**Cohesión:** Fuerza de unión entre las partículas minerales (c).

**Ángulo de fricción interna:** Ángulo de rozamiento entre dos superficies de roca ( $\phi$ ).

La resistencia máxima se denomina resistencia de pico, después de haberse alcanzado la resistencia de pico la roca puede tener todavía alguna capacidad de carga o resistencia; la mínima, o resistencia residual, se alcanza generalmente tras una deformación considerable posterior a la resistencia de pico.

La máxima carga que es capaz de soportar una probeta no confinada antes de su rotura es su resistencia a compresión simple, expresada con respecto al área de aplicación de la fuerza, en unidades de esfuerzo o tensión (fuerza/superficie).

**Esfuerzo ( $\sigma$ ).** Respuesta interna de un cuerpo a la aplicación de una fuerza o a una modificación del campo de fuerzas que actúan sobre él. Fuerza por unidad de área. Unidades de esfuerzo o presión:  $\text{kp/cm}^2$ , MPa,  $\text{mN/m}^2$ , etc.

**Esfuerzo Efectivo ( $\sigma'$ ).** Es el esfuerzo que gobierna la respuesta mecánica del material rocoso con agua. Es función del esfuerzo total aplicado y de la presión de agua (u) en los poros o fisuras del material (presión de poros).

$$\sigma' = \sigma_T - u.$$

**Fractura.** Formación de planos de separación en el material rocoso. Implica la rotura de enlaces para formar nuevas superficies, perdiéndose la fuerza cohesiva y manteniendo solo su resistencia friccional. Fractura no es necesariamente sinónimo de rotura ni de resistencia de pico, estas fracturas definen por ello la resistencia y comportamiento del macizo rocoso.

**b) Comportamiento deformacional:** Relaciones entre las cargas aplicadas y las deformaciones producidas.

Cuando se modifican las fuerzas internas, o se generan fuerzas nuevas debidas a cargas o a la presencia de agua, se están generando esfuerzos en determinadas zonas del macizo rocoso como consecuencia de la aplicación de estas fuerzas. Estos esfuerzos, son la reacción interna del material a la aplicación de cargas, y producen deformaciones en las rocas que se manifiestan mediante desplazamientos y roturas.

**Deformación. ( $\epsilon$ ).** Parámetro que expresa los cambios de posición de las partículas de un cuerpo en el espacio. Es adimensional y se mide comparando las magnitudes inicial y final.

**Comportamiento Elástico.** Relación lineal entre los esfuerzos y las deformaciones. Las deformaciones son recuperables, es decir, al retirar las cargas aplicadas las deformaciones desaparecen. Rotura frágil, proceso en el que ocurre una pérdida de resistencia brusca a través de un plano con poca o nula deformación permanente (plástica).

**Límite de Elasticidad.** Punto de la curva esfuerzo-deformación en el que se abandona el comportamiento elástico y aparecen deformaciones irreversibles en el material. El esfuerzo o



tensión correspondiente al límite de elasticidad es el esfuerzo para el que aparecen las deformaciones permanentes. En algunos tipos de materiales (duros y de baja porosidad) el límite de elasticidad está muy cercano a la resistencia de pico.

**Comportamiento Plástico.** Relación no lineal entre esfuerzos y deformaciones. Deformaciones irreversibles, al retirar la carga permanecen las deformaciones. Deformación dúctil, ocurre cuando la roca puede soportar deformación permanente sin perder totalmente su capacidad de carga.

Generalmente los materiales tienen un comportamiento elastoplástico, es decir, unas veces se aproximan más al comportamiento elástico y otras se aproximan más al comportamiento plástico

El comportamiento elástico o plástico depende de las propiedades resistentes de la roca:  $c$  y  $\phi$ , y queda definido por los módulos de deformación ( $E$  y  $\nu$ ).

$$E = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} = \frac{\sigma}{e} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\nu = \frac{e_{\text{radial}}}{e_{\text{axial}}}$$

Las rocas que poseen una estructura compacta y poca o ninguna anisotropía suelen estar dentro de la categoría de módulo relativo medio. En ella están comprendidas la mayoría de las rocas ígneas.

Como puede observarse, las relaciones entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas indican el comportamiento que va a tener el material rocoso antes de llegar a romper, y la forma de rotura.

Roca	Esfuerzo de aplastamiento (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia Descripción	Módulo de elasticidad E 1000 (kg/cm <sup>2</sup> )	Coefficiente de Poisson	Densidad media (kg/cm <sup>3</sup> )
Basalto	50 – 130	800 – 4200	Alta	200 – 1000	.2	2.7 – 3.0
Gabro	45 – 85	1500 – 2000	Resistente	600 – 1000	.2	2.9 – 3.1
Granito	50 – 80	1200 – 2800	Alta	300 – 700	.2	2.5 – 2.7
Riolita	40 – 110	800 – 1600	Resistente	100 – 200	.22	2.4 – 2.6
Diabasa	60 – 100	1200 – 2500	Resistente	300 – 900	.2	2.9 – 3.1
Tobas	10 – 40	50 – 600	Variable	-	.18	1.3 – 2.2
Dacita	30 – 100	800 – 1600	Resistente	80 – 180	.18	2.5 – 2.7
Andesita	50 – 120	400 – 3200	Resistente en general.	120 – 350	.2	2.3 – 2.7

Tabla 2.5 Propiedades de algunas rocas ígneas inalteradas.

Los valores de los parámetros que definen el comportamiento mecánico de las rocas, se evalúa a partir de ensayos de laboratorio cuyo objeto es:

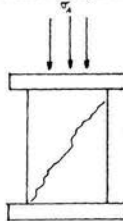
- ✓ Definir la naturaleza de la roca: ensayos de identificación y clasificación.



- ✓ Obtener resistencia: ensayos de resistencia a compresión y tracción.
- ✓ Obtener la deformación: ensayos de deformabilidad.
- ✓ Valorar la influencia del agua.
- ✓ Valorar el comportamiento ante la meteorización: ensayos de alterabilidad.

### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE.

El ensayo de laboratorio para determinar la resistencia a la compresión simple se efectúa en un cilindro o prisma de roca el cual se somete a una carga uniaxial hasta que se produce la rotura. La resistencia a compresión que se obtiene depende hasta cierto punto de la forma del elemento testificado, del tamaño, del contenido de humedad, del régimen de carga.



Relación entre los esfuerzos aplicados:  $\sigma_1 \neq 0$ ;  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ .

A partir de los valores de la carga aplicada y de las deformaciones axial y radial generadas en la probeta, se obtienen los módulos de deformación o constantes elásticas. E (módulo de Young) y  $\nu$  (coeficiente de Poisson) del material ensayado.

El ensayo es realizado para determinar:

- ✓ La resistencia uniaxial no confinada de la roca, o resistencia a la compresión simple, ( $\sigma_c$ ).
- ✓ Las constantes elásticas de la roca: módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).
- ✓ Peso volumétrico.

Factores que afectan a la medida de la resistencia a compresión simple:

- a. Naturaleza y condición de la roca:
  - Mineralogía;
  - Tamaño de grano y cementación;
  - Porosidad, peso unitario;
  - Microfisuración;
  - Grado de meteorización o alteración.
- b. Condiciones de ensayo:
  - Temperatura;
  - Dirección de la carga (anisotropía);
  - Rango de la carga;
  - Forma de la probeta;
  - Volumen de la probeta.

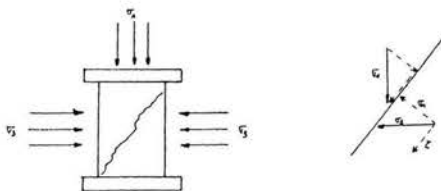


Cuando se produce la rotura lo hace a favor de un plano, y las fuerzas que gobiernan la rotura son las que se generan sobre ese plano: tangenciales ( $\zeta$ ) y normales ( $\sigma_n$ ), que dependen de los esfuerzos aplicados.

$$\zeta, \sigma_n f(\sigma_1)$$

### ENSAYO TRIAXIAL.

El ensayo para determinar la resistencia a compresión y tensión triaxial consiste en la aplicación de una presión hidráulica a la superficie exterior de un cilindro al mismo tiempo que se carga uniaxialmente en compresión, en incrementos de tiempo hasta que se produce la rotura.



Relación entre los esfuerzos aplicados:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \neq 0.$$

A partir de los valores de la carga o esfuerzo aplicado ( $\sigma_1$ ) y del esfuerzo confinante ( $\sigma_3$ ) se mide la resistencia de la probeta. A partir de estos datos se obtienen los valores de los parámetros resistentes cohesión y fricción del material ensayado.

El ensayo es realizado para determinar:

- ✓ La resistencia de la roca bajo unos esfuerzos confinantes determinados;
- ✓ Los parámetros resistentes de la roca:  $C$  y  $\phi$ .

Este ensayo permite obtener pares de valores  $C$ ,  $\phi$ , que pueden ser representados en un gráfico mediante la construcción de círculos de Mohr.

Un círculo de Mohr define todos los posibles valores de  $\sigma_n$  y  $\zeta$  que causan la rotura a favor de planos con diferente orientación en el espacio y para unas condiciones de carga determinadas, representadas por  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ .

En la naturaleza las aplicaciones de los esfuerzos son tridimensionales, y las respuestas en las deformaciones son igualmente tridimensionales. El trabajar en dos dimensiones es una simplificación.

A partir del círculo de Mohr, se puede establecer la expresión que indica la relación entre los esfuerzos que actúan en el momento de producirse la rotura del material:  $\sigma_n$  y  $\zeta$ , que dependen de  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ :

$$\zeta = C + \sigma_n \operatorname{tg} \phi$$

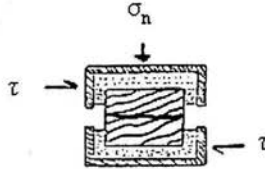
Esta expresión proporciona el criterio de rotura para un material rocoso en función de sus propiedades resistentes  $C$  y  $\phi$ , y de los esfuerzos que se aplican sobre él. Cuando sobre un determinado plano se alcanza el valor del esfuerzo tangencial  $\zeta$  dado por la expresión, se produce la rotura. Este valor depende de  $C$ ,  $\phi$  y del esfuerzo normal  $\sigma_n$  que se ejerce sobre ese plano. A pesar de lo completo de esta prueba, no se emplea comúnmente en rocas.



## ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN DISCONTINUIDADES.

Para la caracterización geomecánica de los parámetros resistentes de las discontinuidades,  $C$  y  $\phi$ , se emplea el ensayo de resistencia al corte, consistente en aplicación de esfuerzos tangenciales sobre el plano de rotura, manteniendo constante el esfuerzo normal. Se realiza sobre una muestra de roca intacta o sobre una muestra de roca diaclasada.

Relación entre los esfuerzos aplicados:  $\tau > \sigma_n \neq 0$ .



A partir de los valores del esfuerzo cortante aplicado ( $\tau$ ) y del esfuerzo normal ejercido sobre la muestra ( $\sigma_n$ ) se mide la resistencia al corte de la superficie ensayada. A partir de estos datos se obtienen los valores de los parámetros resistentes cohesión y fricción de la discontinuidad.

El ensayo es realizado para determinar:

- ✓ La resistencia al corte del plano ensayado para la carga normal aplicada;
- ✓ Los parámetros resistentes de la discontinuidad,  $C$  y  $\phi$ .

Al producirse el deslizamiento a favor del plano de rotura, se vencen su cohesión (sí la tiene) y su fricción. El esfuerzo tangencial depende del esfuerzo normal que se aplique sobre el plano, rigiendo el comportamiento el criterio de Mohr - Coulomb:

$$\zeta = C + \sigma_n \operatorname{tg} \phi$$

Con los resultados del ensayo se obtiene un gráfico esfuerzo-deformación donde se sitúan los valores de pico (para la rotura) y los residuales (después de la rotura).

Tras la realización de varios ensayos para diferentes  $\sigma_n$  se obtiene un gráfico  $\zeta - \sigma_n$  con el que se calculan la  $C$  y la  $\phi$ , que dependen del relleno, rugosidad, presencia de agua, etc.

### 2.4. Clasificación geomecánica.

#### *Clasificación*

Desde el punto de vista geomecánico.

Las clasificaciones geomecánicas se han convertido en una herramienta habitual para el reconocimiento de los macizos rocosos en los que van a construirse obras de ingeniería y especialmente túneles y obras subterráneas.

El comportamiento de los macizos rocosos depende, además de las propiedades de la matriz rocosa, de la frecuencia y tipo de las discontinuidades presentes (que definen su grado de fracturación, el tamaño de los bloques), de las singularidades que los afectan (fallas, zonas



alteradas o meteorizadas) y de la presencia de agua. Todos estos factores deben ser valuados para clasificar un macizo rocoso. Se usan las clasificaciones geomecánicas índices RMR, Q, etc.

## CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI (RMR).<sup>1</sup>

Basado en cinco parámetros universales:

### 1. Resistencia de la roca.

Incrementos de RMR para la resistencia a compresión de la roca	
Resistencia a la compresión simple (MPa)	Contribución*
>200	15
100 – 200	12
50 – 100	7
25 – 50	4
10 – 25	2
3 – 10	1
< 3	0

### 2. Calidad de un testigo perforado RQD.

Incrementos de RMR para la calidad de un testigo perforado	
RQD (%)	Contribución
91 – 100	20
76 – 90	17
51 – 75	13
25 – 50	8
< 25	3

El índice de calidad RQD se basa en la recuperación modificada del testigo, que a su vez depende indirectamente del número de fracturas y del grado de debilitamiento o alteración del macizo rocoso, según se puede observar por los testigos extraídos de un sondeo. En lugar de contar las fracturas, se obtiene una medida indirecta sumando la longitud total de testigo pero considerando únicamente aquellos trozos de testigo de longitud igual o superior a 10 cm, en estado sano y compacto.

Evidentemente este método es muy rígido para la roca cuando la recuperación es escasa, lo que suele indicar una pobre calidad de la roca. Pero esto no siempre es cierto, sin embargo, ya que un equipo de perforación o una técnica deficiente puede dar también lugar a una recuperación escasa.

<sup>1</sup> Una de las clasificaciones más sencillas, pero que puede proporcionarnos idea rápida de la calidad con que cuenta el macizo rocoso.

\*Puntuación aportada dependiendo de cada una de las características del macizo rocoso, para la determinación de su calidad en base al sistema RMR



### 3. Condiciones del agua en el terreno.

#### Incrementos de RMR debidos a las condiciones de agua en el terreno

Caudal por cada 10 m de longitud de túnel (l/min.)	Presión de agua en las juntas dividida por la tensión principal mayor	Condiciones generales	Contribución
0	0	Completamente seco	10
25	0.0 – 0.2	Húmedo	7
25 – 125	0.2 – 0.5	Agua bajo presión moderada	4
125	.5	Problemas severos debido al agua	0

### 4. Separación de juntas y fisuras.

#### Incrementos de RMR para la separación de juntas del sistema principal

Separación (m)	Contribución
>3	30
1 – 3	25
0.3 – 1	20
0.005 – 0.3	10
<0.005	5

### 5. Características de las juntas.

#### Incrementos de RMR para la orientación de las juntas

Apreciación de la influencia de la orientación	Contribución para túneles
Muy favorable	0
Favorable	-2
Moderada	-5
Desfavorable	-10
Muy desfavorable	-12

#### Incrementos de RMR para las condiciones de las juntas

Descripción.	Contribución
Superficies muy rugosas de extensión limitada: roca dura	25
Superficies ligeramente rugosas: apertura menor a 1 mm: roca dura	20
Superficies ligeramente rugosas: apertura menor a 1 mm: roca blanda	12
Superficies lisas. O con relleno de 1 – 5 mm. O apertura de 1 – 5 : juntas de varios metros de longitud	6
Juntas abiertas rellenas con más de 5 mm. O apertura mayor de 5 mm: juntas de varios metros de longitud	0



**Calidad de la roca: entre 0 y 100.**

**CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA**

<b>Clase</b>	<b>Descripción del macizo rocoso</b>	<b>RMR</b>
I	Roca muy buena	81 -100
II	Roca buena	61 – 80
III	Roca aceptable	41 – 60
IV	Roca mala	21 – 40
V	Roca muy mala	0 - 20

Bieniawski (1997) recomienda “Que las clasificaciones se usen en el contexto de un proceso global de diseño ingenieril”. Además indica “que deben usarse solo en fases preliminares y/o de planeamiento, pero no para definir las medidas finales de diseño”.

Además de la posible presencia de agua y la cantidad de gasto infiltrado, es importante determinar la manera en que ocurre el flujo del agua y los efectos que se generarán en el macizo, estos conceptos son presentados en el capítulo siguiente.



## CAPITULO 3. PROBLEMAS DEL FLUJO DE AGUA.

**Objetivo: “Mostrar los efectos perjudiciales del agua infiltrada en la construcción y operación de túneles, para determinar el procedimiento adecuado en el sellado de filtraciones a base de silicatos”.**

El agua subterránea es la que llena los vacíos del suelo y de la roca completamente y que muestra movimientos que dependen solo o casi solo de las fuerzas de gravitación y fricción. Los vacíos pueden ser poros, rupturas, grietas, fisuras o cuevas de distinto tamaño.

Como las condiciones del subsuelo distan mucho de ser uniformes, la distribución del agua subterránea es uno de los problemas geológicos más complicados.

La circulación del agua viene controlada por la permeabilidad primaria del propio material rocoso, la cual es una verdadera permeabilidad aunque resulta frecuentemente muy baja y por la llamada permeabilidad secundaria debida a las fracturas del macizo rocoso; esta última no es una verdadera permeabilidad tal como se entiende en Mecánica del Suelos, pero describe la capacidad de un macizo de roca fracturada para permitir el paso del agua.

Como se ha dicho, en el momento de la excavación se establece un cierto gradiente hidráulico, provocando con ello, el que el agua se filtre a través de los poros, fisuras, discontinuidades, fallas y cavidades produciendo acciones hidráulicas en el interior de la masa del suelo.

### 3.1. Filtración y circulación de agua a través de un macizo rocoso fisurado.

El movimiento del agua se verifica prácticamente a lo largo de las discontinuidades y fisuras. A veces se ha advertido que, además de moverse el agua por las juntas y fisuras, también pasa por las vetas de cuarzo, silicato y calcita que a menudo se dan en rocas volcánicas.

Son muchas las razones que confirman la importancia de las grietas y discontinuidades en el movimiento y acumulación del agua subterránea, las grietas suelen ser el principal factor para determinar la capacidad receptora de una roca. La distribución de las discontinuidades es bastante compleja. Parece claro que a partir de cierta profundidad disminuya apreciablemente su cantidad y tamaño; esta profundidad crítica puede estar alrededor de los 150 m, por debajo de este punto debe esperarse una disminución regular de agua en las juntas.

La circulación del agua en un sólido poroso, viene determinada por los gradientes hidráulicos  $i$  definidos por:

$$i = grad\left(z + \frac{p}{\gamma_w}\right) = grad(U)$$

siendo  $z$  el nivel del agua,  $p$  la presión en el punto considerado, y  $\gamma_w$  el peso específico del agua. La magnitud  $U$  se conoce como potencial hidráulico. En el caso de que no exista cambio de nivel o cuando se pueda despreciar el efecto de la gravedad tenemos:

$$i = grad\left(\frac{p}{\gamma_w}\right)$$



Las variaciones de presión de agua de un punto a otro originan variaciones en las fuerzas superficiales de los poros que son equivalentes a fuerzas de masa. Tales fuerzas creadas en los poros pueden proceder del empuje de Arquímedes o de la resistencia frente a una corriente de tipo viscoso. Las componentes verticales de estas fuerzas de masa han sido denominadas frecuentemente subpresiones por los ingenieros hidráulicos. Las fuerzas de masa hidráulica y otras fuerzas anteriores y exteriores que contribuyen a las deformaciones del medio y que pueden hacer variar el volumen de los poros, influyen sobre los coeficientes de permeabilidad.

Aunque pueden encontrarse discrepancias importantes, se acepta normalmente que la circulación del agua y otros fluidos en sólidos permeables siguen la ley de Darcy. Esta expresa que la velocidad de filtración  $\bar{v}$ , definida considerando el caudal a través de una superficie total, es proporcional al gradiente  $i$  del potencial hidráulico.

$$\bar{v} = -k i = -k \text{ grad } (U)$$

siendo  $k$  la permeabilidad del medio.

La permeabilidad puede relacionarse con las características físicas del sólido y del fluido mediante la relación:

$$k = \frac{KD^2 \gamma_w}{\mu} = \bar{K} \frac{\gamma_w}{\mu}$$

donde  $D$  es el diámetro efectivo de las aberturas (los poros o discontinuidades) del sólido o una dimensión característica de su textura,  $\mu$  la viscosidad,  $\gamma_w$  el peso específico del líquido y  $\bar{K}$  un coeficiente físico de permeabilidad (movilidad):  $\bar{K} = KD^2$ , siendo  $K$  una magnitud de dimensiones que depende de la geometría de los poros.

Si se supone un conjunto de fisuras de abertura  $e$ , con caras paralelas separadas una distancia  $d$ , se obtiene la siguiente expresión para la filtración del conjunto:

$$k = \frac{e^3 \gamma_w}{12d\mu}$$

y la circulación a través de una discontinuidad de espesor constante viene expresada por

$$v = -\frac{e^2 \gamma_w}{12\mu} i$$

Las rocas son materiales muy versátiles; pueden ser muy permeables o casi impermeables. Muestras de granito duro pueden presentar valores del coeficiente de permeabilidad inferiores a  $10^{-10}$  cm/seg. Pero además de la porosidad del material, los macizos rocosos contienen discontinuidades que los hacen aún más permeables. Normalmente, para que no se considere necesario inyectar la roca de acuerdo con el criterio de Lugeon, ha de tener un coeficiente de permeabilidad de  $10^{-5}$  cm/seg.

Se cree que, en la mayoría de los casos, la permeabilidad de la roca depende de las fisuras abiertas y de las pequeñas discontinuidades y no de los poros más uniformemente distribuidos. Esto da un carácter anisótropo a las rocas y macizos desde el punto de vista de la filtración del agua, así como del comportamiento mecánico. En rocas estratificadas ésto es aún más evidente.

En el caso de rocas sanas fisuradas, en las que la permeabilidad se debe principalmente a las discontinuidades (granitos, cuarcitas, etc.), los coeficientes de permeabilidad a considerar son



los que se deducen de la abertura y separación de las discontinuidades. En el caso de rocas muy porosas con discontinuidades rellenas, la permeabilidad vendrá determinada principalmente por la circulación del agua a través de la sustancia rocosa, en cualquier caso en un régimen estacionario, no puede existir diferencia apreciable entre las presiones intersticiales del agua en las discontinuidades o en los poros próximos del material rocoso. Al estudiar la filtración de agua a través de macizos rocosos con fallas importantes, que pueden drenar las discontinuidades, debe considerarse cuidadosamente la importancia relativa de tales zonas de paso localizadas. Lo que sucede normalmente es que tales fallas son muy permeables por una de sus caras y bastante impermeables por otra. De esta forma, la mejor manera de tenerlas en cuenta es considerar tales fallas como superficies límites de la red de flujo.

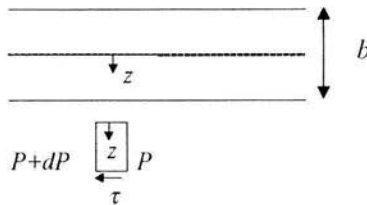
### 3.1.1. Permeabilidad de una fractura aislada.

#### Fractura aislada no rellena de apertura $b$

Definición de viscosidad:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz}$$

El flujo laminar entre láminas paralelas se puede calcular directamente a partir de la conservación del momento:



Equilibrio de fuerzas en una sección de ancho  $dx$  y altura  $z$  desde el centro:

$$\begin{aligned} \tau dx &= \mu dP \\ \tau &= z \frac{dP}{dx} = \frac{dv}{dz} \mu \\ i &= \frac{dP}{dx} \\ iz dz &= \mu dv \end{aligned}$$

donde  $i$  es el gradiente de presión.

La ecuación anterior se integra para obtener la variación de velocidades con  $z$ :

$$v(z) = \frac{1}{\mu} \frac{z^2 - (b/2)^2}{2}$$



Integral de las velocidades para obtener el caudal en una fractura:

$$Q = \int_{-b/2}^{+b/2} v(z) dz = -\frac{ib^3}{12\mu}$$

Se introduce el gradiente de nivel piezométrico:

$$Q = -\frac{\rho g b^3}{12\mu} i = -\frac{b^3}{12\mu} \nabla P = -\frac{\rho g b^3}{12\mu} \nabla h$$

Este caudal se puede convertir en flujo si se divide por alguna anchura.

Sea  $s$  la separación entre fracturas, entonces el caudal por unidad de espesor de roca será:

$$q = \frac{Q}{s} = -\frac{b^3}{12\mu s} \nabla P = -\frac{k}{\mu} \nabla P$$

$$q = \frac{Q}{s} = -\frac{\rho g b^3}{12\mu s} \nabla h = -K \nabla h$$

Si se divide por  $b$  también se obtiene un flujo pero no es por unidad de anchura de medio poroso sino por unidad de anchura de la fractura.

### Conductividad hidráulica y permeabilidad intrínseca.

Por tanto la conductividad hidráulica de un medio fracturado será:

$$K = \frac{\rho g b^3}{12\mu s}$$

o bien la permeabilidad intrínseca:

$$k = \frac{b^3}{12s}$$

La equivalencia entre estos dos parámetros, en el caso de agua a temperatura ambiente (densidad y viscosidad) es:

$$K(m/s) = \frac{\rho g b^3}{12\mu s} = \frac{(1000 kg/m^3) \times (9.81 N/kg) \times b^3}{12 \times (10^{-3} Pa \cdot s) \times s} = 10^{-7} \frac{b^3}{12s} = 10^{-7} k(m^2)$$

### Transmisividad.

La transmisividad es una medida de la conductividad para un espesor dado de medio. En este caso el espesor asociado a una fractura es  $s$ :

$$T = Ks = \frac{\rho g b^3}{12\mu s} s = \frac{\rho g b^3}{12\mu}$$





Fractura aislada rellena de medio poroso de permeabilidad  $K_p$  y apertura  $b$

El flujo de agua en dicha fractura se rige por la ley de Darcy de flujo en medio poroso:

$$Q = qb = -K_p b \nabla h$$

El flujo de agua en el medio depende de la separación entre fracturas. Si  $s$  es la separación entre fracturas resulta:

$$q = \frac{Q}{s} = \frac{q_p b}{s} = -K_p \frac{b}{s} \nabla h$$

y por tanto la conductividad hidráulica de la roca será:

$$K = K_p \frac{b}{s}$$

y la transmisividad:

$$T = Ks = K_p b$$

**2.2. Efectos del agua; alteración mecánica y química debido a su circulación.**

Las rocas se alteran con el tiempo, especialmente las próximas a la superficie de la corteza terrestre. Esto se debe a la degradación química en presencia de aire, agua y otros agentes, o a la disolución de ciertos elementos minerales. Los macizos rocosos están normalmente húmedos o saturados con agua, incluso, si la capa freática está baja. Esta agua se mantiene en el interior del macizo debido a la capilaridad o a fuerzas superficiales.

El agua puede penetrar a la roca desde la superficie, o bien, desde grandes profundidades penetrar hasta la roca. Los canales principales de alimentación son las juntas y fallas, penetrando desde éstas el agua a los intersticios que hay entre los granos minerales de la roca. Por tanto puede esperarse que sea intensa la alteración química en las zonas de fracturamiento.

El agua subterránea es casi seguro que contiene sólidos y gases en disolución. El anhídrido carbónico es la impureza gaseosa más importante del agua subterránea. En el agua este gas forma una débil solución de ácido carbónico, que actúa de disolvente de muchos constituyentes de las rocas, por lo que su presencia es con frecuencia significativa.

El proceso se acelera normalmente con la abertura de microfisuras que multiplican la superficie expuesta a la meteorización y al paso del agua. Las variaciones de nivel de la capa freática también contribuyen notablemente a la alteración. Aparentemente, las aguas magmáticas y el anhídrido carbónico son también las causas principales de alteración de los feldespatos de las rocas ígneas, pasando a caolín, sericita y otras arcillas. Las formaciones rocosas que contienen yeso, sal gema y otros minerales solubles pueden mostrar procesos de alteración muy rápidos cuando tienen lugar variaciones del nivel freático.

Una roca tiene una baja alterabilidad si permanece constante la circulación del agua a través de los canales capilares y microfisuras de los testigos ensayados y si el arrastre de elementos es pequeño. Sin embargo, si la permeabilidad disminuye con el tiempo, puede deberse a la colmatación de los capilares por las partículas arrastradas o al hinchamiento de los minerales arcillosos, lo cual indica que la roca es alterable.



El problema de las presiones de hinchamiento de los minerales en el interior de las discontinuidades de los macizos rocosos por efecto de las variaciones de humedad, es un factor importante en la estabilidad de túneles. En el proceso de desintegración de los basaltos, desempeñan un papel importante las elevadas presiones de hinchamiento de algunos minerales arcillosos como la montmorilonita, en el interior de las cavidades de la roca.

Asimismo, el decaimiento o descomposición interna que produce el agua en las rocas ígneas, como la diabasa, está asociado con la formación de un mineral verdoso que se conoce como serpentina. Cuando ésta se forma tiene lugar una expansión volumétrica que casi siempre conduce a esfuerzos estáticos excepcionalmente elevados en la roca. Las excavaciones que se hacen en este material liberan los esfuerzos internos generalmente originando desprendimiento de lascas en los lados de la excavación, así como fragmentación gradual de la parte inferior de la misma.

### **Estados de meteorización.**

Meteorización de las rocas es un proceso causado por la alteración de la roca bajo la acción del agua,  $\text{CO}_2$  y el oxígeno, por procesos físico-químicos. En la meteorización (Química y Física) la humedad es el factor más importante.

La meteorización modifica las propiedades de las rocas:

- Aumenta la porosidad;
- Aumenta la deformabilidad;
- Aumenta la permeabilidad;
- Disminuye la resistencia.

Los minerales más susceptibles de meteorización son los que contienen abundancia de Mg, Ca y Fe.

### **Grados de meteorización:**

- I.- Roca fresca.
- II.- Ligeramente meteorizada: la meteorización penetra por las fracturas.
- III.- Moderadamente meteorizada: la meteorización penetra la matriz rocosa.
- IV.- Muy meteorizada: la meteorización penetra toda la roca pero quedan zonas interiores inalteradas.
- V.- Completamente meteorizada: completamente meteorizada pero aun se reconoce textura.
- VI.- Suelo residual: se ha perdido la textura.

### **3.3. Influencia de la humedad sobre la resistencia de las rocas.**

El agua hace descender la resistencia debido a las presiones intersticiales.

Ciertos tipos de roca tienen tendencia a absorber la humedad, perdiendo por ello sus características de resistencia mecánica. Los taludes y las caras verticales de roca, al estar expuesto por largo tiempo tienden a liberar sus esfuerzos lo que se refleja en el desprendimiento de lascas y en una falla posible.



### 3.4. Estado de esfuerzos provocado por las presiones del nivel freático.

La permeabilidad de un macizo rocoso puede resultar muy afectada por la filtración a través de las fisuras. Esta permeabilidad secundaria puede ser de mayor importancia que la primaria del material que compone la roca y puede ser anisótropa debido a diferencias de fisuración según las direcciones. Las fuerzas de filtración pueden contribuir de manera significativa al sistema de fuerzas aplicado al medio rocoso por lo que suele ser necesario conocer la permeabilidad in situ.

El estado de esfuerzos de un macizo rocoso, considerado como un medio poroso con fracturas, fisuras y otras discontinuidades y sometido a presiones intersticiales, presenta muchas dificultades en su tratamiento. Es obvio que el estado de esfuerzos de las partículas del sólido varía de un punto a otro. En una sección que atravesase principalmente material sólido impermeable o bloques rocosos, las compresiones serán bajas y uniformemente distribuidas, mientras que en una sección a través de una discontinuidad horizontal solo existirán esfuerzos en las zonas de contacto de los bloques, con compresiones muy elevadas. Por tanto, si se presta la atención principal al problema de la rotura, parece de más interés discutir y determinar el estado de esfuerzos en la discontinuidad antes que en la sección que atraviesa el material rocoso. Si el macizo rocoso está saturado, la presión hidrostática hará disminuir por empuje de Arquímedes las compresiones en el contacto con el sólido en la sección trazada por la discontinuidad. Por otro lado, la misma presión de agua hará aumentar la compresión en el material sólido debido a la compresión hidrostática en torno a los bloques. Si los bloques también son porosos, la experiencia debe mostrarnos en que magnitud las presiones intersticiales contribuyen a la rotura o deformación. Parece ser que las propiedades mecánicas de la estructura se deben principalmente a los enlaces entre las partículas sólidas. Se ha indicado que la resistencia de las rocas depende no solo de la resistencia de sus componentes minerales, sino también del tipo de enlaces.

Ningún método de cálculo de esfuerzos conocido permite determinar el estado de esfuerzos natural o residual existente en el medio rocoso. Éste depende de la historia geomorfológica de la formación y sólo puede determinarse con cierta aproximación a partir de medidas "in situ".

### 3.5. Determinación de la permeabilidad de un macizo rocoso.

En ingeniería, la determinación de la permeabilidad de los macizos rocosos se suele hacer en sondeos, con el denominado ensayo Lugeon repetido normalmente a distintas profundidades dentro del sondeo. Se coloca un obturador a 5 m del fondo inyectando agua a presión a través de un tubo que comunica con la sección del fondo. El caudal se suele medir en la boca del sondeo al cabo de cinco o diez minutos de ensayo para diferentes presiones. La presión normal de medida es  $10 \text{ kg/cm}^2$ . Una unidad Lugeon (UL) corresponde a un caudal de litro por minuto por metro de longitud de sondeo. En general, si se representa el caudal en función del aumento o descenso de presión, se obtendrán diversos tipos de diagramas según la colmatación o limpieza de los poros o discontinuidades producidas por el arrastre de partículas. Normalmente el caudal no es proporcional a las presiones medidas en la boca del sondeo y no suelen obtenerse los mismos valores para diferentes presiones decrecientes después de haber realizado ensayos con presiones crecientes. Por otro lado, es interesante observar que el caudal varía con el tiempo durante ensayos a una presión dada. El hecho de que los macizos rocosos deban su permeabilidad principalmente a las discontinuidades y fisuras hace el problema de determinación "in situ" de la permeabilidad muy errático y a veces carente de sentido. De hecho, el agua que puede filtrarse a través de una formación de roca impermeable con discontinuidades horizontales de 0.1 mm de



abertura y 1 m de separación es la misma que se puede filtrar a través de un macizo poroso homogéneo con un coeficiente de permeabilidad de  $0.8 \times 10^{-4}$  cm/seg.

