



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGÓN

"CONCEPTOS BÁSICOS PARA TRATAMIENTOS EN
ROCAS Y SUELOS MEDIANTE INYECCIONES"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A:
EDGAR FABIÁN CHÁVEZ TORRES

ASESOR: ING. GABRIEL ÁLVAREZ BAUTISTA

m340200

México

2005



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.

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

NOMBRE: Edgar Fabián

Chávez Torres

FECHA: 29/11/04

FIRMA: Edgar Chávez T.

2



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN

EDGAR FABIAN CHAVEZ TORRES
Presente

Con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobado su tema de tesis y asesor.

TÍTULO:
"CONCEPTOS BÁSICOS PARA TRATAMIENTOS EN ROCAS Y SUELOS MEDIANTE
INYECCIONES"

ASESOR: Ing. GABRIEL ÁLVAREZ BAUTISTA

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México, 17 de mayo de 2004.

LA DIRECTORA

ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ



C p Secretaría Académica
C p Jefatura de Carrera de Ingeniería Civil
C p Asesor de Tesis

LTG/AIR/csm

SEGUIMIENTO DE REGISTRO DE TESIS

FECHA	CVE.	DESCRIPCIÓN DEL TRÁMITE	AUTORIZACIÓN Y SELLO
30/06/2004	IMP.	"CONCEPTOS BÁSICOS PARA TRATAMIENTOS EN ROCAS Y SUELOS MEDIANTE INYECCIONES"	
			Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO
			Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO
			Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO
			Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO
			Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO

TRÁMITE	CLAVE
PRÓRROGA	PR.
CAM. TÍTULO	C. T.
CAM. ASESOR	C. A.
CAM. SEM.	C. S.
VIGENCIA	VIG.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A DIOS

Por darme a mi familia y a mí la oportunidad que estemos vivos y unidos, por darme fuerza, salud y guiarme a este logro.

A MIS PADRES

Gerardo Chávez Gallardo y Rosa Elvia Torres Godina. Por brindarme la oportunidad de existir y llegar hasta aquí, por su amor, apoyo y dedicación, por sus sabios consejos en el momento que más lo necesitaba, este logro también es de ustedes. Con todo mi cariño.

A MIS HERMANOS

Ramses Chávez Torres y Fabiola Betzabe Chávez Torres. Por estar siempre conmigo, a quienes quiero con todo mi corazón, por que de ellos aprendí lo valioso que es tener una educación.

A MIS CUÑADOS

Martha Reyes de Chávez y Alejandro Pifón Pavón. Por brindarme su apoyo, en estos últimos momentos de mi educación profesional, ustedes saben cuanto los aprecio.

A EL ING. GABRIEL ALVAREZ BAUTISTA

Por asesorarme en mi tema de tesis, transmitirme, conocimientos, consejos, experiencias y brindarme parte de su valioso tiempo.

A MIS PROFESORES

Por transmitirme todos sus conocimientos y experiencias.

A MIS AMIGOS Y A TI

Ustedes realmente saben quienes son, ya que me han enseñado lo dura y bella que puede llegar a ser la vida, desde otro punto de vista, los valoro y estimo. A ella que tan lejos y cerca puede estar, tú sabes quien y que eres para mí, haz de mi vida una ilusión, y haz de esa ilusión tu vida. *Te quiero.*

A LA U.N.A.M.

Por ser mi alma mater y darme la oportunidad de ser alguien en la vida.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	I
CAPÍTULO I.- TEORÍA Y PRINCIPIOS DE LA INYECCIÓN.....	1
1.1 Inyección de una fisura única.....	1
1.1.1 Presión de levantamiento (Contrapresión).....	1
1.1.2 Inyección de un mortero estable.....	5
1.1.3 Inyección de varias fisuras	6
1.1.4 Presión de inyección y de rechazo de un mortero inestable.....	8
1.1.5 Influencia del diámetro de las perforaciones en la presión de rechazo	10
1.1.6 Presión de inyección y deformación del suelo.....	11
1.2 Agrietamiento del suelo por presión de inyección	12
1.2.1 Orientación de las grietas.....	13
1.2.2 Reconocimientos para localización de roturas y sus consecuencias	14
1.2.3 Inyecciones sin roturas.....	16
1.3 Observaciones «In situ» de la inyección.....	17
1.3.1 Inyección de rocas fisuradas.....	17
1.3.2 Inyección de arenas y gravas.....	26
1.4 Características físicas y mecánicas de los medios inyectados.....	28
1.4.1 Resistencia a la compresión de una fisura inyectada.....	29
1.4.2 Resistencia al deslizamiento de una fisura inyectada.....	30
1.4.3 Resistencia a la rotura de los aluviones inyectados.....	31
1.4.4 Resistencia al deslizamiento de los aluviones inyectados.....	36
1.4.5 Permeabilidad después de la inyección.....	37
1.4.6 Deslavado de los morteros de inyección.....	39
CAPÍTULO II.- INYECCIONES EN ROCA.....	42
2.1 Tipo de tratamientos.....	42
2.1.1 Los cuatro diferentes tipos de tratamientos.....	42
2.1.2 Productos empleados en la inyección.....	43
2.1.3 Mezclas de inyección fabricadas con cemento.....	44
2.1.4 Materiales empleados en la elaboración de mezclas de cemento...	46
2.1.5 Propiedades de las mezclas elaboradas con cemento.....	47
2.1.6 Presión de inyección.....	48
2.1.7 Equipo utilizado para la fabricación de mezclas e inyección.....	49

2.2 Diseño de tratamientos	51
2.2.1 Pruebas de inyección.....	51
2.2.2 Pantallas de impermeabilización.....	52
2.2.3 Tapetes de consolidación.....	55
2.2.4 Inyecciones de relleno.....	56
2.2.5 Inyecciones de contacto.....	58
2.3 Métodos de inyección y control del proceso	59
2.3.1 Método de inyección convencional.....	59
2.3.2 Método GIN (presión y volumen constante).....	59
2.3.3 Verificación del tratamiento.....	60
2.3.4 Caso práctico.....	61
CAPÍTULO III.- TIPOS DE INYECCIÓN EN ROCA.....	64
3.1 Inyección de rocas fisuradas.....	64
3.1.1 Inyección de fisuras muy abiertas.....	64
3.1.1.1 Lavado de las fisuras.....	65
3.1.1.2 Compactación de los rellenos arcillosos.....	66
3.1.2 Inyección de fisuras finas.....	67
3.1.2.1 Ensayos de agua.....	67
3.1.2.2 Inyección por tramos.....	68
3.1.2.3 Inyección de arriba abajo y de abajo arriba.....	70
3.1.3 Inyección de rocas fuertemente fisuradas.....	71
3.1.3.1 Inyección de un mortero estable.....	71
3.1.3.2 Inyección de un mortero inestable.....	73
3.2 Inyección de las arenas y gravas	77
3.2.1 Generalidades.....	77
3.2.2 Inyección de abajo arriba.....	79
3.2.3 Inyección con los tubos con manguitos.....	82
3.2.4 Inyección de arriba abajo.....	85
3.2.5 Presión de inyección.....	86
3.2.6 Cantidades inyectadas y permeabilidad final.....	87
3.3 Control de las inyecciones.....	88
3.3.1 Inyecciones por impregnación.....	89
3.3.2 Inyecciones por roturas.....	89
3.3.3 Medios locales de control.....	90
3.3.3.1 Velocidad de perforación de los taladros.....	91
3.3.3.2 Ensayos de agua.....	91
3.3.3.3 Coloración de los morteros.....	92
3.3.3.4 Trazadores reactivos.....	95
3.3.3.5 Medida de la resistividad eléctrica.....	96
3.3.3.6 Indicadores de movimientos.....	104

3.3.4 Control global de la calidad del tratamiento.....	107
CAPÍTULO IV.- MORTEROS DE INYECCIÓN Y MATERIAL UTILIZADO.....	112
4.1 Características de los morteros.....	112
4.1.1 Principales características de los morteros.....	113
4.1.2 Medida de la viscosidad.....	114
4.1.3 Medida de la rigidez.....	117
4.1.4 Medida del agua rezumada (o de la sedimentación o decantación).	120
4.1.5 Propiedades mecánicas de los morteros.....	122
4.1.6 Influencia de la sedimentación.....	123
4.2 Morteros inestables. - Suspensiones de cemento puro y rebajado.....	125
4.2.1 Morteros de cemento.....	125
4.2.2 Morteros rebajados.....	137
4.3 Morteros estables. - Suspensiones de arcilla.....	138
4.3.1 Morteros inyectables.....	138
4.3.2 Morteros de arcilla tratada.....	140
4.3.2.1 Anomalías de la viscosidad.....	144
4.3.2.2 Elección de las arcillas.....	148
4.3.3 Morteros de aceite-bentonita.....	150
4.3.4 Geles de arcilla.....	150
CONCLUSIONES.....	151
BIBLIOGRAFÍA.....	160

INTRODUCCIÓN

La inyección de suelos es un procedimiento conocido, sino por todos la gran mayoría. Sin embargo, no tiene bastante tiempo sus comienzos, ya que datan de principios del siglo XIX.

Este trabajo se plantea a partir de la escasa información que se le da al tema de inyecciones en suelos fisurados, que su empleo es muy reducido en la práctica, debido a la poca información que existe respecto al tema de inyección en suelos, aparte, se pretende que sirva como una ayuda teórica de consulta, al mismo tiempo que brinden alguna información y aportación sobre la inyección de suelos fisurados.

Este procedimiento que pudiera considerarse accesorio en obras clásicas, se transformo en esencial para obras de mayor tamaño, como en las construcciones de presas haciendo posible la eliminación de circulaciones de agua que contorneaban esta clase de obras.

Esta inyección no se practica como la de macizos rocosos, y es después de un poco más de dos décadas de su verdadero auge, cuando se conoce la forma de dirigir estos trabajos. Los numerosos estudios realizados por los técnicos petroleros para la fracturación hidráulica de los pozos han aportado su contribución a este resultado.

Ante este panorama se ha decidido rescatar la inyección en suelos fisurados como tema de investigación ya que representa un método seguro y costeable a futuro, después de la obra.

Hace pocos años comenzó una nueva etapa de materiales de construcción para la inyección. Se vuelve otra vez a los productos caros, incluso más que el clásico de silicato de sodio. Son las resinas orgánicas tan fluidas como el agua durante la inyección, que después de la mezcla de materiales transforman el suelo en un concreto de resistencia considerable.

Su empleo es limitado porque se ha aprendido a elegir los morteros. Estos productos nobles solo se deben de emplear con buen criterio.

Se debe determinar el mortero de inyección que ha de utilizarse, en función de sus posibilidades y de las características del suelo.