Unidades Lugeon	Longitud del tramo (m)	Abertura de la fisura (mm)		
		1 fisura	10 fisuras	100 fisuras
100	6	0.484	0.225	0.106
	3	0.385	0.178	0.083
10	6	0.225	0.106	0.048
	3	0.178	0.083	0.038
1	6	0.106	0.048	0.022
	3	0.083	0.038	0.018

Tabla 3.2 Influencia del número y abertura de las fisuras.

Una permeabilidad de 100 unidades Lugeon, puede ser debida a una centena de fisuras de una décima de milímetro de abertura aproximadamente. Inversamente se puede tener una permeabilidad de una unidad Lugeon con una sola fisura de una décima de milímetro.

Durante los ensayos de permeabilidad se producen deformaciones debido a que el agua transmite presiones intersticiales al macizo. Estas presiones pueden originar una abertura importante de las fisuras si se superan las presiones internas de la roca. En tal caso los ensayos serán incapaces de permitir estimar la permeabilidad del medio rocoso.

Por estas razones parece que, si se quieren encontrar valores más exactos de la permeabilidad in situ de los macizos rocosos, debe utilizarse el ensayo de bombeo cuando sea posible. En este caso, se agota el agua por bombeo, manteniendo el nivel freático a un nivel dado. Estos ensayos son generalmente difíciles de realizar en sondeos de pequeño diámetro y no permiten la determinación de permeabilidades a diferentes profundidades. Prácticamente todas las formaciones rocosas son anisotrópicas desde el punto de vista de la permeabilidad. Es posible determinar la componente principal y sus direcciones por medio de ensayos de agotamiento midiendo el descenso de nivel en un número de piezómetros.

Cuando parezca importante la abertura de las discontinuidades o cuando se quiera estudiar una discontinuidad particular, pueden estar justificados los ensayos de permeabilidad entre pares o incluso grupos de sondeos. Tales ensayos han sido recomendados en ciertos casos para calcular la apertura de discontinuidades importantes. El caudal de agua  $q$  filtrado por unidad de tiempo desde  $A$  a  $B$  según la discontinuidad  $aa'$ , considerada de apertura uniforme  $e$ , viene dado por

$$q = \frac{\pi e^2}{12\mu} \frac{p_1 - p_2}{Ln \frac{d}{r_0}},$$

donde  $r_0$  es el diámetro del sondeo.

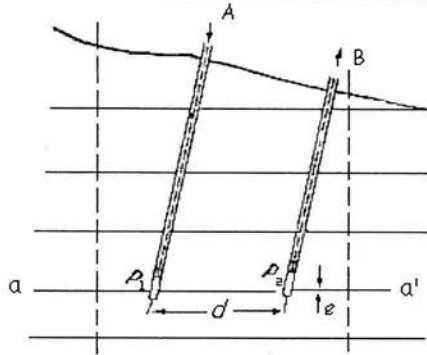


Fig.3.4 Determinación de la permeabilidad de una discontinuidad.

Un factor importante en la permeabilidad de los macizos rocosos es el carácter del material que rellena las discontinuidades. Esta es la razón por la cual, en muchos casos, macizos de roca alterada próximos a la superficie dan una permeabilidad menor que macizos más profundos cuyas discontinuidades no están rellenas. Aunque en general estos materiales de relleno no evitan la circulación de agua a través de las discontinuidades, constituyen la causa principal de un comportamiento anormal o inexplicable durante los ensayos.

La permeabilidad de una discontinuidad aislada depende de la abertura media a lo largo de la misma y de su rugosidad superficial.

### 3.6. Filtraciones hacia túneles .

El agua subterránea es con frecuencia la causa principal de las dificultades que se encuentran en la construcción de túneles.

La construcción de un túnel puede cambiar radicalmente el régimen hidrostático del sitio en el cual se localice esta estructura, afectando la posición del agua dentro del macizo rocoso, así como la dirección y velocidad de su movimiento. En su estado original, dicha masa está sujeta a un estado de presiones de tipo hidrostático, que se verá afectado en el momento de iniciarse la construcción del túnel.

Con la excavación de un túnel a través de formaciones geológicas que almacenan agua, la oquedad formada en el macizo induce un cambio de presiones hidráulicas que genera un flujo de agua hacia la excavación. El túnel actuará como un dren, y en consecuencia se producirá un flujo hacia el frente. Las fuerzas de filtración ligadas a dicha corriente, pueden sumarse a los esfuerzos tangenciales del terreno del frente. Debe observarse que estas presiones de filtración pueden producirse independientemente de la cantidad de flujo; es decir, en terreno compacto, incluso aunque no haya flujo aparentemente, si el frente está por debajo del nivel freático del agua, se producirá flujo con las correspondientes presiones de filtración.

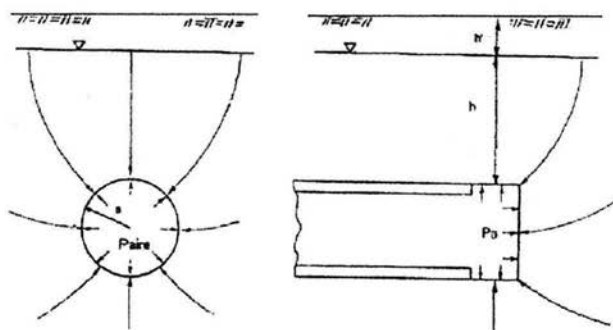


Fig. 1.4 Fuerzas de filtración en una galería de avance por debajo del nivel freático.

Las fuerzas de filtración hacen que aumente la carga de roca considerablemente. En los casos en que la cantidad del flujo es grande, y si el gradiente hidráulico es lo suficientemente alto, entonces se puede producir en el punto de salida una agitación y erosión de las partículas de la roca.

La magnitud del problema que desde el punto de vista constructivo ocasiona la filtración, es creciente con la cantidad de agua que penetra al túnel, ya que además de requerirse instalaciones especiales para disponer del agua captada cuando el volumen de ésta es considerable, interfiere con las operaciones normales de la excavación.

Las perspectivas para la construcción de túneles en el futuro, obligan a reconsiderar los procedimientos disponibles para la evaluación de los volúmenes de agua que habrán de manejarse en dichas excavaciones, tanto por los procedimientos especiales para su manejo como por el costo que éstos representarán. La valuación teórica del gasto que captará un túnel al excavar en un manto acuífero ha sido establecida para algunos casos simples.

Considérese un túnel localizado a una profundidad  $h$  bajo el nivel freático (medio homogéneo e isótropo). Se supone además que el perímetro interno del túnel está sometido a una presión de aire denominada  $P_{aire}$ .

El gasto que se filtra hacia el túnel es:

$$Q = 4k\pi \frac{P_{aire} / \gamma_w - h}{\ln \frac{a^2}{a^2 + 4h^2}}$$

- donde:  $h$  = profundidad del eje del túnel respecto al nivel freático.  
 $a$  = radio del túnel.  
 $P_{aire}$  = presión de aire en el túnel.  
 $k$  = coeficiente de permeabilidad del medio.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Efecto de las fuerzas de filtración en el contorno de un túnel permeable. Jesús Alberro, Rogelio R. Hernández H. Instituto de Ingeniería. UNAM. Junio, 1988.



La fórmula muestra que el gasto por metro lineal del túnel es:

- Proporcional a la permeabilidad del medio.
- Proporcional a la presión de aire aplicada en el interior del túnel.
- No es estrictamente proporcional a la profundidad o al diámetro del túnel.

Este aspecto es principalmente importante durante la etapa constructiva del túnel, en donde un conocimiento bien fundamentado del probable gasto de infiltración repercutirá directamente en la selección de las instalaciones y equipo de bombeo requerido para desalojar la totalidad de las aguas infiltradas, dado que las consecuencias que puede traer la falta de previsión sobre este aspecto pueden dar lugar a problemas en la construcción, con las siguientes pérdidas económicas y retrasos en la misma.

### 3.6.1. Casos de filtraciones en túneles.

Como se ha visto, la naturaleza discontinua del macizo y la presencia del agua propician que, cuando se excava un túnel, siempre existan filtraciones al mismo.

La información contenida en la literatura sobre la excavación de túneles, al respecto del agua captada en ellos, se resume en la Tabla 3.1, donde se incluyen algunos tramos del túnel para el Emisor Central, en los cuales las aportaciones son de tal magnitud que se han constituido en factor determinante para el avance de los trabajos de excavación. De esta Tabla puede notarse que, aunque en algunos túneles la captación no es de importancia, en otros, se constituye en un verdadero caudal cuyo manejo para su extracción de la excavación, requiere de costosas instalaciones y cuidadosos controles, ya que una falla en las instalaciones de bombeo se traduciría en la inundación completa de la excavación en un corto lapso de tiempo.

Túnel	Material de excavación.	Longitud (km)	Aportación media l/s/km
<b>Simplon</b>	Mezcla de formaciones rocosas	19.60	51.0
<b>San Jacinto</b>	Granito	20.90	121.0
<b>Kurobe</b>	Granito	4.50	148
<b>Emisor Central</b>			
Tramo 4-5 (570 a 840)	Andesita fracturada con rellenos arcillosos	0.30	2720
Tramo 4-5 y 6	Tobas andesíticas	2.71	173
Tramo 10-11 y 12	Riolita alterada a arena limosa	2.63	237
Tramo 11-10	Andesita fracturada y riolita alterada	0.85	800
Tramo 12-11 y 13	Tobas andesíticas fracturadas	2.93	579
Tramo 14-14 A	Conglomerados andesíticos y aluviones.	0.48	1800

Tabla 3.1 Casos de filtraciones en túneles.

Podemos citar además el Túnel Kanmon (Japón) que atraviesa diorita y porfirita; habiéndose éste construido enteramente en roca dura, pero cruzado por numerosas fallas, pues



esta área ha sido muy afectada por los frecuentes terremotos que se producen en aquella parte del mundo, fue necesario un extenso programa de inyecciones en la sección subacuática debido a la presión de la roca descompuesta en la vecindad de las fallas.

Las medidas empleadas ante la presencia de filtraciones que se toman son diferentes para cada caso, tomando en consideración las condiciones particulares y los resultados que pretenden alcanzarse.

### 3. 6.2. Técnicas de sellado (Inyección).

Las características físicas de los macizos rocosos, las formas de rotura y el efecto del agua en las rocas, influyen sobre su comportamiento en relación a las obras de ingeniería, disponiéndose de ciertas técnicas para modificar estas propiedades con el objeto de facilitar la construcción y principalmente su operación.

El problema que plantea la presencia de agua en los túneles es el inverso del que generalmente hay que resolver, ya que su presencia no es deseable y debe procurarse, por tanto, contener su afluencia.

Existen diferentes métodos que permiten disminuir la filtración de agua en excavaciones subterráneas entre los que podemos mencionar: el método de congelación (aunque de aplicación muy limitada), el emplear las instalaciones especiales de pozos colectores utilizadas en las excavaciones a roza abierta, el procedimiento drástico de hacer descender realmente el nivel hidráulico subterráneo para que el túnel quede por encima de este nivel y pueda, por tanto, trabajarse en seco. Además de estos métodos de control, la forma normal de controlar esta agua subterránea es por medio del uso de aire comprimido en el túnel, y por supuesto la inyección del terreno.

Dentro de los diferentes métodos de tratamiento y mejora del terreno, las inyecciones tienen una gran importancia en la actualidad, sobre todo en obras hidráulicas y subterráneas. La inyección es el primer recurso del ingeniero, siempre que la cantidad de agua haga económico ese gasto y que pueda asegurarse de forma categórica, basándose en el conocimiento de las formaciones geológicas afectadas, que será eficaz.

La inyección (química y con cemento Portland), se emplea extensamente en la perforación de túneles con el objeto principal, pero no exclusivo, de disminuir la afluencia de agua subterránea. La necesidad de inyectar y la forma de realizar esta operación dependen de la naturaleza de las rocas existentes. Si la inyección se ha de hacer de modo satisfactorio, es preciso que existan grietas o, al menos, fisuras, o bien, porosidad general en la roca. Estas características citadas dan lugar a una excesiva entrada de agua, a rocas estructuralmente débiles incapaces de sostenerse para formar el arco de la bóveda de un túnel, o bien a materiales susceptibles a descomponerse en contacto con el aire. Suelen realizarse también inyecciones a elevada presión de la roca circundante con objeto de cegar cualquier fisuración local originada por la perforación del túnel y reducir las posibles fugas a través de la roca, cuando se trata de túneles de conducción.

La técnica de inyección consiste en hacer penetrar a presión y caudal relativamente regulado y con magnitudes muy diferentes, un fluido en la masa rocosa de forma que fragüe en las grietas y fisuras desplazando el aire o el agua en ellas existente. El producto inyectado, al mismo tiempo que impide la circulación del agua por la roca, proporciona una resistencia adicional.





De acuerdo con el grado de fisuración del macizo rocoso y el nivel de estanqueidad que se desea alcanzar existen diferentes tipos de mezclas (los principales tipos de mezclas son presentados en Anexo 2), entre las cuales puede elegirse la que nos ofrezca los mejores resultados y cuyas características de aplicación se adapten mejor al tipo de trabajo requerido. Las mezclas químicas y en particular el uso de los silicatos y sus reactivos han tenido una gran expansión en lo que respecta a impermeabilizaciones de rocas fisuradas, por los beneficios que reporta su empleo.

Para hacer más fácil, o posible, el relleno completo de los huecos existentes es necesario que estos huecos estén conectados entre sí. El acceso a estos sistemas de huecos se realiza mediante perforaciones espaciadas ampliamente, en el sentido que tal espaciado exceda en mucho la anchura de los huecos a inyectar, bien sean fracturas, poros o cavidades de mayor tamaño. Las rocas fisuradas están caracterizadas por tal abundancia de fisuras que una perforación ejecutada en cualquier punto es susceptible de absorber una cantidad de la mezcla inyectada más o menos importante.

Las inyecciones en túneles se utilizan frecuentemente en los frentes de avance perforados en terrenos con presencia de agua, evitando la afluencia de la misma. Existen muchos casos interesantes en los que la inyección ha sido necesaria para estabilizar rocas que, de otra forma hubieran sido difíciles si no imposibles de atravesar con seguridad.

Independientemente del número y de la magnitud de la abertura de las fisuras, deberá tenerse en consideración la calidad de la roca propiamente dicha, para elegir el método y el tipo de mortero de inyección a emplear.



## CAPITULO 4. MEZCLAS DE INYECCIÓN A BASE DE SILICATOS, PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS.

**Objetivo: “Mostrar las características y propiedades de las inyecciones a base de silicatos, con el fin de establecer las ventajas y desventajas en el sellado de filtraciones de agua en túneles excavados en macizos rocosos de origen ígneo”.**

Las técnicas de inyección comenzaron desde la práctica, no desde la teoría. Es intuitivo el hecho de que el relleno de huecos y cavidades existentes en el subsuelo permite su estabilización y/o sellado, a medida que el material inyectado, tras una fase fluida inicial, endurece o solidifica.

La primera aplicación de una inyección en el terreno se realizó hace casi 200 años. Fue el francés Charles Bérigny quien empleó una suspensión de agua y cemento con puzolana, con el fin de rellenar las cavidades existentes en los cimientos de una esclusa de los canales de navegación de París al Havre. Posteriormente, las técnicas de inyección de cemento fueron aplicadas en el sellado de rocas fisuradas, sin embargo, esta posibilidad de mejora fue limitada, debido a que las partículas de cemento han de pasar a través de los canales existentes entre las fisuras de la roca. La dimensión de los granos o flocúlos de la fase sólida en suspensión de estos morteros clásicos limita entonces su penetrabilidad. Es, pues, normal que sea la Química la que se ocupe de encontrar morteros perfectamente líquidos y, como tales , alcanzar todos los huecos del terreno donde el agua pueda tener acceso. Un gran paso en este campo se produjo con la invención de materiales químicos de inyección a base de soluciones puras, gracias al alemán Dutchman H. Joosten en 1926. Las inyecciones químicas se forman a partir de una base de inyección, un reactivo y un catalizador. Las más comunes son las basadas en una solución de silicato alcalino, sobre todo silicato de sodio, con diferentes reactivos para formar un concentrado de sílice, los llamados geles de sílice.

La idea de rellenar los poros de un terreno con un líquido de esta clase es bastante antigua, en 1886 apareció en Alemania una patente de este método, pero fue necesario esperar al procedimiento de Jeziorsky (1887) para tener una idea clara del sistema. A partir de entonces se inyecta separadamente en el terreno una solución de silicato de sodio y después una solución de cloruro de calcio. El silicato da un gel resistente que consolida el terreno impermeabilizándole. Este procedimiento lo volvió a adoptar Joosten y desde entonces es conocido por ese nombre.

El sistema Joosten consiste en la inyección sucesiva de silicato de sodio de alta concentración y cloruro de calcio, que al entrar en contacto ambas forman espontáneamente un gel de sílice. El procedimiento original se realizaba introduciendo un componente tras otro por barrenos distintos, desarrollándose la reacción dentro del terreno, siendo un proceso lento, poco preciso e incluso dificultoso. Por ello, se desarrollaron lechadas de silicato de un solo fluido (silicato de sodio + ácido clorhídrico + reactivo), de baja viscosidad con un tiempo de gelificación controlado, que eran fácilmente mezcladas en superficie e inyectadas de una sola vez en el terreno.

Fue a finales de los años 50's, con el desarrollo de los productos orgánicos, cuando se empezaron a emplear mayormente las inyecciones químicas, aunque Joosten había demostrado la fiabilidad del proceso de inyección química con su patente del método Joosten. Para 1957 se definieron las lechadas químicas como soluciones puras sin partículas en suspensión (a no ser que



éstas sean añadidas para algún caso específico), y debido a su baja viscosidad, a veces cercana a la del agua, son lechadas que pueden penetrar en fisuras de hasta 0.01 mm de abertura.

El mayor inconveniente de las mezclas químicas, debido al precio de los diferentes compuestos, es que son costosas. Suelen usarse para casos especiales o combinadas con otras técnicas, como con inyecciones de cemento previas. Como consecuencia del precio relativamente elevado de estos productos, se consiguió emplearlos disminuyendo su volumen, añadiéndoles un polvo fino puesto en suspensión. Se obtienen así suspensiones que se transforman, fraguan e incluso se polimerizan, exactamente igual que los morteros líquidos.

#### 4.1. Definición de las mezclas en base a silicatos.

Se define como inyecciones del terreno con silicatos los tratamientos del mismo por inyecciones de una mezcla formada por silicato sódico, agua y un reactivo orgánico o inorgánico que, al cabo de un cierto tiempo, gelifica pasando de sal a gel.

La base más común de los geles de sílice es el silicato sódico disuelto en agua, obtenible con diferentes pesos específicos, con diferente alcalinidad y diferente contenido de ácido silícico.

El silicato de sodio ( $n\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$ ) se comercializa en forma de solución coloidal en agua, con densidad de treinta y ocho grados Baumé ( $38^\circ \text{Bé}$  corresponden a una densidad de  $1.3 \text{ t/m}^3$  a  $20^\circ \text{C}$ ). Para aplicar lechadas químicas, el silicato se disuelve en agua. Dicha solución reducirá la viscosidad del producto y aumentará su penetrabilidad en los terrenos tratados. La dilución será ajustada en función a la permeabilidad existente. Para caracterizar las diluciones normalmente se usa el porcentaje de silicato en agua.

La solubilidad de los silicatos se basa en mantener un pH alto a través de la presencia del óxido de sodio alcalino ( $\text{NaO}_2$ ) a un nivel en que el óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$  - sílice) es soluble. Si el pH se lleva a un nivel neutro, se reduce la solubilidad de la sílice hasta formar un gel. Esta es la reacción química en que se fundamentan las lechadas de silicato de sodio en aplicaciones geotécnicas.

La relación  $n$  (sílice/álcali) es importante puesto que para valores de  $n$  entre 3 y 4 se obtienen geles adherentes, lo cual es especialmente interesante para su utilización en inyecciones. Si no se establece nada en contra, se usarán soluciones sódicas cuya relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  esté comprendida entre tres y medio (3.5) y cuatro (4).

La sílice es un ácido débil, y como consecuencia, el silicato de sodio es básico. La precipitación como gel de silicato se produce por neutralización con ácidos o sales ácidas. El tipo y cantidad de estos reactivos determina el grado de neutralización del álcali. La resistencia del gel aumenta con el incremento de la neutralización. El tiempo de gelificación se relaciona con la concentración de las disoluciones de partida.

En la figura 4.1, se describe el efecto de la neutralización. Según ésta, se requiere de una neutralización de al menos 66% para producir un gel duro. Otros autores señalan que la concentración de silicato sódico debe estar entre un 40 y un 60% incluso un 80%, para limitar el efecto de la sinéresis y, por consiguiente, producir un gel resistente. En las aplicaciones de impermeabilización la concentración típica es del 30%.



Fig. 4.1 Resistencia de un gel de sílice en función de la neutralización y del tiempo.

En todos estos productos se realiza la congelación retardada de una solución de silicato de sodio, con una cantidad de cationes insuficientes para obtener un medio eléctricamente neutro. Si se utiliza gran cantidad de geles serían menos estables y sobre todo más costosos porque necesitarían una cantidad demasiado grande de reactivo. Las propiedades del gel varían en grandes proporciones según el catión utilizado.

#### Reactivos:

Como se ha dicho, dado un silicato sódico apropiado, éste se mezcla con un reactivo endurecedor orgánico (geles duros) o mineral (gel espuma), que al variar su proporción permite regular el tiempo de fraguado, éstos pueden clasificarse en:

- **Reactivos orgánicos:** son sustancias orgánicas, o mezcla de varias de ellas, que en disolución en una solución coloidal de sílice alcalina, producen un gel sólido. Mediante hidrólisis, o disociación química se origina en la mezcla, de forma no instantánea, la cantidad de iones suficientes para una gelificación completa en un tiempo controlable y repetible en igualdad de condiciones.

Los agentes de fraguado orgánicos reaccionan con el silicato para formar geles de sílice a través de la modificación del pH. Estos sistemas son generalmente, más flexibles en sus respuestas al gelado, pero normalmente se obtienen menores resistencia y tienden a ser más caros que los agentes de fraguado inorgánicos.

- **Reactivos minerales:** son electrólitos inorgánicos, principalmente sales o mezclas de sales y ácidos, que, en una disolución de sílice coloidal alcalina, dan lugar a la formación de un gel blando de sílice, en forma no instantánea. Los reactivos minerales más importantes a añadir son el ácido clorhídrico (HCl), el cloruro cálcico ( $\text{CaCl}_2$ ), el sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) y sales sódicas. Los tipos de sales que producen un gel blando de sílice que se utiliza en la impermeabilización de terrenos son, entre otros:

- Bicarbonato de sosa, técnico.
- Aluminato sódico, técnico.
- Fosfato monosódico, técnico.



Los agentes de fraguado inorgánicos tienen muchas ventajas, generalmente producen las lechadas de mayor resistencia, tienen el menor impacto ambiental y son bajos en costos, pero los tiempos de gelado para estos sistemas están algo limitados y se requiere de mayor experiencia al formularlos y aplicarlos.

Los factores que influyen en las posibilidades de aplicación de las lechadas químicas son: durabilidad, viscosidad, resistencia del gel, control del tiempo de gelificación, toxicidad y costo. La tabla 4.1 recoge una síntesis de algunas de las propiedades generales.

Lechada Silicatos	Catalizador	Resistencia no confinada del terreno inyectado $\text{kg/cm}^2$	Viscosidad centipoises	Tiempo de fraguado minutos	Toxicidad	Polución
Concentración baja	Bicarbonato	0.7 – 3.5	1.5	0.1 – 300	No	No
Concentración baja	Producto de la Halliburton Co.	0.7 – 3.5	1.5	5 – 300	No	No
Concentración baja a alta	Siroc – Diamond Shamrock Chemical Co.	0.7 - 35	4 – 40	5 – 300	No	No
Concentración baja a alta	Cloruro – Proceso Joostein	0.7 - 70	30 – 50	0	No	No
Concentración baja a alta	Acetato etílico Solentache y Halliburton	0.7 - 35	4 – 40	5 – 300	No	No
Concentración baja a alta	Geloc – 3 H. Baker Co.	0.7 - 350	4 – 25	2 – 200	No	No
Concentración baja a alta	Geloc – 3x	0.7 - 175	4 - 25	0.5 - 120	No	No

Tabla 4.1 Propiedades de los silicatos.

#### 4.1.1. Clasificación de los geles.

En función de la naturaleza del reactivo y su aplicación existen dos grandes grupos de geles, los impermeabilizantes (plásticos), o blandos, y los de consolidación, o geles duros:

**A. Geles plásticos o blandos:** formados por una disolución de silicato sódico de treinta y ocho grados Baumé (38 °Bé) en agua y un reactivo mineral (p.e. bicarbonato de sodio o aluminato de sodio), añadido antes de la inyección, en una disolución generalmente elevada (relación silicato/agua del orden de 0.25). En impermeabilizaciones la resistencia a compresión simple es menos crítica, por ello la viscosidad resultante es muy débil, comparable a la del agua. Este tipo de geles se emplea en la impermeabilización de rocas muy finamente fisuradas y porosas. En el tratamiento de rocas porosas o muy fisuradas se procede, inyectando el gel antes de la lechada de cemento o bentonita – cemento.

**B. Geles duros:** formados por una disolución, por la mezcla de silicato sódico más o menos concentrado y un reactivo orgánico, siendo el más común el tipo acetato de etilo o un derivado de los diácidos. También pueden emplearse diferentes reactivos asociados, más ligeros o más pesados según se requiera alargar o reducir el tiempo de fraguado. Otro reactivo usado es el glioxai.



La viscosidad varía de varios a 25 s.mPa (s.mPa = centipoise cp) para los geles más concentrados, siempre hablando de viscosidad inicial. Este tipo de geles duros, también es aplicado a la inyección de rocas finamente fisuradas.

Los geles plásticos de silicato de sodio se obtienen por congelación retardada de un mortero único que conserva su estado líquido en el transcurso de la inyección. Para su fabricación se utilizan reactivos minerales, mientras que en las mismas condiciones de fraguado, son necesarios reactivos orgánicos para obtener geles duros.

#### **4.1.2. Aplicaciones de los geles en rocas.**

Las inyecciones con mezclas de silicatos de sodio y sus reactivos han logrado resultados satisfactorios en su aplicación en rocas fisuradas especialmente en los siguientes casos:

- **Inyección de silicatos en microfisuras.**

Para inyectar rocas con fisuras muy pequeñas con espacios intergranulares muy reducidos, es preciso utilizar líquidos que sufran el proceso de gelificación.

La aplicación de los geles es óptima en rocas con permeabilidades del orden de 1 a 10 UL es decir, en fracturas finas.

El límite inferior de aplicabilidad viene dado por la viscosidad en función del tiempo y por la presión admitida. Para las soluciones comunes, la anchura mínima de la fractura es de 0.05 mm, siendo selladas sólo excepcionalmente. La anchura mínima de la fisura está condicionada principalmente por el tamaño de la partícula del cemento, a través de la experiencia se ha establecido un ancho mínimo variable entre 0.1 y 0.5 mm.

Bajo estas condiciones, está justificado suponer que los sistemas de fracturas con anchos por debajo de 0.1 mm pueden ser inyectados de manera confiable usando los geles de silicato y sus diferentes reactivos.

- **Inyección de silicatos en rocas con permeabilidad matricial.**

Cuando las dos clases de permeabilidad – primaria y secundaria – se unen, la inyección de las fisuras es muy delicada.

Las fisuras que atraviesan una roca porosa (tobas muy permeables por ejemplo), en su masa son muy difíciles de inyectar con suspensiones de cemento. Las paredes porosas de la fisura absorben más o menos rápidamente el agua del mortero y al perder el cemento el vehículo que lo transporta, se deposita en las proximidades del barreno de inyección.

La solución de este problema consiste simplemente en suprimir la permeabilidad en pequeña escala de las paredes de la fisura. Se consigue esto, comenzando la inyección por una cantidad limitada de gel de silicato, éste penetra en el seno de la roca solidificándose después. Su rigidez, por pequeña que sea, es suficiente para quedar bloqueada entre los granos de la roca, pero no tanto como para poder ofrecer resistencia a una inyección de cemento a presión. Ésta pasa, entonces, normalmente por haberse suprimido la pequeña permeabilidad del macizo.

A menos que hagamos la inyección de cemento a muy alta presión con objeto de abrir las fisuras más finas al máximo, éstas permanecerán obturadas de gel. Es necesario, por tanto, emplear un gel indeslavable en este tratamiento preliminar. Este método es conocido como silicatización previa.



• **Inyección de silicatos como complemento a una inyección de otros morteros.**

En un macizo rocoso fracturado todas las fracturas no guardan la misma anchura, rellenando la inyección primero las de mayor anchura, pudiendo quedar sin rellenar las de anchura mínima.

Con objeto de rellenar las fisuras muy finas donde los morteros espesos no han podido penetrar y las cavidades pueden estar abiertas después de la primera inyección, hoy en día, los productos utilizados para tal situación son: los geles de silicato de sodio y reactivos. Estos son productos de cohesión reducida y únicamente sirven para impermeabilizar, pero como son bastante fluidos, su penetrabilidad es buena y completa, siendo su uso muy ventajoso sobre los morteros de arena – cemento.

En principio cada medio deber ser inyectado por materiales de inyección lo más gruesos posible. Estas reglas deben ser consideradas también en los procedimientos sucesivos. Al principio se rellenarán con el material apropiado los huecos más grandes, después los de tamaño medio y finalmente los más pequeños lográndose con ello la estanqueidad deseada.

Se han empleado con éxito inyecciones de silicatos para detener la entrada de agua en túneles; entre algunos ejemplos encontramos los siguientes:

	BERLÍN SUBTERRÁNEO	BERLÍN ESTRUCTURA MENDELSONH	HAMBURGO ZANJA PARA TUBERÍA	VIENA SUBTERRÁNEO
Material de inyección.	Gel orgánico duro	Gel orgánico duro	Gel blando inorgánico	Gel inorgánico duro
Reactivo.	Acetato de etilo	Éster dicarbono	Aluminato Na	Cloruro Ca
Neutralización	47.3	90	65	85
Zona inyectada (m <sup>3</sup> )	10 000	1 300	2 000	-
Permeabilidad del terreno (10 <sup>-4</sup> m/s)	1 a 3	5	3 a 4	0.1 a 10
Periodo de ejecución	10/1979 a 04/1980	11/1978 a 02/1979	09/1979 a 10/1979	05/1985 a 07/1985

Tabla 4.2 Ejemplos de aplicación de inyecciones de silicatos.

## 4.2. Propiedades y características de las mezclas.

### 4.2.1. Resistencia al corte.

Se ha de considerar que los materiales químicos de inyección son, en un sentido reológico, fluidos newtonianos, y como tales, no tienen límite de flujo, o lo que es lo mismo, carecen de resistencia al corte. Por lo tanto, la resistencia de la zona tratada con materiales químicos suele ser más pequeña que la conseguida por las inyecciones de cemento.

Casi siempre el factor de resistencia que se emplea es el de la resistencia húmeda. Esto se debe a que la mayoría de las aplicaciones de inyección son realizadas en terrenos húmedos o bajo el nivel freático, lo que hace que la masa inyectada nunca esté seca.

En el proceso de endurecimiento se produce una retracción del gel, con una expulsión del agua libre incluida, disminuyendo el volumen del mismo (sinéresis). Por lo tanto, el volumen del



gel después del endurecimiento completo es una medida de la calidad del gel, es decir, de las resistencias del gel y del medio inyectado.

Se ha observado que la resistencia final tiende a ser inversamente proporcional al tiempo de fraguado. Como este último es regulado con la concentración de reactivo, parece establecerse que la resistencia aumenta con la concentración de reactivo, además de incluir en tal parámetro la naturaleza del mismo.

Un hecho curioso es que por pequeño que sea el reactivo, los geles de un contenido de silicato constante y con un tiempo igual de fraguado, tienen a la misma edad la misma resistencia al corte salvo error de medida. Al cabo de 10 horas no aumenta prácticamente la resistencia al corte porque esos geles fraguan en 20 minutos. Su valor máximo es pequeño, alrededor de 30 g por centímetro cuadrado.

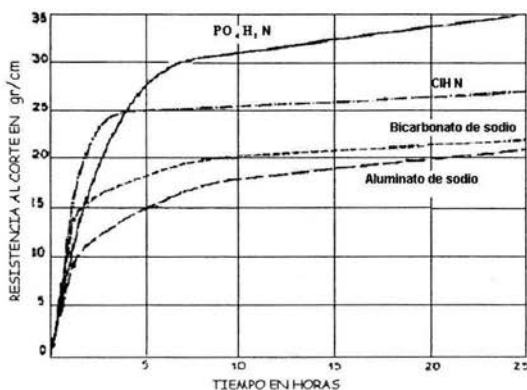


Fig. 4.6 Variación de la rigidez en función del tiempo, de diferentes geles con un tiempo igual de fraguado.

La cantidad de agua que modifica bastante el tiempo de fraguado, tiene una clara influencia en la resistencia. Cuanto mayor es la cantidad, más débil es la resistencia del gel.

Pero se observa también que geles que tienen el mismo contenido de sílice son menos resistentes, a medida que aumenta su tiempo de fraguado. Este retraso del fraguado, al haberse producido por un déficit de cationes cada vez más fuerte, los iones silícicos descargados, capaces por sí solos de coagular, son cada vez menos numerosos y la resistencia al corte tiende a disminuir.

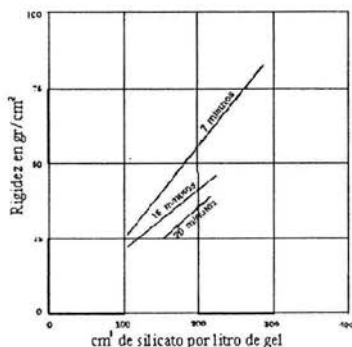


Fig. 4.7 Variación de la rigidez de diferentes geles con un tiempo igual de fraguado en función de la cantidad de agua o silicato contenido.





Este fenómeno es, pues, normal. Explica por qué un gel de fraguado lento, incluso fabricado con silicato muy concentrado, no puede tener una resistencia al corte tan fuerte como los geles de fraguado instantáneo utilizados en los procedimientos Joosten y análogos.

La variación lineal de la resistencia al corte  $r$ , en función de la cantidad total de sílice del gel  $S$  permite escribir:

$$r = K \frac{S}{A}$$

siendo  $K$  una constante y  $A$  la cantidad de agua.

La constante  $K$  parece variar poco con la naturaleza del reactivo, pero disminuye cuando el tiempo de fraguado aumenta. Es probable que fuera independiente de éste si se tomara para  $S$  únicamente la cantidad de sílice en estado de congelación.

#### 4.2.2. Sinéresis.

Como las lechadas de silicato contienen típicamente grandes cantidades de agua, pueden presentar encogimiento o sinéresis. El fenómeno de sinéresis se presenta en muchas mezclas químicas de fluidos simples, producido por la salida natural del agua presente en el gel. En las mezclas a base de sílice que sufren sinéresis, el agua es exudada al cabo de unas horas del fraguado, estabilizándose el proceso en unas 3 - 4 semanas. Se debe evitar sistemas de endurecimiento que presenten encogimiento mayor al 30%. Este efecto puede ser controlado con un aumento en la mezcla de la concentración de silicato y del coeficiente de neutralización.

El valor de la sinéresis en una lechada depende de la relación de su volumen con el área superficial del terreno inyectado, siempre que la unión del gel a la superficie sólida resista los esfuerzos de retracción interna y reduzca así la variación de volumen de la lechada.

El tamaño de los huecos del terreno influye sobre el fenómeno de la sinéresis, lo que puede obligar a tratarlo previamente con una lechada tipo arcilla - cemento o bentonita - cemento, para cerrar los grandes huecos.

La resistencia a compresión simple determinada en laboratorio sobre terrenos inyectados depende también de condiciones de curado y de la velocidad de ensayo. Si la velocidad de aplicación de la carga crece, también lo hace la resistencia. El curado de probetas sumergidas en agua tiende a proporcionar valores pesimistas por la posible disolución parcial del gel. Sin embargo, el efecto de la sinéresis parece reducirse sensiblemente con la textura del terreno.

#### 4.2.3. Durabilidad.

En cuanto a los geles, es importante tener en cuenta su durabilidad, puesto que pueden ser atacados químicamente por ciertas sales disueltas en el agua subterránea. Este ataque químico es producido lento pero constante, degradando las propiedades del gel.

#### 4.2.4. Tiempo de fraguado.

El tiempo de gelificación, o periodo de fraguado de una lechada química, se define como el tiempo entre el mezclado inicial de los componentes químicos y la formación del gel. Este periodo depende, para cada aplicación concreta, de muchos factores, entre los que destacan el volumen de la lechada a inyectar y el caudal de inyección a una presión de bombeo admisible. También constituyen factores importantes la permeabilidad del terreno, las condiciones del agua



freática y la temperatura. En este caso, el aumento de la temperatura puede reducir la viscosidad inicial, aunque esta reducción es marginal, siendo compensada rápidamente por la aceleración del proceso de gelificación.

El tiempo de gelificación de las mezclas químicas puede variar desde minutos a horas, según la temperatura. En condiciones normales, se usan tiempos de gelificación de 45 – 90 minutos para dar tiempo a realizar adecuadamente el mezclado, bombeo y emplazamiento de la lechada. No es fácil determinarlo, salvo en casos en que el fraguado está perfectamente definido. Pero no es el caso del silicato de sodio.

La medida de las viscosidades no suele ser buena norma para determinar el fraguado. Por el contrario, la medida de la rigidez marca un aumento de ésta al realizarse el fraguado, pero la aparición progresiva de este aumento impide que pueda utilizarse para determinar un tiempo de fraguado exacto. Por otra parte, estas medidas requieren el montaje de delicados aparatos.

Una medida indirecta de la rigidez se efectúa anotando el hundimiento de un cono de acero, sometido al peso propio y cuya punta se coloca inicialmente en la superficie del gel. Este cono tiene un ángulo en el vértice de 15° y pesa 100 g. Los hundimientos del cono se determinan a los cinco segundos del comienzo de la medida. Como en el caso anterior, tampoco puede saberse el tiempo de fraguado exactamente.

A la vista de estas dificultades, lo que suele hacerse es invertir el recipiente que contiene el gel. Cuando el gel deja de verterse es que se ha alcanzado el fraguado.

Hay quien se conforma con poner el recipiente sobre uno de sus lados. La superficie libre, que entonces es vertical debe mantenerse. Por último, otros sacuden ligeramente el recipiente. Cuando el gel comienza a desprenderse de las paredes, conservando sensiblemente la misma forma, se dice que ha fraguado. Por absorber el gel de sílice fuertemente la luz durante su fraguado, cabría pensar que al alcanzarse éste se produciría un cambio de absorción. Realmente no es así. Se comprueba que un gel, que tarda prácticamente una hora en su fraguado, sigue absorbiendo luz progresivamente durante unas diez horas. El proceso de solidificación continúa, por tanto, más allá del tiempo de fraguado.

Las medidas de pH o de resistividad no conducen a mejores resultados. Estas cantidades permanecen constantes durante el periodo de coagulación. Confirman, que la coagulación del silicato no corresponde a una reacción química, sino a una neutralización de las cargas eléctricas.

A cada uno de estos sencillos criterios corresponden tiempos de fraguado diferentes para un mismo gel. Están próximos cuando son cortos, pero notablemente diferentes si exceden de una hora aproximadamente. Por ser muy subjetivos estos procedimientos, no permiten una determinación exacta del tiempo de fraguado, pero son suficientes para las necesidades de una obra, a condición de que se utilicen siempre los mismos.

### **Factores que influyen en la duración del fraguado.**

**Reactivo:** la determinación del tiempo de fraguado de los geles confeccionados a partir de silicatos comerciales, diluidos en  $\frac{1}{4}$  y de un reactivo en solución normal:

t = es el tiempo de fraguado del gel, y

c = la concentración de reactivo en el terreno, se tiene que:

$$t = e^{-kc}$$



siendo  $k$  una constante que depende de la calidad del silicato dado por la relación  $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ , de su disolución y de su temperatura.

La figura 4.8 muestra un ejemplo de la relación anterior cuando varía la concentración del reactivo contenido.

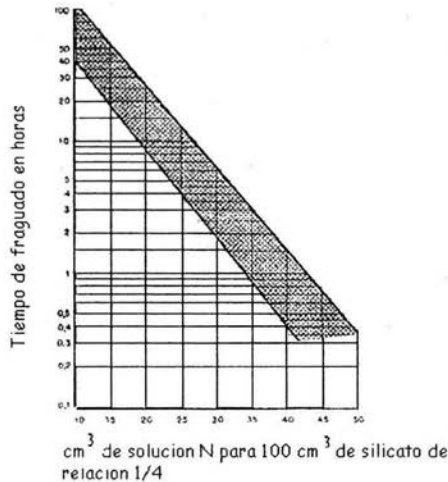


Fig. 4. 8 Variación del tiempo de fraguado de los geles en función del porcentaje de reactivo.

La dispersión de resultados proviene de la dificultad de apreciar el tiempo de fraguado con precisión. La diversidad de reactivos utilizados confirma claramente que no se está en presencia de una reacción química.

Esta ley exponencial muestra la gran importancia de la dosificación del reactivo. Debe hacerse con una gran precisión, si se quiere conservar en todo el proceso de fabricación del gel, el tiempo de fraguado fijado de antemano.

Es importante señalar que si, pretendiendo dilatar el tiempo de fraguado, la concentración de reactivo es muy baja en la mezcla, en ella quedará una proporción importante de  $\text{Na}_2\text{O}$  sin reaccionar, que contribuirá a la disolución y pérdida de resistencia del gel de sílice. En aplicaciones desarrolladas correctamente, este fenómeno puede limitarse a la zona de contacto entre el terreno tratado y el agua, y su influencia en el volumen de terreno inyectado es pequeña; sin embargo, en el laboratorio este fenómeno se extiende con facilidad a la totalidad de la muestra ensayada.

**Dilución:** si a partir de un silicato y un reactivo de concentraciones conocidas, se realizan geles, cuyo contenido de agua sea variable, puede comprobarse que para obtener un gel cuyo tiempo de fraguado sea constante, es necesario un volumen de reactivo que sea función lineal del contenido en agua del gel, lo cual puede ser observado en la Figura 4.9. También puede observarse que cuanto más concentrado es el gel más retarda su fraguado si se le añade una cantidad determinada de agua. Los geles menos sometidos a la influencia de la dilución son los que están menos concentrados en productos activos.

**Presión y agitación:** ninguna de las dos tienen influencia con el tiempo de fraguado, mientras no se modifique la temperatura.



**Medio inyectado:** si el terreno a inyectar contiene un manto de agua caliente, el fraguado del gel se acelerará. Sucederá igual si esta agua está mineralizada, al mezclar el mortero en más o menos cantidad con el agua al comienzo de la inyección. Estos dos fenómenos son conocidos y pueden fácilmente tenerse en cuenta para definir la composición de un mortero que dé plena satisfacción.

Además sabemos por experiencia que la granulometría y la naturaleza del material inyectado tienen una influencia en el fraguado del gel.

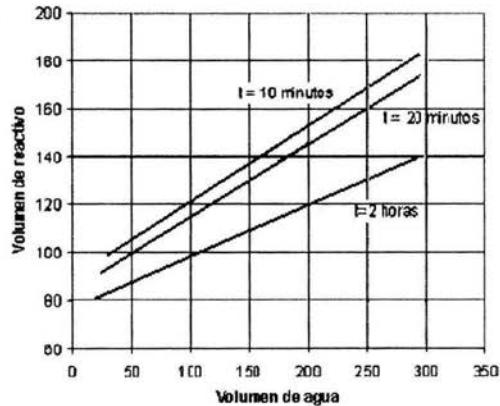


Fig. 4.9 Influencia de la dilución sobre el tiempo de fraguado. La cantidad de silicato es siempre la misma.

**Temperatura:** con los gelescorrientes la temperatura se eleva de 2 a 3 grados en el momento de mezcla del silicato y el reactivo. La reacción desprende algo más de 15000 calorías – gramos por molécula silícica descargada, bien por un ion ácido o por un catión polivalente.

A continuación la congelación se realiza a temperatura constante pero una elevación de la temperatura acelera la velocidad de reacción. Ésta se duplica cada vez que la temperatura se eleva unos 10 °.

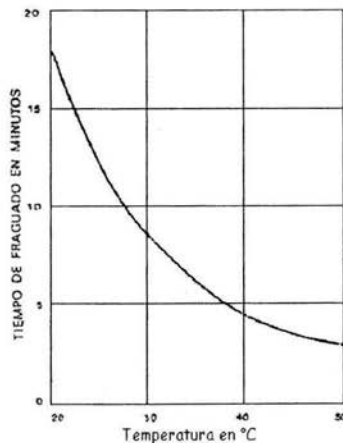


Fig.4.10 Influencia de la temperatura en el tiempo de fraguado.



#### 4.2.5. Contenido de agua.

El contenido de agua de un gel de fraguado retardado siempre es muy grande. Fácilmente puede alcanzar el 1500%. Esto quiere decir que en 100 g de gel existen alrededor de 6.3 g de materias sólidas. Esta cantidad puede parecer pequeña, pero esos geles son ampliamente suficientes para asegurar la estanqueidad; incluso se los puede diluir.

Esta agua se presenta bajo forma de agua libre y mezclada con algún producto. Para separar esas dos fases, se utiliza la centrifugación.

En los geles de aluminato la congelación de sílice es más constante que en los geles de bicarbonato. Por el contrario la del aluminato, también sol coloidal, es completa salvo error de medida. En la fase sólida, el número de moléculas de agua mezclada por cada molécula de sílice varía de 18 a 30. Esta fase es mucho más fuerte que con bicarbonato.

Además, estas medidas indican que siempre existe silicato en la fase líquida, pero siendo estos geles obtenidos con deficiencia de cationes, nada tiene esto de extraño. Es, pues, corriente, encontrar sílice en las aguas de deslavado de geles.

#### 4.2.6. Deslavado.

La experiencia de malos resultados nos demuestra que no basta con saber bombear morteros de inyección para saber inyectar; es preciso elegir correctamente las sustancias que deben componer los morteros, teniendo en cuenta la gran variedad que existe en el mercado y que hacen más difícil esta elección.

Geles de silicatos de sodio confeccionados con un reactivo inadecuado les hace, efectivamente, deslavables. Son suficientes unos pocos años para que la presión del agua les afecte o las circulaciones subterráneas los destruyan.

Ensayos de laboratorio realizados durante varios meses con medidas muy precisas, permiten prever el comportamiento de un mortero. Los ensayos de laboratorio son los que han informado que no todos los geles de silicatos de sodio son indeslavables. Es importante verificar en el laboratorio, que los geles utilizados para la impermeabilización no van a ser deslavados por las aguas de filtración. La elección del reactivo tiene una gran importancia. Se ha comprobado que los geles menos sensibles al deslave son los que constan de aluminato de sodio  $Al_2O_4Na_2$  o el ácido fosfórico  $PO_4H_3$  como reactivos.

La resistencia de los geles a ser deslavados no debe ser cifrada por la dosificación de sílice en las aguas de filtración, ya que existe mucha cantidad en la fase líquida del gel, sino por la medida de la permeabilidad del gel deslavado.

#### 4.2.7. Permeabilidad de los geles.

El aumento de permeabilidad de ciertos geles corresponde a la pérdida total de sílice. La fase sólida de esos geles se disuelve, pues, poco a poco.

El aumento del contenido de agua del gel aumenta la permeabilidad de éste. Pero aún en el caso más desfavorable, una permeabilidad final del orden de  $5 \times 10^{-2}$  unidades de Darcy no es suficientemente elevada para impedir que se realice una impermeabilidad satisfactoria. Lo esencial es que el gel no sea deslavable, cosa que puede lograrse fácilmente. Se puede elegir entre varios reactivos el que más convenga.

Los geles de aluminato, de ácido clorhídrico y de ácido fosfórico son las que dan al principio las aguas de filtración más cargadas en sílice, pero si se pretende hallar la cantidad total



de sílice eliminado en función del tiempo, haciendo intervenir el agua de filtración, directamente ligada a la permeabilidad del medio, se comprueba que son los geles de ácido clorhídrico puro los que pierden más sílice y los de aluminato y ácido fosfórico los que pierden menos.

Los ensayos donde se mide la permeabilidad de los geles, han demostrado que después de un deslavado de 15 días cesa la disolución del silicato y la permeabilidad del gel es insensible al deslavado.

Se observa que la permeabilidad aumenta de 1 a 10 aproximadamente cuando la cantidad inicial de sílice disminuye de 3 a 1.

#### **4.2.8. Inyectabilidad de las mezclas.**

La inyectabilidad, o capacidad de la inyección para penetrar en el terreno, está relacionada con la permeabilidad y, por consiguiente con el tamaño medio de las partículas y su porosidad, además del tamaño medio de partícula del material de inyección. Esta penetrabilidad de la lechada también depende de la presión aplicada durante la inyección, del tiempo de inyección y de su viscosidad.

Dado que la lechada no mantiene la misma viscosidad indefinidamente, para cualquier tipo de lechadas existe un límite en su distancia de penetración, que corresponde al radio efectivo. Durante el proceso de inyección la viscosidad aumenta y, por lo tanto, la permeabilidad aparente del terreno disminuye. Así, el radio efectivo se reduce a partir del valor calculado. Esta reducción puede ser compensada aumentando la presión, aunque no deberá sobrepasar la presión de fracturación.

Partiendo de lo expuesto, es probable que el valor de la permeabilidad inicial  $k$  disminuya con la reducción de la viscosidad inicial, y al contrario, la inyectabilidad aumente.

La penetrabilidad puede mejorarse localmente empleando una presión excesiva. Sin embargo, este aumento local tiene lugar en perjuicio de otras fracturas, las cuales pueden llegar a no ser inyectables por tal operación. Solamente pueden crearse buenas condiciones de inyección si se emplean mezclas adecuadas y las presiones aplicadas permanecen por debajo de la presión de fracturación.

### **4.3. Parámetros de diseño.**

Tanto en la ejecución de una operación de inyección como en el estudio teórico de la misma, existen cuatro parámetros principales cuya determinación ha de hacerse con detalle. Estos cuatro parámetros son los siguientes:

- Viscosidad y endurecimiento de los materiales.
- Presión de inyección.
- Radio efectivo.
- Tiempo de inyección.

#### **4.3.1. Viscosidad.**

Según el comportamiento reológico de las mezclas empleadas en las inyecciones, éstas pueden agruparse en dos categorías básicas: lechadas de partículas o suspensiones (fluidos de Bingham), y lechadas sin partículas o soluciones (fluidos newtonianos). Ejemplos de fluidos newtonianos son el agua y las lechadas químicas de baja viscosidad. Como muestra del comportamiento reológico de fluidos newtonianos se hallan los geles de sílice, de comportamiento más complejo.



La diferencia práctica entre éstas es que la penetrabilidad de las suspensiones es una función del tamaño de partícula en relación al tamaño de poros o fracturas del terreno a inyectar, además de su viscosidad inicial, mientras que para las lechadas o soluciones es una función de la viscosidad inicial y del tiempo de gelificación. El comportamiento de flujo y endurecimiento de todos los materiales de inyección están definidos por la viscosidad y el límite de flujo o rigidez. Los fluidos newtonianos se caracterizan por una función lineal del gradiente de cizalla y la resistencia al corte

$$\tau = \eta \cdot D$$

siendo

- $\tau$  = resistencia al corte
- $\eta$  = viscosidad
- $D$  = gradiente de cizalla

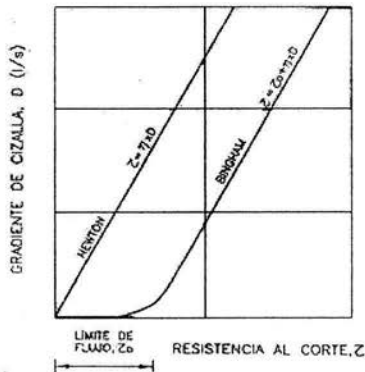


Fig. 4. 11 Curvas de flujo típicas.

Los gels de sílice tienen una viscosidad inicial que, dependiendo de la concentración de silicato sódico varía entre 4 y 20 s.mPa. Sin embargo, estas mezclas newtonianas antes de la gelificación, presentan una viscosidad creciente con el tiempo. El tiempo de fraguado se caracteriza por la aparición de rigidez en la mezcla, con una transformación simultánea de líquido de Newton (lechadas sin partículas o soluciones) en líquido de Bingham (lechadas de partículas o suspensiones).

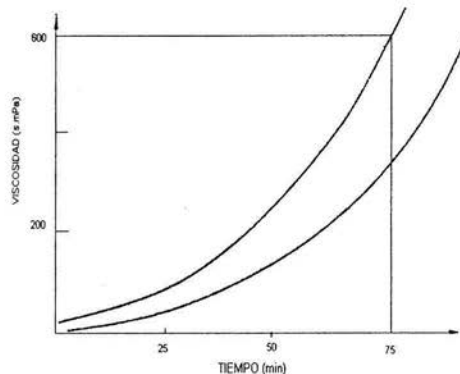


Fig. 4.12 Viscosidad de los gels de sílice en función del tiempo.



Por otro lado, las mezclas granulares tipo Bingham se distinguen por el límite de flujo o rigidez, donde debe alcanzarse una resistencia al corte inicial para comenzar a fluir. Después, la resistencia al corte y el gradiente de cizalla son proporcionales entre sí, hasta que la viscosidad pueda ser supuesta como constante.

La viscosidad y la rigidez o límite de flujo, son las dos propiedades reológicas que gobiernan el flujo de la lechada en los huecos del terreno. Esta viscosidad es la que permite que los materiales entren en las fracturas y poros, o hacen que la penetración sea imposible. Esto significa que, en principio, la viscosidad es responsable de la adaptabilidad de un material a un determinado sistema de fracturas o poros y con un radio efectivo dado. La viscosidad también gobierna la viabilidad de aplicación de un material. Los fluidos bombeables con equipos comunes, y por lo tanto tan factibles de uso, son aquellos con una viscosidad de hasta 800 a 1000 s.mPa.

El límite de flujo afecta a la ejecución del tratamiento, puesto que la presión deber ser lo suficientemente alta para superar el límite de flujo sin fracturar el terreno. Es importante apuntar que, según distintos especialistas, se usan diferentes términos para el límite de flujo, tales como límite líquido, punto de fluencia, valor de fluencia, umbral de resistencia o cohesión.

La figura 4.11 realmente es una instantánea que simula una viscosidad constante, pero la viscosidad de los materiales, necesariamente, depende del tiempo, debido al pretendido proceso de endurecimiento, esta viscosidad aumenta continuamente después del proceso de mezclado, además de depender también de la temperatura. Esto se aplica al agua, a las suspensiones de cemento y a las lechadas químicas. La viscosidad del agua disminuye con el aumento de la temperatura y al contrario, la viscosidad de las mezclas con base de sílice aumenta cuando lo hace la temperatura. Además, la viscosidad varía con la concentración de los reactivos químicos, como se indica en la Figura 4.13.

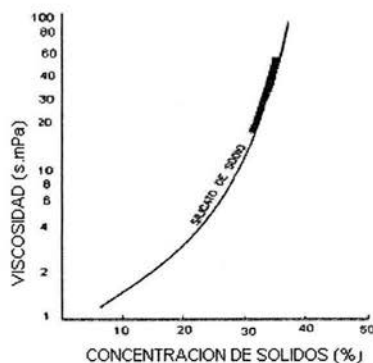


Fig. 4. 13 Viscosidad del silicato; la línea gruesa indica las concentraciones de la solución normalmente empleadas.

La viscosidad de los geles de sílice aumenta rápidamente en la parte final del tiempo de gelificación, pasando en los 15 últimos minutos de 10 a 100 s.mPa, como se observa en la figura 4.14. La viscosidad de una lechada química aumenta de forma moderadamente rápida después de su preparación, y a mayor velocidad tras unos 30 minutos.



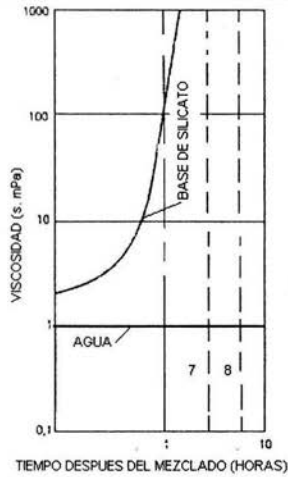


Fig. 4. 14 Evolución de la viscosidad de la mezcla con base de silicato.

Es necesario que el material no comience a endurecer durante la operación de inyección, ni tampoco provoque el bloqueo de la penetración por sedimentación de las partículas sólidas. Además, el material debe ser capaz de desalojar el agua existente en las fracturas o en los poros del terreno sin que se produzca la dilución del material de inyección ni su deterioro. Sabemos que un fluido de baja viscosidad será desplazado por un fluido de mayor viscosidad.

La viscosidad de este tipo de lechadas es evolutiva, baja durante la fase de inyección, creciendo rápidamente con el tiempo de gelificación. El desarrollo de esta viscosidad, para todo tipo de materiales químicos de inyección, depende de la temperatura, lo cual afecta el tiempo de gelificación o de fraguado. Por ejemplo, para un gel duro varía aproximadamente según la tabla 4.3.

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE GELIFICACIÓN (MIN)
10	80
20	60
30	40

Tabla 4.3 Variación del tiempo de gelificación con la temperatura.

Es importante tener en cuenta este efecto, que si se inyecta el gel en el terreno demasiado pronto se provoca una dislocación por gravedad de la lechada desde la zona deseada. Al proceder de forma contraria, demasiado tarde, hace que la lechada no alcance la zona requerida del tratamiento.

En general, las mezclas de silicato de sodio forman las lechadas químicas con mayor viscosidad, con valores de 20 a 50 s.mPa. Las soluciones de baja viscosidad se producen por disolución de silicato de sodio en agua.



### 4.3.2. Radio efectivo.

Las dimensiones de la zona de inyección vienen dadas por el radio efectivo, el cual se define desde el origen del material inyectado, es decir, desde la propia perforación de inyección, y viene dado por la siguiente ecuación.

$$R = \frac{a * p}{\tau_0} + r$$

siendo:

R = radio efectivo.

2a = anchura de la fisura

p = presión de inyección efectiva.

$\tau_0$  = limite de flujo del material de inyección.

2r =diámetro de la perforación.

Esta ecuación es válida para una fisura horizontal inyectada verticalmente. Para fracturas inclinadas existen otras ecuaciones mucho más complicadas.

Para fluidos newtonianos la relación entre la permeabilidad y la viscosidad es la siguiente:

$$\frac{k_0}{k} = \frac{\eta}{\eta_0}$$

siendo:

$k_0$  = permeabilidad del terreno con respecto al agua.

k = permeabilidad del terreno con respecto a un fluido newtoniano viscoso diferente del agua.

$\eta_0$  = viscosidad del agua.

$\eta$  = viscosidad de un fluido newtoniano diferente del agua.

Estas ecuaciones representan unas condiciones simplificadas, con una anchura de fisura constante, mientras que en la naturaleza la anchura varía a lo largo de cada fractura, además de variar éstas dentro de un macizo rocoso en anchura y orientación.

El material de inyección se mantiene en movimiento con la presión de inyección hasta alcanzar el radio efectivo final. El radio efectivo y la presión, deben ser limitados tanto por razones económicas como para no alterar la zona inyectada. Una presión inadecuada en la inyección puede originar levantamientos de la superficie, movimientos indeseados de la roca e incluso esfuerzos excesivos.

### 4.3.3. Tiempo de inyección.

El tiempo de inyección de las soluciones químicas es aproximadamente igual al tiempo de gelificación. Es al final de este tiempo de gelificación cuando el material comienza a desarrollar una resistencia al corte medible.

El tiempo de inyección está relacionado con la evolución de la viscosidad del material inyectado, con la presión de inyección admisible y con el radio efectivo deseado o alcanzado. Este periodo es de 20 a 60 minutos para el caso de lechadas químicas comunes.

Es durante el tiempo de inyección cuando el material actuará desde la perforación hasta la distancia deseada, siendo esta distancia el radio efectivo.

En el caso de lechadas químicas comunes, el radio alcanzado y el tiempo de inyección están limitados por el rápido aumento de la viscosidad, es decir, por el tiempo de gelificación relativamente corto. En la práctica esto conduce a unos radios efectivos de 3 a 5 m en sistemas de fracturas de 1 a 3 m en medios porosos.

A continuación se describe una inyección de relleno (Fig. 4.15), en la que se observa la importancia del factor tiempo.

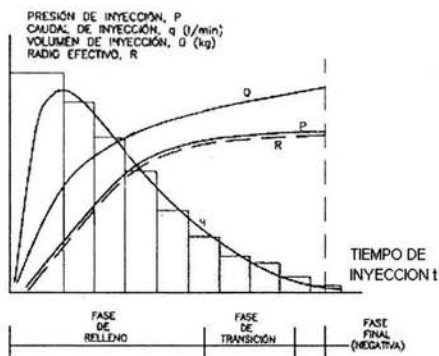


Fig. 4.15 Esquema representativo de una inyección de relleno típica.

La presión  $P$  es controlada, creciendo lenta y continuamente desde cero hasta el valor final admisible. Al final, la presión se mantiene constante durante un periodo de tiempo determinado. Con el paso del tiempo  $t$ , el área inyectada es rellenada hasta unos radios transitorios, y al fin hasta el radio efectivo definitivo  $R$ . En la fase de relleno, el caudal de inyección  $q$ , es elevado, disminuyendo a lo largo del tiempo hasta llegar a ser casi cero al final (fase negativa). Por razones prácticas, en la fase final el caudal de inyección es muy pequeño, pero no cero. El volumen total  $Q$ , del material inyectado va aumentando hasta el final de la operación.

#### 4.3.4 Presión de inyección.

La presión de inyección debe determinarse cuidadosamente debido a que si es excesiva, puede fisurar la roca o ampliar las fisuras existentes. En el mejor de los casos el daño implica la utilización de una cantidad antieconómica de lechada o resultar un daño peor como el debilitamiento permanente de la roca o el incremento de la permeabilidad. Por otro lado, si la presión es baja la lechada no penetra adecuadamente.

La presión de inyección a aplicar con seguridad dependerá entonces del estado de esfuerzos de la roca en el instante de inyección, cabe realizar ensayos de rotura por presión hidráulica con objeto de estimar la presión de trabajo adecuado.

Algunos autores proponen presiones por lo menos iguales al peso del material suprayacente al fondo de la perforación, que pueden ser mayores si la roca es masiva, la lechada muy viscosa y cuando la perforación ya fue inyectada previamente.

En el caso de un macizo rocoso con un sistema de fracturas principal paralelo a la superficie (horizontales), la presión debe ser igual al peso del terreno o sobrecarga. Solo entonces la presión puede ir incrementándose proporcionalmente con la profundidad. La presión, a cualquier profundidad, deberá ser menor que la presión referida al recubrimiento. Una presión demasiado elevada puede causar un empuje o desplazamiento de la roca; dependiendo del ángulo de buzamiento de las fracturas.



En el caso de macizos rocosos donde predominen familias de fisuras inclinadas o verticales, la presión a aplicar debe estar por debajo de la presión con la que se produzcan desplazamientos de la roca, que vienen indicados por deformaciones plásticas. Tal presión solamente puede ser determinada mediante ensayos, o bien estimada por la experiencia.

Se llama presión de rechazo a la presión límite que se fija de antemano, esta presión solo debe ser alcanzada cuando casi no hay flujo de lechada en el barreno. Es peligroso inyectar un caudal grande a niveles altos de presión de rechazo. Especialmente en rocas con estratos o juntas paralelas a la superficie del terreno y a menos de 15 m de profundidad. Para conseguir un buen tratamiento es necesario aplicar una presión tan alta como sea posible, pero tal presión, como se dijo anteriormente, puede ser perjudicial si una gran cantidad de lechada es inyectada bajo esta presión. Esta es una de las partes más delicadas de la inyección.

Al principio de la inyección, en un tramo dado, el flujo estará en función de la presión aplicada. Esta presión debe ser tal que la lechada fluya, por ejemplo, en un tramo donde la presión de rechazo sea de  $10 \text{ kg/cm}^2$ , un flujo de 100 por minuto, aplicando una presión de 1 a 2  $\text{kg/cm}^2$ , es razonable. En cambio si es inyectado a  $5 \text{ kg/cm}^2$  no es razonable y si es inyectado a  $10 \text{ kg/cm}^2$  es totalmente irrazonable.

El principio es el siguiente: aumentar la presión gradualmente para sentir el comportamiento del terreno; si el consumo es de 60 litros o más, mantener la presión baja, por ejemplo, a un tercio de la presión de rechazo; si el consumo es bajo, menor a 20 litros por minuto, aumentar gradualmente la presión.

Normalmente, a medida que la inyección progresa, la presión aumenta y el flujo disminuirá hasta alcanzar la presión de rechazo prácticamente sin flujo.

Cuando la presión permanece baja con absorción alta de lechada, mostrando que se está inyectando una gran fisura o una cavidad grande, la mezcla deberá ser cambiada por otra más densa para aumentar su resistencia.

Cuando por efecto de la presión de inyección se aumenta la abertura de las fisuras, al detener la inyección la fisura tiende a recuperar su abertura inicial. Las dos paredes comprimen entonces el depósito y la fisura queda perfectamente obturada. Se puede con una simple inyección pretensar el macizo. El depósito les impide recuperar su apertura inicial y como consecuencia se pretensa el macizo como si se hubiera comprimido con cuñas.

Se comprende igualmente por qué una inyección terminada a una determinada presión de rechazo puede continuarse a una presión superior. Ésta abre todavía más la fisura, lo que permite un nuevo depósito de lechada.

En las inyecciones de impregnación o relleno, la presión aplicada debe ser menor que la presión de fracturación y la presión de fracturación debe superar los esfuerzos tangenciales existentes.

La figura 4.16 presenta una distribución de presiones para el caso de un sistema de juntas abiertas. Así, en la perforación, la presión efectiva disminuye hasta cero en cualquier radio efectivo, transitorio o último. Las fisuras que al final de la inyección se cierran, presentarían una presión constante desde el sondeo de perforación hasta el final.



Fig. 4.16 Distribución de la presión de inyección en una fractura.

Por tanto, las presiones de inyección únicamente pueden evaluarse analizando detalladamente los registros de inyección y no es posible elaborar especificaciones que puedan adaptarse a todas las condiciones geológicas, de esfuerzos internos y de agua subterránea que pueden encontrarse en los trabajos de ingeniería civil.

#### 4.4. Técnicas de inyección.

Las lechadas químicas pueden aplicarse según dos procedimientos.

##### a. Doble acción.

Uno de ellos es el proceso de doble acción (two – shof), donde entran en contacto dos productos químicos formando un precipitado insoluble en los huecos del terreno inyectado. Normalmente se inyecta primero la sustancia más viscosa, seguida de la segunda inyección, menos viscosa, que se mezcla con la primera, reaccionando hasta formar el precipitado. Como ejemplo de este procedimiento se tiene el ya citado método Joosten, que consiste básicamente en la inyección de silicato sódico concentrado seguido de una solución de cloruro cálcico dura inyectada a alta presión que actúa como gelificante.

La formación del gel es un proceso rápido al entrar en contacto ambos componentes, por el contrario, la reacción química entre el silicato sódico y los reactivos se producen en función del tiempo.

El proceso de formación del gel descrito por Joosten es:



Este silicato de sodio tiene un alto contenido de ácido silícico, que es el que proporciona la resistencia al gel, así como la permeabilidad y la resistencia de los medios inyectados. La resistencia conseguida por Joosten es máxima debido a que se emplea silicato sódico concentrado, a una densidad de 37 – 40° Be y una viscosidad de más de 50 s.mPa (Be: Baumé es una denominación común de la densidad del silicato sódico).