Se deben checar en el laboratorio las fórmulas de los morteros mejor adaptados. La experiencia que se va adquiriendo, apoyado en un sólido conocimiento de los principios de inyección que permite cambiar de mortero cuantas veces estime conveniente respecto a su consistencia.

Este cambio de morteros es obligatorio durante los trabajos si se quiere llegar a un resultado satisfactorio de manera económica. Los reconocimientos aun detallados no suponen nunca un conocimiento de la estructura del subsuelo tan precisa que el que proporciona la observación directa durante la inyección de numerosas barrenaciones.

Para realizar un trabajo de inyecciones, parte de un equipo donde cuyos miembros deben aceptar los conocimientos de los otros en sus especialidades respectivas. La técnica es ahora demasiado complicada para que una persona únicamente sea autosuficiente como ocurría hace años, con ciertas excepciones, ya que debe de estar de acuerdo al tipo y lugar de trabajo, puesto que, si se es bastante sencillo y sin tantas inyecciones al suelo se puede disminuir el equipo de trabajo.

Por otra parte el suelo es bastante heterogéneo para que unas simples explicaciones resuelvan el problema, por lo tanto se tiene que ver realmente todos sus porques de la inyección.

Es difícil, saber como se propagan las lechadas de inyección en el suelo. Las excavaciones practicadas en los macizos inyectados no muestran más que el resultado. En cuanto a los ensayos de laboratorio, no puede reflejar la realidad porque es imposible confeccionar un modelo que posea todas las propiedades reales del terreno. Los resultados obtenidos de este modo no se presentan como un comportamiento real.

Tal situación permite a cualquiera tener su idea sobre la inyección. Lo esencial es que esta opinión este de acuerdo con los hechos y desgraciadamente no siempre ocurre así.

Para tratar de esclarecer el tema hay que asociar:

- La estructura de los suelos, que resulta ser en la mayoría de los casos heterogéneos.
- Las propiedades de los morteros que pueden ser totalmente diferentes según sus usos.
- Las leyes de circulación de fluidos o suspensiones por conducciones de forma geométrica mal definida y repartidas de cualquier manera en un medio elástico para llegar a conclusiones que esten de acuerdo con las observaciones realizadas en trabajos reales.

Actuando de este modo, es como poco a poco la inyección ha podido hacer los espectaculares progresos de estos últimos años.

De la inyección en suelos resultan discusiones interminables, los falsos razonamientos, asociados a una búsqueda morbosa de la seguridad, imponen métodos que no pueden dar plena satisfacción o una verdadera certeza del trabajo realizado.

Se escucha a groso modo que las inyecciones sirven para muy poca cosa. No se puede reprochar nada ante eso, pero es sin embargo lamentable, que ingenieros de esa altura desconozcan las posibilidades de un nuevo método ó proceso de construcción.

La inyección utilizada como procedimiento de construcción tiene por objeto impermeabilizar o consolidar los cuerpos sólidos porosos y permeables, tales como rocas fisuradas, arcillas, arenas y gravas o aluviones (depósitos de arenas).

Para alcanzar este resultado a grandes rasgos se rellenan los vacíos del medio a tratar con un producto líquido que se solidifica con el tiempo.

Los morteros de inyección y los métodos utilizados son diferentes según sea la forma de los vacíos a rellenar. Estos pueden clasificarse en dos categorías:

- a) Fisuras.
- b) Vacíos de suelos sueltos o incoherentes (ósea que carecen de cohesión).

Los tipos de tratamientos pueden ser cuatro tipos:

- a) Pantallas impermeables.
- b) Tapetes de consolidación.
- c) Relleno.
- d) Inyecciones de contacto

Las categorías y tipos de tratamiento serán tratados en este tema de tesis

Se trataran puntos a fin como son las mezclas las cuales se dividen en dos grupos las *suspensiones* y las *soluciones*, sus tipos de las mismas como son las *mezclas estables e inestables*.

El objetivo principal del trabajo de tesis fue elaborar una investigación que brinde elementos teóricos para la utilidad del método de inyección en suelos.

La importancia de esta investigación radica en exponer los beneficios que nos brinda este método tanto para los beneficiarios directos que lo representan, los contratistas, y para los beneficiarios indirectos, personificados por la población.

El alcance del trabajo fue distinguir las ventajas y desventajas de emplear la inyección en suelos fisurados.

CAPÍTULO I

TEORÍA Y PRINCIPIOS DE LA INYECCIÓN.

1.1 INYECCIÓN DE UNA FISURA ÚNICA.

1.1.1 PRESIÓN DE LEVANTAMIENTO (CONTRAPRESIÓN).

Sabemos que la fuerza que tiende a abrir una fisura puede obtenerse suponiendo que la presión medida en el taladro a la altura de la fisura se ejerce sobre un círculo cuyo radio es tres o cuatro veces más pequeño que el radio de acción de la inyección. Este resultado sólo es exacto si hay circulación en la fisura; salvo casos realmente excepcionales, esto tiene lugar siempre durante la inyección de un mortero.

Si la fisura inyectada es poco profunda y paralela a la superficie del suelo, se podrá llegar a levantar el terreno, aumentando la presión. Calculemos esta presión límite suponiendo que el terreno levantado, de peso específico igual a 2, se encuentra en un tronco de cono cuyo semi ángulo en el vértice es igual a 30° . Para una profundidad de la fisura igual a 10 m y para un radio de acción de la inyección de 4 m, P_0 es aproximadamente igual a 16 kg/cm^2 . Evidentemente, este valor no constituye más que un orden de magnitud, pero está en perfecto acuerdo con la práctica. Cuando el macizo rocoso no está completamente desorganizado por su fisuración, puede aumentarse sin peligro. A 20 m de profundidad se encontraría en las mismas condiciones, con P_0 aproximadamente igual a 70 kg/cm^2 .

Concretamente se verá que el levantamiento de losas de concreto de revestimientos en carreteras y aeropuertos se hace con presiones que llegan hasta 4 kg/cm^2 . Esta presión es necesaria para que la losa se levante. Como no es muy pesada, es necesario que las presiones ejercidas sean muy próximas o idénticas a las teóricas, que, por otra parte, dan para la presión en el taladro, valores comparables a la presión media.

A pesar de su imprecisión, continuemos este análisis definiendo un orden de magnitud de la abertura de la fisura en curso de inyección. Para una fisura única, es suficiente aplicar la fórmula de BOUSSINESQ.

Hagamos dos aplicaciones con $r = 4 \text{ m}$, valor muy pequeño sin duda alguna:

a) En un macizo en el que $E = 200000 \text{ kg/cm}^2$, bastante grande para una roca fisurada, una presión de 50 kg/cm^2 abre la fisura 2,5 mm.

b) En un macizo en el que $E = 2000 \text{ kg/cm}^2$, arcilla o arena, una presión de 10 kg/cm^2 abre la fisura 5 cm. Es probable que en ese preciso momento r no sea igual a 4 m. Si alcanza 10 m, por ejemplo, la abertura llega a 12,5 cm.

Tenemos así la explicación del fenómeno llamado *contrapresión*.

Se dice que existe contrapresión cuando al detener la inyección el manómetro no se vuelve a cero. Basta entonces con abrir una válvula de descarga para que la perforación expulse el mortero, simplemente acumulado en una fisura ensanchada por la inyección. En cuanto ésta cesa, el mortero es rechazado al exterior por la elasticidad del terreno o por el peso del mismo. Si el mortero es de tal naturaleza que se solidifica durante la inyección, la contrapresión no tiene lugar. La fisura queda llena del mortero y conserva la abertura que le ha dado la inyección.

La fuerte compresibilidad de las arcillas, que permite una gran abertura de las fisuras debidas a la inyección, da a esta última un gran radio de acción. Pueden resultar graves consecuencias si las condiciones geológicas se prestan a ello.

Por eso es por lo que en una roca kárstica que contenga cavernas de grandes dimensiones, llenas de arcilla y relativamente poco profundas, la inyección puede provocar peligrosos levantamientos del terreno, incluso con presiones de algunos kilogramos por centímetro cuadrado, mientras que si las cavernas no existen se pueden utilizar sin peligro presiones elevadas.

Hemos visto un caso parecido en una inyección hecha a unos 10 m de profundidad, con una presión alrededor de 5 kg/cm^2 , donde apareció una fisura en una obra de una fábrica que se realizaba en superficie. Al observar esta fisura, que era filiforme, se detuvo la inyección. Sorprendentemente se vio cómo la fisura se abría hasta alcanzar una abertura de unos 10 mm; se volvió a cerrar después para transformarse de nuevo en filiforme. Simplemente ocurrió que la arcilla desempeñó la función de un acumulador de presión, funcionando después de haber detenido la inyección, hasta que el mortero pudo discurrir por las resurgencias. Inyecciones próximas a ésta en las que se alcanzaron hasta 30 kg/cm^2 no provocaron jamás un fenómeno parecido.

Este ejemplo es muy instructivo porque muestra bien claro que la limitación de la presión no se corresponde sistemáticamente con la seguridad. Será necesario que las condiciones geológicas colaboren y esto es muy raro. Se corre el riesgo, limitando *a priori* las presiones de inyección a valores bajos, de que no se realicen tratamientos correctos, porque un aumento del número de perforaciones no puede reemplazar el efecto de altas presiones de inyección.

No se trata de una afirmación gratuita, sino del resultado de una observación. Numerosos fracasos en la cimentación de pozos de minas han conducido al aumento de presiones. Desde entonces las inyecciones han sido satisfactorias (A. FRANCOIS, 1923; F. ARGILLERE, 1927; H. VAN MASSENHOVE, 1930).

La nueva puesta en servicio de los pozos de minas destruidos al final de la primera guerra mundial es un ejemplo de utilización de elevadas presiones que no deberíamos a adoptar en las obras públicas.

En el pozo n° 11 de las minas de Lens, cuya entibación, destruida a la altura de los límites acuíferos, estaba constituida por piezas de encina unidas de 12 a 20 cm de espesor, se inyectó hasta 40 kg/cm².

Las perforaciones situadas sobre dos círculos concéntricos a los pozos se encontraban a 4 y 6,50 m de la entibación. Cuando la inyección estuvo a la altura de la entibación, simplemente se limitó la pérdida de mortero y en el momento del desmontaje de la entibación, el terreno no volvió a dar agua (A. FRANCOIS, 1963).