Generalmente la inyección de doble acción produce valores de resistencia a compresión no confinada mucho mayor que el sistema de acción única. Por ejemplo, con el método Joosten se



alcanzan resistencias entre 2.87 MPa. El gel no sufre retracción al fraguar, es resistente a los cambios de temperatura y a ataques salinos, además de no resultar tóxico.

Por otro lado, el método de Joosten es un proceso más lento, debido a que la solución de silicato sódico ha de inyectarse a medida que la tubería de inyección avanza hacia abajo. A continuación, esta tubería se lava con agua y se inyecta el cloruro de calcio a medida que el tubo se extrae. Además su utilización está restringida, ya que es necesario inyectarlo empleando tubos muy reducidos para obtener buenos resultados.

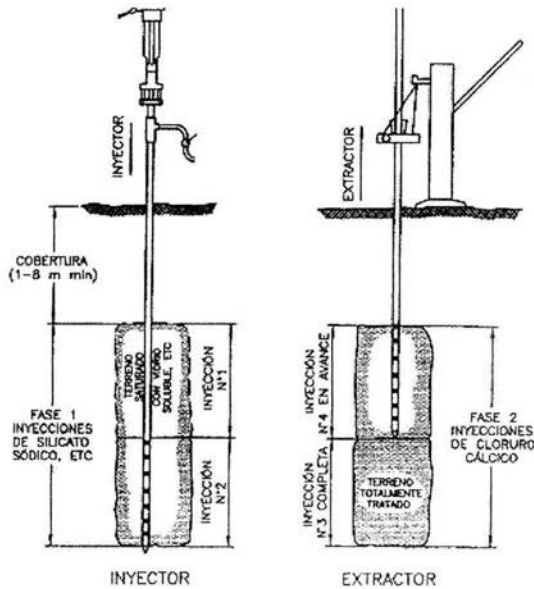


Fig. 4.17 Inyección por el método Joosten.

La penetrabilidad de la lechada de silicato está limitada por el hecho de que la precipitación tiene lugar cuando entran en contacto las dos soluciones, por lo que es necesario que las inyecciones se realicen muy próximas. Para mejorar la admisión de la lechada se puede aplicar una mayor presión de inyección, aunque no siempre se obtiene una interpenetración perfecta entre las dos inyecciones.

#### b. Acción simple.

El proceso de inyección de doble acción ha sido ampliamente desbancado por los sistemas de acción simple (one - shof), una patente antigua de Lemaire y Dumont, correspondiente a un procedimiento totalmente diferente; en este último todos los productos a utilizar se mezclan antes de ser inyectados, diseñándose para que la reacción que convierte la lechada en una masa sólida o gelatinosa tenga lugar en los huecos del terreno a rellenar. En cuanto a las inyecciones de acción simple, éstas son más versátiles que las de dos inyecciones, tienen un tiempo de gelificación controlable entre unos minutos y varias horas y rangos de viscosidades ( 1 a 10 s.mPa) y de penetrabilidad (hasta  $10^{-6}$  m/s) bastante amplios.

Como inconveniente, con este sistema los valores de resistencia logrados en lechadas de silicatos son bajos (hasta 3.5 MPa). El gel obtenido de esta forma no es muy rígido y no debe utilizarse más que para impermeabilizar.



Sin embargo, si el silicato sódico se mezcla con esteres orgánicos (acetato de etilo), además de retrasarse el tiempo de gelificación, este tipo de inyecciones provocan un aumento apreciable en la resistencia del terreno tratado.

Como los concentrados de estas inyecciones de acción simple son débiles y no siempre estables, solo deberían emplearse en condiciones adecuadas y bajo la experiencia cualificada de los ingenieros de inyección.

En general para ambos tipos de inyección la resistencia “in situ” del terreno dependerá del contacto mecánico existente entre el terreno tratado y la lechada química inyectada.

Tomando en cuenta las diferentes características que presentan las mezclas de inyección con silicatos como material principal, deberá establecerse el procedimiento adecuado, dependiendo del estado de fisuración del terreno, equipos y recursos, y por supuesto el grado de estanqueidad deseada. La secuencia del procedimiento de ejecución se detalla en el Capítulo 5.

## CAPÍTULO 5. PROCEDIMIENTO DE SELLADO DE FILTRACIONES A BASE DE SILICATOS ALREDEDOR DEL PERÍMETRO DE UN TÚNEL.

**Objetivo:** “Mostrar el procedimiento de inyección a base de silicatos, en el sellado de las filtraciones de agua en túneles excavados en un macizo rocoso de origen ígneo”.

A fin de determinar el procedimiento adecuado en una inyección de impermeabilización se deberá inicialmente establecer el objetivo que se persigue, ya que de ello dependerá el método a seguir, los equipos, dosificaciones, etc., definiéndose los procedimientos más acertados para cada caso en particular.

### 5.1. Tipos de inyección según la mejora del terreno.

Se distinguen tres tipos principales de mejora del terreno mediante inyecciones: de impregnación o relleno, de compactación o desplazamiento e inyecciones de fracturación. Será dependiendo el fin que se persiga, que se hará uso de alguno de ellas en particular. La figura 4.2 recoge esquemáticamente el fundamento de estos tres tipos de mejora del terreno.

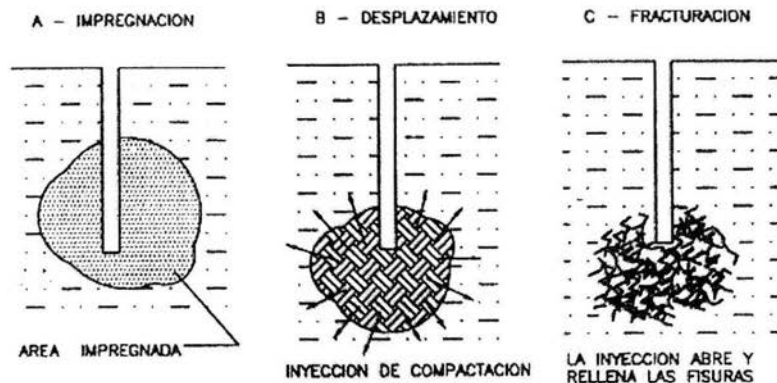


Fig. 5.1 Principales tipos de inyección.

#### 5.1.1. Inyecciones de impregnación (Sello).

Las inyecciones de impregnación se basan en el relleno de los poros o fracturas por el material inyectado, sin producir prácticamente cambios de volumen en la estructura del terreno original. Su finalidad es la de sellar y/o rellenar los huecos para controlar el flujo de agua. Por su propio fundamento, es aplicable en macizos rocosos con fisuras importantes, control de agua en el terreno, en soportes de túneles y excavaciones o en reparaciones de estructuras bajo el nivel freático.

En general, cuanto mayor es la profundidad a alcanzar bajo el nivel freático en terrenos permeables, tanto más dilatado suele ser el tiempo de ejecución y, a la vez, más interesante podría resultar la inyección comparada con el achique. En cualquier caso, es importante no descartar la combinación inyección – agotamiento de agua. Ciertamente, cuanto mayor es el grado de estanqueidad logrado por la inyección en el terreno y, en consecuencia, menor la necesidad de achique, mayor es el costo de la inyección (mayor densidad de perforaciones y/o más fases de





tratamiento, mayor consumo de material de inyección y más tiempo de ejecución). Así pues, el óptimo económico puede radicar, en cada caso, en una combinación adecuada de tratamiento de impermeabilización y de achique.

En las inyecciones de impregnación, se emplean lechadas de cemento y de tipo químico, a base de silicatos de sodio, entre otras.

#### 5.1.1.1. Método de ejecución.

En la ejecución de las inyecciones de impregnación pueden emplearse desde lanzas de mano con métodos de final de entubado, inyección por etapas ascendentes o descendentes, hasta tubos de manguito instalados según el diseño predeterminado (horizontal, inclinado o verticalmente).

Cuando se aplican a profundidades someras, las inyecciones de impregnación suelen realizarse en una sola etapa, a partir de una tubería de inyección que desciende por el sondeo perforado hasta completar la profundidad, inyectando de manera ascendente. En este caso, la inyección puede ejecutarse alternativamente mientras se realiza la perforación, la que se prolonga cierta distancia con una varilla de perforación hueca, extrayéndose ésta dicha distancia para después inyectar la lechada con la varilla. Mientras el terreno se estabiliza lo suficiente con la migración de la lechada debido a las inyecciones previas, la perforación permanece abierta en toda su longitud.

Este ciclo se repite, continuando la inyección hasta que la varilla es extraída totalmente.

En los casos de inyecciones a mayores profundidades o con presiones elevadas se emplea la técnica de inyección por etapas (Fig. 5.2). En este caso, la perforación se realiza a una profundidad determinada antes de ejecutar la inyección propiamente dicha. Cuando la lechada ha fraguado, la perforación es profundizada para la ejecución de la siguiente etapa de inyección, repitiéndose el proceso.

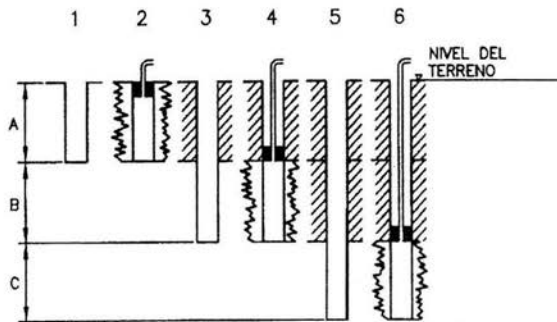


Fig. 5.2 Inyección por etapas con obturador.

La inyección por etapas permite usar presiones de inyección crecientes para aumentar la profundidad del sondeo de inyección, reduciéndose así la pérdida de la lechada por fugas hacia la superficie.

En el tratamiento de terrenos con inyecciones de impregnación, la distribución de los sondeos está relacionada con el radio efectivo deseado y, por lo tanto, con la presión admitida. Comúnmente se escogen espaciados entre 1.5 y 3.0 m.

El método de tubo - manguito constituye una técnica muy común tanto en la inyección de macizos rocosos como en suelos. El tubo - manguito consiste en un tubo de acero o plástico, de entre 37.5 y 62.5 mm de diámetro. Dicho tubo está perforado con pequeños agujeros circulares,

de 8 mm de diámetro, espaciados a intervalos estándar de 0.33 m. Debido a esta corta longitud de la sección de inyección, los poros y fracturas se rellenan completamente.

Cada grupo de estas pequeñas perforaciones está cubierto por un tubo de goma o manguito de 60 a 120 mm de longitud, que se infla como una válvula bajo la presión de inyección, permitiendo el paso de la lechada a través de las perforaciones hacia alrededor del tubo. Todas estas dimensiones recomiendan un diámetro del sondeo de 75 mm.

En la Figura 4.4 se muestra el modo de operación. Tras ejecutar el sondeo y, en su caso extraer el revestimiento, se vierte una lechada, llamada lechada de vaina en el espacio entre la pared del sondeo y la tubería. A continuación se lleva a cabo la inyección a través del tubo - manguito, bajando dentro de él una tubería de inyección, de pequeño diámetro, hasta su parte final perforada, quedando encajada entre dos obturadores en U. Estos obturadores se pueden centrar entre cualquiera de los grupos de perforación del tubo.

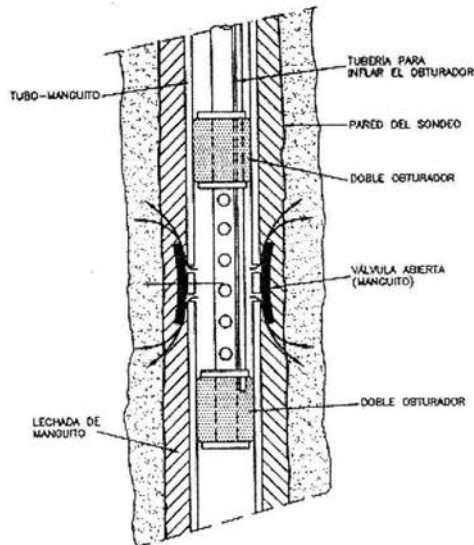


Fig. 5.3 Modo de operación de un tubo manguito.

Al comenzar la inyección, la presión aumenta en la tubería de impulsión hasta que la lechada levanta los manguitos de goma, permitiendo que salga por las perforaciones hasta el terreno circundante. Los manguitos impiden el retorno del mortero al tubo manguito y previenen cualquier escape hacia la superficie.

Las ventajas de esta técnica del tubo manguito son:

- La inyección confiable de una zona definida, en el macizo rocoso,
- La posibilidad de reinyectar, y
- La separación conveniente de trabajos de perforación e inyección en unidades discretas, ofreciendo una gran flexibilidad en el trabajo, puesto que en un mismo sondeo puede inyectarse más de una vez y usarse distintos tipos de lechadas.

Normalmente, se estima que el 70% del fluido total de la inyección se efectúe en los sondeos primarios, dejando el resto para los sondeos secundarios y terciarios.

Como ya se explicó al hablar de los parámetros de diseño, en las inyecciones de impregnación la presión de inyección aplicada debe ser menor que la presión de fracturación, ya



que si no fuera así podría producirse una impregnación inconsistente. Con un caudal de 5 a 10 l/min, la presión aceptable no debe exceder a 1.0 MPa (1 mPa = 1000000 Pa).

El resultado obtenido es una masa de roca consolidada y reforzada, formando una zona de permeabilidad muy reducida como control de la circulación de agua.

#### **5.1.1.2. Ventajas.**

La aplicación de las inyecciones de impregnación ofrece las siguientes ventajas.

- Localización precisa y controlada.
- Dimensión, forma y profundidad del área de tratamiento predeterminada.
- Flexibilidad para aumentar el alcance del tratamiento, tanto en tiempo como en posición.
- Costos económicos y predecibles.
- No existen vibraciones.
- Requerimiento de un área de trabajo limitada.
- Grado de mejoramiento importante y predecible.

#### **5.1.1.3 Control.**

Las medidas de control más importantes a realizar durante la ejecución de tratamientos con inyecciones de impregnación son:

- Comprobación del fraguado y del tiempo de gelificación.
- Viscosidad, densidad y exudación de la mezcla.
- Presión y caudal de flujo en función del tiempo.
- Volumen por emplazamiento de inyección.
- Ensayos de permeabilidad del agua antes y después del tratamiento.
- Registros de las muestras de sondeo.

#### **5.1.1.4. Ejemplos de sellado en rocas.**

- Sellado de rocas en túneles, para permitir o facilitar el avance.
- Sellado de rocas alrededor de cavernas, que reduzca la infiltración cuando la caverna está en explotación.

#### **5.1.2. Inyecciones de compactación o desplazamiento.**

Las inyecciones de compactación o de desplazamiento introducen en el terreno materiales muy viscosos a altas presiones, de manera que desplazan o comprimen el terreno circundante sin penetrar en él. El resultado, al endurecer la lechada, es un bulbo o columna formada por una masa de terreno más compacto, y relativamente incompresible, donde se intercalan las zonas del material inyectado.

Debido a que el radio de acción afectado por la inyección es pequeño, por lo que el tratamiento es bastante puntual, se requiere un número apreciable de perforaciones para el tratamiento de una zona determinada.

Para que la mejora sea efectiva las inyecciones de compactación no deben realizarse a profundidades menores de 1 – 2 m, a no ser que exista una estructura por encima a la que se deba proporcionar contención.



### 5.1.2.1. Aplicaciones.

- Este tipo de inyecciones se ha empleado mucho para corregir asentamientos diferenciales, debido a que el volumen de la masa o zona inyectada aumenta, por lo que puede provocar un levantamiento del terreno.
- Además, se utilizan como sostén de estructuras, cuando bajo éstas existe un terreno de baja capacidad portante. También como refuerzo del terreno adyacente en excavaciones abiertas y en la ejecución de túneles.
- En el caso de túneles, las inyecciones de compactación se emplean para rellenar grandes huecos, como la existencia de cavidades cársticas, o compensar deformaciones al ir avanzando la excavación del túnel.

En las inyecciones de compactación se emplean lechadas de viscosidad elevada, comúnmente lechadas de cemento – arena, pudiendo ser mejoradas con aditivos. También pueden utilizarse geles de sílice fuertes.

### 5.1.2.2. Método de ejecución.

La inyección puede realizarse por etapas descendentes, desde cerca de la superficie del terreno hasta una capa firme, o bien por etapas ascendentes, por medio de tuberías instaladas según el diseño escogido (verticalmente o en ángulo) a partir de la profundidad de tratamiento requerida hasta la superficie. La lechada se bombea hasta alcanzar uno de los siguientes criterios: llegar a la presión negativa o máxima, alcanzar un volumen máximo predeterminado de lechada u observar un levantamiento del terreno o de la estructura.

Cuando el problema a tratar afecta hasta niveles próximos a la superficie del terreno, es casi obligatoria la inyección por etapas descendentes para prevenir fugas de la mezcla hacia la superficie.

Las presiones aplicadas en el punto de inyección varían típicamente entre 350 kPa y 1.7 MPa en el caso de inyecciones de 2 m de la superficie, a 3.5 MPa cuando la inyección tiene lugar a profundidades mayores a los 6 m presiones por encima de los 4.2 MPa son empleadas en pocas ocasiones, independientemente de la profundidad del tratamiento, aunque algunas veces se precisan presiones muy elevadas, como de unos 7 MPa, para iniciar la inyección de la mezcla en el caso de emplear tuberías estrechas.

Durante el proceso de inyección es importante que el aumento de la presión no se realice demasiado rápido, lo que puede controlarse ajustando el caudal de bombeo; un caudal lleno ofrece una mayor toma de lechada.

El tamaño de la masa inyectada depende de la densidad, humedad y propiedades mecánicas del terreno, además del caudal y de la presión de inyección. Las inyecciones de compactación han sido aplicadas hasta en profundidades de más de 30 m.

### 5.1.2.3. Ventajas.

Las ventajas del tratamiento con inyecciones de compactación son:

- Localización precisa y controlada.
- Grado de mejoramiento predecible.
- Rangos de producción altos.
- Programa de inyecciones en serie.
- Costo efectivo; este tipo de inyecciones puede aplicarse cuando el control del asiento sobrepasa un valor predeterminado.



- No generan vibraciones que puedan afectar estructuras vecinas.
- Rupturas mínimas

#### 5.1.2.4. Control.

El control a realizar en este tipo de inyecciones puede distinguirse según sea durante o después de la ejecución:

Durante la ejecución:

- Registro del volumen y de la presión de inyección.
- Control del levantamiento del terreno.
- Ensayos en la mezcla.

Después del tratamiento:

- Control de asentamientos y deformaciones.
- CPT (Cone Penetrometer Testing).
- SPT (Standard Penetration Testing).

#### 5.1.2.5. Ejemplos de estabilización en roca.

- Mejora de la roca circundante a túneles, para facilitar su excavación y reducir los costos del revestimiento provisional y definitivo.
- Consolidación de la roca circundante en túneles bajo presión, aumentando el efecto de sostenimiento de la roca.

#### 5.1.3. Inyecciones con fracturación.

En las inyecciones con fracturación, junto al efecto de relleno de los huecos o fisuras naturales existentes en el terreno, se produce una fracturación hidráulica del mismo debido a las muy altas presiones de inyección que se aplican, rellenando con la inyección también las nuevas fisuras así creadas. Este sistema de fracturas provoca un armado del terreno, que compacta y mejora sus propiedades mecánicas, reduciéndose además su permeabilidad.

En resumen, la estabilización del terreno se logra por esta fracturación hidráulica y el relleno de las fracturas por el material inyectado.

La fracturación puede formarse en cualquier dirección. En una masa de roca homogénea con la superficie del terreno horizontal, el esfuerzo principal menor es un esfuerzo horizontal, por lo que las fracturas se desarrollan principalmente en una dirección vertical.

Posteriormente, con el aumento de la compactación lateral por el relleno de las fracturas pueden desarrollarse fracturas horizontales, obteniéndose al final un esqueleto formado del material inyectado endurecido, con el terreno compactado entre las ramificaciones del esqueleto (Fig. 5.4).

Este esqueleto, formado por la lechada endurecida, proporciona globalmente al macizo una resistencia al corte adicional. El grado de resistencia del terreno confinado en el esqueleto depende de las condiciones de drenaje y de la presión intersticial generada. Al no haber una zona de inyección coherente, casi no es posible estimar o determinar, en términos de resistencia, el resultado de la inyección.

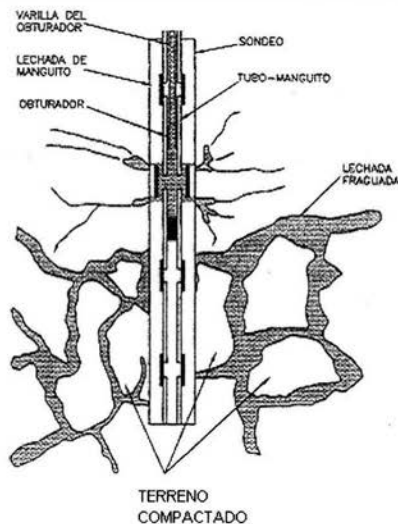


Fig. 5.4 Inyección con fracturación con tubo – manguito.

#### 5.1.3.1. Presión de inyección.

La fracturación aparece cuando se excede un determinado valor de la presión en la tubería de inyección, que depende de las características del terreno y del espesor del recubrimiento. El valor es la presión de fracturación, que puede estimarse a partir de las ecuaciones descritas en los parámetros de diseño, o mediante ensayos. Cuando se trata de profundidades bajas, la presión de fracturación ha de ser menor.

Es obvio que la presión necesaria para rellenar las fracturas existentes es menor que la presión requerida para crear nuevas fracturas. Así, después de la fracturación, esta presión de inyección disminuirá.

Para poder crear el esqueleto no son necesarios valores mayores de 1.5 MPa, siendo necesarios hasta 2.0 MPa de presión para fisurar la lechada de manguito alrededor del tubo manguito, precisándose de esta presión solamente una vez para cada manguito, y durante un corto periodo de tiempo.

Para la elevación de una estructura también es necesario que la presión exceda la presión de fracturación, que, en este caso, depende del peso muerto de la estructura y del área en la que se realiza. Esta área está relacionada con el orden y el número de manguitos activados simultáneamente. La presión de levantamiento es difícil de determinar puesto que la extensión del área afectada no es conocida.

Los trabajos de levantamiento de estructuras deben ser controlados cuidadosamente, ya que si la presión es demasiado elevada, la lechada escapará hacia la superficie, cayendo repentinamente la presión. Para una carga estructural de 60 MN, la presión de levantamiento viene a ser de 2.0 MPa. Esto corresponde a un área afectada de 30 m<sup>2</sup> equipada con 4 manguitos activados simultáneamente.

#### 5.1.3.2. Ejemplos de estabilización en roca.

- Las inyecciones con fracturación pueden ser aplicadas en casi todos los tipos de terrenos, como rocas débiles, ya que el proceso de este tipo de inyecciones precisa



que el terreno sea fracturado no penetrado. Este tipo de inyecciones es muy utilizado en el caso de formaciones rocosas, con la finalidad de conseguir su refuerzo y disminuir su permeabilidad.

- Las inyecciones con fracturación son empleadas para reducir o frenar asentamientos diferenciales o totales de estructuras, y/o renivelar, e incluso evitar los asentamientos generados en edificios próximos a la excavación de túneles. Además, también pueden emplearse en la estabilización de deslizamientos.

En las inyecciones con fracturación, tanto por razones técnicas como por razones económicas y medioambientales, solamente se emplean suspensiones de cemento, con o sin escoria puzolánica. Como aditivos pueden usarse aceleradores y silicato sódico, este último ayuda en el inicio rápido del proceso de endurecimiento.

### 5.1.3.3. Método de ejecución.

Los sondeos se distribuyen de manera que se permita el desarrollo de un esqueleto de lechada lógico, instalándose tubos – manguito en todas las perforaciones. Con este método se permite realizar todo el trabajo de perforación antes de iniciar la inyección, que se hace en sentido ascendente.

Los sondeos deben perforarse hasta una capa firme que soporte el esqueleto. Para el caso de una mejora general, estos sondeos se disponen en una malla regular sobre la masa del terreno a tratar.

### 5.1.3.4. Control

Las medidas de control a realizar en los trabajos de inyección con fracturación son:

- Monitoreo adecuado de todas las fases de la ejecución, desde la instalación de los tubos hasta la misma inyección
- Diseño y control detenidos tanto del mezclado de la lechada, como de la presión, el volumen y el caudal de bombeo
- Control por ordenador de los movimientos de la estructura.
- Documentación completa de cada etapa de la ejecución.

## 5.2. Equipos necesarios en los tratamientos de inyección.

El equipo básico de las inyecciones químicas difiere en algunos aspectos del utilizado en las inyecciones de cemento. De forma general consta de los siguientes aparatos:

- Bomba de inyección
- Manómetros de presión
- Líneas de circulación, obturadores y manguitos.

En el mercado existen distintos tipos de bombas, según el número de componentes que se tenga que aspirar para crear la lechada química. En el caso de las mezclas de dos componentes las bombas son muy potentes, de manejo sencillo y fácil mantenimiento.

Dependiendo de los tipos del polímero y del tipo inyección, los componentes químicos son distribuidos ya mezclados o por separado. En este último caso, los compuestos serán succionados



por las bombas y se mezclaran en la aspiración, creando un producto final que al entrar en contacto con el agua se espumará.

Los equipos para la ejecución de inyecciones se pueden agrupar, fundamentalmente, en:

- Equipos de perforación.
- Equipos de inyección.

### **5.2.1. Equipos de perforación.**

Son dos los tipos de máquinas de perforación más utilizadas: el de percusión y el de rotación. Dentro de las máquinas de percusión se incluyen las de rotopercusión que combinan percusión y rotación. Estas últimas son las más utilizadas actualmente.

Las máquinas de percusión perforan con martillo neumático. Existen máquinas en las que la acción del martillo se comunica a la broca por medio de la tubería de perforación, otras, cuentan con martillo de fondo y la acción se aplica directamente a la broca. En algunas máquinas los recortes son eliminados mediante el aire y el agua de perforación, en otros únicamente con aire.

Las máquinas de rotación perforan con flujo continuo de agua para sacar los recortes fuera del barreno. El rendimiento de las máquinas de percusión es mayor que el de las de rotación.

Existen desventajas al perforar con cualquiera de estos tipos de máquinas: en las de rotación los recortes son muy finos y pueden taponar las fisuras finas al penetrar con el agua de lavado de los barrenos; y en las de percusión, aunque los recortes son más gruesos, pueden introducirse en las fisuras debido a la presión del aire de perforación o con el agua del lavado de los barrenos.

Los estudios comparativos de la eficiencia de la inyección efectuados con ambas máquinas no llegan a ser concluyentes; sin embargo, por su bajo costo de operación y su mayor rendimiento las máquinas de percusión se recomiendan para la perforación de barrenos de inyección.

### **5.2.2. Equipos de Inyección.**

El sistema básico de la instalación para las inyecciones consta de la siguiente cadena de subsistemas:

Central de mezclado, que incluye:

- A.1. Silos o almacenes de los ingredientes de las mezclas.
- A.2. Equipos dosificadores.
- A.3. Mezcladora.
- A.4. Depósito regulador de la mezcla.

Sistema de transporte, que puede ser:

- B.1. Continuo; constituido por:
  - o Bomba de transporte de la mezcla.
  - o Tubería de transporte hasta el equipo de inyección.
- B.2. Discontinuo; cuando las circunstancias de la obra lo requieran se podrá adoptar un sistema discontinuo a base de vehículos transportadores de la mezcla.





Equipo de inyección:

- C.1. Depósito (s) receptor-contador (es).
- C.2. Bomba (s) de inyección.
- C.3. Línea de inyección.

**5.2.2.1. Central de mezclado.**

- Almacenamiento de los materiales.

Los materiales deberán almacenarse en la Central de forma que su calidad no resulte mermada. El tipo de silos y almacenes o depósitos será el adecuado a las características de los ingredientes de las mezclas.

Los aditivos, preferentemente líquidos en solución o suspensión, se acopiarán en depósitos o tanques cerrados y provistos de agitador que garantice en todo momento su homogeneidad. La capacidad de almacenamiento estará en consonancia con la del elemento de mayor uso.

- Equipos dosificadores.

La dosificación de los ingredientes se efectuará mediante aparatos dosificadores apropiados a su naturaleza y a la precisión exigida de acuerdo con los siguientes criterios:

- Los materiales líquidos podrán dosificarse por volumen o por peso en aparatos dosificadores que garanticen la imposibilidad de sinfonamiento incontrolado en caso de avería o de manipulación incorrecta; los aparatos dosificadores dispondrán de mandos automáticos de arranque y parada.
- Los materiales suministrados a granel se dosificarán por peso en básculas independientes para cada uno de ellos. Si no se estableciera nada respecto a los errores máximos admisibles en la dosificación de estos materiales se aplicará lo indicado en el cuadro siguiente:

Material	Error de dosificación máximo admisible (%)
Agua	4
Aditivos	1
Silicatos	3

Con el fin de evitar desajustes en los aparatos de dosificación, los equipos deberán estar convenientemente aislados o protegidos de las sacudidas y vibraciones producidas por otras máquinas de la instalación.

- Mezcladora y depósito regulador.

Las mezcladoras de los distintos componentes para elaborar el gel de sílice tendrán un dispositivo de agitación mediante paletas cuya velocidad de giro será del orden de cien revoluciones por minuto (100 r.p.m.), como máximo.

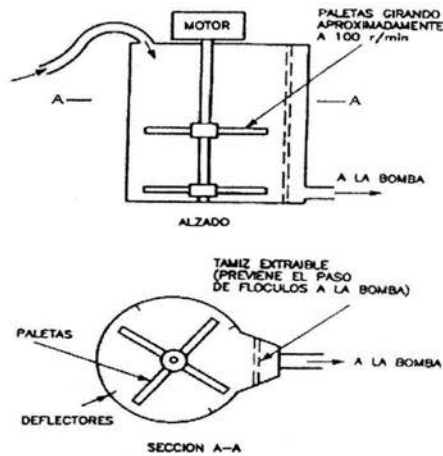


Fig. 5.5 Agitador de paletas.

La operación de homogenización se puede realizar en una sola etapa, con una mezcladora en la que se introducen directamente todos los ingredientes del mortero a inyectar previamente dosificados, o bien, cuando lo requiere la naturaleza de los ingredientes, en una primera fase se preparan las combinaciones primarias en mezcladoras independientes y, mediante dosificadores para cada una de las mezclas primarias, se alimenta la mezcladora terminal en la que se prepara la lechada definitiva a inyectar.

### 5.2.2.2. Sistema de transporte de la mezcla.

Cuando las circunstancias de la obra lo requieran y sea necesario situar la bomba de inyección en una posición fija o móvil, pero alejada de la central de mezclado, se construirá un circuito de transporte de la mezcla desde la mezcladora de fabricación de ésta a las bombas de inyección. Este circuito podrá estar constituido por tuberías o por una flota de vagonetas, camiones u otro tipo de vehículos apto para este trabajo.

Dado la naturaleza de los líquidos a transportar, que se transforman en sólidos al cabo de un cierto tiempo, las tuberías deben ser de sección constante, superficie interior lisa, diámetro adecuado para que en las mezclas no se produzcan decantaciones por velocidad baja y, en lo posible, su trazado debe carecer de sifones y de zonas de remanso producidas por flechas de la tubería entre apoyos, etc. Siempre que sean inevitables estas zonas, deberá colocarse un grifo de purga en el punto más bajo para evitar atascos a causa del endurecimiento de la mezcla que haya podido quedar depositada al terminar la inyección.

### 5.2.2.3. Equipo de inyección.

El depósito receptor-contador deberá estar provisto de agitador para mantener la mezcla homogeneizada y alimentar a una sola bomba.

Los **agitadores** son elementos intermedios entre el mezclador, que libera la mezcla a cada amasado y la bomba, que da un suministro continuo. Su misión es la de mantener la mezcla homogeneizada hasta que sea bombeada al barreno. Comúnmente se trata de un recipiente, de



capacidad doble del mezclador, provisto de una serie de paletas que giran lentamente, a unas 100 r/min.

**Bombas de inyección.** Las bombas de inyección deberán ser de caudal y presión variables, con al menos dos cilindros de émbolos buzo, accionadas por motor hidráulico o de aire comprimido, que permitan una variación amplia de velocidades. También se pueden emplear bombas de otro tipo, siempre que alcancen las presiones y caudal máximos que sean necesarios para ejecutar la inyección; ello obliga a regular el caudal y la presión de inyección mediante un circuito de retorno dotado de una serie de válvulas para regular estos parámetros. Cada bomba deberá estar situada en una cota sensiblemente igual o menor que la de la boca del barreno a inyectar.

Las bombas de inyección deben ser capaces de impulsar el material a zonas que por sus características harán que la velocidad del fluido sea baja y que los granos puedan sedimentar.

Las bombas de inyección deberán permitir el control de la presión y el caudal con precisión y agilidad desde cero hasta los máximos autorizados; si se utilizan bombas de pistones, deberán tener más de dos que funcionen coordinados en línea. Generalmente, podrán utilizarse bombas semejantes a las empleadas para la inyección de mezclas de cemento, siempre que cumplan con las condiciones anteriores.

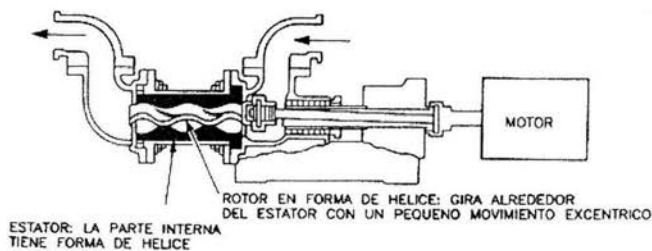


Fig. 5.6 Bomba con rotor helicoidal.

**La tubería de la línea de inyección.** Será de sección constante, de paredes internas lisas y deberá resistir, por lo menos, el doble de la presión máxima de inyección; se dispondrán, en los lugares adecuados del circuito, grifos de descarga y de regulación de caudal.

La línea de inyección estará provista de dos manómetros situados uno a la salida de la bomba de inyección y el otro en la zona del barreno, si la distancia entre la bomba y el barreno fuera menor de tres metros (3 m.), será necesario tan sólo un manómetro. Se dispondrá en obra al menos de un manómetro de reserva.

La línea de inyección deberá revisarse frecuentemente para evitar rotura o fugas de la mezcla que podrían ocasionar accidentes debido a la energía con que éstas se producen. Se deberán cuidar especialmente los empalmes entre tramos de tuberías y el espesor de sus paredes, pues, frecuentemente, los productos a inyectar son muy abrasivos o pueden producir corrosiones internas en las tuberías, dando lugar a estallidos de las mismas sin presentar antes síntomas externos de deterioro progresivo.

Se evitará que los conductos de suministro de agua provoquen la oclusión de aire en ella.

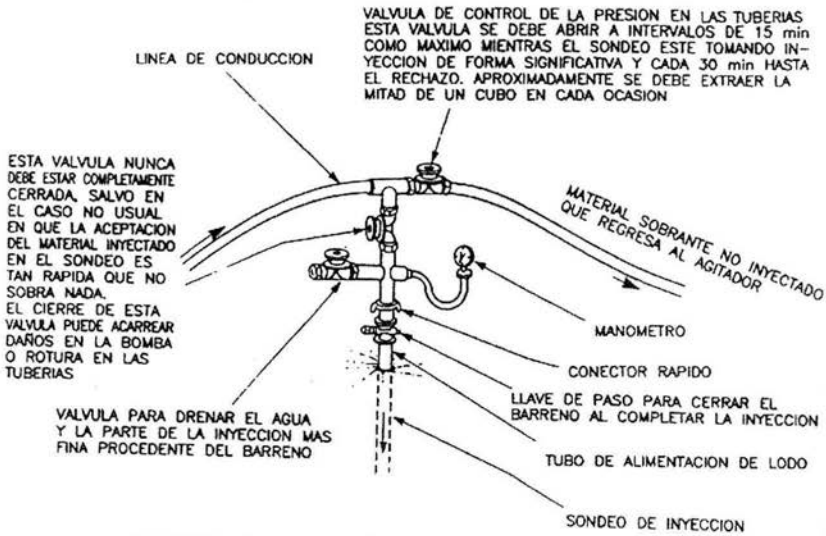


Fig.5.7 Mecanismos y accesorios destinados al control de la inyección.

#### 5.2.2.4. Líneas de circulación y obturadores.

Una vez que la bomba los ha succionado son bombeados hacia los barrenos. Los componentes se juntan en un dispositivo donde son mezclados íntimamente, al ser bombeados a través de un mezclador estático. Esta operación es esencial en las inyecciones químicas.

La parte superior del tubo de alimentación tiene un obturador cerrando el barreno. Este se infla con la mezcla líquida, sellando la perforación. Tras la inyección, el sistema de cierre queda en la perforación y lo sella mediante una válvula antirretorno, mientras la mezcla se espuma en la cavidad del terreno a tratar (Figs. 5.8 y 5.9).

Una técnica muy usada en las inyecciones químicas es la que emplea una tubería provista de manguitos, el comentado tubo manguito, con la que la inyección puede ser ejecutada a profundidades determinadas, aumentando la eficacia de rellenar las zonas deseadas, además de permitir la reinyección terciaria de la zona.



a)



b)

Fig. 5.8 a) Obturador hinchable. b) Obturador hinchable expandido.

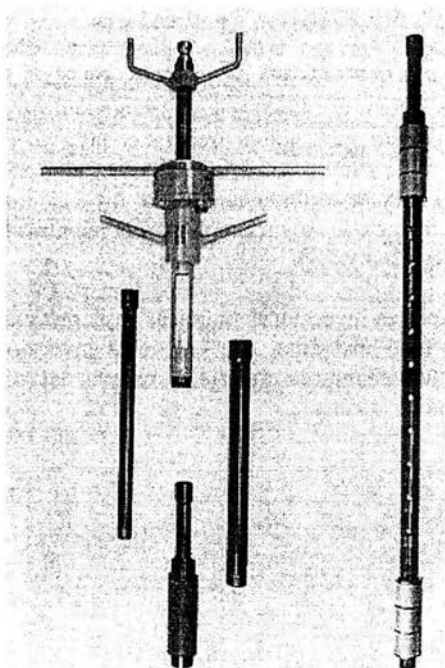


Fig. 5.9 Torno de plato, tuberías de extensión y obturador mecánico.

El proceso básico de una inyección puede resumirse de la manera siguiente: los materiales de inyección se añaden al mezclador, al cabo de unos minutos, la mezcla es impulsada al agitador, donde se batirá lentamente. La función de este equipo es la de mantener la mezcla agitada hasta que se realice la inyección. Las bombas de inyección aspiran la mezcla desde el

agitador y la bombean a través de las líneas de inyección al sondeo. Una vez dentro del sondeo, el uso de obturadores o manguitos ayudan a distribuirla de forma correcta.

Los equipos de inyección pueden instalarse combinados o por separado de sus unidades, según sea el trabajo a realizar. Para grandes proyectos, es conveniente instalar una estación central con silos para los materiales y recipientes para pesarlos y mezclarlos automáticamente.

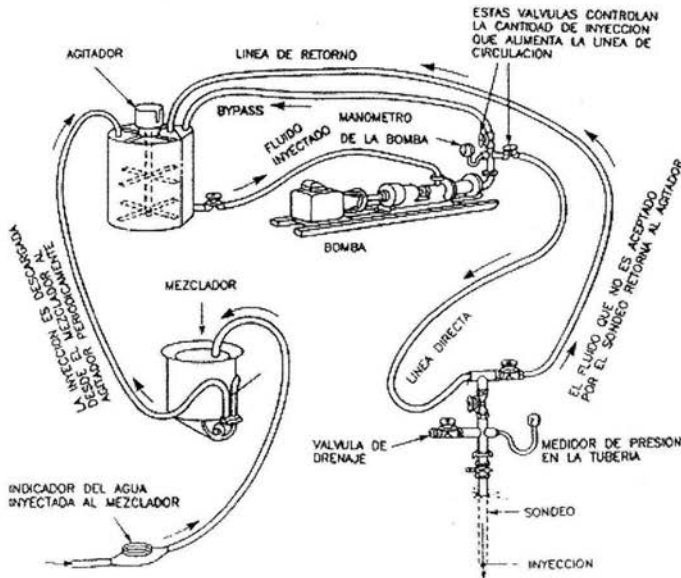


Fig. 5.10 Disposición del equipo de inyección.

### 5.3. Barrenos .

#### 5.3.1. Procedimientos de perforación.

El procedimiento de perforación tiene cierta importancia en macizos rocosos. Se utiliza muy frecuentemente la rotación.

El empleo de prismas o diamantes hace que el barreno tenga unas paredes lisas, permitiendo así el buen funcionamiento del obturador. Los labios de las fisuras aparecen limpios y los barrenos pueden ser ejecutados en cualquier dirección, incluso de abajo arriba. Además, se pueden realizar con pequeño diámetro.

Los martillos neumáticos tienen el inconveniente de alterar el terreno o la fabrica donde actúan y de taponar, con los sedimentos de la perforación, la entrada de las fisuras, quedando éstas más o menos obturadas, no pudiéndose asegurar que un aumento de presión sea suficiente para destaponarla.

Lo mismo ocurre con los supermartillos, teniendo, además, el inconveniente de que se pueden ocasionar importantes desviaciones en el barreno. (Para más información acerca de las perforaciones ver anexo 4)

En el caso de inyección de un macizo rocoso se deberá tener en cuenta la disposición de los planos de estratificación, discontinuidades y fracturas, debiéndose ajustar las perforaciones a la orientación y espaciamiento de las principales juntas abiertas.



### **5.3.2. Separación de los barrenos.**

Las consideraciones técnicas y económicas realizadas para determinar la separación de los barrenos, establecen dos reglas que se contradicen:

- Cuanto más fisurado esté el macizo, más separación pueden tener los barrenos e inversamente. Esto se comprende fácilmente porque las grandes y numerosas fisuras existentes facilitan el progreso del mortero hasta el interior del macizo.
- Por otra parte, cuanto más separados estén los barrenos de inyección, más cantidad de mortero será necesario inyectar para poder realizar una pantalla realmente continua.

Es necesario, por tanto, ver la forma de hacer compatibles los precios de la perforación con los del mortero de inyección.

Si se desea que intervenga la presión de rechazo, como debe ser, el problema se complica, pues cuanto más elevada sea esta presión, más separados pueden estar los barrenos e inversamente.

Como la solución teórica es prácticamente imposible, se puede realizar un ensayo para obtener la separación óptima. También hacemos uso de la experiencia en trabajos análogos.

Según la calidad del macizo, se separarán o aproximarán los barrenos.

### **5.3.3. Diámetro de los barrenos.**

Suelen realizarse barrenos de un diámetro muy pequeño, se aumenta de esta manera la velocidad de la mezcla inyectada y se elimina la colmatación de las fisuras

No debe olvidarse que la mayor pérdida de carga de la circulación en las fisuras se produce en las proximidades del barreno, aumentando su valor cuando el diámetro de la perforación disminuye. La necesidad de realizar barrenos de pequeño diámetro, para no colmatar prematuramente la entrada de las fisuras, nos lleva a aceptar presiones de rechazo mucho más importantes que con barrenos de gran diámetro, a menos que se aproximen excesivamente los puntos de inyección. Estas fuertes presiones de rechazo no son más que aparentes porque a varios centímetros del eje del barreno la presión en la fisura es mucho menor.

### **5.3.4. Inclinación de los barrenos.**

En los macizos rocosos se pueden realizar barrenos con una inclinación cualquiera, incluso verticales hacia arriba, a condición de que no sean demasiado largos; por ejemplo, de 20 a 30 m.

### **5.3.5. Métodos de inyección de los barrenos.**

De acuerdo con el grado de fisuración del macizo rocoso, con el programa de trabajo de la obra en particular y el nivel de estanqueidad que se desea alcanzar existen diversos métodos de inyección, se aplicará el método que haya sido fijado, en su caso por el Programa de Trabajos o, en caso contrario, el establecido en el Estudio de Ejecución de las Inyecciones.

El Director podrá ordenar modificaciones del método de inyección si los resultados de los trabajos iniciales de inyección o las singularidades encontradas en el terreno así lo aconsejaren. Así mismo, se podrá ordenar el cambio del método de inyección de los barrenos siempre que los resultados que se vayan obteniendo en los trabajos de inyección así lo justifiquen.

La inyección de los barrenos se podrá realizar por alguno de los siguientes métodos:

- **Inyección desde la boca de la perforación.**

Consiste en introducir la lechada desde la boca del sondeo, obturando en la parte superior. Es preciso comenzar con una lechada espesa y disminuir progresivamente su consistencia, siendo aumentada la presión final en cada dosificación a medida que se va disolviendo el mortero. El aumento de presión tiene por objeto ensanchar la abertura de la fisura que tiene la entrada obturada, con el fin de impulsar hacia delante el tapón causante de la obturación y permitir la circulación normal del mortero.

Este método es adecuado cuando la abertura de las fisuras de la roca es prácticamente uniforme. La inyección se efectúa después de terminar la perforación de un barreno. El tramo inyectado queda comprendido entre el fondo de la perforación y un obturador, emplazado cerca de la superficie. Este método tiene la desventaja de que cuando las fisuras tienen aberturas desiguales toda la lechada penetra en las de mayor abertura. Si se hace la lechada más espesa para que este fenómeno no se produzca, se taponan las entradas de las fisuras finas, impidiendo la penetración de la lechada. Otras desventajas de este método son que únicamente es posible aplicar una sola presión que, por lo general, tiene que ser baja para evitar resurgencias y que no es posible ajustar la dosificación de la lechada a la calidad del macizo. Por otra parte, el método del sondeo completo tiene la ventaja económica de poder emplear el equipo de perforación en otro punto, mientras se inyecta en la perforación ya terminada. Pero las desventajas, desde un punto de vista técnico, son suficientes para eliminar casi siempre este método.

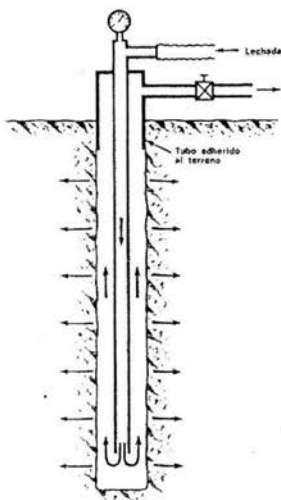


Fig. 5.11 Barreno inyectado en toda su longitud.

- **Método de inyección en sondeos.**

Cuando la longitud de los sondeos es superior a 10 m, o en el caso de emplear altas presiones de inyección que logren una penetración satisfactoria de la mezcla, o secciones de perforación estrechas, la inyección debe realizarse por etapas. Su finalidad es la de proporcionar mayor control del área tratada y minimizar la exudación y drenaje de la mezcla en sondeos.



La inyección del mortero se hace, como el ensayo del agua, por tramos de unos 5 m de longitud. Cada tramo está limitado en su parte superior por un obturador y en su parte inferior por el fondo de la perforación que puede ser el terreno natural o el mortero de inyección, endurecido según sea el sistema adoptado.

Existen varios métodos para realizar esta inyección por etapas, aunque normalmente se usan combinaciones de los mismos.

- a) Inyección por fases descendentes.
- b) Inyección por fases ascendentes.
- c) Inyección con tubo-manguito.
- d) Inyección con puntaza perdida.

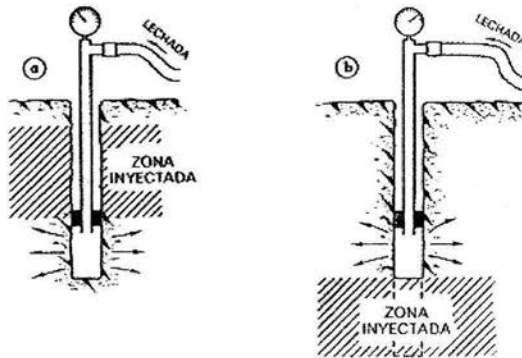


Fig. 5.12 Métodos de inyección. a) Fases descendentes. b) Fases ascendentes.

#### a) Inyecciones por fases descendentes.

Consiste en un proceso en el cual se perfora e inyecta un tramo de terreno, reperforando e inyectando a continuación el tramo inmediato inferior. También se puede aplicar este método con la colocación de obturadores, iniciándose el proceso de inyección progresivamente hacia el fondo de sondeo.

En cada una de las etapas debe realizarse la perforación e inyección desde la superficie, así como el intervalo de espera para que fragüe la mezcla inyectada, la perforación hasta el fondo del sondeo y la limpieza de los detritus, antes de iniciar la siguiente etapa.

Esta técnica es la más cara entre los métodos de inyección, pues además de tiempo implica la instalación de todo el sistema en cada etapa. Sin embargo, como las etapas superiores son tratadas repetidamente cuando la inyección es efectuada con el obturador emplazado desde la superficie, si se produjera un fallo en alguna zona se reforzaría automáticamente.

Se emplea en aquellas zonas donde aparecen superficies excesivamente fracturadas o donde se precisa proteger las estructuras cercanas de las altas presiones de inyección utilizadas.

El procedimiento a seguir en el método de inyección por fases descendentes será el siguiente: se perfora un tramo y se inyecta; a continuación se reperfora el siguiente y se prolonga la perforación en una nueva sección que se inyecta, continuando de esta forma hasta completar la inyección en el trayecto del barreno previsto.

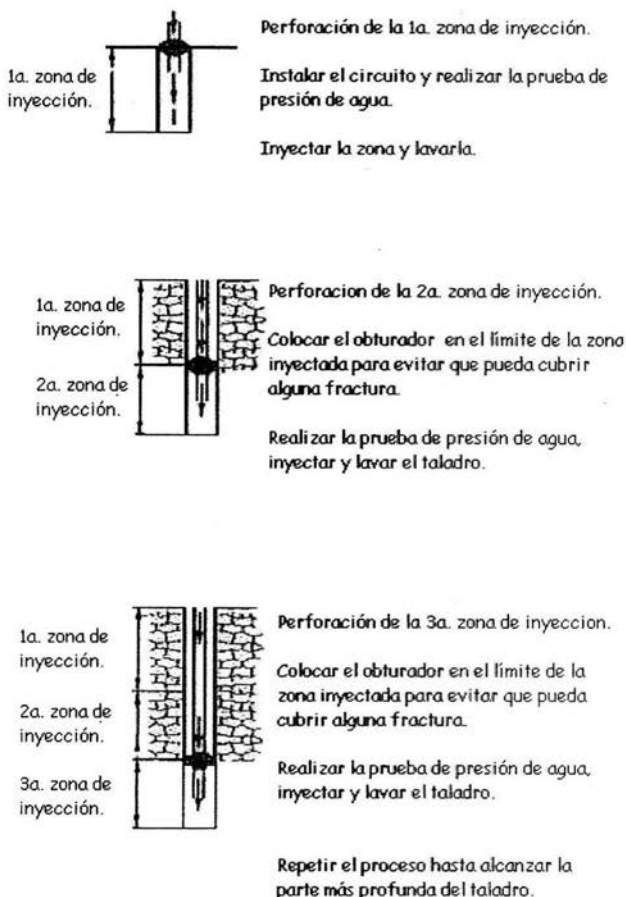


Fig. 5.13 Esquema del método de etapas descendentes.

#### b) Inyecciones por fases ascendentes.

Se trata de un proceso de inyección por tramos sucesivos, comenzando desde la parte inferior de la zona a inyectar hasta la zona superior.

Este método de inyección es el más simple y barato en aquellos casos en los que las perforaciones no colapsan y pueden emplearse obturadores. El sondeo es perforado hasta su profundidad máxima de una vez, limpiando y sometido a la prueba de presión de agua. A continuación se va inyectando la mezcla con un solo obturador y cuando se estima que la inyección de una zona ha sido completada, el obturador se eleva hasta la zona de la siguiente etapa.

Este método requiere la ejecución de ensayos de agua en el transcurso de la perforación y un reconocimiento muy cuidadoso, con el fin de detener los barrenos a la profundidad conveniente.

Presenta una gran ventaja económica, permite realizar el barrenado con el máximo rendimiento y después desplazar la máquina de perforación a otro emplazamiento durante la inyección.

El procedimiento a seguir será el que se describe a continuación: una vez perforado el barreno en su totalidad se inyecta por tramos, comenzando la inyección desde el fondo del barreno hasta la boca; los tramos a inyectar se aíslan del resto del barreno aun no tratado mediante un obturador.

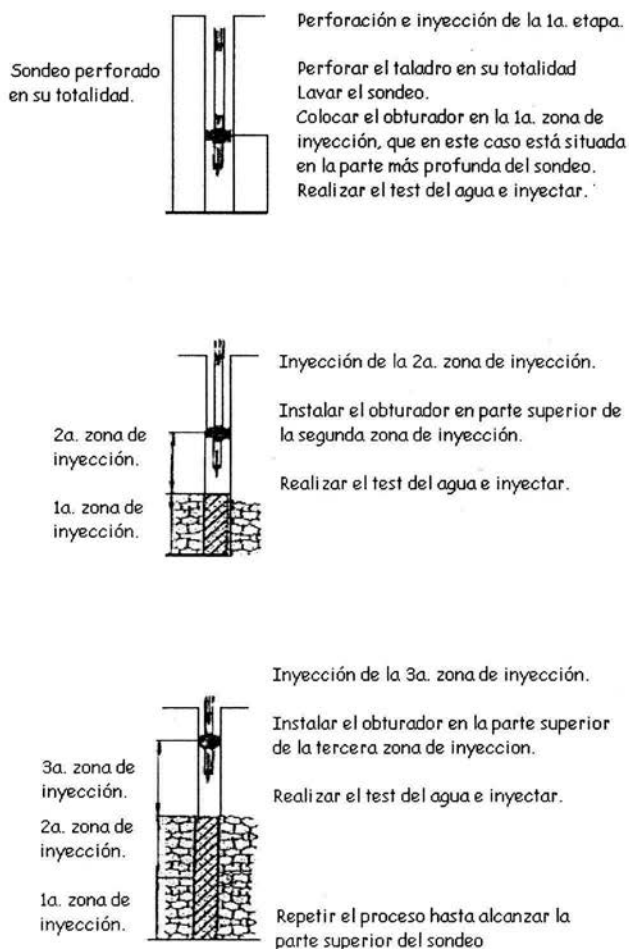


Fig. 5.14 Esquema del método de etapas ascendentes.

### c) Inyección por fases repetitivas mediante tubos manguito.

Se trata de un procedimiento que permite tratar repetidamente, en distintas fases, un mismo punto, sin reperfusión, para lo cual se perfora un barreno colocando en su interior un tubo, denominado "tubo manguito", que tiene una serie de agujeros periféricos, obturados exteriormente por manguitos de goma, que sirven de válvulas antirretorno, por los que sale la



lechada. El espacio anular entre el tubo y el terreno se rellena, constituyendo lo que se denomina "gaine", con el objetivo de conseguir una obturación longitudinal continua.

En cualquier método de inyección con sondeos es conveniente realizar una preparación previa del mismo.

#### **d) Puntaza perdida.**

El procedimiento a seguir en la inyección con puntaza perdida se describe a continuación: se perforan los barrenos mediante una tubería lisa en cuyo extremo inferior se ha acoplado una herramienta especial terminada en punta. Una vez alcanzada la profundidad necesaria, se levanta la tubería, dejando perdida la herramienta, comúnmente llamada puntaza, en el fondo del barreno. La inyección se realiza de forma continua a medida que se eleva la tubería hasta su extracción total.

En cuanto a los trabajos de impermeabilización existen diferentes procedimientos para formar pantallas o paraguas mediante la inyección sucesiva de sondeos. Los dos métodos principales son las inyecciones en serie y las inyecciones de cierre espaciado.

### **Procesos de inyección.**

#### **Inyecciones en serie.**

Las inyecciones en serie son utilizadas cuando se inyectan al mismo tiempo grupos de entre 5 y 10 sondeos, incluyendo su limpieza, pruebas de agua e inyección simultánea. Esta técnica es empleada comúnmente para la inyección de zonas superiores o capas superficiales.

La finalidad de la perforación y limpieza de varios sondeos próximos es conseguir crear vías de comunicación entre ellos, que permitan llevar a cabo barridos cruzados para la extracción de los materiales que pudieran estar depositados en las grietas, como arcilla o arena.

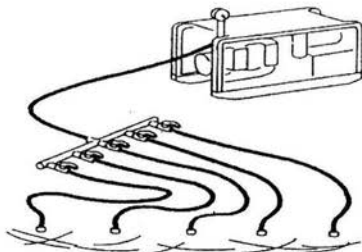


Fig. 5.15 Esquema de inyecciones en serie.

#### **Método de cierre espaciado.**

El método de cierre por etapas para constituir una pantalla impermeable consiste en inyectar una primera etapa de perforaciones en línea recta con una separación determinada, 24 m por ejemplo, después una segunda etapa de inyección en posiciones intermedias, quedando a 12 m de distancia de las de la primera etapa, luego una tercera etapa en los puntos medios del espaciamiento entre las perforaciones de las primeras dos etapas, y así sucesivamente hasta que los consumos sean insignificantes.

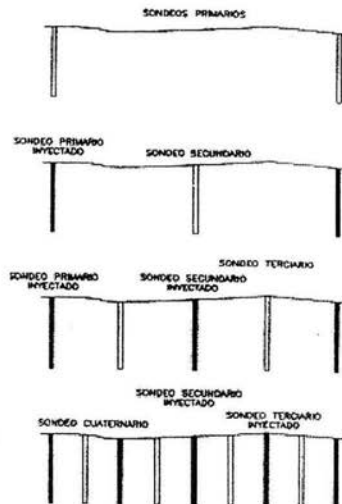


Fig. 5.16 Proceso para la realización de una inyección de cierre.

## 5.4. Procedimiento general al realizar la inyección.

### 5.4.1. Estudios preliminares.

Antes de iniciar los tratamientos de inyección, se deberá disponer de un Estudio de Ejecución de las inyecciones, cuyas directrices serán fijadas teniendo en cuenta la información geológica y geotécnica existente y los datos obtenidos en los reconocimientos realizados mediante sondeos, calicatas, galerías y prospecciones geofísicas.

Consta de los siguientes puntos:

- Información del terreno.
- Selección de la clase de inyección.
- Pruebas de inyectabilidad.
- Lavado del terreno.
- Presiones de inyección.
- Métodos para el confinamiento de la inyección.
- Planos de barrenos y fases del tratamiento.
- Prescripciones e instrucciones para la ejecución.

#### 5.4.1.1. Información del terreno.

Se recopilará y complementará la información geológica y geotécnica del terreno del siguiente modo:

a) **En macizos rocosos.** Descripción de la estructura geológica; planos de las familias de fisuras principales con indicación de su orientación, echado y características de abertura y del relleno; catalogación y localización en planos de los accidentes geológicos tales como fallas,



zonas falladas, milonitas, plegamientos, etc.; características hidrológicas: niveles freáticos, presión del agua intersticial, resultados de las pruebas de permeabilidad tipo Lugeon y otras.

**b) En macizos rocosos con cavernas.** En los terrenos cársticos: localización de zonas carstificadas, ubicación y estimación del tamaño y volumen de las cavernas, conductos y su intercomunicación. En terrenos volcánicos, origen, formación y determinación mediante métodos mecánicos o geofísicos de la distribución estadística de posibles cavernas y conductos.

**c) Aguas subterráneas.** Localización de acuíferos, con determinación de sus dimensiones y características del material, presión intersticial, permeabilidad, etc. En corrientes subterráneas, localización, velocidad, caudal y características químicas del agua.

#### 5.4.1.2. Selección de la clase de inyección y definición de las mezclas.

En base a la información indicada en el apartado anterior se procederá a seleccionar la clase de inyección, tanto en lo que se refiere al sistema de perforación como a la mezcla de inyección, presiones, cantidades, caudales y demás parámetros que intervienen en el proceso.

En base a la finalidad del tratamiento de inyecciones y a las características del medio a inyectar, se procederá al estudio y definición de la formulación de las mezclas tipo a emplear, mediante ensayos de laboratorio sistemáticos para determinar los parámetros de inyectabilidad: viscosidad, tiempo de estabilidad, tiempo de endurecimiento o fraguado, temperatura; también se definirán las características del producto final una vez endurecido tales como resistencia, deformabilidad, retracción, sinéresis de los geles, erosionabilidad y resistencia a la lixiviación.

#### 5.4.1.3. Pruebas de inyectabilidad.

Las pruebas de inyectabilidad consisten en la realización de tratamientos de ensayo, a escala natural, en determinadas zonas de terreno que, en sí mismas, presentan características homogéneas desde el punto de vista de los tratamientos de inyecciones.

En el Programa de Trabajos se indicarán las pruebas que, en su caso, se consideren necesarias, así como el fin que se persigue con su ejecución, entre los que se pueden citar, como más importantes, los siguientes:

- Conformación o modificación, en su caso, de la clase de mezcla a inyectar prevista, así como la puesta a punto de las dosificaciones de las mezclas.
- Ajuste o modificación de las presiones y caudales de inyección, de las limitaciones de volumen inyectado por barrenos, de los esquemas de barrenos y de cuantos factores intervienen en las operaciones de inyección.
- Observación de los resultados de la inyección, mediante toma de muestras, análisis, excavaciones, etc., de la zona inyectada.

#### 5.4.1.31. Ensayos de agua.

En cada barreno se realizan ensayos de agua por tramos sucesivos para el reconocimiento, para determinar el método de inyección y la naturaleza del mortero a inyectar. Su objetivo es establecer la dosificación inicial del mortero; cuando más elevadas son las absorciones, más fuerte será la dosificación. Se intenta de esta manera no perder inútilmente el tiempo, inyectando un mortero demasiado diluido que llegue a perderse.



Las múltiples pruebas son efectuadas por etapas de presión en la proporción 1:2:3:2:1, donde 3 representa la etapa de presión máxima de seguridad. Los resultados de estas pruebas se representan en gráficos indicando la pérdida de agua en función de la presión.

Las pruebas durante la ejecución del tratamiento se realizan después de limpiar el sondeo, una vez perforado, y antes del comienzo de la inyección. La información obtenida, además de indicar la permeabilidad en una determinada etapa de trabajo o del sondeo, ayuda a decidir el momento de efectuar las mezclas, si se requiere alguna medida especial, y la localización de posibles fugas y correspondencia con otros sondeos.

Estas pruebas no se realizan normalmente después de la inyección en el mismo sondeo, pero si fuesen necesarias, el tiempo mínimo necesario entre el final de la inyección y la prueba de agua sería de 24 horas.

La unidad tradicional de las pruebas de presión de agua es también el Lugeon (UL: Unidad Lugeon), que se define como la admisión de 1 litro de agua por metro y por minuto a una presión de 10 bar (1 MPa), y equivale a un valor de  $k$  de  $10^{-5}$  cm/s.

Esta presión es a menudo demasiado grande para los ensayos que se realizan cerca de la superficie o en rocas dañadas. En este caso se emplean presiones más bajas, ajustando el valor mediante la fórmula siguiente:

$$\text{Valor Lugeon} = \text{Agua admitida (l/min/m)} \times 1 \text{ MPa/Presión actual (MPa)}.$$

Los siguientes ejemplos pueden dar una idea de las magnitudes:

1 Lugeon	Es el grado de permeabilidad de un terreno que no requiere inyección, y es considerado como el límite de inyección empleando cemento ordinario.
3 – 5 Lugeon	Representa una estructura donde normalmente la inyección es necesaria.
10 Lugeon	Garantizan la inyección en cualquier tipo de obra.
10-20 Lugeon	Representa lugares con cavidades considerables.
100 Lugeon	Es el grado de permeabilidad de zonas muy fracturadas con un número relativamente alto de fracturas abiertas.

La forma de efectuar la inyección de agua también puede aportar importante información, así una admisión estable proporciona unas condiciones uniformes. En el caso de que la admisión disminuya significa que existían cavidades que se han rellenado con agua, mientras que un aumento en la admisión puede indicar, o bien que la roca se ha desplazado, o que el material de relleno ha sido barrido fuera de las cavidades presentes.

#### 5.4.1.32. Ensayos de inyección.

La inyección de barrenos de reconocimiento permite determinar la naturaleza del mortero y el método de tratamiento mejor adaptado al terreno. Conviene, sin embargo, señalar que la experiencia en estos trabajos permite casi siempre dispensar de esta inyección de prueba.

El estado de fisuración del macizo impone un esquema de inyección variable. Los ensayos de tratamientos realizados en el mismo emplazamiento de futuros trabajos están teóricamente destinados a adaptar las disposiciones previstas a las características reales del terreno. Las inyecciones con esta finalidad se hacen en ocasiones con materiales colorantes. El método de inyección deberá ser adaptado entonces para cada caso.



Se trata también de conocer la separación que conviene dar a los barrenos. La inyección de las fisuras finas se hace partiendo de barrenos más o menos espaciados. La determinación de la separación óptima entre barrenos solo puede realizarse en aquellos sitios en que la inyección se haga únicamente por impregnación.

El ensayo consiste en inyectar dos barrenos próximos y realizar un barreno de control en medio. La comparación de los ensayos de agua ejecutados en los tres barrenos, así como el de las absorciones de mortero, nos indicarán en que sentido debe ser modificada la separación elegida.

#### ENSAYO DE INYECCION

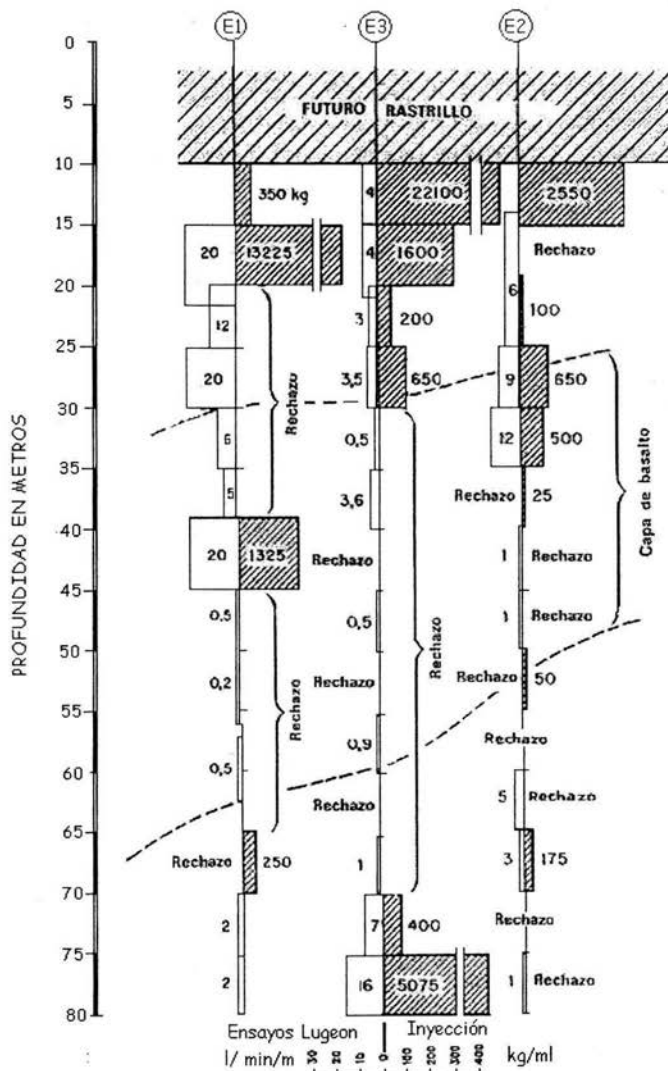


Fig. 4. 17 Ensayo de inyección en rocas volcánicas.





Los barrenos E1, E2 tienen 6 m de separación. A pesar de esta pequeña separación, el barreno de control presenta absorciones relativamente fuertes en los extremos superior e inferior. De esta manera, la pantalla ha sido realizada con una separación entre barrenos de 3 m.

Por último, estos resultados justifican también los barrenos de control después del tratamiento. Nunca se tiene completa seguridad de que, a pesar del máximo cuidado en los trabajos, no existan algunas regiones de fisuración muy finas que hayan escapado a la inyección normal. Estos barrenos serán entonces nuevamente inyectados.

#### 5.4.1.4. Lavado del terreno.

Se determinará si es o no conveniente, tanto desde el punto de vista técnico como del económico, la realización de un lavado de las discontinuidades del macizo rocoso previamente a la ejecución de las inyecciones, con el fin de mejorar la eficiencia del tratamiento de inyecciones.