F. ARGUILLERE precisa:

... la función desempeñada por las altas presiones de inyección es bastante clara y constituye una característica física del procedimiento. Estas presiones llegan a alcanzar hasta 80 y 90 kg. Facilitan, en el momento de ser inyectadas, la expulsión del agua sobrante, quedando solamente el agua de cristalización constituyendo un corrector de los posibles errores de dosificación. Aumentan la adherencia de los sedimentos a los terrenos incluso poco propicios y contribuyen a evitar el peligro de fraguado de un magma más o menos enlodado; ensanchan fisuras demasiado estrechas y hace que penetre más adentro la lechada de cemento. Por último, llegan a crear en el terreno, siguiendo más o menos los planos de sus diaclasas, nuevas fracturas revestidas de una fina película impermeable, formando un haz anastomótico a través del cual la circulación de agua estará limitada por fuertes pérdidas de carga...

Dice el profesor LUGEON en su libro *Barrage el Géologie* (1933):

... Antiguamente, y hasta hace pocos años, se utilizaban campanas de aire comprimido para enviar la lechada. Se dependía de la presión de los compresores de la obra y casi no se sobrepasaba una carga de 10 kg/cm². Este sistema ha sido reemplazado por la bomba de cemento, que permite una inyección continua, que es esencial, y a presión alta, que es capital, pudiendo alcanzarse hasta 50 kg y más. Solamente en los estratos superiores de rocas con estratificación horizontal no se podrán alcanzar cargas tan elevadas, por el temor de levantar los bancos rocosos, pero en el resto no hay nada que temer...

Por esto, aun los razonamientos aparentemente más lógicos, son destruidos por los hechos. Parece como si cada roca constituyera un caso especial.

Así nos encontramos de vez en cuando con rocas fisuradas cuya permeabilidad, medida por inyección de agua a presiones de hasta 10 kg/cm², es de varias unidades LUGEON. La inyección de un mortero de cemento inestable a 10-15 kg/cm² se traduce por un rechazo inmediato al constituirse en filtro los granos de cemento a la entrada de cada fisura. Por el contrario, si se aumenta la presión, las absorciones de cemento son importantes.

Se dice frecuentemente que en este caso la inyección hace crujir el suelo. En general, las fuertes presiones no hacen otra cosa que abrir las pequeñas fisuras preexistentes, lo que permite el paso de granos de cemento.

Llegamos así a la siguiente conclusión: Un macizo rocoso finamente fisurado no puede ser inyectado a baja presión más que con cemento de grano fino; es decir, de gran superficie específica. Por el contrario, a partir del momento en que

puede aumentarse la presión, todos los cementos son utilizables porque son las fisuras las que se han ensanchado. Entonces pueden pasar los granos de cemento.

Los cementos de gran superficie específica, indispensables para las inyecciones a baja presión, son escasos. En consecuencia, es normal que desde hace bastante tiempo se inyecte a elevada presión, sin debilitar por ello las características mecánicas del suelo o desorganizar las construcciones que puedan existir en la superficie, pero, ¿cómo determinar esta presión de inyección?

En una *consolidación* no hay problema. Es preciso terminar el tratamiento con las presiones más fuertes posibles, pero disponerlo convenientemente para detener temporalmente la primera fase de inyección en cuanto hagan aparición las resurgencias. La experiencia enseña que operando así el macizo se va comprimiendo, las fisuras se abren cada vez con más dificultad y, finalmente, la presión de rechazo sin resurgencia aumenta hasta alcanzar el valor deseado.

Al contrario, para una *impermeabilización* se nos presenta un dilema: rellenar de cemento las fisuras a cualquier precio o no hacer nada de esto, estimando que la débil permeabilidad medida en el ensayo LUGEON es suficientemente segura.

El problema se plantea principalmente en el momento de realizar la estanqueidad en la cimentación de una presa. En general, se piensa que, si el ensayo LUGEON da una débil permeabilidad con una presión máxima igual a la carga del futuro embalse, es inútil inyectar.

Esto denota un gran desconocimiento de las circulaciones subterráneas. Con el ensayo de agua se obtiene una circulación radial; la presión máxima medida en la perforación va decreciendo muy rápidamente con la distancia, mientras que cuando la obra está en servicio, se tendrá una circulación paralela, totalmente diferente de la del ensayo y, sin duda, más desfavorable. No inyectando, se puede tener, por tanto, un caudal de fugas netamente superior al previsto.

Por otra parte, la inyección de un macizo semejante, con presiones de rechazo demasiado elevadas, hace correr el riesgo de absorciones considerables, por ejemplo, varias toneladas de cemento por metro de perforación. Es totalmente inútil aplicada para una estanqueidad.

Para evitar este inconveniente es preciso, después de haber determinado la presión que permita la inyección, adoptar una presión de rechazo ligeramente superior: 5 kg/cm^2 o incluso menos. Así se tiene la seguridad de rellenar las fisuras limitando las absorciones. Esto impide fijar de una vez para todas, la presión de rechazo. Es preciso determinarla para cada tramo de inyección. Es molesto porque retrasa la marcha activa de los trabajos, pero es el único método correcto.

En determinados casos, esta forma de operar puede conducir a presiones elevadas como para una consolidación. Esto obliga a la puesta en obra de aparatos de medida; efectuar señales que determinen alteraciones y colocar indicadores de

apertura de fisuras e incluso la realización de ensayos destinados a medir la presión a partir de la cual el mortero puede penetrar bien en las fisuras. Este es el único método que permite obtener resultados satisfactorios.

1.1.2 INYECCIÓN DE UN MORTERO ESTABLE.

Si la compresibilidad del suelo por efecto de la inyección permite comprender por qué la inyección de un mortero inestable provoca un buen relleno de fisuras, también permite comprender por qué no es posible crear una estanqueidad correcta en un macizo fisurado con un mortero estable que no haya fraguado durante la inyección.

Al detener la inyección, la fisura vuelve a su apertura normal expulsando al mortero de una y otra parte. Como los morteros cemento-arcilla no son estables en el sentido absoluto de la palabra, se produce un ligero rezumo antes del fraguado. Esto es suficiente para que la estanqueidad no sea completa.

Por esto es por lo que un mortero estable de fraguado lento no permite más que la transformación de una roca fuertemente fisurada, en otra de fisuración fina. Para poder terminar la estanqueidad es preciso inyectar posteriormente por las mismas perforaciones o por perforaciones próximas, una suspensión de cemento con la cual el fenómeno precedente no se reproduzca. Para proceder a esta nueva inyección, es preciso evidentemente, que el mortero inyectado en primer lugar haya tenido tiempo suficiente de fraguar.

Solamente cuando la inyección del mortero estable haya provocado un abombamiento permanente del suelo puede dispensarse a éste de la inyección del mortero inestable. Este abombamiento no puede explicarse de otro modo que por un aumento del tamaño de las fisuras, al penetrar en ellas un mortero resistente que impide que se cierren. Ningún hueco puede quedar sin rellenar. Desgraciadamente no pueden admitirse siempre levantamientos del suelo de varios centímetros que, además, nunca son sistemáticos.

Puesto que la sedimentación del mortero impide un relleno de fisuras satisfactorio, debe ser suficiente inyectar un mortero que no sedimente para lograr un buen resultado.

Como no se sabe realizar tales morteros, se elude la dificultad confeccionando morteros que se hinchan antes del fraguado. Se regula la expansión del mismo para que compense la sedimentación. Es el principio de los morteros Prepak.

La solución teórica es muy sencilla. Pero no lo es la sedimentación. Ésta es, relativamente, mucho más importante cuando es pequeño el espesor del mortero que cuando es grande, lo que hace que no se conozca el valor que es necesario dar a la expansión. Pero como ésta se manifiesta casi íntegramente antes del fraguado del mortero, puede dársele un valor alto sin peligro alguno.

Así, con estos morteros, es posible inyectar de una sola vez las rocas fisuradas, pero es evidente que si existen al mismo tiempo fisuras finas y otras más anchas, el mortero marchará preferentemente por estas últimas. Siendo sistemáticamente limitadas las cantidades de mortero, las fisuras más finas no alcanzarán el grado de tratamiento deseado. Por esta razón es preferible inyectar en primer lugar un mortero cemento-arcilla ordinario y después un mortero inestable, de acuerdo con el proceso indicado anteriormente.

1.1.3 INYECCIÓN DE VARIAS FISURAS.

La influencia de la presión en el caso de una fisura única es relativamente sencilla. Generalmente es más complicada cuando varias fisuras son cortadas por la inyección.

En el caso en donde existan una gran cantidad de fisuras y todas tengan la misma abertura. La inyección en un caso tan poco verosímil es análoga a la inyección en un medio pulverulento. Es más fácil su realización porque las fisuras tienen una abertura constante. Pueden ser utilizados morteros inestables.

Para poder comprender lo que sucede cuando no son idénticas las fisuras, puede examinarse el sencillo esquema (fig. 1), donde están todas situadas en planos paralelos. Sea, por ejemplo, el conjunto de fisuras de la (fig. 1). Dos fisuras, *AA* y *BB*, están más abiertas que las otras. La presión de inyección es la misma a la entrada de cada fisura. Al principio, el mortero penetra en todas ellas. Es evidente que va más lejos en las fisuras *AA* y *BB*, más abiertas, que en las otras. Las pérdidas de carga de la circulación son, igualmente, menos fuertes en esas dos fisuras, o, lo que es lo mismo, las presiones son ahí más elevadas. De ello resulta una fuerte compresión de los dos semiespacios, superior en *AA* e inferior en *BB*, que alcanzan un asiento importante cuyo orden de magnitud ya ha sido determinado. El volumen comprendido entre *AA* y *BB* también se comprime.

Pero siendo su espesor pequeño, esta compresión es relativamente poco importante.

Por el efecto de esta compresión, las fisuras finas se cierran y solamente las fisuras más anchas, como las *AA-BB*, son prácticamente inyectadas, pero llega un momento, como consecuencia de la inyección, en que estas fisuras llegan a ser iguales que las otras. Entonces, una o dos fisuras son las que se abren inyectándose a su vez.

Esta abertura puede provocar una expansión o dilatación, del mortero inicialmente inyectado en las fisuras y como consecuencia un descenso de presión en la perforación. Las fisuras *AA* y *BB*, inicialmente más anchas por la presión y parcialmente inyectadas por el depósito de cemento, vuelven a cerrarse.

Sus paredes o paramentos pueden llegar a juntarse con el cemento inyectado, provocando éste, entonces, una obturación total de la fisura e incluso un pretensado del macizo. De esta forma, las fisuras son sucesivamente obturadas; primeramente las más grandes y después las más pequeñas.