Cuando se realice un lavado en un terreno rocoso fisurado para eliminar de sus fisuras la arcilla u otros materiales finos, mediante el empleo de dispersantes mezclados con agua y aire comprimido, se mantendrán perforados y abiertos los barrenos próximos al área que se trate de lavar, para dar salida fácil al agua sucia, y evitar que el terreno pueda estar sometido a presiones intersticiales peligrosas en zonas extensas no controladas.

La inyección suele ser muy eficaz cuando las fracturas están abiertas y limpias. Las partículas de la inyección se adhieren a las paredes de las fisuras con lo cual se mejora la "cohesión" del macizo y se evita la circulación del agua. Las características de deformación del macizo rocoso bajo carga experimentan también cierta mejora.

Las fisuras de alguna importancia están raramente vacías, casi siempre están rellenas de arcilla, de arena fina o de otro producto que provenga de la descomposición de rocas o circulación de aguas subterráneas. En ocasiones la inyección se acomoda a este relleno. La comprime sin expulsarla. Pero conviene a veces limpiar las fisuras con un lavado previo a la inyección. Este lavado se hace por medio de los barrenos que cortan las fisuras.

Las fracturas rellenas de arcilla son más difíciles de tratar. Si están muy próximas, resultará imposible inyectarlas excepto en la inmediación de los barrenos, donde la arcilla es arrastrada por el agua introducida al realizarse la perforación. Si el fin de la inyección es solamente de impermeabilización, raramente será necesario tratar el macizo que contenga fisuras de esta naturaleza, ya que el relleno arcilloso es suficiente para resistir gradientes hidráulicos bastante elevados sin ser arrastrado. Si se quiere conseguir una consolidación puede estar justificado un programa de lavado de las fisuras. Cuando existen gruesas capas de arcilla dentro de un macizo rocoso, raramente se puede recurrir a la inyección.

Por tanto, al finalizar la perforación de cualquier etapa y antes de comenzar la inyección, debe dejarse circular el agua de barrido hasta que el sondeo esté limpio. La cantidad de agua circulando dentro del sondeo durante su limpieza deberá ser suficiente para extraer del mismo los detritos de perforación y los materiales erosionados. En algunos casos suele emplearse aire y agua para tal extracción, pero esta operación debe ser realizada con cuidado y control, ya que el empleo de aire comprimido puede producir cavidades y desprendimiento del terreno.

Para preparar el sondeo para la próxima etapa de inyección, la limpieza se realizará de 2 a 6 horas después de finalizar la inyección, dependiendo de la temperatura y de la calidad de la mezcla.



El lavado no debe realizarse más que cuando está bien definido el canal por donde han de circular las aguas. Es necesario realizar numerosos barrenos próximos, espaciados uno o dos metros, e inyectar sucesiva o simultáneamente agua y aire a presión. Puede incluso añadirse al agua de lavado algún producto químico.

Cuanto más elevados son los caudales, mayores son las posibilidades de éxito. Por ejemplo, las bombas de agua deben permitir caudales del orden de  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  con una presión de 4 a 5  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Para el aire se puede comenzar con un compresor de 80 caballos, pero dispuestos a aumentar esta potencia rápidamente, si hay necesidad.

Para provocar la circulación entre barrenos son necesarias presiones importantes. Los grandes esfuerzos ejercidos en el seno del macizo pueden provocar el levantamiento del suelo, sobre todo cuando las cavidades a limpiar no son muy profundas. Existe, por tanto, un peligro que no se debe subestimar. Si las presiones de inyección son suficientemente elevadas como para ensanchar las fisuras y éstas se pueden mantener abiertas rellenándolas con la lechada de inyección, la roca sufrirá un pretensado interno aumentado por tanto su resistencia al corte según los planos de fractura.

Debido a los deficientes rendimientos y a la necesidad de un riguroso control, el lavado de fisuras es poco utilizado.

#### **5.4.1.5. Presiones de inyección.**

Se establecerán las presiones de inyección del terreno en función de la naturaleza, estructura, orientación de fisuras y de la finalidad del tratamiento.

Se indicarán los procedimientos de control de las presiones según la importancia y naturaleza del tratamiento. Si se considera oportuno, se ordenará la colocación de manómetros registradores en la central de inyección conectados a las bombas y, además, manómetros simples en boca de barreno.

Se especificarán los medios de observación de las deformaciones que eventualmente pueden ocurrir en el terreno y obras próximas por efecto de las inyecciones. Para ello, de acuerdo con las circunstancias particulares de la obra, se dispondrá la colocación de dispositivos de observación topográfica y de auscultación en profundidad tales como extensómetros, péndulos, clinómetros, dilatómetros, etc.

Se utilizarán dispositivos para la limitación automática de presiones y caudales en los casos en que la inyección requiera un especial cuidado.

#### **5.4.1.6. Métodos para el confinamiento de la inyección.**

Para impedir la emigración de la inyección a zonas del terreno que no interese tratar, se adoptarán, en función de la naturaleza del terreno y del tipo de tratamiento, las medidas y precauciones necesarias para que la inyección quede razonablemente confinada. Estas medidas deberán servir para evitar el consumo inútil del producto inyectado, la mala calidad global del tratamiento, así como la contaminación de los cauces, el cegamiento de conductos, drenes y filtros, la inyección imperfecta de las partes próximas del terreno y otros perjuicios derivados de una difusión incontrolada de la inyección.

A título orientativo, en el cuadro siguiente se indican algunos métodos que pueden impedir las fugas de inyección fuera de las zonas donde se pretende efectuar el tratamiento en terrenos rocosos:



Parámetro	Incidencias	Acciones recomendables
P/Q= Creciente P/Q = Constante	Inyección normal Probable fuga de inyección	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reducir paulatinamente el caudal Q antes de alcanzar la presión de cierre</li> <li>•Detener la inyección.</li> <li>•Cambiar a mezclas más viscosas y utilizar aceleradores de fraguado.</li> <li>•Reconsiderar el proyecto, limitando el recinto a tratar mediante una pantalla de barrenos más próximos entre sí e inyectar mezclas viscosas y taponantes a través de ellos.</li> </ul>
P/Q = Decreciente	Fugas de inyección por nuevas fisuras abiertas o destaponamiento de grietas	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Detener la inyección.</li> <li>•Reconsiderar la presión de inyección de proyecto; puede ser demasiado alta y romper o deformar excesivamente el terreno.</li> <li>•Utilizar mezclas más viscosas y de fraguado más rápido.</li> <li>•Inyectar con caudales más bajos</li> </ul>
<p>La inyección de un barreno se suspenderá cuando se alcance la presión de cierre establecida.            P = Presión durante la inyección (Pa)            Q = Caudal de la mezcla que se inyecta ( m<sup>3</sup>/seg)</p>		

**Cuadro 4.1 Medidas de confinamiento de la inyección en terrenos rocosos.**

#### 5.4.1.61. Resurgencias.

No es preciso interrumpir las inyecciones a la primera manifestación de resurgencias, sino intentar reducirlas, ya que no pueden detenerse. Se utilizarán para este fin cuñas de madera, papeles mojados o cualquier otro sistema de obturación.

Si este procedimiento es ineficaz como consecuencia del excesivo número de resurgencias o de su inaccesibilidad, se podrá intentar la inyección de un mortero de fraguado rápido, o detener la inyección durante varias horas para permitir el fraguado del mortero ya inyectado. La inyección se reanuda después de la nueva perforación del tramo.

Si estos procedimientos resultaran ineficaces habría que hacer uso de otras técnicas, como impregnación con mortero estable expansivo, inyectando a baja presión a partir de numerosos barrenos; utilización de morteros muy densos, etc.

#### 5.4.1.7. Planos de barrenos y fases de perforación.

Se incluirán los planos de los sistemas de barrenos para la inyección. Se confeccionarán planos de situación de los barrenos en planta y perfiles transversales en los que se dibujará el contorno de las obras de fábrica, o de rellenos, ya construidas y las pendientes de ejecución con todos los detalles que deban tenerse en cuenta durante la ejecución de las inyecciones.

En los planos de los barrenos deberá figurar la clave de designación de cada barreno, su orientación, inclinación, longitud y diámetro. También figurará el orden de perforación y la agrupación y secuencia de barrenos para distintas etapas de inyección, si los hubiere, dentro del mismo tratamiento o campaña de inyecciones.



Se definirá el procedimiento de perforación de los barrenos según el medio a perforar y la clase de inyecciones seleccionada. También se definirán las fases o tramos de perforación de los barrenos individuales, si las hubiere.

Se indicarán los criterios a seguir durante los trabajos de perforación para fijar la profundidad efectiva que deben alcanzar los barrenos.

La separación entre barrenos dependerá de la naturaleza del terreno a tratar y de las presiones de inyección compatibles con aquél. El Cuadro 4.2 indica la separación media recomendada entre barrenos de inyección, para algunas de las aplicaciones más corrientes:

Tipo de obra	Terreno	Disposición de los barrenos
Pantallas de impermeabilización	Roca	Una o dos filas de barrenos paralelos. Separación entre barrenos: 2,5 a 6 m.
Tratamiento masivo del terreno	Roca	Cuadrícula del orden de 3 x 3 m.
Fondos impermeables	Roca	Cuadrícula del orden de 4 x 4 m.

Cuadro 4.2 Arreglos de barrenos.

#### 5.4.1.8. Prescripciones e instrucciones para la ejecución de las inyecciones.

Se establecerán las medidas adecuadas para proteger durante los trabajos de inyección los elementos de obras ya realizadas y que pudieran resultar dañados o alterados, tales como drenes, filtros, juntas de las fábricas, etc.

Será necesario establecer una distancia mínima entre barrenos que se inyectan, o que estén recién inyectados, y los que se estén perforando, en función de la permeabilidad del terreno, con el fin de evitar que el fluido de perforación contamine o lave la de inyección recién suministrada o en proceso de inyección.

Se deberá llevar un control riguroso y permanente del estado de la perforación e inyección de los barrenos, anotando expresamente las profundidades de los barrenos perforados, el volumen de mezcla inyectada en cada barreno, las presiones de inyección y las fases de inyección realizadas si la obra se ejecuta por fases o etapas de perforación o inyección con distintas mezclas.

En el Estudio de Ejecución de las Inyecciones se darán las oportunas prescripciones e instrucciones para la ejecución de la inyección, según el objetivo y tipo de tratamiento a realizar, conforme a la naturaleza y características del terreno.

El Estudio de Ejecución deberá concretar el sistema de línea de inyección y el método de inyección de los barrenos que han de adoptarse en la ejecución de las inyecciones.

Se especificarán expresamente las características que deben cumplir las instalaciones de equipos de inyección tales como silos y almacenes de materiales, dosificadores, mezcladoras, bombas de transporte de las mezclas, bombas de inyección, dispositivos en los barrenos, etc., así como las longitudes máximas de transporte de mezclas por tuberías.

Se establecerán sistemas de control de calidad de las mezclas a inyectar midiendo los parámetros de inyectabilidad de aquéllas: viscosidad, decantación, tiempo de endurecimiento o fraguado, temperatura, etc., así como las características del producto final una vez endurecido:



## **5.4.2. Ejecución.**

### **5.4.2.1. Preparación de los geles.**

El Contratista someterá a la aprobación del Director la formulación de la mezcla y las características y procedencia de los reactivos acompañando referencias de trabajos satisfactoriamente ejecutados con estos productos y su formulación, especialmente en lo referente a la durabilidad, erosionabilidad y resistencia a la lixiviación del gel, una vez inyectado.

Antes de aceptar el producto el Director podrá ordenar al Contratista la realización de una prueba de inyección en el terreno con el fin de comprobar el comportamiento del gel propuesto.

### **5.4.2.2. Inyección de los geles.**

La inyección de geles de sílice en macizos rocosos deberá en ocasiones realizarse una vez ejecutado un primer tratamiento con mezclas de cemento, a fin de sellar las fisuras que el primer o primeros tratamientos hallan dejado.

La operación de inyección de un barreno se realizará de forma continua hasta alcanzar la presión de cierre; solamente se paralizará la inyección en el caso de presentarse incidentes tales como fugas importantes, comunicaciones entre barrenos y otros que, a juicio del Director, necesiten una reconsideración sobre la inyección que se esté realizando.

Las actividades que requiere la ejecución de las inyecciones son:

- Programa de trabajos.
- Replanteo de barrenos.
- Accesos, instalaciones, obras y medios auxiliares.
- Perforación de barrenos y pruebas.
- Ejecución de la inyección.
- Retirada de equipos y limpieza de tajos.

#### **5.4.2.2.1. Programa de trabajos.**

En base a la finalidad de las inyecciones, a la información actualizada del medio a tratar, a lo establecido en el Programa de Trabajos y a las instrucciones dadas por el Director, el Contratista elaborará un programa de trabajos.

El programa de trabajos, deberá incluir, entre otros:

- Esquema de barrenos, de acuerdo con lo fijado en el Estudio de Ejecución.
- Cronograma de trabajos que, con detalle suficiente, establezca la duración e interrelación de las distintas actividades previstas en el Estudio de Ejecución.
- Equipo de perforación. Relación de los equipos a emplear con indicación de sus características principales y capacidad de producción horaria y diaria, así como las máquinas de reserva de que se dispondrá en obra. El número y capacidad de los equipos serán los adecuados para garantizar, con holgura, el cumplimiento del Cronograma de trabajos.
- Equipos de inyección. Equipos a emplear, características principales y capacidad de producción horaria y diaria, además de las máquinas de reserva de que se dispondrá en la obra.



#### 5.4.2.22. Replanteo de barrenos.

El Contratista llevará a cabo el replanteo de cada uno de los barrenos de acuerdo con el esquema de barrenación aprobado, adoptará un sistema lógico de designación de los barrenos que permita identificarlos en los esquemas y planos y en la obra. La identificación en obra será mediante marcas o señales permanentes de forma que, de manera inconfundible, se correspondan con su respectivo barreno.

#### 5.4.2.23. Perforación de barrenos y pruebas.

El diámetro de perforación de los barrenos para inyección será tal que garantice en su fondo un diámetro útil mínimo de treinta y cinco milímetros (35 mm.), en terrenos rocosos.

Antes de ser inyectados todos los barrenos, se comprobará que tienen la longitud útil perforada así como el diámetro requerido, como precaución frente a posibles desprendimientos del terreno o reducción de sección por deformaciones del mismo ocurridas durante el tiempo transcurrido entre la perforación y la inyección.

El Programa de Trabajos especificará la frecuencia de los ensayos de permeabilidad que sea oportuno realizar, así como la naturaleza, es decir: ensayos tipo Lugeon, para terrenos rocosos.

#### 5.4.2.24. Accesos, instalaciones, obras y medios auxiliares.

Acceso a las obras. Salvo prescripción específica en algún documento contractual, serán de cuenta del Contratista todas las vías de comunicación y las instalaciones auxiliares para transporte tales como carreteras, caminos, sendas, pasarelas, planos inclinados, montacargas para el acceso de personas, transporte de materiales a la obra, etc.

Estas vías de comunicación e instalaciones auxiliares serán gestionadas, proyectadas, construidas, conservadas, mantenidas y operadas así como demolidas, desmontadas, retiradas, abandonadas o entregadas para usos posteriores por cuenta y riesgo del Contratista.

Acceso a los tajos. Se refiere a aquellas obras auxiliares e instalaciones que sean necesarias para el acceso del personal y para el transporte de materiales y maquinaria a los frentes de trabajo o tajos, ya sea con carácter provisional o permanente, durante el plazo de ejecución de las obras.

Instalaciones auxiliares de obra y obras auxiliares. Constituye obligación del Contratista el proyecto, la construcción, conservación y explotación, desmontaje, demolición y retirada de todas las instalaciones auxiliares de obra y de las obras auxiliares, necesarias para la ejecución de las obras definitivas.

Se considerarán instalaciones auxiliares de obra las que, sin carácter limitativo, se indican a continuación:

- a) Oficinas y laboratorios de la Dirección.
- b) Instalaciones transporte, transformación y distribución de energía eléctrica y de alumbrado.
- c) Instalaciones telefónicas y de suministro de agua potable e industrial.
- d) Instalaciones para servicios del personal.
- e) Instalaciones para los servicios de seguridad y vigilancia.
- f) Oficinas, laboratorios, almacenes, talleres y parques del Contratista.
- g) Instalaciones de áridos, fabricación, transporte y colocación del concreto, fabricación de mezclas bituminosas.



h) Cualquier otra instalación que el Contratista necesite para la ejecución de la obra.

Se considerarán como obras auxiliares las necesarias para la ejecución de las obras definitivas que, sin carácter limitativo, se indican a continuación:

- a) Obras para el desvío de corrientes de aguas superficiales, tales como ataguías, canalizaciones, encauzamientos, etc.
- b) Obras de drenaje, recogida y evacuación de las aguas en las zonas de trabajo.
- c) Obras de protección y defensa contra inundaciones.
- d) Obras para agotamientos o para rebajar el nivel freático.
- e) Entibaciones, sostenimientos y consolidación del terreno en obras a cielo abierto y subterráneas.
- f) Obras provisionales de desvío de la circulación de personas o vehículos, requeridas para la ejecución de las obras objeto del contrato.

Durante la vigilancia del contrato, serán de cuenta y riesgo del Contratista el funcionamiento, la conservación y el mantenimiento de todas las instalaciones auxiliares de obra y obras auxiliares.

Maquinaria y medios auxiliares. El Contratista está obligado, bajo su responsabilidad, a proveerse y disponer en obra de todas las máquinas, útiles y medios auxiliares necesarios para la ejecución de las obras, en las condiciones de calidad, potencia, capacidad de producción y en cantidad suficiente para cumplir todas las condiciones del contrato, así como a manejarlos, mantenerlos, conservarlos y emplearlos adecuada y correctamente.

La maquinaria y los medios auxiliares que se hayan de emplear para la ejecución de las obras, cuya relación figurará entre los datos necesarios para confeccionar el Programa de Trabajos, deberán estar disponibles a pie de obra con suficiente antelación al comienzo del trabajo correspondiente, para que puedan ser examinados y autorizados, en su caso, por el Director.

#### **5.4.2.25. Ejecución de la inyección.**

La ejecución de la inyección incluye las siguientes operaciones:

- Dosificación y preparación de las mezclas.
- Transporte de la mezcla desde la mezcladora a la bomba de inyección.
- Limpieza y comprobación de los barrenos a inyectar.
- Colocación de obturadores en los barrenos.
- Bombeo de la mezcla a los barrenos.
- Retirada de obturadores y limpieza de barrenos.
- Precauciones y vigilancia durante las inyecciones.
- Toma y registro de datos de la inyección.

##### **5.4.2.25.1. Dosificación y preparación de las mezclas.**

El Contratista deberá comprobar, al término de cada turno de trabajo, que el consumo de los materiales concuerda con las dosificaciones teóricas de las mezclas y calcular, asimismo, las desviaciones respecto del consumo teórico.



Diariamente deberá compensar dichas desviaciones para evitar que se acumulen errores del mismo signo con el consiguiente perjuicio de la calidad del tratamiento.

#### **5.4.2.25.2. Transporte de la mezcla desde la mezcladora hasta la bomba de inyección.**

Si el transporte se realiza por tuberías, la mezcla deberá transportarse desde la batidora de la instalación de fabricación a un depósito adosado a la bomba de inyección. No se admitirá, en ningún caso, la conexión directa a la bomba de inyección.

Si el transporte se realiza por medios discontinuos, es decir, mediante vagonetas o vehículos sobre neumáticos, se deberá evitar a toda costa las sacudidas, vibraciones y cualquier fenómeno que pueda alterar las características de la mezcla a inyectar; en este sentido se deberá garantizar que la pista de transporte sea lisa o que el transporte se realice mediante vehículos sobre carriles. Los recipientes en que se transporte la mezcla deberán estar dotados de agitadores y estar cerrados para evitar la acción de los agentes atmosféricos y la caída de cuerpos extraños en la mezcla.

#### **5.4.2.25.3. Limpieza y comprobación de los barrenos a inyectar.**

Antes de proceder a la inyección se comprobará si el barreno ha sufrido derrumbe de sus paredes, desprendimientos que disminuyan su longitud útil o si se detecta la presencia de cuerpos extraños. Estas comprobaciones se realizarán introduciendo una varilla calibrada, con el diámetro mínimo necesario, hasta el fondo del barreno.

Los barrenos se lavarán, si se considera necesario y si el terreno es rocoso, con agua a presión o con agua y aire, con el fin de eliminar los detritus de la perforación y los materiales finos contenidos en las fisuras y oquedades del terreno que puedan ser arrastrados por el simple efecto del agua y del aire. La presión de lavado no será superior a la máxima admitida para la inyección

#### **5.4.2.25.4. Colocación de obturadores en los barrenos.**

Los dispositivos obturadores de barrenos, los artilugios para la inyección con retorno dentro del barreno, los cabezales de emboquillamiento y demás accesorios para equipar los barrenos a inyectar, serán de tipos y calidades suficientemente sancionados y sometidos a la aprobación del Director.

El Contratista dispondrá de una serie de modelos de obturadores que sean adecuados para confinar el tramo a inyectar, teniendo en cuenta el método empleado en la perforación del barreno, la naturaleza del terreno y el tipo de mezcla a inyectar. Si por obturación defectuosa, la inyección contornease el obturador y endureciese por encima del mismo, quedando por tanto aprisionada la varilla de inyección e inutilización el barreno, será por cuenta del Contratista la reparación de esta avería a satisfacción del Director quien podrá ordenar la ejecución e inyección de un nuevo barreno a cargo del Contratista.

No se aceptarán errores en la colocación de obturadores dentro de un barreno, superiores al diez por ciento (10 %) de la longitud del tramo que se inyecte.

#### **5.4.2.25.5. Bombeo de la mezcla a los barrenos.**

Antes de comenzar el bombeo de inyección, el Contratista deberá haber instalado un sistema de comunicación telefónico entre la central donde se encuentran las bombas y el barreno





que se inyecta. En obras de pequeña importancia será suficiente un par telefónico directamente conectado, pero en obras importantes tendrá que disponer de un sistema telefónico más completo, suplementado con una señal acústica o luminosa para transmitir las órdenes de operación y los incidentes que puedan presentarse.

El Contratista controlará minuciosamente el proceso de bombeo, teniendo en cuenta lo indicado en el Programa de Trabajos sobre presiones y caudales de inyección. En general, cuando la presión tienda a subir, se deberá reducir paulatinamente el caudal, debiendo llegarse a la presión máxima con el caudal mínimo posible. Una inyección que no siga esta norma general es muy probable que sea insuficiente o defectuosa, por lo que no serán admisibles las inyecciones que se consideren terminadas, por haberse alcanzado la presión de cierre sin disminuir antes el caudal. El Contratista estará obligado a repetir a su costa el proceso de inyección si hubiera incurrido en esta falta.

Si durante el proceso de bombeo no se logrará alcanzar la presión de cierre, se observarán, además, bajadas de presión, cambios bruscos de caudales, etc., se parará el bombeo y se analizará el fenómeno observado. Asimismo se vigilará el entorno de la obra por si aparecieran fugas de inyección, resurgencias, roturas del terreno o desperfectos en las instalaciones cercanas. Como orientación, se pueden seguir las normas que se indican en el apartado sobre el confinamiento de la inyección.

#### **5.4.2.25.6. Retirada de equipos y limpieza de tajos.**

Una vez terminados los trabajos de inyección, el Contratista retirará los equipos, instalaciones de obras, obras auxiliares, andamios, plataformas y demás medios auxiliares y procederá a la limpieza de la zona de trabajo de los materiales, detritus de perforación, restos de mezclas de inyección y demás desperdicios originados por las operaciones de inyección, siendo todos estos trabajos a su cargo.

#### **5.4.2.25.7. Precauciones y vigilancia durante las inyecciones.**

Durante el proceso de inyección el Contratista deberá llevar a cabo una vigilancia minuciosa y permanente en los siguientes aspectos:

a) Fugas de mezclas. La vigilancia para detectar fugas de mezclas abarcará a zonas suficientemente alejadas del punto de inyección mientras se intenta su taponamiento, si la fuga fuera importante e imposible su taponamiento, deberá paralizarse la inyección. En estos casos es aconsejable, antes de paralizar la inyección, aumentar la viscosidad de la mezcla que se esté inyectando.

b) Comunicaciones de inyección entre barrenos. Deberá tomarse nota de todas las comunicaciones de mezclas de inyección que se observen entre barrenos durante la inyección, anotándose el número de identificación del barreno por el que se inyecta y el barreno o barrenos que han resultado comunicados así como la presión de inyección en el momento en que se produjo la comunicación.

El Contratista estará obligado a tomar las precauciones que estime necesarias para asegurar que no existe peligro de cegar con la inyección los drenes u otros conductos y dispositivos de la obra definitiva, bien mediante el relleno con arena fina de los conductos y su posterior lavado o por otros procedimientos.

El Programa de Trabajos o el Director definirán el modo de realizar la vigilancia y observación por auscultación de los posibles movimientos y deformaciones que las inyecciones



puedan inducir en el terreno y en las obras o instalaciones próximas. Para este fin se dispondrán sistemas de observación topográfica o de auscultación en superficie o en el interior.

Con independencia de lo indicado en el párrafo anterior, el Contratista estará obligado a mantener una vigilancia mediante la observación visual y con medios que no requieran instrumentos o equipos de auscultación específicos sino, solamente, los de la topografía usual en obras y mediante la colocación de testigos en juntas de obras de fábrica u otros medios similares.

#### 5.4.2.25.8. Toma y registro de los datos de inyección.

De cada uno de los barrenos y de sus tramos de inyección se registrarán los siguientes datos:

- Fecha, hora y clave de identificación del barreno.
- Características de la mezcla.
  - Formulación.
  - Viscosidades iniciales y finales en la inyección.
  - Presiones.
  - Cantidad total de productos consumidos.
  - Cantidad neta realmente inyectada en el terreno, deducidos los volúmenes de relleno del propio barreno, tuberías perdidas por fugas, escapes y lavado de bombas y tuberías en los cambios de los puntos de inyección.

#### 5.4.3. Control .

##### 5.4.3.1. Control de calidad de las mezclas de inyección.

El Contratista efectuará regularmente la toma de muestras de la mezcla en la boca del barreno y verificará en laboratorio que se cumplen las especificaciones establecidas en el Programa de Trabajos o en el Estudio de Ejecución de las Inyecciones.

La temperatura de las mezclas no deberá sobrepasar los veinticinco grados centígrados (25 °C) ni ser inferior a diez grados centígrados (10 °C) en ningún punto de su recorrido. Para ello el Contratista estará obligado a proteger eficaz y permanentemente las tuberías, depósitos y otras instalaciones por las que circule la mezcla de inyección, si fuese necesario. En ningún caso se permitirá que las tuberías estén expuestas al sol de forma continua ni en largos tramos.

El Cuadro 5.3 indica los controles que generalmente se deben realizar en las mezclas de inyección de silicatos.

Características	Número de ensayos	Condiciones de rechazo
Densidad de la mezcla	Uno por cada mezcla	Error superior al 5 % en volumen de la dosificación establecida
Viscosidad de la mezcla medida con cono MARSH	Uno por mezcla	Error superior al 5 % de la fijada
Tiempo de gelificación	Uno por cada mezcla	Tiempo de gelificación superior o inferior en 10 min. al establecido.

Cuadro 5.3 Control de las mezclas de inyección de gel plástico y gel duro de silicato



Se confeccionarán periódicamente con la frecuencia que ordene el Director, probetas de gel duro y probetas de gel mezclado con una muestra de suelo a inyectar, previamente cribada por el tamiz 0,5 de medio milímetro (0,5 mm.). Las probetas se conservarán, parte sumergidas en agua hasta el momento de su rotura, y el resto en ambiente húmedo o enterrado en arena con humedad similar a la del suelo a inyectar.

#### **5.4.3.2. Control de la inyección.**

El Contratista estará obligado a realizar el control de producción de todas las operaciones de perforación e inyección de los barrenos para poder garantizar que, en todo momento, se cumplen las prescripciones exigidas.

El Contratista confeccionará un parte diario en el que se distinguirán las circunstancias de las operaciones de inyección por cada barreno y tramo inyectado. En los partes figurarán, al menos, los siguientes datos:

- El número de identificación del barreno.
- El número de tramo inyectado.
- La fecha y hora del principio y final de la operación.
- La posición del obturador o el número del manguito inyectado.
- Los resultados del ensayo de agua previo a la inyección, en su caso.
- La dosificación de la mezcla, la presión de inyección, el caudal de inyección y la hora en la que alguno de estos parámetros haya variado, así como las cantidades de lechada inyectadas entre dos variaciones de uno de estos parámetros.
- El registro gráfico de las presiones de inyección, si se instalasen manómetros de este tipo, con la indicación del número del barreno del tramo inyectado, de la fecha y de la hora.
- La absorción total de lechada del tramo.
- Las observaciones e incidentes durante el curso de la inyección.

#### **5.4.3.2.2. Medida de la permeabilidad después de la inyección.**

Si el mortero de inyección llega a rellenar todos los huecos del subsuelo, la permeabilidad final puede ser calculada a partir de la del mortero y del índice de huecos. Como la permeabilidad del mortero, después de fraguado, es muy débil,  $10^{-5}$  unidades Darcy, la estanqueidad es prácticamente absoluta.

Pero no es la permeabilidad intrínseca del mortero lo que es esencial, sino la penetrabilidad. La primera es siempre suficiente con amplitud, pero es poco frecuente que se lleguen a rellenar todos los huecos. Unos son demasiado pequeños para permitir el paso del mortero y otros están mal comunicados con los barrenos. La permeabilidad final del medio inyectado, depende, por tanto, casi exclusivamente, de la proporción de huecos no inyectados. Es suficiente que un conjunto de huecos, incluso de gran dimensión, quede rodeado de un cerco estaco, para que el caudal de percolación se reduzca considerablemente.

El único método para determinar la permeabilidad media después de la inyección es medir los caudales de filtración, por lo que las permeabilidades después de la inyección son valores estadísticos sobre medidas efectuadas en diversos puntos del terreno tratado.

Las experiencias nos demuestran que las permeabilidades locales son siempre mucho más grandes o mucho más pequeñas que la permeabilidad media real y que su valor es siempre insuficiente para que su media corresponda a la realidad.

A medida que la permeabilidad del terreno disminuye, no conviene valorar la calidad del trabajo en razón de la permeabilidad inicial y final, pues son los terrenos permeables donde el



mortero discurre con más facilidad, los más fáciles de impermeabilizar, ya que es tanto mejor la calidad del trabajo cuanto más fácil haya sido la inyección.

Es el valor absoluto de la permeabilidad media final el que debe ser considerado y comparado con el límite práctico de estanqueidad, 0.5 unidades Darcy, por ejemplo. En un macizo fisurado se llega con bastante facilidad a una permeabilidad final inferior a 0.1 unidades Darcy ( $10^{-6}$  m/s)

#### 5.4.3.3. Control de recepción.

En el Estudio de Ejecución, se especificarán los métodos de control de los tratamientos de inyección ejecutados a fin de determinar si el tratamiento ha sido suficiente o si, por el contrario, debe ser intensificado mediante una nueva fase de inyecciones, en mallas o secciones en abanico, de barrenos intercalados a los inyectados en la fase anterior.

En todo caso, como método de control se realizarán pruebas de permeabilidad en los barrenos que se inyectan y en otros intercalados que el Director ordenase perforar.

En macizos rocosos las pruebas de permeabilidad se realizarán mediante ensayos de tipo Lugeon según la normativa usual y a distintas presiones escalonadas.

Los ensayos Lugeon se realizarán con agua limpia y clara y por tramos de barreno de tres (3) a cinco metros (5 m.) de longitud. Estos tramos se confinarán con obturador simple colocado en la zona superior del tramo, cuando los ensayos se realicen siguiendo la progresión de la perforación, o con obturador doble que cierre, en sus dos extremos, el tramo del barreno a ensayar. Los obturadores simples, serán de paso directo, sin pérdidas de carga ni estrechamientos; los obturadores dobles serán sometidos a la aprobación del Director, quien podrá exigir que se determinen prácticamente las pérdidas de carga que producen con objeto de no falsear los resultados del ensayo.

Cuando lo ordene el Director se realizarán reconocimientos mediante sondeos, calicatas, pozos o galerías, para observar directamente el resultado de las inyecciones.

#### 5.4.3.4. Control de producción.

Será obligatorio el control de los materiales empleados en las mezclas de inyección, tanto a su llegada a la obra como en el momento anterior a su empleo.

El Contratista estará obligado a efectuar el control de las mezclas de inyección en los siguientes puntos:

- Funcionamiento y error de medida de los dosificadores. La comprobación se efectuará, al menos, al principio de cada turno de trabajo.
- Que las dosis de cada uno de los componentes de la mezcla fijados en los dosificadores correspondan correctamente a la dosificación ordenada. La comprobación se efectuará al principio de cada turno de trabajo y siempre que se cambie la dosificación.
- Densidad de la mezcla, en la forma y frecuencia que indique la Pauta de Control de Producción, en la salida de la mezcladora.
- Viscosidad de la mezcla, en la forma y frecuencia que indique la Pauta de Control de Producción, en el depósito receptor-contador o en la boca del barreno.
- Características de la mezcla endurecida en la forma y frecuencia que indique la Pauta de Control de Producción.



El Contratista estará obligado a efectuar de manera permanente el control de las presiones de inyección. Se utilizarán manómetros de calidad reconocida, tarados periódicamente y provistos de dispositivos de protección contra el contacto directo con la mezcla. La amplitud total de la escala graduada de los manómetros no será mayor del doble de la presión máxima prevista.

El control del caudal y volumen de la mezcla bombeada se realizará en todos los casos por el procedimiento que se indique en el Programa de Trabajos o en el Estudio de Ejecución. Este procedimiento estará en consonancia con la importancia, circunstancias y posición de los trabajos de inyección y la naturaleza de los materiales empleados.

#### **5.4.4. Informes.**

##### **5.4.4.1. Informes periódicos.**

El Contratista estará obligado a redactar informes periódicos con la frecuencia que indique el Director, por lo general mensualmente, sobre el desarrollo de los trabajos efectuados.

Los informes incluirán las siguientes materias:

- Recopilación de los datos de los partes de ejecución una vez depurados.
- Análisis de los resultados parciales del trabajo realizado, con indicación de datos tales como: absorciones por metro (m) de barreno y por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de terreno tratado, pruebas y ensayos realizados, etc.
- Recomendaciones o sugerencias para la continuación de los trabajos.

##### **5.4.4.2. Informe final.**

Una vez finalizados los trabajos de inyección, y antes de transcurrido un mes de la fecha de terminación, el Contratista entregará al Director un informe final que constará de las siguientes partes:

- Parte 1ª. Recopilación de los datos depurados, planos de barrenos inyectados, cantidades de mezclas inyectadas por metro (m) de barreno, volúmenes de materiales consumidos en la inyección, fotografías, incidencias y cuantos sucesos sean de interés técnico.
- Parte 2ª. Análisis de resultados y conclusiones.

#### **5.4.5. Medición y abono.**

El Programa de Trabajos establecerá en cada caso particular la forma de efectuar la medición y abono de los trabajos efectuados, mediante la definición de las partidas alzadas y precios unitarios correspondientes a las distintas operaciones, suministros y trabajos en que se agrupen las diversas actividades que formen parte del objeto del contrato.

No serán de abono las mezclas de inyección que no se inyecten realmente; es decir, la que queda, después de terminar una etapa de inyección en las tuberías, depósitos u otros recipientes de la instalación de inyección, estas mezclas se desecharán sin costo alguno después de dos horas de permanecer en depósitos o en circulación.

No serán de abono los barrenos inyectados donde conste que no se han cumplido las especificaciones relativas a las presiones, volúmenes inyectados, caudales de inyección, métodos de inyección, etapas, colocación de obturadores y cualquier otra cuya no observancia pueda dar lugar a la realización de un trabajo defectuoso.



No serán de abono las inyecciones realizadas con mezclas cuya temperatura sea, en algún punto de su recorrido, superior a veinticinco grados centígrados (25 °C), ni inferior a cinco grados centígrados (5 °C).

No será de abono la inyección realizada en barrenos rellanados o contaminados por resurgencia de inyección de otros barrenos cercanos que no hayan sido adecuadamente limpiados por el Contratista, en cuanto se advierta dicho fenómeno. El Director podrá ordenar, si lo considera oportuno, la perforación e inyección de un nuevo barreno en las proximidades del contaminado e inutilizado, a cargo del Contratista



## CONCLUSIONES.

En la realización de cualquier obra de ingeniería, el ingeniero busca combinar los tres factores: seguridad, funcionalidad y economía. Por ello, en la construcción de túneles y estructuras subterráneas deben estudiarse a fondo las características del medio natural en que han de colocarse las estructuras diseñadas, determinando sus características benéficas o perjudiciales y así, elegir aquellas alternativas de solución que proporcionen los mejores beneficios.

El conocimiento de las características del medio en que se realizará la obra, nos ofrecerá la base para el diseño de cada uno de los elementos del túnel, además de ayudarnos a prever los posibles factores que influirán de manera desfavorable en el desarrollo de cada etapa en particular. Por ello, es de gran importancia conocer bien el lugar donde se realizará la construcción, para ver que problemas presenta dicho sitio y que tratamiento es el más adecuado para afrontarlos. Para lograr este fin es necesario realizar exploraciones y obtener muestras representativas del terreno.

Los tratamientos de inyección han reportado resultados satisfactorios, pero las experiencias demuestran que no es suficiente saber preparar una mezcla para inyectar correctamente. Es preciso además saber elegir éstas en función del terreno, del resultado que se pretende alcanzar y de la economía de los trabajos. El ingeniero tiene a su disposición una gran variedad de mezclas, que se obtienen haciendo variar las proporciones de algunos elementos básicos. El éxito consistirá en saber utilizar la mejor adaptada al tipo de obra en particular; el conocimiento de las características del terreno y propiedades de las mezclas es indispensable para orientar en la elección.

Por otro lado, para obtener una mezcla que, una vez colocada satisfaga los propósitos para los cuales fue diseñada, será necesario practicar también estudios de laboratorio. De esta forma se determinará la proporción exacta de los diversos productos que entran en la composición de la lechada y la calidad de los mismos. El propósito será, conseguir una mezcla que no sufra alteración a pesar de los ataques del medio a los que estará sometida, como las presiones hidrostáticas y las aguas agresivas; que tenga la resistencia adecuada y el grado de obturación deseado.

Como puede observarse, en los problemas de filtración, la permeabilidad propia de las rocas ígneas podrá considerarse despreciable, esto querrá decir que cualquier filtración a través de éstas, será producto únicamente de las fisuras o contactos que presenten, por lo que los estudios previos siempre deberán contener informes sobre cualquier tipo de discontinuidad. Así mismo, es observable que las rocas pueden exhibir fracturamientos diferentes dependiendo si son rocas ígneas intrusivas o extrusivas, por lo que esta información será también de especial interés para su tratamiento. En algunos casos, la permeabilidad de las rocas ígneas puede ser elevada, y su tratamiento difícil y costoso; por ello, dicha información definirá si el tratamiento propuesto es aplicable y si reportará resultados benéficos al desarrollo del proyecto.

El uso de explosivos es causa de daños irreparables en la roca, por ello es recomendable usarlos con moderación y en frentes reducidos, particularmente si la roca exhibe un comportamiento frágil, ya que esto podría aumentar el grado de fisuramiento del macizo, o provocar el deslizamiento en donde ya se encuentran zonas de falla, aumentando así la permeabilidad del macizo y dificultando su tratamiento.



Los tratamientos de inyección resultan ser una ayuda considerable en lo que a impermeabilización de terrenos se refiere. Sin embargo, su uso requiere que siempre sean tomados en consideración los factores que influyen en su desarrollo y optimizar a toda costa los rendimientos. La presión durante el inyectado es uno de los parámetros más importantes a considerar. En principio puede decirse que es necesario operar con las presiones más altas que resulten admisibles, para abrir las fisuras y penetrar a mayor profundidad. Sin embargo, hay limitaciones sobre este particular, puesto que existe el riesgo de que se provoque el levantamiento de las formaciones, con pérdidas de lechada o daño a la roca. Debe entonces definirse la máxima presión; aquella que aumente el radio de acción o penetración de la lechada, disminuyendo el número de barrenos perforados e inyectados, pero siempre proporcionando seguridad a las estructuras y garantizando que no existirán pérdidas excesivas de lechada.

Con el presente trabajo de tesis, se concluye que la inyección con geles de silicatos presenta diversas ventajas en el tratamiento de impermeabilización de rocas cuyas aberturas sean reducidas, permitiendo con ello, una permeabilidad prácticamente nula del macizo; favoreciendo al desarrollo de la obra, adicionalmente proporciona beneficios cuando se usa como complemento de una inyección previa o posterior, con otro mortero. Entre las ventajas de la inyección a base de silicatos encontramos que: dado el estado fluido de los silicatos, éstos pueden penetrar más lejos en las fisuras finas, en ocasiones los procedimientos de inyección son más sencillos, no existe el riesgo de sedimentación en los tubos ni en la perforación, aunque la mezcla permanezca mucho tiempo en reposo, y por lo tanto, suele no ser necesaria la línea de retorno.

Uno de los mayores inconvenientes de estos materiales de inyección es su elevado costo. La inyección de silicatos, entonces, puede emplearse sólo en aquellos casos en que el grado de estanqueidad requerido sea el más alto posible. Así mismo, cabe también la posibilidad, como ya se mencionó, de usarlos en combinación con otro tipo de mortero posteriormente, una vez que el primero ha sellado las fisuras de mayor tamaño o previo al tratamiento del otro mortero. Se obtienen así ambos beneficios, costos no muy elevados y una más alta impermeabilización.

El ámbito de la ingeniería de túneles abarca dimensiones considerables, por lo que en este trabajo de tesis sólo se pretendió exponer una condición que suele presentarse con mucha frecuencia en la realización de obras subterráneas. Por ello no se profundizó demasiado en los fundamentos del tuneleo, ni en la descripción del macizo rocoso y solo se tocaron más a fondo aquellos conceptos que nos ayudan a la comprensión de los fenómenos que propician las filtraciones a través del macizo rocoso y su perjuicio en la obra.





## BIBLIOGRAFÍA.

Crimmins Robert. **Trabajos de construcción en roca.** Ed. Limusa. México, 1978.

Galabru Paul . **Cimentaciones y túneles.** Ed. Reverte. España, 1977. 2ª edición.

Stagg – Zienkiewicx. **Mecánica de rocas en la ingeniería práctica.** Ed. Blume. España, 1970.

Hoek E. **Excavaciones subterráneas en roca.** Ed. Mc Graw Hill. México, 1985.

Legget Robert F. **Geología para ingenieros.** Ed. Gustavo Gilli, S. A. Barcelona 1967.

**Tópicos de geotecnia.** Universidad Nacional Autónoma de México. Escuela Nacional de Estudios Profesionales. Acatlán. México 1987.

Bielza Feliu Ana. **Manual de técnicas de mejora del terreno.** Edita: Carlos López Jimeno. Madrid, 1999.

H. Cambefort. **Inyección de suelos.** Ediciones Omega. S. A. Barcelona 1968.

**Estabilidad en túneles.** Tesis profesional. Nicolás Islas Coca. Gerardo Sánchez Torres Esqueda. ENEP. Acatlán. UNAM. México 1979.

Karoy Szenchy **The art of tunnelling.** Academia Kiadó. Budapest 1970.

Comisión Federal de Electricidad. **Manual de Diseño de Obras civiles.** Tomo B.3.5. Tratamiento de macizos rocosos.

Comisión Federal de Electricidad. **Manual de Diseño de Obras civiles.** Tomo B.3.2. Obras subterráneas.



## ANEXOS.

### Anexo I. Terminología.

**Aditivos.** Productos químicos que se añaden, en pequeñas dosis a las mezclas para modificar sus características de inyectabilidad o para dotarlas de determinadas propiedades, una vez endurecidas. Forman parte de este grupo los aditivos químicos para el cemento, y los fluidificantes y antiespumantes de las resinas, los aceleradores y los retardadores para las mezclas de silicatos y los fluculantes para la arcilla.

**Admisión.** Cantidad de mezcla de inyección, medida en volumen o en peso de materia seca, que se ha inyectado en un terreno, dividida por los metros de barreno empleados para inyectarla o por el volumen teórico de terreno tratado.

**Caudal de bombeo.** Caudal que suministra la bomba de inyección a la línea de inyección.

**Central de mezclado.** Instalación donde se realiza la fabricación de la mezcla según la formulación establecida.

**Comunicaciones.** Escape de mezcla de inyección por un barreno abierto, procedente de otro que se está inyectando en las proximidades de aquél.

**Depósito receptor-contador.** Recipiente de capacidad reducida, entre cinco (5) y diez (10) litros por lo general, situado a la entrada de la bomba de inyección para medir los volúmenes de mezcla que se bombean.

**Depósito regulador.** Recipiente provisto de un aparato agitador donde se almacena temporalmente la mezcla fabricada y desde el que se alimentan los equipos de bombeo; evita la dependencia directa entre el proceso de fabricación y de inyección de la mezcla.

**Dispersión.** Mezcla formada por un líquido y un sólido finamente dividido en suspensión coloidal.

**Formulación.** Expresión concreta de la composición de una mezcla de inyección, donde se indican los diferentes ingredientes y sus cantidades expresadas en unidades adecuadas de volumen y peso.

**Fracturación hidráulica.** Consiste en la inyección del terreno mediante su fracturación por lechada, con una presión por encima de su resistencia a tracción y de su presión de confinamiento. También se denomina hidro-fracturación, hidrofisuración, hidrojetting o claquage.

**Fuga.** Desplazamiento o emigración de la mezcla que se está inyectando a zonas del terreno que no interesa tratar o fuera del mismo.

**Gel duro.** Mezcla de inyección formada por una disolución de silicato sódico en agua y un reactivo orgánico.

**Gel plástico.** Mezcla de inyección formada por una disolución de silicato sódico en agua y un reactivo mineral.

**Impregnación.** Sustitución del agua y/o gas intersticial en un medio poroso, por una lechada inyectada a una presión suficientemente baja, que asegure que no se producen desplazamientos significativos de terreno.

**Inyección.** La inyección de un terreno implica la introducción en el mismo, para reducir su grado de permeabilidad y/o mejorar sus condiciones mecánicas, de una mezcla fluida que posteriormente fragua y endurece. La finalidad primordial de los tratamientos de inyecciones del terreno puede ser:

- a) La mejora de las condiciones mecánicas del medio a inyectar, incremento de las resistencias y disminución de la deformabilidad: inyecciones de consolidación.
- b) La disminución de la permeabilidad del medio: inyecciones de impermeabilización.
- c) Los dos efectos anteriores, simultáneamente.

En el proceso se controla indirectamente la colocación a distancia de materiales bombeables mediante el ajuste de sus propiedades reológicas y de sus parámetros de colocación (presión, volumen, caudal).



**Inyección por compactación.** Consiste en un método de inyección con desplazamiento del terreno, en el cual se introduce un mortero de alta fricción interna en una masa de suelo.

**Inyectabilidad.** Capacidad de un terreno para poder ser inyectado con una determinada mezcla de inyección.

**Lechada de cemento.** Líquido formado por una mezcla de agua y cemento en suspensión.

**Línea de inyección.** Tubería de transporte de la mezcla entre la bomba y la boca del barreno. Se denomina línea directa cuando la circulación de la mezcla se realiza solamente desde la bomba hasta el barreno; línea con retorno es cuando la tubería constituye un circuito de circulación de la mezcla en ambos sentidos.

**Materiales principales.** Materiales que, interviniendo en cantidades importantes en la composición de la mezcla, la caracterizan por su propia naturaleza; pueden ser entre otros: cemento, agua, silicatos, resinas reactivas, ligantes hidrocarbonados y las arcillas.

**Mezcla de inyección.** Agregación de varios productos líquidos y sólidos para formar un material que pueda ser bombeado y transportado por tuberías.

**Mezcladora de alta turbulencia.** Mezcladora cuyo mecanismo interior giratorio está constituido por una turbina con velocidad tangencial superior a veinte metros por segundo (20 m/s).

**Mezcladora.** Máquina que realiza el mezclado íntimo de los distintos componentes que constituyen la mezcla de inyección. Está constituida por un recipiente provisto de un mecanismo interior giratorio que posibilita la mezcla de los componentes

**Obturador de expansión.** Obturador simple o doble cuyo ajuste al barreno se realiza con cierres de material elastomérico que, por procedimientos mecánicos o hidráulicos, se dilatan considerablemente.

**Obturador doble.** Dispositivo formado por dos obturadores montados en los extremos de un tubo provisto de perforaciones practicadas en su parte central y por los que sale la mezcla a inyectar. Este dispositivo se enrosca en el extremo del varillaje de inyección.

**Obturador.** Dispositivo que sirve para aislar la zona del barreno que se desea inyectar; está formado, en esencia, por un anillo, o conjunto de anillos, montado sobre la tubería de inyección que se ajusta herméticamente a la pared del barreno. Puede ser obturador simple o doble.

**Penetrabilidad.** Propiedad de una determinada mezcla de inyección para poder ser inyectada en un terreno dado.

**Presión de bombeo.** Presión que marca el manómetro colocado en la salida de la bomba de inyección.

**Presión de cierre.** Presión a la que debe detenerse la inyección de un barreno. Puede ser igual o menor que la presión máxima admisible.

**Presión de inyección.** Presión que marca el manómetro situado en la boca del barreno que se está inyectando. Si se utilizan bombas de pistones, se considerará como presión de inyección al valor medio de las lecturas máximas y mínimas que indique en cada instante el manómetro.

**Presión estática.** Presión que se mantiene en el barreno una vez detenido el proceso de inyección y cerrada su boca.

**Presión máxima admisible.** Presión que no deben ser sobrepasadas bajo ningún concepto durante cualquier fase del proceso de inyección.

**Productos de adición.** Productos que intervienen en cantidades significativas en las mezclas de inyección con determinados fines tales como abaratar la mezcla y obtener un producto inyectado más adecuado a las características del medio. Entre otros, se distinguen la arena fina, tierra de diatomeas (Kieselghur), cenizas volantes, puzolanas naturales, bentonita y arcillas.



**Reactivos.** Sustancias cuya presencia es necesaria para la solidificación o gelificación de algunos materiales principales. Pueden ser, entre otros, los endurecedores para resinas reactivas y los productos orgánicos o inorgánicos para los geles de sílice.

**Relleno de fisuras.** Inyección de lechada en las fisuras, fracturas o discontinuidades, en general, en formaciones rocosas.

**Relleno de huecos.** Consiste en la colocación de una lechada, con un alto contenido de partículas, para el relleno de grandes huecos.

**Resurgencia.** Fuga que aflora a la superficie del terreno a través de grietas, poros o roturas de éste.

**Sinéresis:** Salida natural del agua presente en el gel.

**Silicato de sodio:** productos químicos inorgánicos en forma de cristales amorfos, químicamente son similares al vidrio pero con la característica de disolverse en agua. Se producen en hornos de alta temperatura, mezclando carbonatos de sodio y potasio con arena silíceas. Como resultado de esta reacción se obtiene silicato de sodio sólido, que posteriormente puede disolverse y dar lugar a una gran variedad de productos con diferentes propiedades.

**Suspensión estable.** Mezcla de un líquido y un producto insoluble finamente dividido, que no decanta o sedimenta durante el proceso de inyección.

**Suspensión inestable.** Mezcla de un líquido y un producto insoluble y granulado más o menos finamente que decanta o sedimenta durante el proceso de inyección.

**Tubo manguito.** Tubo de paredes lisas provisto de una serie de válvulas antirretorno distribuidos regularmente a lo largo de las zonas del mismo que van a coincidir, una vez colocado el barreno, con las zonas de terreno a inyectar.



## Anexo 2. Tipos de mezclas de inyección.

a. **Suspensiones estables de cemento:** cemento-bentonita, cemento-silicato, cemento-bentonita-silicato o dispersiones activadas de cemento. Las lechadas de cemento se forman a partir de agua y cemento solamente, o agua, cemento y otros productos, como la bentonita y la arcilla, que mejoran su estabilidad, o productos inertes, por ejemplo la arena, que funciona como elemento de carga. La mezcla de cemento pórtland corriente y agua es la más empleada debido a su rápida obtención, a su rendimiento, a sus altos límites elásticos y a su bajo costo comparado con cualquier lechada de tipo químico. Sus inconvenientes son la lenta ganancia de resistencia y el tamaño de partícula, que impide su penetración en terrenos con una permeabilidad menor de  $10^{-3}$  m/s.

El cemento no puede penetrar en fisuras o cavidades más pequeñas que el tamaño de sus propios granos, el límite para la penetración de cemento normal en una fisura es de 0.2 – 0.3 mm de espesor.

b. **Suspensiones inestables de cemento:** cemento puro, cemento con aditivos, cemento con aditivos y productos de adición, etc. Las lechadas de cemento puro son inestables, como consecuencia, su velocidad de flujo disminuye rápidamente a medida que aumenta la distancia desde la perforación a la zona de inyección, sedimentándose las partículas en una proporción que disminuye con la relación A/C de la mezcla. El efecto de la sedimentación de estas suspensiones depende del tipo de cemento y de la dilución. La lechada inyectada debe ser inicialmente bastante fina para observar el comportamiento de la perforación de inyección y del terreno, reduciendo las probabilidades de taponamientos prematuros de la perforación por una lechada demasiado densa. Cuando el terreno no presenta grandes dificultades, las inyecciones con estas lechadas inestables pueden ser un método barato y eficaz. Su introducción en las fracturas crea un depósito hidráulico, produciéndose una absorción importante relacionada con la presión de inyección y las posibilidades de evacuación del agua, además presentan una resistencia mecánica muy elevada.

c. **Inyecciones de microcemento:** consiste en un cemento de una finura aproximadamente 1.7 veces menor a la del cemento pórtland ordinario. Ofrecen un mayor alcance en la penetración de las lechadas y mejor distribución en la inyección a través del medio poroso. Su limitación más destacable es el elevado costo, comparable al de las mezclas químicas.

d. **Suspensiones de arcilla:** de arcilla, arcilla-cemento, arcilla-cemento-arena, lodos tixotrópicos de arcilla-cemento, etc. Básicamente están compuestas de cemento pórtland, con una relación A/C entre 10 y 2.5 y un lodo de arcilla. El efecto de la arcilla como filler o carga en este tipo de suspensiones de cemento es el de aumentar el contenido de finos y mejorar la capacidad de penetrar en el terreno, reduciendo el consumo de cemento y mejorando la estabilidad y viscosidad de la suspensión, debido a la capacidad de la arcilla para formar geles, estabilizando la mezcla de cemento. La arcilla frena significativamente la sedimentación de la suspensión y la pérdida de agua de la mezcla. La estabilidad de las lechadas de arcilla – cemento es directamente proporcional a la calidad de la arcilla y a su proporción en la mezcla.

e. **Inyecciones de silicatos:** geles duros de silicato de sodio y de lignocromo; geles plásticos de silicato de sodio y bentonita defloculada; etc.

f. **Inyecciones de resinas sintéticas:** resinas, epoxi, acrílicas, etc. Las resinas en general son soluciones de productos orgánicos en agua o en un disolvente no acuoso, capaces de producir, a temperatura ordinaria y en un lugar cerrado, la formación de un sólido dotado de propiedades mecánicas adecuadas.

Estos productos se utilizan en tratamientos del terreno donde no es inyectable otro producto por su viscosidad demasiado elevada. Además, su tiempo de fraguado puede ser fácilmente regulado.



g. **Mezclas de acrilamida:** consisten en la mezcla de dos monómeros orgánicos: la acrilamida, constituyendo del orden del 95% de la solución, y un agente, como el metileno – bis –acrilamida, introducido en aproximadamente un 5% y destinado a enlazar entre sí las cadenas de acrilamida. Como ventajas destacan su rápida velocidad de penetración, debido a su baja viscosidad, manteniendo una velocidad constante durante el periodo de inyección, poseen una gran capacidad del control de su tiempo de gelificación y, además ofrecen unas resistencias muy adecuadas a la mayoría de las aplicaciones. Si no fuera por su toxicidad cumplirían la mayoría de las especificaciones para una lechada ideal.

h. **Geles mixtos:** mezcla de gel de sílice y resina acrílica. Se emplean principalmente en el tratamiento de fisuras activas.

i. **Geles de arcilla:** mezclas de arcilla (bentonita), silicato y un reactivo peptizante. Son aplicados en la impermeabilización de terrenos difíciles de tratar con lechadas a base de cemento y cuando no está justificado el empleo de gel.

j. **Geles lignocromos:** mezclas de lechadas lignosulfúricas más o menos concentradas y de bicarbonato de potasio de sodio como gelificante. Esta mezcla de inyección a base de lignosulfonatos contienen siempre un compuesto exhalante de cromo, y por ello se denominan cromoligninos. Este tipo de geles se emplea en la impermeabilización de depósitos aluviales más o menos abiertos, como complemento de tratamientos de bentonita - cemento, cuando la impregnación del silicato de sodio pueda constituir un estorbo para la continuación de los trabajos.

k. **Materiales espumosos resinas de poliuretano acuarreactivas:** existen numerosos materiales espumosos de diferente composición, los cuales varían en sus propiedades durante el proceso de reacción, así como después de completar ésta. Este tipo de productos permanecen en estado líquido mientras no haya agua, ya que en contacto con ella la mezcla se hidrata y solidifica. Sus aplicaciones son muy diversas, estando limitadas principalmente por su elevado costo.



### Anexo 3. Inyecciones del terreno con mezclas de cemento.

Se define como inyecciones del terreno con mezclas de cemento, los tratamientos del terreno por inyecciones de mezclas cuyo componente endurecedor es el cemento.

#### Clasificación.

Las inyecciones con mezclas de cemento se clasifican de la siguiente manera:

- Clase A:

Inyecciones de cemento: suspensiones de cemento puro, con o sin aditivos. Pueden contener bentonita hasta un dos por ciento del peso del cemento ( $B/C < 2\%$ ) para disminuir su estabilidad. Esta clase se divide en los siguientes apartados:

- A.1. Sin productos de adición.
- A.2. Con productos de adición inertes (Kieselguhr, harina mineral, etcétera.)
- A.3. Con cenizas volantes.

Generalmente se emplearán aditivos estabilizadores de la suspensión.

- Clase B:

Inyecciones de cemento-bentonita: suspensiones estables con un contenido de bentonita igual al dos por ciento (2%) del peso del cemento. Esta clase se divide en los siguientes apartados:

- B.1. Sin productos de adición, excepto bentonita.
- B.2. Con productos de adición inertes.
- B.3. De cemento-cenizas volantes-bentonita.

- Clase C:

Inyecciones de suspensiones de cemento activadas: dispersiones estables de cemento activadas por:

- C.1. Vía mecánica (turbo agitador de muy alta velocidad).
- C.2. Vía química (generalmente con polvo de aluminio).

- Clase D:

Inyecciones de mortero de cemento: mezclas de la Clase A o B, con adición de arena fina, generalmente menor de un milímetro y veinticinco centésimas (1.25 mm.).

- Clase E:

Inyecciones de mezclas de mortero activadas: mezcla de la clase C, con adición de arena fina.

- Clase F:

Inyecciones de arcilla-cemento: suspensiones estables de arcilla natural y cemento en el agua, o de bentonita y cemento, en las que el contenido de arcilla es muy alto respecto de las suspensiones de la Clase B. Realmente son suspensiones de arcilla en agua a las que se adiciona cemento para conseguir una pequeña resistencia mecánica para bloquear la mezcla en los intersticios del suelo.

No se consideran las mezclas de cemento-silicato por no ser adecuadas para la inyección del terreno, debido a su tendencia a la formación de grumos de silicato.

#### Aplicaciones.

Las suspensiones de cemento puro y agua, con o sin aditivos pero sin bentonita, por su baja estabilidad solamente se podrán emplear en la inyección de terrenos con huecos de gran tamaño respecto del grosor de los granos de cemento, y corto recorrido de la inyección, en rocas duras y muy fisuradas con discontinuidades abiertas y en inyecciones de contacto roca-concreto.

Las mezclas A y B son adecuadas para las inyecciones de impermeabilización y consolidación en macizos rocosos, la resistencia final de la mezcla endurecida disminuye al aumentar la relación bentonita-cemento (B/C).

La inclusión de productos de adición inertes, Kieselguhr, harina de rocas calizas, cenizas volantes aunque sean de baja o nula actividad puzolánica, servirán para abaratar el costo de la mezcla y disminuir la retracción de la mezcla inyectada. La adición de cenizas volantes muy finas recogidas con recuperación electrostática, aumenta la estabilidad de las mezclas, además de su posible actividad puzolánica.

Las inyecciones de la Clase C son adecuadas para la consolidación de gravas sumergidas en el agua, o bajo el nivel freático en terrenos sueltos, debido a su no miscibilidad temporal con el agua.

Las mezclas de la Clase D se emplean para rellenar grandes huecos y cavernas del terreno, en las inyecciones de contacto de la bóveda de los revestimientos de concreto y en la consolidación de los rellenos de entibación de las obras subterráneas.



La aplicación principal de la Clase E es en concretos especiales de agregados colocados en seco y posteriormente inyectadas, en obras bajo el agua y en el macizado de espacios confinados.

La Clase F sólo podrá emplearse en inyecciones de impermeabilización donde no sean necesarias características geomecánicas de cierta consideración.

#### Estudio de ejecución de las inyecciones.

Se prestará especial atención a la definición de las mezclas tipo más adecuadas según la finalidad del tratamiento, impermeabilización o consolidación, en base a las características del medio a inyectar y a las condiciones de la estructura que, en su caso se apoye sobre el terreno.

Se determinarán los límites entre los cuales habrán de estar comprendidas las características principales de las suspensiones. El Programa de Trabajos concretará estas características que, como mínimo serán las siguientes:

- Relación agua/cemento (A/C) inicial y final.
- Relación bentonita/cemento, en su caso, o arcilla/cemento.
- Decantación. (%) de la altura de agua separada en superficie. Curva de tiempo-% de decantación en función del tiempo de amasado (generalmente 10 minutos), especialmente en suspensiones inestables. Como característica final se tomará la decantación en % al cabo de un tiempo determinado, generalmente a los sesenta minutos (60 min).
- Viscosidad, en segundos. Medida en Cono Marsh para las mezclas de las clases A, B y F y en Cono Mecasol o cono Prepak para las Clases D y E.
- Rigidez, en centipoises (1 cp = 1mPa.s). Solamente en el caso de suspensiones tixotrópicas, mediante el viscosímetro de Stormer o con otro tipo viscosímetro de reconocida idoneidad.
- Resistencia a compresión, de la mezcla endurecida, a los 3, 7 y 28 días, en MPa (1 MPa = 10,20 kp/cm<sup>2</sup>).

#### Materiales.

*Cemento:* el cemento para inyecciones del terreno, además de cumplir las prescripciones de calidad especificadas para cualquier tipo de trabajo, cumplirá con las siguientes:

- Finura del molido:

- Residuo acumulado sobre el tamiz de 900 mallas por centímetro cuadrado máx. 0.30 %.
- Residuo acumulado sobre el tamiz de 4.900 mallas por centímetro cuadrado máx. 4.00 %
- Superficie específica Blaine, en cm<sup>2</sup>/g. mín. 4.500.

*Agua:* no contendrá partículas en disolución que puedan afectar las características de la mezcla.

*Aditivos:* En todo caso se ensayará la eficacia del aditivo teniendo en cuenta que ésta depende de la dosificación de cemento en la mezcla.

*Productos de adición:* la bentonita, arena (el tamaño máximo de la arena no será mayor de 1,25 mm), arcilla, etc.

#### Equipos.

Las mezcladoras serán obligatoriamente del tipo denominado de alta turbulencia, provistas de turbina cuya velocidad tangencial será superior a veinte metros por segundo (20 m/s).

A propuesta del Contratista podrán aceptarse otros tipos de aparatos mezcladores, siempre que éstos aporten pruebas de su eficiencia y referencias de experiencias satisfactorias en otras obras o bien se realicen ensayos en la obra que demuestren su idoneidad.

Los productos de adición, con excepción de la arena, se prepararán en batidoras independientes, mezclándolos con agua antes de su incorporación a la lechada de cemento, para ello se dispondrá en obra de los correspondientes equipos de mezclado, maceración, homogeneización y depósitos para la alimentación de la mezcladora de acuerdo con las necesidades de la obra.

El depósito regulador donde se almacena la lechada una vez fabricada, estará provisto de un sistema de agitación mediante paletas cuya velocidad de giro no será inferior a cien revoluciones por minuto (100 r.p.m.).





Las bombas de inyección deberán estar equipadas con mecanismos de mando que posibiliten el control de la presión y del caudal, con precisión y agilidad desde cero hasta los máximos autorizados. En el caso de bombas de pistones, el número de éstos será como mínimo de dos (2), preferentemente de inmersión y, obviamente, con ciclos de funcionamiento alternativo solapados; las bombas serán aptas para la eventual inyección de mezclas con alto porcentaje de arena.

No se permitirá el empleo de aparatos de inyección por descarga intermitente mediante aire comprimido.

Las tuberías desde la salida de la bomba hasta el barreno tendrán un diámetro útil máximo de veinticinco milímetros (25 mm)

### **Métodos de inyección de los barrenos.**

El Programa de Trabajos podrá concretar el método de inyección de los barrenos según la naturaleza del medio a inyectar: por fases descendentes, por fases ascendentes, con tubo manguito o con puntaza perdida. Si el Programa de Trabajos no especificase el método, el Contratista lo propondrá a la aprobación del Director.

El Director podrá ordenar el cambio del método de inyección de los barrenos siempre que los resultados que se vayan obteniendo en los trabajos de inyección así lo justifiquen.

### **Ejecución.**

*Preparación de las mezclas:* Las mezclas se prepararán de acuerdo con la dosificación o formulación establecida en el Estudio de Ejecución de las inyecciones. La formulación se deberá ir ajustándose durante los trabajos iniciales de inyección.

- **Suspensiones de cemento.** Como norma general, en las mezclas para inyección de macizos rocosos, la relación agua/cemento será la menor compatible con la inyectabilidad y la penetrabilidad adecuada a las grietas y fisuras a inyectar. En general, la relación agua/cemento (A/C) estará comprendida entre 3/1 y 1/1. El tiempo de mezclado del cemento con el agua en la mezcladora de turbina no será inferior a dos (2) minutos; asimismo, el tiempo de permanencia de la lechada de cemento en los agitadores no será superior a una (1) hora.
- **Mezclas de cemento-bentonita o de cemento-arcilla.** Las suspensiones de cemento-agua y de bentonita-agua, o arcilla-agua se prepararán en mezcladoras distintas. Las suspensiones bentonita-agua o arcilla-agua se prepararán con una antelación mínima de veinticuatro horas (24 h) a su empleo, manteniéndolas en agitación durante todo este tiempo. El agua para las suspensiones de bentonita o de arcilla deberá estar exenta de cemento. La suspensión de cemento-agua deberá pasar a un recipiente dotado de agitador al que se incorporará la suspensión de bentonita-agua, o arcilla-agua, de forma que al mezclarse ambas suspensiones se obtenga la composición previamente establecida.

### **Inyección en macizos rocosos.**

Tanto si el método de inyección es por fases ascendentes como si lo es por descendentes, los tramos de inyección de cada fase tendrán una longitud no superior a cinco metros (5 m).

Antes de iniciar la inyección del barreno deberá procederse a su lavado con agua y aire a presión, hasta que el agua de retorno sea clara. Cuando se utilice el método de inyección por fases descendentes, el lavado se realizará al terminar la inyección de cada tramo y no antes de que la lechada haya iniciado su fraguado, salvo que el Director ordene que no se realice esta operación de lavado y que, en cambio, sea reperforado el tramo una vez transcurridas veinticuatro horas (24 h) de haberlo inyectado.

Si se inyecta por fases descendentes, el obturador deberá colocarse a un metro (1 m) por encima del externo inferior del último tramo inyectado.

Una vez comenzada la inyección, deberá continuarse sin interrupción hasta que se alcance la presión de cierre establecida.

Se dará por terminada la inyección de un tramo de barreno cuando la presión de cierre se alcance con un caudal de inyección inferior a cinco litros por minuto (5 l/m) durante diez minutos (10 min). A continuación se mantendrá cerrado el tramo durante diez minutos (10 min) como mínimo y, si al abrirlo refluiese la mezcla, se volverá a cerrar hasta que la mezcla inicie su endurecimiento.