Se comprende fácilmente que cuanto más fuerte sea la presión, más posibilidad existe de inyectar las fisuras finas. Al abrirlas la fuerte presión, permiten inyectarse incluso aquellas que en estado normal son demasiado finas para permitir el paso de los granos de cemento. Este punto es de gran importancia porque una gran cantidad de fisuras finas permite una circulación de agua tan importante como varias fisuras aisladas mucho más abiertas, fácilmente impermeabilizables a baja presión. Vemos claramente el interés que tiene realizar inyecciones a las mayores presiones posibles, y, contrariamente a lo que se piensa con frecuencia, no resulta obligado un aumento de la cantidad de inyección, ya que las fisuras delgadas no pueden admitir un gran volumen. Más adelante veremos un ejemplo.

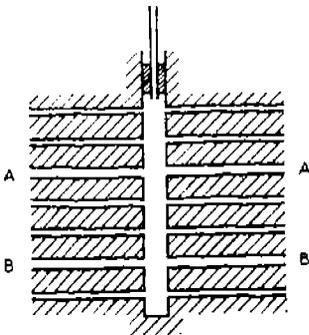


Fig. 1. Inyección de varias fisuras paralelas.

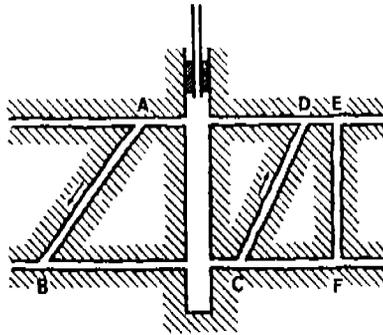


Fig. 2. Inyección de cualquier fisura.

Consideremos ahora el caso, simplificado al máximo, de fisuras que unen otras dos horizontales (fig. 2). Estas fisuras inclinadas o verticales son el medio de circulación desde la zona de fuertes presiones hacia las bajas. En el caso de la figura, si las fisuras horizontales son idénticas, existe una circulación descendente en *AB*, remontándose en *CD* y haciéndose nula en *EF*. Las fisuras *AB* y *CD* pueden además estar más o menos cerradas por la presión reinante en las fisuras horizontales. Su estanqueidad es, si no lo es nula, al menos si es muy mala.

Se comprende así el interés de disponer las perforaciones de manera que atraviesen el sistema de fisuración principal y por qué no es posible alcanzar totalmente la estanqueidad de una roca fisurada, cualquiera que sea la separación de las perforaciones, aunque el depósito de cemento que se forme en las fisuras sea perfectamente estanco.

1.1.4 PRESIÓN DE INYECCIÓN Y DE RECHAZO DE UN MORTERO INESTABLE.

Volvamos a considerar el caso de una fisura única de abertura e inyectada con un caudal Q y una presión P . Siendo prácticamente un fluido newtoniano el mortero de presión inestable, el movimiento o circulación del mortero en la fisura está determinado al comienzo de la inyección por la relación que escribimos en forma simplificada:

$$P = \frac{6\nu Q}{\pi e^3} \ln \frac{R}{r_0} \dots\dots(1)$$

Apareciendo R bajo el signo logarítmico, sus variaciones no influyen mucho en la presión. Puede decirse que P es proporcional a Q .

Por ello, la presión al comienzo de la inyección no depende más que del caudal. Como la inyección de un mortero inestable no es más que la clásica sedimentación hidráulica, que comienza a realizarse cuando la velocidad de circulación del mortero es suficientemente débil para que los granos se depositen, es especialmente interesante que esta velocidad sea elevada en la mayor distancia posible en torno a la perforación. Dicho de otro modo, es preciso inyectar con un caudal grande. Los primeros depósitos se harán entonces lejos de la perforación y el rendimiento de la inyección se aumenta. La fuerte presión no entorpece cuando dejan de inyectarse capas superficiales.

Conviene hacer constar que la presión es igualmente proporcional a la viscosidad del mortero. La inyección de fisuras delgadas que necesitan presiones elevadas con un mortero de poca viscosidad, no debe hacerse con un mortero de dosificación demasiado elevada en cemento; es decir, mucho más viscoso que un mortero débilmente dosificado.

Se tiene, pues, una justificación teórica de la práctica conocida, por la cual la dosificación del mortero viene determinada a partir del resultado de un ensayo de agua preliminar, incluso sumariamente realizado, con independencia de las taponaduras que se formen a la entrada de las fisuras finas, con morteros demasiado espesos, o de la velocidad crítica de sedimentación.

La fórmula precedente no puede explicar lo que ocurre después del comienzo de la inyección. La descripción del fenómeno dada anteriormente nos da la razón de ello. Pero puede pensarse que al final de la inyección, cuando la fisura esté casi totalmente rellena de cemento y no exista por encima de éste más que un ligero paso de abertura e_0 , esta misma fórmula constituye una buena aproximación del régimen de circulación.

La presión P correspondiente es lo que se llama *presión de rechazo*. Es, en general, la presión máxima que se fija de antemano, más bien a sentimiento que técnicamente.

No es preciso que esta presión de rechazo sea demasiado débil porque de esta manera la inyección no se realiza bien. Si se detiene la circulación, en ese momento el macizo no puede lograr que se comprima el depósito de cemento.

Precisando este punto:

La sección de la abertura e_0 independiente de la dimensión de la figura es proporcional a la raíz cúbica de $v Q/P$. No depende más que de v porque P/Q es prácticamente constante. Por el contrario, el aumento de la abertura $2 W$ de la fisura es proporcional a P . La condición indispensable de $2 W > e_0$ no se obtiene más que si P sobrepasa un valor mínimo, función de la viscosidad del mortero, de la elasticidad del macizo y del radio de la inyección. La presión de rechazo depende de las condiciones de la inyección. Sin embargo, resulta de este análisis que es necesario adoptar presiones de rechazo *elevadas y alcanzarlas con caudales pequeños y morteros poco viscosos*, simple confirmación teórica de una práctica correcta.

En la disminución de los caudales existe limitación por el peligro de obturación de las conducciones habituales que se producen violentamente para caudales del orden de 0,05 a 0,07 l/s.

En cuanto a la dosificación del mortero, depende mucho de la economía del trabajo. Pero es necesario evitar el aumento muy rápido de las dosificaciones, para no verse en la necesidad de hacer perforaciones suplementarias.

Se debe hacer constar, sin embargo, que estas perforaciones suplementarias no resuelven el problema. Si bien permiten paliar la insuficiencia de radio de acción, no permiten compensar la insuficiencia de abertura de las fisuras debido a las presiones demasiado débiles. Se tiene aquí la razón por la cual no se saben inyectar correctamente las capas superficiales con morteros inestables. Solamente los morteros expansivos pueden mejorar la situación.

Para una consolidación, después de haber obtenido una presión cercana a la presión de rechazo, con un mortero de dosificación normal, por ejemplo, 1/4 ó 1/2, tiene gran interés terminar la inyección con un mortero de dosificación muy pequeña, 1/8 ó 1/10. Así la abertura residual e_0 es lo más pequeña posible y la descompresión final del macizo, mínima. Esta práctica es recomendada por LUGEON (1933).

Pero este proceso complicado no tiene interés más que si se trabaja cerca de la presión máxima. Si ese no es el caso, es suficiente con aumentar fuertemente la presión de rechazo admitida, para llegar al mismo resultado.

1.1.5 INFLUENCIA DEL DIÁMETRO DE LAS PERFORACIONES EN LA PRESIÓN DE RECHAZO.

Algunas observaciones realizadas en los trabajos indican que con perforaciones de gran diámetro las absorciones de un mortero inestable son más fuertes que con perforaciones de pequeño diámetro. La explicación que de ello se deduce es que el número de fisuras atravesadas por una perforación es proporcional a la superficie periférica.

Esta explicación es manifiestamente errónea. Por el contrario, si esas perforaciones han sido inyectadas con la misma presión de rechazo, cosa que puede ser posible, la presión a la entrada de las fisuras es sensiblemente la misma en los dos casos.

Es suficiente con referirse a la fórmula correspondiente a la circulación de fluidos en una fisura para comprobar que, a una distancia dada del eje de la perforación, la presión durante la inyección en el taladro grande es más fuerte que en la inyección por el pequeño (fig. 3). Es, pues, normal que las absorciones sean más elevadas.

El ensayo ha sido involuntariamente trucado. Para que hubiera sido satisfactorio, habría sido necesario tomar la presión de rechazo en función del diámetro de la perforación.

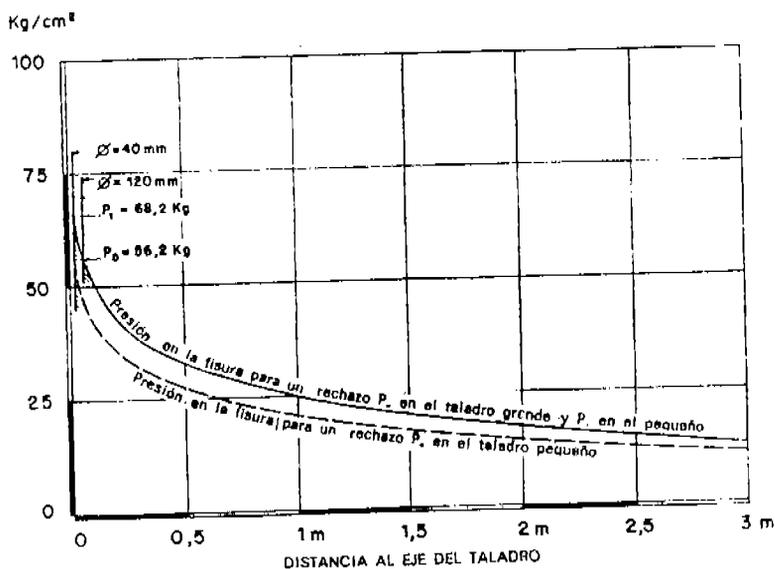


Fig. 3. Influencia del diámetro del taladro en la presión de rechazo de un mortero inestable. P_1 —presión de rechazo de la inyección en el pequeño taladro, dando la misma repartición de presión en una fisura que la inyección bajo la presión P_0 en el taladro grande.

Para precisar este punto, supongamos que en el momento del rechazo el mortero se extiende hasta 10 m de distancia por fisuras parcialmente inyectadas, cuya abertura e_0 en ese preciso momento es solamente de 0,3 mm. Para fijar ideas, el caudal se supondrá igual a 5 cm³/s por fisura, pero en realidad la cantidad que interviene es Q/ne_0^3 , siendo n el número de fisuras y Q el caudal total. Por último, se admitirá que el mortero es una simple suspensión de cemento en el agua con una relación cemento/agua de 0,5. La viscosidad de un fluido de estas características es de unos 3 centipoises, es decir, casi la del agua.

La aplicación de la fórmula precedente muestra que la inyección a partir de una perforación de 40 mm de diámetro da en la fisura la misma repartición de presiones que la debida a la inyección partiendo de una perforación de 120 mm de diámetro, siempre que la presión en la perforación pequeña sea superior en 12 kg/cm² a la existente en la perforación grande (fig. 3).

Esta diferencia de presión de 12 kg/cm² no constituye, naturalmente, más que un orden de magnitud. Es, sin embargo, muy grande y muestra claramente que la sola consideración de las presiones leídas sobre el manómetro colocado en la cabecera de la perforación no puede dar más que ideas erróneas sobre la repartición de las presiones de circulación en el suelo.

Muestra también que una inyección realizada por perforaciones de pequeños diámetros, como debe hacerse siempre para reducir la sedimentación de cemento en la perforación, debe ser efectuada hasta una presión muy superior de la que sería necesaria con perforaciones más grandes. Las absorciones y una eventual desorganización del terreno no aumentarán por ello. Si no habría que proceder a cerrar las perforaciones y la economía y ventajas técnicas debidas a los taladros de pequeño diámetro se perderían.

1.1.6 PRESIÓN DE INYECCIÓN Y DEFORMACIÓN DEL SUELO.

El temor de las altas presiones no está justificado más que cuando son efectuadas en capas próximas a construcciones y también, como lo demostrará el estudio sobre el agrietamiento de los suelos, cuando la inyección se realiza con exceso. Es necesario, entonces, señalar la deformación alcanzada para fijar la presión de inyección en su justo valor. Pero a partir de unos 12 m de profundidad puede utilizarse la presión que se desee. Ésta estará limitada solamente por la calidad del suelo y por la del tratamiento que quiera obtenerse.

He aquí un ejemplo real que demuestra que sin deformación no se puede inyectar correctamente. Durante las inyecciones que se realizaron en un túnel del metropolitano de París, se observó que aumentaba considerablemente la abertura de antiguas fisuras. Para evitar dificultades se instalaron en las principales fisuras contactos que cerraban un circuito eléctrico cuando se producía el ensanchamiento, encendiéndose una lámpara y haciendo sonar una sirena.

Al principio, estos contactos fueron preparados para detectar fisuras del orden de la décima de milímetro, y era imposible inyectar porque la sirena entraba en acción desde el momento en que la bomba de inyección era puesta en marcha. Fue necesario admitir una abertura comprendida entre medio milímetro y 1 mm. para poder realizar el trabajo. Los contactos eléctricos no volvieron a funcionar más que cuando las subidas de presión podían ser peligrosas. Así fue posible realizar la inyección sin que se presentara ningún problema serio.

1.2 AGRIETAMIENTO DEL SUELO POR PRESIÓN DE INYECCIÓN.

La observación de las paredes de una excavación hecha en un suelo inyectado muestra casi siempre en los aluviones la presencia de fisuras inyectadas cuando normalmente ese material no está fisurado y más raramente en macizos, se ven fisuras igualmente rellenas de mortero que no corresponden de una manera manifiesta al sistema de fisuración de la roca (fig. 4).

Se trata de roturas provocadas por la inyección. Todas esas roturas afectan a una o varias perforaciones de inyección. Su radio de acción puede fácilmente alcanzar una docena de metros y algunas veces más. Puede asimilárselas a planos que, según los casos, son verticales, horizontales o inclinados. En determinadas rocas, solamente se inyectan estas roturas al atravesarse fisuras más o menos finas que no son inyectadas (A. FRANCOIS, 1924; H. V ANMASSEN HOVE, 1930).

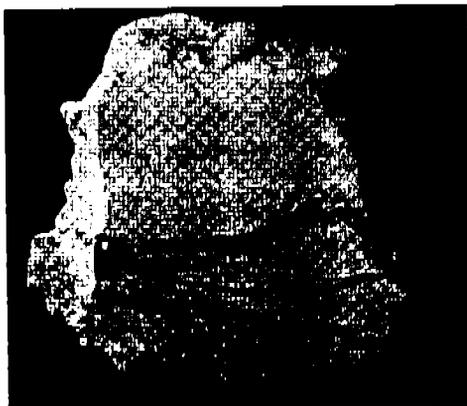


Fig. 4. Bloque de arenisca (agrieta), por la inyección.

Este fenómeno es muy importante porque en muchas ocasiones a él solo se debe la eficacia de una pantalla estanca, sobre todo en aluviones. Como otros muchos fenómenos de la inyección, hace ya tiempo que fue comprobado y utilizado sin que haya podido ser explicado.

1.2.1 ORIENTACIÓN DE LAS GRIETAS.

Fueron M. K. HUBBERT y D. G. WILLIS (1957), quienes haciendo el estudio de la fracturación hidráulica de los pozos de petróleo, han demostrado cómo podían producirse esas roturas.

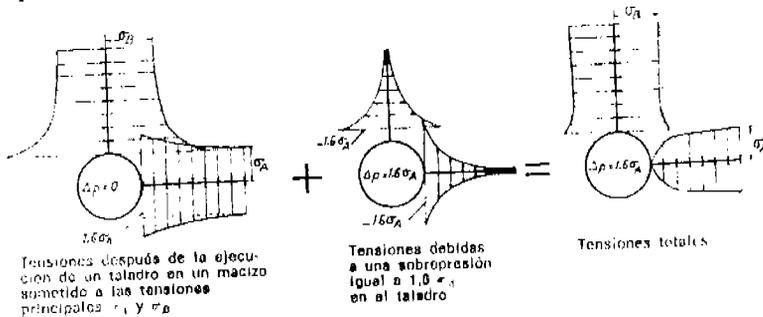


Fig. 5. Tensiones en la proximidad de un taladro.

La observación de los resultados obtenidos en varios campos petrolíferos y la consideración de las tensiones reinantes, sobre las paredes de una perforación, realizado en un macizo sometido a un sistema de tensiones uniformes (fig. 5), han conducido a sus autores a pensar que las roturas se producían siempre perpendicularmente a la menor de las tensiones principales que solicitan al terreno (fig. 6).

Para verificar esta hipótesis, se han confeccionado bloques de gelatina sometidos a diferentes estados tensionales. La inyección de una lechada de yeso por una perforación central ha producido siempre roturas, perpendiculares a la menor de las tensiones principales.

Han llegado incluso a fisurar perpendicularmente a la estratificación de los bloques constituidos por una superposición de capas duras y capas muy blandas de gelatina, cuando podría pensarse que este fenómeno debería únicamente producirse en las capas blandas.

Los ensayos confirman la hipótesis sobre orientación de estas roturas. No parece, pues, que pueda ponerse en duda.

Por otra parte, más adelante veremos el notable ejemplo que constituyen las pantallas de estanqueidad de Bou Hanifia (Argelia), que no pueden ser explicados más que por esta teoría.

Si el fin perseguido es la inyección de las roturas verticales, resulta de ello un aumento de las tensiones horizontales, que solicitan al macizo. Puede suceder que la tensión vertical constante e igual al peso de las tierras se convierta en la tensión mínima. Las grietas que se producen entonces son horizontales y pueden ser peligrosas para las construcciones cimentadas en superficie.

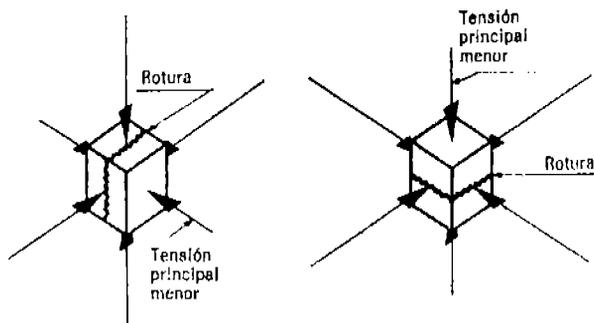


Fig. 6. Orientación de las «roturas», siempre perpendiculares a la tensión principal más pequeña.

Este estudio, además, ha demostrado que al producirse una de estas roturas, la presión no alcanza un máximo para descender luego a un valor constante. Las grietas no se producen únicamente cuando se observa una oscilación en la presión. Por esto es, a menudo, imposible apreciar su aparición.

1.2.2 RECONOCIMIENTOS PARA LOCALIZACIÓN DE ROTURAS Y SUS CONSECUENCIAS.

Las *roturas verticales* que van a parar a la superficie, con o sin resurgencia de mortero, son fácilmente localizables; pero no constituyen la mayor parte de las roturas verticales producidas por la inyección. Las que no se manifiestan de esta forma son inlocalizables si no se realiza una excavación.

De una manera general, esas roturas no son muy peligrosas. Contribuyen a la deformación horizontal del suelo que se observa en la inyección de aluviones con tubos de manguitos. Esos tubos de acero embutidos en el suelo quedan, en efecto, casi siempre torcidos por la inyección.

Cuando esas grietas están repletas de mortero mejoran la calidad de las pantallas en tanto que, evidentemente, no sean perpendiculares al plano medio de éstas. Pero este es un caso particular. La experiencia confirma que su orientación obedece bastante al azar y que participan efectivamente en la estanqueidad buscada, porque se observa siempre que la permeabilidad media de una pantalla estanca es inferior a la permeabilidad media deducida de ensayos locales, incluso muy numerosos. Este fenómeno nos proporciona la solución para resolver la dificultad que se presenta para controlar la eficacia de la inyección de los aluviones.

Las roturas horizontales que se manifiestan tras de las roturas verticales no son, evidentemente, detectables. Para tener idea de su existencia es preciso observar escrupulosamente las variaciones de la presión de inyección.

En efecto, cuando se produce una rotura de este tipo, la presión del mortero de inyección en el suelo no puede ser otra que la debida al peso del terreno a esa altura que es muy pequeña. La observación del manómetro indica entonces un escalón, después de una brusca caída de la presión.

Si se observa, además del escalón citado, un fenómeno de contrapresión, se puede asegurar que se presenta en esa zona una grieta horizontal. Conviene entonces detener la inyección en curso porque, contrariamente a las roturas verticales, las grietas horizontales no pueden aportar mejora alguna al tratamiento. Se trata solamente de una detención local de la inyección, pero nada impide inyectar encima, debajo o en una perforación próxima.

Este estudio es muy teórico porque los golpes de pistón del inyector no son nunca correctamente amortiguados y es muy raro descubrir en el diagrama de presiones una caída brusca seguida de un escalón.

Como esas roturas aparecen al final de los trabajos, cuando las fisuras del terreno comienzan a estar bien cerradas por efecto del mortero, se cree que las elevaciones de la superficie del suelo corresponden a la formación de grietas horizontales. Esta interpretación es en gran parte errónea porque pueden darse levantamientos importantes sin roturas. Así ocurre cuando el mortero llega a impregnar un medio en el que cada grano queda rodeado de una capa más o menos grande. El levantamiento de la superficie es prueba de un buen tratamiento.