En los barrenos inyectados por fases descendentes, el Contratista efectuará una prueba de permeabilidad en toda la longitud, excepto el último tramo no reperforado, colocando el obturador en la boca del barreno. Si el ensayo



de la prueba fuese satisfactorio el barreno se rellenará con una mezcla espesa desde el fondo del barreno. Si el barreno hubiera de quedar vacío se taponará cuidadosamente en su boca.

### Control de calidad.

*Control de las mezclas de inyección:* El Contratista efectuará regularmente la toma de muestras de la mezcla en la boca del barreno y verificará en laboratorio que se cumplen las especificaciones establecidas.

La temperatura de las mezclas no deberá sobrepasar los veinticinco grados centígrados (25 °C), ni ser inferior a cinco grados centígrados (5 °C), en ningún punto de su recorrido. Para ello el Contratista estará obligado a proteger eficaz y permanentemente las tuberías, depósitos y otras instalaciones por las que circula la mezcla de inyección, si fuese necesario. En ningún caso se permitirá que las tuberías estén expuestas al sol de forma continuada ni en largos tramos.

Las mezclas que circulen o permanezcan más de dos (2) horas en los depósitos, bombas, tuberías u otras conducciones serán desechadas por cuenta del Contratista. En el Cuadro 4.1 se indican los controles que generalmente se deben realizar y su frecuencia.

Tipo de mezcla	Características	Número de ensayos	Condiciones de rechazo
Suspensión inestable de cemento	Densidad	Uno por cada mezcla	Error superior al cinco por ciento (5%) en peso de la dosificación indicada
Suspensión estable de cemento con aditivos estabilizadores	Viscosidad en cono Marsh	Uno por cada mezcla	Error superior al cinco por ciento (5%) de la indicada en la documentación técnica
Suspensión inestable de cemento/agua y arena	Densidad	Uno por cada mezcla	Error superior al cinco por ciento (5%) en peso de la dosificación indicada
	Viscosidad en cono Mecasol o Prepakt	Uno por cada mezcla	Error superior al diez por ciento (10%) de la indicada en la documentación técnica
Suspensión estable/agua/arena con aditivos estabilizadores	Densidad	Uno por cada mezcla	Error superior al cinco por ciento (5%) en peso de la dosificación indicada.
	Viscosidad en cono Mecasol o Prepakt	Uno por cada mezcla	Error superior al diez por ciento (10%) de la indicada
Suspensión estable de cemento/arcilla y cemento/bentonita	Densidad	Uno por cada mezcla	Error superior al cinco por ciento (5%) en peso de la dosificación indicada
	Viscosidad en cono Marsh	Uno por cada mezcla	Error superior al cinco por ciento (5%) de la indicada

**Cuadro 4.1 Control de las mezclas de inyección**

Periódicamente se confeccionarán probetas con las mezclas de inyección que se dejarán endurecer en las condiciones adecuadas para cada tipo de mezcla. El curado y conservación de las probetas se realizará según las normas para el curado de probetas de concreto. La rotura se realizará a los siete (7) y veintiocho (28) días, o a la edad que indique el Director.

*Control de la inyección:* El Contratista estará obligado a realizar el control de producción de todas las operaciones de perforación e inyección de los barrenos para poder garantizar que en todo momento, se cumplen las prescripciones exigibles.

El Contratista confeccionará un parte diario en el que se distinguirán las circunstancias de las operaciones de inyección por cada barreno y tramo inyectado. En los partes figurarán, al menos, los siguientes datos:

- El número de identificación del barreno.
- El número del tramo inyectado.
- La fecha y hora del principio y final de la operación.
- La posición del obturador o el número del manguito inyectado.
- Los resultados del ensayo de agua previo a la inyección.



- La dosificación de la mezcla, la presión de inyección, el caudal de inyección y la hora en la que alguno de estos parámetros haya variado, así como las cantidades de lechada inyectadas entre dos variaciones de uno de estos parámetros.
- El registro gráfico de las presiones de inyección, si se instalasen manómetros de este tipo, con la indicación del número del barreno del tramo inyectado, de la fecha y de la hora.
- La absorción total de lechada del tramo.
- Las observaciones e incidentes durante el curso de la inyección.

*Control de recepción:* En el Estudio de Ejecución, se especificarán los métodos de control de los tratamientos de inyección ejecutados a fin de determinar si el tratamiento ha sido suficiente o si por el contrario, debe ser intensificado mediante una nueva fase de inyecciones, en malla o secciones en abanico, de barrenos intercalados a los inyectados en la fase anterior.

En todo caso, como método de control se realizarán pruebas de permeabilidad en los barrenos que se inyectan y en otros intercalados que el Director ordenase perforar.

En macizos rocosos las pruebas de permeabilidad se realizarán mediante ensayos de tipo Lugeon según la normativa usual y a distintas presiones escalonadas. Los ensayos Lugeon se realizarán con agua limpia y clara y por tramos de barreno de tres (3) a cinco metros (5 m) de longitud. Estos tramos se confinarán con obturador simple colocado en la zona superior del tramo, cuando los ensayos se realicen siguiendo la progresión de la perforación, o con obturador doble que cierre, en sus dos extremos el tramo de barreno a ensayar. Los obturadores simples serán de paso directo, sin pérdidas de carga ni estrechamientos; los obturadores dobles serán sometidos a la aprobación del Director.

Cuando lo ordene el Director se realizarán reconocimientos mediante sondeos, calicatas, pozos o galerías, para observar directamente el resultado de las inyecciones.

#### **Informes.**

Será de aplicación el apartado Informes en el procedimiento de inyección de silicatos.



## Anexo 4. Perforación de barrenos.

### Definición.

El término barreno significa el agujero circular de gran longitud relativa, practicado en el terreno o en cualquier clase de obra de fábrica o relleno con finalidades diversas, en este caso, tratamientos de inyecciones.

### Clasificación.

Los barrenos para obras hidráulicas, según sea la naturaleza del medio a perforar o procedimiento de ejecución, se agrupan según la siguiente clasificación:

#### A. Por el medio a perforar:

1. En roca.
2. En suelos (coherentes o no coherentes)
3. En gravas.
4. En concreto y otras fábricas.

#### B. Por el procedimiento de perforación.

1. A rotopercusión.
2. A rotación con corona.
3. A rotación con tricono.
4. A rotopercusión-rotación (OD).
5. con sonda helicoidal continua.
6. Con trépano.
7. Con sonda de punta helicoidal (Auger).
8. Con dardo de agua.

**1. Barreno a rotopercusión:** es el ejecutado mediante una máquina perforadora a rotopercusión, es decir, la que imprime al útil de perforación un movimiento de giro combinado con el golpeteo de un pistón sobre el útil, directamente o a través de un varillaje. El movimiento de rotación consiste en un giro de fracción de vuelta entre cada dos golpes, para que el útil no golpee en el terreno siempre en la misma dirección y que el barreno tenga forma circular. Generalmente se emplean dos tipos de perforador a rotopercusión: las denominadas de "martillo en cabeza" y las denominadas de "martillo de fondo".

Las perforadas con martillo en cabeza, transmiten el giro y la percusión a la barrena a lo largo de todo el varillaje. El accionamiento del martillo puede ser por aire comprimido o con mecanismos hidráulicos de aceite.

En las perforaciones con martillo de fondo, el martillo avanza en el interior del barreno y es sostenido y empujado por el varillaje que acciona el cabezal de la máquina. El martillo suele ser neumático.

Como fluido de perforación se puede utilizar aire comprimido o agua; en algunos equipos también se pueden utilizar lodos para perforar.

Cuando se utiliza como fluido de perforación el aire, será preciso tomar precauciones contra el polvo. Este procedimiento no deberá emplearse en lugares cerrados o con ventilación limitada, tales como obras subterráneas, galerías y otros; salvo que se establezca un adecuado sistema de ventilación forzada.

**2. Barreno a rotación con corona:** es el ejecutado con una máquina perforada que imprime un empuje y un movimiento de giro a una tubería o varillaje, provista en su extremo de una corona de borde cortante, para efectuar la perforación del terreno. Las máquinas perforadas, denominadas corrientemente sondas, pueden estar accionadas por motores eléctricos, hidráulicos o de combustión; aunque existen algunos modelos accionados también con motores de aire comprimido. La reacción del empuje necesario para perforar se obtendrá por el peso propio de la máquina, o, en los modelos ligeros, mediante el anclaje de la sonda al terreno.

Las coronas de perforación pueden tener el borde cortante constituido por acero especial, dientes de widia o diamantes industriales engastados en la matriz de la corona; también se emplean coronas con dientes de polvo de diamante aglomerado. La elección de un tipo determinado de coronas depende del terreno a perforar.

Aunque las coronas de perforación suelen tener forma anular, lo que permite la obtención de testigos del terreno que se perfora, también se utilizan, cuando no se desea obtener testigos, las "coronas ciegas", que tienen varios bordes cortantes concéntricos y forma cónica, o forma plana provista de aletas o cuchillas cortantes.

Como fluido de perforación se suelen utilizar el agua, sola o con aditivos, los lodos y el aire comprimido.



**3. Barreno a rotación con tricono:** es el ejecutado con una máquina perforada que imprime a una tubería o varillaje, provista en su extremo de un útil dotado de tres o más discos o conos dentados de una aleación dura, un movimiento de rotación y un empuje para efectuar la perforación del terreno. Generalmente, los equipos son los mismos que los utilizados para perforar a rotación con corona; pueden estar accionados por motores de combustión, eléctricos, o hidráulicos en los modelos ligeros.

El empuje sobre el tricono combinado con el giro, permite romper el terreno y realizar la perforación. Dicho empuje se suministra mediante peso aplicado encima del tricono, colocando en el varillaje unos elementos especiales modulados llamados "barras de carga", compuestos de plomo u otro material pesado. No debe perforarse con tricono utilizando el empuje que suministra la perforadora, como en el caso de perforar con corona.

Los equipos con tricono suelen ser pesados y con un par de giro elevado. Se utilizan preferentemente para barrenos de gran longitud, para pozos profundos y sondeos petrolíferos. Como fluido de perforación se utilizan preferentemente lodos, con circulación directa o inversa.

**4. Barreno a rotopercusión-rotación:** es el ejecutado mediante una máquina perforadora que combina el sistema de rotopercusión con el de rotación con corona simultáneamente; de forma que el barreno queda entubado por el equipo a rotación a medida que es perforado por la barrera a rotopercusión que trabaja en el interior de aquel. Este método de perforación, generalmente denominado método "OD", está especialmente indicado para la perforación en gravas y suelos de cualquier tipo. Los equipos constan de dos motores independientes: el de rotopercusión, que es el que actúa sobre el elemento perforador y el de rotación, que actúa sobre la tubería de revestimiento, pudiendo ambos sistemas perforar aisladamente. El accionamiento puede ser por aire comprimido o hidráulico. Como fluidos de perforación se pueden utilizar el agua, el aire o lodos.

**5. Barreno con trépano, o a percusión:** es el ejecutado con un equipo provisto de un trépano rompedor accionado mediante un cabrestante que permite golpear el terreno con la energía producida por la caída libre de aquél. Las máquinas perforadas a percusión disponen de un cabrestante que eleva el trépano y permite dejarlo caer libremente para realizar la perforación. Suelen estar accionadas por motores de combustión o eléctricos. El trépano, provisto de bordes cortantes especiales, va suspendido de un cable de acero, y tiene forma y tamaños diferentes, adecuados a la naturaleza del terreno y a la finalidad a que se destine el barreno.

En estos equipos no existe sistema para extraer automáticamente los detritus de la perforación del fondo del barreno, por lo que es preciso ejecutar esta operación de vez en cuando mediante herramientas especiales parando la perforación propiamente dicha. Como fluido de perforación suele utilizarse el agua y lodos.

**6. Barreno con sonda helicoidal continua:** es el ejecutado con una perforadora a rotación provista de una barrera helicoidal continua como elemento perforador. Este método de perforación solamente está indicado en los suelos de constitución relativamente blanda. Generalmente los equipos son los mismos que los dedicados a perforar a rotación con corona, sustituyendo el varillaje y la corona de perforación por una serie de elementos en hélice que se empalman para profundizar el barreno.

Suelen emplearse dos tipos de barrenas continuas: las barrenas que tienen el eje hueco (barrenas de alma hueca) y las que lo tienen macizo (barrenas de alma llena).

No se utiliza fluido de perforación para ejecutar este tipo de barrenos. El material del terreno se extrae automáticamente al perforar, al ascender sobre la superficie alabeada del helicoide.

**7. Barreno con sonda de punta helicoidal:** es el ejecutado con una perforación a rotación provista de un útil constituido por una barrena helicoidal con una longitud del orden del diámetro del barreno. Este método de perforación solamente está indicado en los suelos de consistencia relativamente blanda y normalmente para ejecutar pilotes en terrenos arcillosos, sin agua o con el nivel freático situado bajo el fondo de la perforación.

El equipo consiste en una perforación a rotación, generalmente montada sobre una base portante normalmente móvil (grúa, camión, etc.) y está dotado de un varillaje que puede ser telescópico o fijo (monoblock), accionado por una masa de rotación hidrostática o hidrodinámicamente mediante un convertidor de par. Algunos equipos llevan un empujador normalmente mediante cilindros hidráulicos, que acciona sobre el varillaje para dar presión al útil contra el terreno.

Normalmente la perforación se realiza en seco. La extracción del terreno se hace al sacar la barrena del interior del barreno.

**8. Barreno con dardo de agua:** es el ejecutado con una máquina, que utiliza el poder erosivo de un chorro de agua dotado de alta energía, actuando contra el terreno. Este tipo de barrenos se ejecutan normalmente en terrenos no coherentes, arenas, gravas, obteniéndose una alta velocidad de perforación. También se puede utilizar en rocas blandas; en este caso suele adosarse al tubo interior una maza para golpear la tubería exterior y realizar la hincada de ésta.



El equipo de perforación está constituido por una herramienta formada por dos tuberías concéntricas. La inferior se puede desplazar longitudinalmente respecto de la exterior en una cierta longitud.

Por el tubo interior se lanza un chorro de agua de gran caudal que erosiona el terreno; moviendo el tubo interior se provoca, por una parte un golpe de ariete del agua y por otra un golpeo sobre una sufridera colocada en el tubo exterior, que se hince en el terreno a la vez que el agua es expulsada por el espacio anular, arrastrando los detritus de la perforación.

En algunos casos se añade, mediante una tubería adecuada, aire comprimido que se emulsiona con el chorro de agua, favoreciendo el arrastre de material.

### **Equipos de perforación.**

El método y los equipos de perforación serán propuestos por el Contratista a la aprobación del Director, en consonancia con lo establecido en este Pliego y en el Programa de Trabajos. La propuesta del Contratista tendrá en cuenta la finalidad y localización de los barrenos, las características del medio a perforar, las características geométricas -con sus tolerancias- de diámetro mínimo, longitud, orientación, inclinación y máxima desviación admisible.

Los equipos de perforación serán los apropiados para cumplir con seguridad los requisitos del párrafo anterior y de suficiente capacidad de producción para cumplir el Programa de Trabajos. El tipo, potencia y demás características técnicas de los equipos de perforación será propuesto por el Contratista a la aprobación del Director.

Si en el transcurso de los trabajos, las circunstancias reales del medio que se perfora hacen aconsejable el cambio de tipo o características del equipo de perforación, el Contratista estará obligado, por su cuenta, a sustituir dicho equipo por otro que sea adecuado para estas circunstancias.

A la vista de los resultados obtenidos durante los trabajos de perforación en un determinado medio, el Director podrá ordenar el cambio de métodos o equipos, si lo juzga necesario para asegurar el cumplimiento de los plazos de ejecución o la calidad del trabajo.

### **Ejecución de los barrenos.**

Las actividades se requieren la ejecución de los barrenos son:

- Programa de trabajos.
- Replanteo de los barrenos.
- Accesos, plataformas y andamios.
- Suministros de energía, agua y aire.
- Alumbrado y ventilación.
- Transporte a obra del material.
- Perforación.
- Ejecución de pruebas, ensayos y observaciones en el barreno.
- Partes de ejecución.
- Retirada de los equipos.
- Informes periódicos e Informe final.

### **Programa de trabajos.**

En base a la finalidad de los barrenos, a la información actualizada del medio a perforar, a lo establecido en este Pliego y en el Programa de Trabajos y a las instrucciones dadas por el Director, el Contratista elaborará un programa de trabajos.

El programa de trabajos deberá incluir, entre otros, los siguientes conceptos:

- **Esquema de barrenos:** referidos a los Planos de la obra, que definan los barrenos a realizar con sus respectivos puntos de emboquille, orientación, buzamiento, longitud y diámetro mínimo, así como las distintas fases de ejecución cuando se trate de tratamientos en masa.
- **Ensayos en los barrenos y en laboratorio con los testigos y muestras extraídos:** para cada barreno se especificará el tipo de frecuencia de la obtención de testigos o muestras, así como los ensayos, pruebas y observaciones a realizar en cada barreno y los ensayos de laboratorio con los testigos o muestras obtenidas, además del Cronograma de los trabajos que con el detalle suficiente, establezca la duración e interrelación de las distintas actividades previstas.



- **Equipos de perforación:** con indicación de sus características principales y capacidad de producción horaria y diaria, así como las máquinas de reserva de las que se dispondrá en obra. El número y capacidad de los equipos serán los adecuados para garantizar con holgura, el cumplimiento del Cronograma de los trabajos indicados en el párrafo anterior.

#### **Replanteo de barrenos.**

El Contratista llevará a cabo el replanteo de cada uno de los barrenos de acuerdo con el esquema de barrenos aprobado por el Director.

El Contratista adoptará un sistema lógico de designación de los barrenos que permita identificarlos en los esquemas y planos y en la Obra. La identificación en obra será mediante marcas o señales permanentes de forma que de manera inconfundible, se correspondan con su respectivo barreno.

#### **Accesos, plataformas de trabajo y medio auxiliares.**

**Acceso a las obras:** salvo prescripción específica en algún documento contractual, serán de cuenta del Contratista, todas las vías de comunicación y las instalaciones auxiliares para transporte tales como carreteras, caminos, sendas, pasarelas, planos inclinados, montacargas para el acceso de personas, transporte de materiales a la obra, etc.

**Instalaciones auxiliares:** constituye obligación del Contratista el proyecto, la construcción, conservación y explotación, desmontaje, demolición y retirada de obra de todas las instalaciones auxiliares de obra y de las obras auxiliares, necesarias para la ejecución de las obras definitivas. Durante la vigencia del contrato, serán de cuenta y riesgo del Contratista el funcionamiento, la conservación y el mantenimiento de todas las instalaciones auxiliares de obra y obras auxiliares.

**Maquinaria y medios auxiliares:** el Contratista está obligado, bajo su responsabilidad, a proveerse y disponer en obra de todas las máquinas, útiles y medios auxiliares necesarios para la ejecución de las obras, en las condiciones de calidad, potencia, capacidad de producción y en cantidad suficiente para cumplir todas las condiciones del contrato, así como a manejarlos, mantenerlos, conservarlos y emplearlos adecuada y correctamente.

**Suministros de energía, aire y agua:** los suministros de energía, aire y agua serán por cuenta del Contratista.

**Alumbrado y ventilación:** el servicio de alumbrado para los trabajos nocturnos o en lugares donde sea necesario su empleo, así como el de la ventilación del tajo en locales cerrados, será por cuenta del Contratista. La iluminación y la ventilación exclusivas y las adicionales, que sean necesarias para la ejecución de los barrenos, serán también por cuenta y riesgo del Contratista.

#### **Transporte a la obra del material.**

El Contratista será responsable de realizar el transporte a obra de los equipos de maquinaria y medios auxiliares que sean necesarios para la ejecución de los barrenos.

El transporte a la obra de los equipos y medios auxiliares deberá ser anunciado con suficiente antelación por el Contratista y autorizados por el Director.

#### **Ejecución de la perforación.**

La ejecución de la perforación de los barrenos incluye las siguientes operaciones:

- Emplazamiento del equipo de perforación por el punto de emboquille.
- Perforación del barreno propiamente dicho hasta el límite establecido.
- Entubación total o parcial del barreno.
- Obtención de testigos y muestras.
- Control de la perforación. Desviaciones.
- Rectificación del barreno.



### ***Emplazamiento del equipo de perforación.***

El Contratista deberá comprobar que existen los permisos necesarios para la ocupación de los terrenos afectados por los trabajos antes de la iniciación de éstos.

El Contratista estará obligado a respetar los servicios y servidumbres existen durante todas las operaciones de ejecución de los barrenos.

El Contratista tendrá en cuenta la información que le haya sido facilitada por la Administración sobre posibles canalizaciones y servicios subterráneos existentes.

La máquina de perforación se emplazará de forma que el emboquille del barreno no se desvíe del punto replanteado en más de los siguientes valores:

- Cinco centímetros (5 cm) en soleras o paramentos de concreto y otras fábricas.
- Diez centímetros (15 cm) en terreno natural sin allanar.

Las medidas de orientación se realizarán con error menor que dos grados sexagesimales ( $<2^\circ$ ).

### ***Perforación del barreno.***

Esta operación consiste en la perforación del barreno incluidas todas las maniobras, la toma de datos y los ensayos en el barreno de acuerdo con el Programa de trabajos.

El tipo, calidad, potencia y estado de uso del equipo de perforación serán propuestos por el Contratista y aprobadas por el Director. La elección del equipo de perforación se hará en función del terreno que se espere perforar. El procedimiento de perforación dependerá de la finalidad de los sondeos, del número de muestras o testigos a obtener, de la profundidad del reconocimiento y de las demás circunstancias particulares de cada caso.

El Director podrá rechazar el sistema de perforación propuesto por el Contratista si no lo considera adecuado para obtener la información que se desea obtener con el barreno, o por cualquier otra causa justificada.

El sondista deberá poseer los conocimientos y experiencia suficientes para redactar los partes de trabajo en todos los aspectos y tipos de incidencias. Durante la perforación del barreno, el personal adscrito al equipo de perforación no deberá alejarse nunca de la máquina; por tanto será necesario contar, al menos con dos operarios por máquina perforada, es decir, un sondista y un ayudante, ambos con experiencia suficiente.

### ***Entubación total o parcial del barreno.***

Siempre que fuere necesario para evitar hundimientos, para cortar fugas de agua o por cualquier otra eventualidad el Contratista procederá a entubar parcial o totalmente el barreno siguiendo, en cada caso, el procedimiento adecuado a las características del método de perforación utilizado. De estas operaciones el Contratista dará conocimiento inmediatamente a la Dirección.

### ***Obtención de testigos y muestras.***

De acuerdo con las especificaciones del Programa de Trabajos, del Programa de trabajos o cuando lo ordene el Director, se procederá a la extracción de muestras o testigos. Para ello se utilizarán los aparatos adecuados.

Los tomamuestras para la obtención de núcleos inalterados podrán ser, según los casos, de los siguientes tipos:

- Tomamuestras de pared delgada (tipo Shelby)
- De pared gruesa con tubo partido y camisa de cinc abierta por una generatriz, en sus correspondientes tapas.
- De pared gruesa con tubo partido y camisa de plástico provista de tapones de goma.
- De pared gruesa con cabeza giratoria y tubo doble, con tubo interior de plástico provisto de tapones de goma.

Los testigos de roca o concreto se obtendrán con sonda de corona de diamantes y sacatestigos de tubo doble con dispositivo ensanchador del barreno. El sacatestigos será de diseño y calidad suficientemente probados.

### ***Control geométrico y tolerancias de la perforación.***

Durante la perforación el Sondista efectuará de manera continua el control de la longitud perforada. El control de desviaciones respecto al eje teórico del barreno se realizará mediante un aparato especialmente fabricado al efecto, de los que existen modelos que permiten medir la desviación en varios puntos de barreno, mediante fotogramas de la posición de un péndulo o mediante otro dispositivo.





Las tolerancias admisibles para desviaciones del rumbo de los barrenos ejecutados serán las siguientes, según el tipo de barrenos, expresadas en porcentaje de la longitud.

- Con rotoperCUSión: Inferior al diez por ciento (10 %)
- A rotación con corona: Inferior al seis por ciento (6 %)
- A rotación con tricono: Inferior al cinco por ciento (5 %)
- A rotoperCUSión-rotación: Inferior al seis por ciento (6 %).
- Con trepano. Inferior al diez por ciento (10 %).

Dada la imposibilidad que, en la mayoría de los casos existe para medir las desviaciones de los barrenos con sonda helicoidal continua puesto que suelen realizarse en terrenos blandos donde las paredes de los barrenos no son estables, se rechazarán los equipos de barrenos cuyos elementos tengan defectos en los dispositivos de unión, o que presenten holguras de manera que al unir los tramos resulte un eje de perforación articulado y no rígido.

Por lo que respecta al barreno con sonda de punta helicoidal, antes de comenzar la perforación del barreno, se controlará la verticalidad del varillaje de perforación mediante nivel, plomada u otro elemento análogo que garantice la verticalidad del barreno. La base portante de la perforadora debe tener el peso y estabilidad suficientes para que no se levante al dotar de empuje al varillaje contra el terreno.

Si se trata de barreno con dardo de agua, no se admitirán desviaciones respecto del eje teórico del barreno, superiores a dos grados sexagesimales (2°), medidos sobre el eje de la tubería de hincas que, debido a su rigidez y a la longitud usual de los barrenos realizados con este sistema, suelen ser sensiblemente rectos.

#### ***Rectificación del barreno.***

Si como resultado de las mediciones de la desviación fuera necesario rectificar la dirección del barreno, se utilizará para ello un método que deberá ser aprobado por el Director, bien introduciendo en el fondo del barreno perforado cuñas especiales, cementando y reperforando o mediante otro procedimiento sancionado por la experiencia.

También se considerará rectificación del barreno la operación de aumentar su diámetro cuando lo ordene el Director con el fin de obtener testigos de mayor diámetro del establecido, realizar observaciones o ensayos o por otras causas no previstas al iniciar la perforación.

En ensanchamiento del barreno para recuperar bocas, coronas, varillaje y otros elementos que impidan la continuación de la perforación, será por cuenta del Contratista, quien podrá optar por esta operación o por ejecutar un nuevo barreno próximo, de acuerdo con las instrucciones del Director.

#### **Partes de ejecución.**

El Contratista estará obligado a confeccionar los partes de ejecución de cada barreno indicando las incidencias habidas durante la perforación tales como pérdidas de agua, cambios de velocidad de perforación, agarrotamiento, derrumbamiento del barreno, averías e interrupciones. También se consignará someramente la naturaleza de los terrenos atravesados.

En los partes de ejecución se indicará en forma sencilla la naturaleza y características deducidas de la inspección visual y manual de los terrenos atravesados. El Contratista propondrá a la aprobación del Director la clasificación, características y estado de las rocas y suelos que, con una terminología sencilla, habrán de reflejarse por el Sondista en los partes de ejecución. Estas denominaciones deberán limitarse exclusivamente a los tipos de rocas y suelos que previsiblemente hayan de atravesarse.

En el parte de ejecución deberán figurar claramente indicados, para cada barreno, al menos los siguientes datos:

Designación del barreno (la misma que la señalizada y marcada en los planos de replanteo).

- Longitud, orientación y buzamiento.
- Diámetro o diámetros de las bocas o útiles empleados en la perforación del barreno.
- Procedimiento de perforación y características.
- Equipo de perforación empleado, marca, modelo y características.
- Fecha y hora del principio y de la terminación de la perforación.
- Nombre del operador.

Las partes de ejecución se entregarán diariamente al Director.

Con independencia de los partes de ejecución de los barrenos, el Contratista estará obligado a confeccionar los partes de realización de los ensayos efectuados en cada barreno, individualizados por tipos de ensayos.



### Retirada de los equipos.

Una vez terminados los trabajos de perforación, el Contratista retirará los equipos, instalaciones de obra, obras auxiliares, andamios, plataformas y demás medios auxiliares y procederá a la limpieza de la zona de trabajo de los materiales, detritus de perforación y desperdicios originados por las operaciones de ejecución de los barrenos.

### Ejecución de pruebas, ensayos y observaciones en el barreno.

El Programa de Trabajos indicará el tipo, las condiciones de realización y la frecuencia de las pruebas, ensayos y observaciones a realizar en los barrenos una vez ejecutados.

Si el Director estimara necesario realizar ensayos, pruebas u observaciones en los barrenos, no previstos en el Programa de Trabajos, o que supusieran aumento del plazo de ejecución de las obras objeto del Contrato, el Contratista estará obligado a realizar dichos ensayos, pruebas y observaciones en la forma que acuerde con el Director dentro del marco de las cláusulas contractuales.

A título informativo se indican a continuación los ensayos más usuales que se realizan en los barrenos.

Medio	Ensayo	Características
Roca	Permeabilidad: Tipo Lugeon. Relajación por sobrestificación. Presiométrico (dilatómetro)	Permeabilidad Esfuerzos Deformaciones

### Preparación y conservación de testigos y muestras.

Inmediatamente después de recuperarse el tubo portatestigos, se retirará cuidadosamente el testigo de roca del tubo, clasificándolo y midiendo el porcentaje de recuperación.

Los testigos de roca se colocarán, según el orden de recuperación, en cajas, generalmente de madera, de la suficiente resistencia y espesor. Las cajas deberán estar divididas en compartimentos a fin de alojar los testigos y tendrán una altura tal que impida el intercambio del material entre compartimientos.

Cuando la roca extraída esté muy fracturada o sea muy blanda, el tubo portatestigos se desmontará horizontalmente y el testigo se retirará cuidadosamente a fin de no alterar su estructura.

A la terminación de cada sondeo, se marcará de forma clara e indeleble, en cada caja de testigos, el número de identificación del barreno.

El Contratista deberá disponer de un lugar de almacenamiento de las cajas de testigos; éstas se entregarán posteriormente, cuando lo ordene el Director en el punto de destino.

### Conservación de barrenos.

Si fuera necesario conservar abiertos los barrenos durante un tiempo más o menos largo, el Contratista cuidará, mediante los medios adecuados, de que no se deterioren los mismos, bien por la caída en su interior de cuerpos extraños, bien por colapso de sus paredes o por cualquier otra causa que los inutilice para el fin a que se tengan que dedicar.

El Contratista deberá señalar de forma clara y con la suficiente solidez para que no pueda destruirse por causa de algún accidente provocado por cualquier máquina o medio existente en la obra, el emplazamiento de la boca del barreno, mientras sea necesario o lo ordene el Director.

### Informes.

*Informes periódicos:* el Contratista estará obligado a redactar informes periódicos con la frecuencia que indique el Director, por lo general mensualmente, sobre el desarrollo de los trabajos ejecutados.

Los informes incluirán las siguientes materias:

- Recopilación de los datos de los partes de ejecución una vez depurados.
- Columnas estratigráficas, con la situación de las incidencias.
- Fotografías en color convenientemente numeradas de los testigos colocados en sus cajas.
- Análisis de los resultados de las pruebas y ensayos realizados.
- Recomendaciones o sugerencias para la continuación de los trabajos.



*Informe final:* Una vez finalizados los trabajos y antes de transcurrido un mes de la fecha de terminación el Contratista entregará al Director un Informe final, que constará al menos de las siguientes partes:

- Parte 1ª. Recopilación de los datos depurados. Planos de los barrenos, columnas estratigráficas, fotografías, etc.
- Parte 2ª. Análisis de resultados y conclusiones.

### **Medición y abono**

Los barrenos se medirán y abonarán por metro (m.) de longitud de los mismos realmente ejecutados, incluyéndose en este concepto la perforación, limpieza, conservación y rectificaciones, en su caso, así como los medios auxiliares que fueren precisos (andamiajes, plataformas de trabajo, accesos, etc.), los suministros (energía eléctrica, agua, aire comprimido, etc.), el alumbrado, ventilación y la información técnica periódica durante la ejecución de los trabajos.

No serán de abono los barrenos con una desviación mayor de la máxima tolerada, cuando el diámetro del barreno o la calidad de la perforación en cuanto a limpieza de corte impida la correcta utilización del barreno para el fin al que se haya destinado.

No serán de abono los excesos de perforación ejecutados más allá de los límites de longitud de los barrenos definidos en los planos aprobados por el Director.

No serán de abono los barrenos rellenados o inutilizados a causa de trabajos posteriores ejecutados por el Contratista que imposibilitaren su medición final, cuando ésta no hubiera sido realizada anteriormente. Únicamente podrá ser abonable el tramo de barreno perforado si así lo decidiese el Director por considerar que el barreno, aunque inacabado, tuviese una utilidad cierta.

No serán de abono los barrenos rellenos o inutilizados a causa de trabajos posteriores ejecutados por el Contratista que imposibilitaren su medición final, cuando ésta no hubiera sido realizada anteriormente.

La medición de la longitud de los barrenos se hará sobre los planos o esquemas de barrenos ejecutados, bien sea por medición directa, bien por medición del varillaje empleado en las últimas maniobras de la perforación realizada, a efectos de la valoración de la obra ejecutada.

La entubación del barreno de pared inestable se medirá y abonará por metros (m) realmente colocados en el barreno.

Los ensayos, pruebas y toma de muestras en el interior de los barrenos se mediarán y abonarán por unidad de ensayo, prueba o muestra inalterable, según el tipo de que se trate.

La extracción de testigos y su entrega se abonará por metro (m) de los tramos de barreno en los que el Director haya ordenado la obtención de testigos y en los que realmente haya sido efectuada la perforación con doble tubo sacatestigo, con independencia del resultado obtenido. En el precio unitario estará incluido el costo de determinación de porcentaje de testigo obtenido y los índices RQD. Asimismo se incluyen las cajas de ordenación y conservación de los testigos y su transporte, dentro del ámbito de la obra, al lugar de almacenamiento que ordene el Director. El prototipo de caja deberá ser previamente sometido a la aprobación del Director.

No será de abono la obtención de testigos defectuosos, considerándose como tales los testigos en los que se observen desgastes por rotación en sus extremos y en general, aquellos en cuya extracción no se hayan seguido las normas o instrucciones establecidas para esta operación en el Programa de Trabajos, se hayan empleado sondas con campaneos o con coronas excesivamente desgastadas.

No será de abono la toma de muestras inalteradas de mala calidad ni los ensayos o pruebas que no hayan sido realizados siguiendo rigurosamente las normas o instrucciones fijadas en este Pliego, en el Programa de Trabajos u ordenadas por el Director.

No será de abono la toma de muestras y la obtención de testigos en los casos de extravío o de deterioro de las muestras o testigos, por causa imputable al Contratista.