No se debe olvidar que las roturas horizontales pueden comportarse como verdaderos gatos de gran superficie. Son muy peligrosas porque, teniendo cuenta su gran extensión, es suficiente una débil presión del mortero para levantar cualquier construcción cimentada encima por pesada que sea.

Tanto si las roturas son *verticales* u *horizontales* su efecto es compactar el terreno e incluso pretensarle. Se trata de un fenómeno extremadamente útil, empleado con frecuencia sin saber *a priori* si sería eficaz.

En los macizos rocosos, las roturas son poco frecuentes y la compresión del medio se realiza sobre todo por aumento de la abertura de las fisuras inyectadas.

Por el contrario, en aluviones, las roturas pueden compactar medios demasiado finos para ser impregnables por el mortero. Esta compactación provoca una disminución del índice de poros de la formación que tiene una doble consecuencia:

a) La permeabilidad puede reducirse considerablemente, aunque el mortero no haya penetrado entre los granos. Para darse cuenta de ello es suficiente con aplicar la fórmula de KOZENY que tiene un factor $n^3/(1-n)^2$. Si n pasa, por ejemplo, de 0,30 a 0,25, el coeficiente de permeabilidad se divide por dos.

b) El ángulo de rozamiento interno aumenta. La fórmula de CAQUOT $\text{tg}\phi = A(1-n)/n$ nos muestra que si el ángulo de rozamiento interno era de 35° con $n = 0,30$, llega a 42° cuando n es igual a $0,25$.

Estas mejoras son muy claras pero no parecen, sin embargo, suficientes para explicar las comprobaciones que pueden hacerse cuando se abre una excavación en suelos de esta forma inyectados. En efecto, se nota una ausencia casi total de agua a través de esos medios. Además, éstos están a veces de tal forma compactados que se mantienen taludes verticales, siendo necesario la utilización de un pico para excavarlos.

Puede pensarse que las roturas que surcan el subsuelo son suficientes para impedir la circulación del agua. Es posible que con determinada granulometría, el aumento del ángulo de rozamiento interno sea mayor que el determinado anteriormente, pero hay que hacer observaciones sistemáticas para poder precisar este punto, porque efectivamente, todas las capas así tratadas no presentan este gran aumento de resistencia.

1.2.3 INYECCIONES SIN ROTURAS.

Al comienzo de una inyección, el mortero impregna los medios muy permeables, pero al cabo de cierto tiempo esta circulación del mortero origina una gran pérdida de carga, bien por su excesiva longitud o por el fraguado del mortero. Permaneciendo casi constante el caudal del inyector, la presión aumenta en el taladro hasta alcanzar el valor necesario para la inyección de las capas menos permeables. Si esta nueva presión es demasiado fuerte, aparecen las roturas.

Es, pues, teóricamente posible realizar inyecciones sin roturas. Es suficiente con utilizar morteros muy fluidos y caudales de inyección muy pequeños para que la presión en la perforación no alcance jamás la presión de rotura.

Se ve que tal modo de operar es imposible cuando el terreno es heterogéneo. No se conoce nunca suficientemente esta heterogeneidad como para fijar con todo conocimiento de causa, la fluidez del mortero, su tiempo de fraguado y el caudal de inyección. Tendremos entonces o absorciones considerables o un tratamiento imperfecto.

Cuando el terreno es homogéneo pueden permitirse semejantes tratamientos, pero solamente en casos muy raros, porque la elección de un caudal de inyección pequeño y morteros fluidos es siempre muy costosa, alcanzando los trabajos tal precio que casi siempre se llega a encontrar una solución ingenieril más encajada.

No hay más remedio, por tanto, que aceptar las roturas. Pueden aceptarse tanto más fácilmente cuanto que la experiencia demuestra que participan efectivamente en el tratamiento. Incluso inyecciones de consolidación realizadas con productos químicos originan frecuentemente roturas.

El único inconveniente es que hacen muy difícil la interpretación de los ensayos de control que hay que hacer en el curso de los trabajos.

1.3 OBSERVACIONES (IN SITU) DE LA INYECCIÓN.

Las observaciones *in situ* se realizan a partir de las excavaciones efectuadas en terrenos inyectados. Esta inyección puede ser, simplemente, la inyección definitiva, a condición de que afecte a un volumen de terreno muy importante, o, por el contrario, una inyección especialmente organizada que permita esta observación. Se suele decir en este último caso que se trata de «ensayo a gran escala».

Si tales excavaciones no suelen hacerse más que con relativa frecuencia, aún es menos frecuente emplear tiempo en anotar detalladamente todas las observaciones que permitan éstas, porque se trata de un trabajo extremadamente molesto. Por ello, BERNATZIK, DAXELHOFER, LÉVEQUE, OTT Y ROSET han consignado los fenómenos que son objeto de los ejemplos siguientes.

1.3.1 INYECCIÓN DE ROCAS FISURADAS.

La realización siempre muy costosa, de pozos o galerías para observar el resultado de la inyección de rocas fisuradas es poco frecuente en el momento actual. Se trata en efecto, de inyecciones fáciles de realizar, ya sancionadas por la práctica de mucho tiempo. Por ello no vemos la necesidad de comprobar los resultados con nuestros propios ojos.

Los tres primeros ejemplos que siguen son sin embargo, relativamente recientes. Se refieren a ensayos en gran escala destinados los dos primeros a estudiar las posibilidades de consolidación por inyección de las rocas más o menos alteradas del emplazamiento de la futura presa de Ait Chouarhit (Marruecos), y el tercero a determinar, sobre otro emplazamiento de presa (Oum er-R'bia, Marruecos), el mortero de inyección más idóneo.

Estas investigaciones no nos interesan aquí, pero las observaciones a que dieron lugar son muy importantes permitiendo comprender mejor el proceso de inyección. Estos ensayos fueron realizados en Marruecos por P. LÉVEQUE (1954-1957).

El cuarto ejemplo que presentamos tiene mucho más tiempo (1938), y se refiere al control de una pantalla de estanqueidad realizada en la presa de Bou-Hanifia (Argelia) por la Sociedad S. E. C. (SOLÉTANCHE).

Primer ejemplo.

A partir de una galería situada a unos 5 m de profundidad se procedió a inyectar por medio de taladros cortos, pudiendo verse en la (figura 7), la situación de los mismos y su disposición.

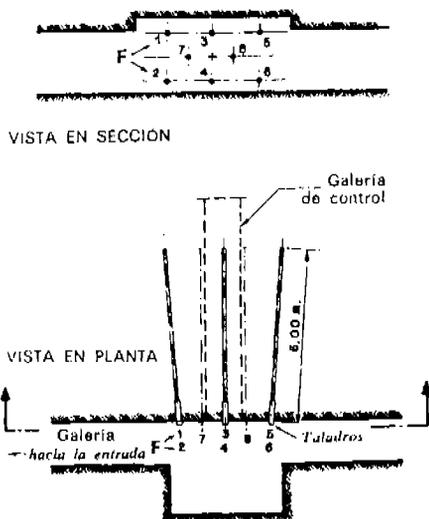


Fig. 7. Plan de ensayo efectuado a partir de una galería.

El macizo rocoso está constituido por areniscas arcósicas, microareniscas arcósicas y microarcosas, susceptibles de una alteración, más o menos pronunciada, con el aire.

La inyección fue realizada por tramos de 1,5 a 2 m de longitud con contrapresiones de rechazo de 15 kg/cm^2 . La cantidad máxima de cemento inyectado deducidas las pérdidas, ha sido de 1,53 toneladas por metro de perforación en el F-1 entre los 3 a 4,5 m de profundidad y las absorciones medias algo inferiores a 500 kg/m . Son unas absorciones enormes que no pueden explicarse más que por lo aislado del ensayo. La lechada de inyección pudo fácilmente alejarse. Esas pérdidas tan alejadas son mucho menos importantes en la ejecución de una pantalla continua.

La galería de reconocimiento excavada después de la inyección ha permitido hacer las siguientes observaciones:

a) El cemento se encuentra en fisuras sensiblemente verticales. Los planos de estratificación subhorizontales prácticamente no quedan inyectados. Todo esto es normal considerando que la construcción de la galería inicial impide el aumento de tensiones perpendiculares a su pared. Es una confirmación directa de la teoría sobre las roturas.

b) En la fisura que termina en un taladro, la granulometría del cemento depositado es sensiblemente constante, en 25 a 40 cm; después se va haciendo más fina, con el correspondiente estrechamiento de la fisura para terminar siendo un depósito incoherente. Se trata más bien de un proceso hidráulico de sedimentación, con depósito de elementos gruesos en la proximidad de la perforación, que de un relleno por inyección de la parte posterior de esos elementos. Sin embargo:

c) Algunas fisuras están tapizadas de un depósito incoherente dejando un hueco entre las dos paredes. En algunos puntos, los granos de cemento las unen. Son obstrucciones que de haber proseguido la inyección, habrían sido impulsadas hacia delante.

d) Igualmente a 1,50 m aproximadamente del extremo del F-8 existe una fisura vacía de unos 2 m de anchura a unos 30 cm de otra perfectamente obturada. Las dos fisuras están en planos sensiblemente paralelos. La inyección no es eficaz más que si las perforaciones atraviesan las fisuras que se quieren inyectar. De aquí el interés de un estudio geológico previo.

Segundo ejemplo.

No habiéndose conseguido los resultados que se esperaban con el ensayo precedente, se organizó un segundo ensayo en las proximidades.

Se trataba esta vez de inyecciones verticales de unos 7 m de longitud ejecutadas a partir de una pequeña trinchera poco profunda y de unos 10 m de larga (figs. 8 y 9).

Los taladros fueron inyectados de arriba abajo por tramos de 2 m de longitud. Sin embargo, el primer tramo no fue nada más que de 1,50 m a consecuencia de la existencia de un tubo metálico empotrado en los primeros 0,50 m de la perforación.

En este primer tramo se inyectaron inicialmente entre 4 y 10 kg/cm², cuatro taladros; a 15 kg/cm², dos y a 25 kg/cm², otros cuatro taladros.

En los otros tramos, la contrapresión de rechazo fue de 100 a 110 kg/cm². Las resurgencias en superficie fueron fácilmente detenidas, interrumpiendo la inyección durante el tiempo preciso para el fraguado del cemento.

Después de esta primera inyección se inyectaron los taladros en toda su longitud fijando el conducto de inyección sobre el tubo empotrado en el terreno.

La presión fue llevada entonces sistemáticamente hasta 82 kg/cm². Las absorciones fueron grandes pero no excesivas (fig. 9).

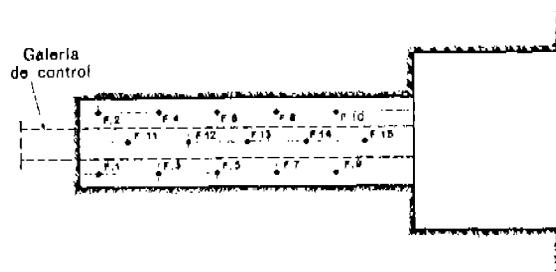


Fig. 8. Implantación de taladros en un plan de ensayo, ejecutados a partir de una trinchera.

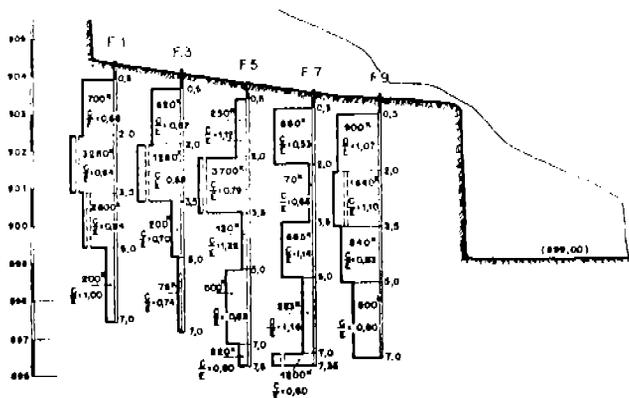


Fig. 9. Absorción de cemento de una línea de taladros. La absorción de las otras líneas es análoga.

Es de hacer notar que en estos ensayos la presión de inyección es extremadamente elevada en las proximidades de la superficie, siendo la estratificación de la roca sensiblemente horizontal. Ello proviene que el cemento se ha repartido, una vez más, entre los planos verticales. Conocidas la disposición geográfica del ensayo y la teoría de las *roturas*, no podría ser de otro modo.

La galería de reconocimiento que ha permitido esta observación nos muestra además:

- 1.- Que incluso las fisuras de 0.5 mm de espesor estaban llenas de un cemento compacto que rayaba el cristal.
- 2.- Que no se han encontrado depósitos incoherentes como en el primer ensayo. El cemento estaba perfectamente adherido por todas partes a las paredes de las fisuras y sus diferentes fracciones granulométricas no se diferenciaban. Vemos así el interés de las altas presiones de inyección.
- 3.- Que en el terreno no inyectado directamente se encuentran todavía fisuras abiertas sin aspecto alguno de haber circulado mortero o agua por ellas.

Tercer ejemplo.

Este ejemplo es tan interesante como los precedentes. El objeto de este ensayo es determinar el mortero de inyección más apta para impermeabilizar una serie de lentejones de arenas limosas y conglomerados cuarcitosos o areniscosos superpuestos.

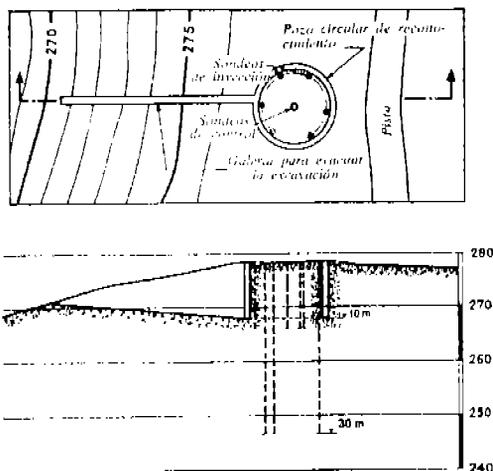


Fig. 10. Plan de ensayo realizado a partir de la superficie en arenas limosas y conglomerados.

Haremos abstracción de esta finalidad para ceñimos exclusivamente a las observaciones hechas en el transcurso y después de la inyección. Se realizaron seis perforaciones de 30 y 12 m de profundidad a partir de la superficie sensiblemente horizontal. Estas perforaciones se situaron sobre una circunferencia de 11,50 m de diámetro (fig. 10). Fueron inyectadas por tramos descendentes de 2 m de longitud con diferentes morteros coloreados estables e inestables.

En las dos primeras perforaciones que estaban provistas de un tubo incrustado a lo largo de sus primeros 60 cm., las contrapresiones de rechazo fueron sensiblemente proporcionales al espesor de los terrenos subyacentes, a partir del segundo tramo, siendo muy fuerte el coeficiente de proporcionalidad (cuadro 1).

CUADRO 1

Tramo, m	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	16-18	18-20
Presión de rechazo, kg/cm ²	4	20	28	34 (máx. 65)	22	75 (ensayo)	60	90

Si se piensa que no estamos en presencia de una roca en el propio sentido de la palabra, es notable comprobar cómo han podido ser útilmente ejercidas presiones tan elevadas.

La máxima absorción de cemento ha alcanzado 1,150 t/m entre 18 y 20 m de profundidad. Sin embargo, es P. LÉVEQUE quien tiene la palabra:

Conviene hacer notar que la mayor cantidad de absorción tuvo lugar a presiones relativamente débiles, inferiores en general a 10 ó 15 kg/cm² para las capas más profundas. Sin embargo, a título de ensayo, se decidió proseguir la inyección para ciertas capas, aunque el manómetro indicara presiones del orden de 30 a 40 kg/cm². En estos casos, cuando no existe un levantamiento del terreno, como generalmente sucede, el porcentaje de absorción logrado por encima de esas presiones y hasta una contrapresión de rechazo de 80 a 90 kg/cm² es con frecuencia inferior al porcentaje absorbido por debajo de los 30-40 kg/cm².

Esta observación es muy interesante porque muestra que las fuertes presiones en inyección, indispensables para un buen tratamiento, no provocan necesariamente absorciones ilimitadas.

Después de esta inyección se hizo una perforación central de control en la que se inyectaron agua pura y mortero. Además, una zanja circular de unos 12 m de profundidad permitió observar los resultados siguientes:

a) El terreno es inyectado según los planos de separación de las masas lenticulares de arena limosa y conglomerados. Estos planos son paralelos al buzamiento general. Pero existen otros lugares de penetración, perpendiculares al buzamiento, que están en contacto con grandes bloques de cuarcita. Esta clase de grietas es totalmente análoga a la que encontramos en suelos incoherentes. Los cantos muy gruesos facilitan los agrietamientos.

b) Durante la inyección del taladro central de control se comprobó que el agua seguía regularmente los caminos ya inyectados; además gracias a las diferentes clases de mortero utilizado, se pudo observar que las grietas aumentan en cada inyección aunque provenga de una perforación relativamente alejada. Tenemos la confirmación del hecho en el gran ensanchamiento de las fisuras por efecto de la presión. Estas múltiples grietas pueden acabar por subdividirse en casi tantas como fases de inyección existan.

c) El espesor de una fisura inyectada es máximo en la proximidad de un taladro. Disminuye a medida que se aleja. Esto demuestra que la presión en la fisura que se está inyectando disminuye rápidamente con la distancia a la perforación.

d) En los morteros bentonita-cemento, la bentonita se separa con mucha frecuencia del cemento. Con los morteros arcilla-cemento esta separación es, por el contrario, poco frecuente.

En los depósitos de cemento se observa una distribución heterogénea del colorante. Como éste es adsorbido por los granos finos del cemento con más facilidad que por los gruesos, se vuelve a hallar una distribución granulométrica del cemento, análoga a la del primer ejemplo; es decir, granos gruesos en las proximidades del taladro; después, granos cada vez más finos a medida que se aleja.

Cierto tiempo después de la apertura de la zanja se fisuraron numerosos morteros de inyección. Es un fenómeno totalmente normal. Por el contrario, son excepcionales los morteros que en esas condiciones no se fisuran. Puede afirmarse que si esta condición de fisuración hubiera sido determinante en la elección de un mortero, no se hubiera realizado ninguna inyección de suelos.

Cuarto ejemplo.

Este último ejemplo no se refiere a un ensayo en gran escala sino a la observación de la pantalla realizada a lo ancho de la margen izquierda de la presa de Bou-Hanifia examen realizado por los señores BERNATZIK y J. P. DAXELHOFER.

Esta pantalla vertical fue ejecutada a partir de dos galerías de trabajo, dispuestas una sobre otra, en las cotas 300 y 255 aproximadamente. Además, se encuentra situada en la parte superior del macizo que forma el apoyo de la margen izquierda (fig. 11). Esta disposición, debida en gran parte al azar, es muy importante para explicar el resultado de las inyecciones.

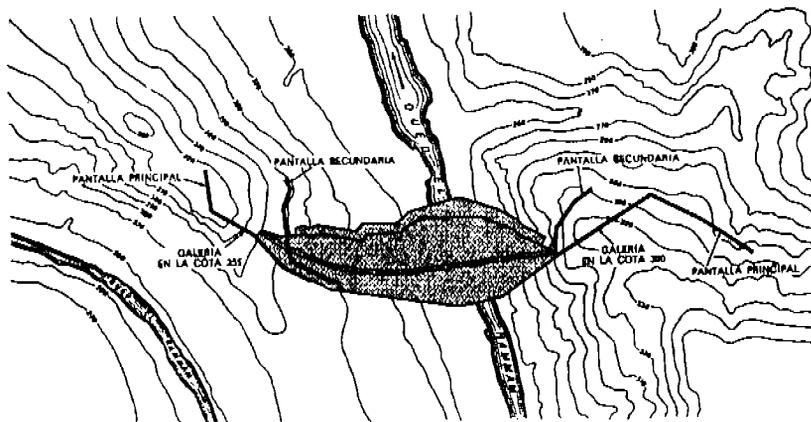


Fig. 11. Plano de situación de las principales pantallas.

En la margen derecha, donde la pantalla es perpendicular al talud de la montaña, los resultados fueron totalmente diferentes, como ya veremos.

Las inyecciones se han hecho con gel de sílice y cemento en un complejo margareniscoso. Las perforaciones tenían una separación de, 2,50 m y los tramos

de inyección de 3 a 4 m de longitud. Se inyectaron simultáneamente varios taladros, próximos entre sí. Con el fin de examinar los resultados obtenidos en un medio particularmente arenoso, se comunicaron por un pozo las dos galerías. El emplazamiento del pozo se situó entre dos perforaciones, de tal suerte que pudo observarse en toda su altura.

Así fue posible extraer testigos de cemento y estudiados según el método puesto al día por BERNATZIK (fig. 12), pero no tuvo gran interés.

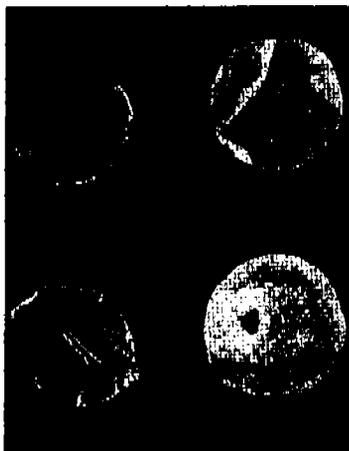


Fig. 12. Bou-Hanifa. - Secciones rectas de testigos extraídos en las perforaciones.

Lo más interesante fueron las observaciones hechas en las paredes de los pozos. Pudo observarse aquí que la inyección ha agrietado el terreno según planos verticales situados en el plano de la pantalla (fig. 13). Estas grietas son extremadamente numerosas y de más o menos longitud. Algunas son relativamente anchas y otras ramificadas (fig. 14).

Aunque las capas sean arenosas, areniscosas o margosas, son atravesadas por las mismas grietas, que se propagan sin ninguna discontinuidad. Se trata pues, de fracturas y no de finas fisuras del terreno ensanchadas por la inyección.

Por otra parte, su distribución, así como el aspecto tortuoso de alguna de ellas, anulan esta hipótesis.

Se concibe que, a pesar de existir tantas fisuras naturales no inyectadas, se haya podido realizar una pantalla de estanqueidad con esa cantidad de inyecciones de cemento. Sin embargo, esta estanqueidad no puede ser perfecta. El agua puede contornear con más o menos facilidad todas esas pequeñas pantallas parciales.

Así se comprende cómo los ensayos realizados en perforaciones de control no indicaron más que una débil reducción de permeabilidad e incluso ninguna.

El control de la pantalla de la margen derecha, perpendicular a los flancos del valle y ejecutada en las mismas condiciones que la precedente, nos ha mostrado, al contrario, que las grietas mucho menos frecuentes tenían una dirección de tendencia perpendicular al plano de la pantalla; es decir, paralela al río y además perpendicular a las tensiones más pequeñas. Ciertamente, no puede encontrarse una confirmación más clara de la teoría de roturas.

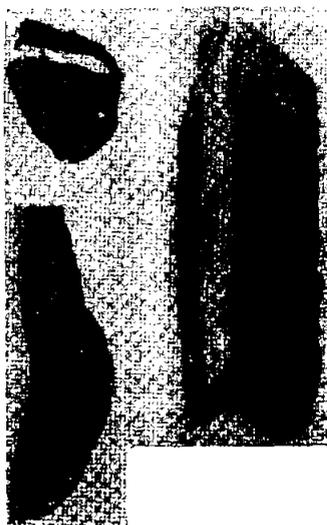


Fig. 14. Bou-Hanifia. —Algunos ejemplos de fisuraciones.

1.3.2 INYECCIÓN DE ARENAS Y GRAVAS.

Entre las numerosas observaciones que se han hecho en aluviones inyectados, recordamos las de Lac Noir que fueron las más instructivas, porque no quedó toda la masa embebida del mortero de inyección. Estas observaciones fueron realizadas por F. ROSSET.

Después de finalizar las inyecciones de cemento y gel de margas, se construyó un pozo de 2 X 2 m de sección, con una profundidad de unos 5 m en un extremo de la pantalla, en la margen izquierda. Se dedujo de esto que la zona reconocida no estaba interesada más que por un número reducido de taladros. Éstos, de unos 10 m de profundidad, estaban separados entre sí unos 2 m.

El aspecto de las paredes del pozo, fue observado detalladamente. La (figura 15), nos muestra su desarrollo. Se observa que tres de las perforaciones se hallan en tres ángulos del pozo, situándose el cuarto ángulo en la mitad de la distancia de dos perforaciones.

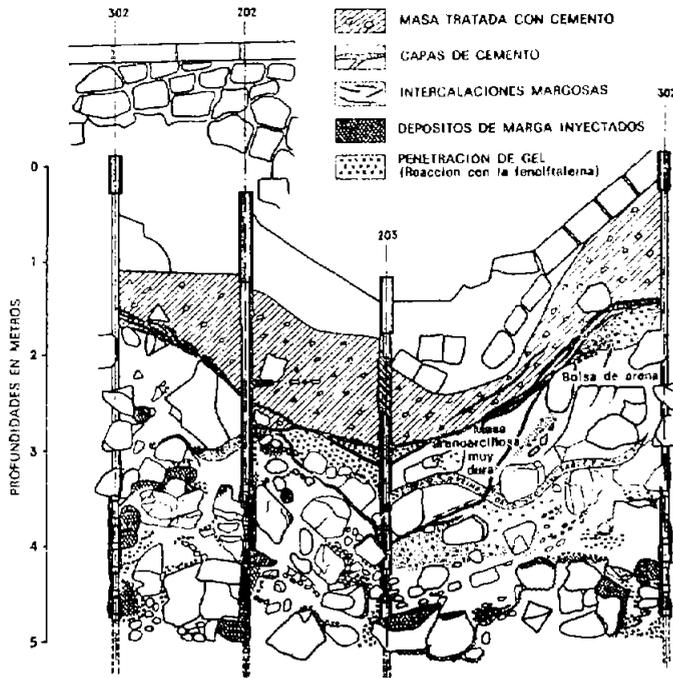


Fig. 15. Desarrollo de las paredes del pozo de control de Lac Noir.

En la parte superior pueden observarse gravas de estructura abierta, perfectamente inyectadas de cemento. Este medio, es casi comparable a un concreto.

Pero las formaciones son demasiado, arenosas para que por debajo, haya podido hacerse una impregnación de cemento. Por el contrario, pueden observarse numerosos agrietamientos sensiblemente paralelos a la superficie. Su espesor varía de 0,5 a 3 cm. Según las zonas, la vena de cemento se divide en tres o cuatro capas superpuestas, separadas por arena no inyectada.

La arcilla margosa está repartida de manera análoga. Varias bolsadas están perfectamente impregnadas. Algunas son fácilmente observables, mientras que otras no pudieron ser detectadas más que después de una reacción de fenoltaleína.

Por última, hay roturas de gel puro. También son paralelas a la superficie. En general están adheridas a piedras grandes. A veces las rodean completamente.

Puede observarse a la derecha de la figura y hacia abajo, una zona fisurada constituida por una vena de cemento en contacto inmediato, con dos venas de gel. Este fenómeno, muy frecuente en esta parte del pozo, nos muestra que cuando se ha producido una grieta del tipo que nos ocupa, tiende a abrirse de nuevo y esto

sucede cualquiera que sea el mortero utilizado. El mortero inyectado en segundo, término, puede encontrarse, como en este caso, en los dos lados de la primera grieta, aunque esté rellena de gel puro, inyectado antes que el cemento. Pero, puede concentrarse en un solo lado. De esto, veremos otro ejemplo.

Esta yuxtaposición de fisuras puede limitarse a la proximidad del taladro, siguiendo cada una de los morteros de inyección un camino, diferente cuando, estén más alejados, pero también puede conservarse en la totalidad de su superficie.

Este ejemplo, muestra claramente los diferentes procesos de la inyección en aluviones. Y no, debemos olvidar que existen zonas en las que el mortero, no ha penetrado. A pesar de ello, el conjunto de la pantalla se ha comportado y se comporta perfectamente.

Aunque esto sea una anticipación del control de las inyecciones, atraemos la atención sobre la presencia en una pantalla estanca de zonas no inyectadas, simplemente cerradas por efecto, de la presión.

Un ensaye puntual de agua, realizado en una de esas zonas, nos dará un resultado muy desfavorable mientras que será bueno en una zona impregnada. Se concibe fácilmente que la media de todos estos ensayos, no tenga nada que ver con la permeabilidad de la pantalla considerada, en su conjunto.

Si, por ejemplo, fracturas verticales que siempre existen, aunque no hayan sido anotadas en las observaciones, se comunican de un taladro a otro, se puede lograr una excelente estanqueidad de la pantalla y ensayos de agua muy malos.

En casas así no valen para nada tales controles, como veremos más adelante.

1.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS MEDIOS INYECTADOS

Una inyección, incluso bien ejecutada, sólo puede ser satisfactoria si, después del fraguado del mortero, se logra el fin perseguido. Dicho de otro modo, una consolidación debe mejorar la resistencia mecánica del medio, y la estanqueidad, su permeabilidad. Intuitivamente, estamos inclinados a pensar que para consolidar es preciso un mortero de una gran resistencia mecánica y para impermeabilizar, un mortero que tenga la menor permeabilidad posible.

La realidad es mucho más compleja. Se puede, en efecto, consolidar ciertas rocas fisuradas con morteros que sólo presenten una cohesión débil y el empleo de un mortero exclusivamente estanco no sirve de nada si la presión del agua le empuja y le desborda. Para una estanqueidad es preciso que la débil permeabilidad del mortero esté asociada a una rigidez, cuyo valor depende de la contextura del medio y de la carga hidrostática que solicitan la pantalla estanca. Por eso, los morteros exclusivamente viscosos como los betunes puros no deben ser utilizados

para impermeabilizaciones definitivas. Después de la inyección, su circulación en el subsuelo continúa extremadamente lenta, seguramente por efecto de la gravedad y de la presión del agua.

Los estudios teóricos que permiten resolver estos problemas son escasos y no pueden aplicarse más que a fisuras inyectadas. PRANDTL ha calculado la resistencia a la compresión de una fisura repleta de una materia plástica, y MANDEL la resistencia a los esfuerzos ejercidos según el plano de la fisura; es decir, la resistencia al deslizamiento. Para los aluviones hemos realizado varios ensayos en laboratorio con el fin de precisar las ideas que puedan obtenerse *a priori*.

Por último, las indicaciones suministradas sobre valores de la permeabilidad final de medios inyectados, han sido calculadas a partir de numerosas medidas de caudales de agua, infiltrados a través de obras realizadas únicamente por inyección.

1.4.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UNA FISURA INYECTADA.

PRANDTL ha considerado únicamente el caso de las fisuras rellenas con materiales perfectamente plásticos, cuya resistencia al cizallamiento es constante e igual a C . Su estudio corresponde al caso de una fisura infinitamente larga, de anchura l y de abertura e (fig. 16). La relación que da la presión media p , equilibrada por el relleno, en función de sus características, es:

$$p = C \left(\frac{\pi}{2} + \frac{l}{2e} \right) \dots \dots (\text{ec.2})$$

siendo e notablemente menor que l . Este resultado fue obtenido experimentalmente por TRESCA en 1865.

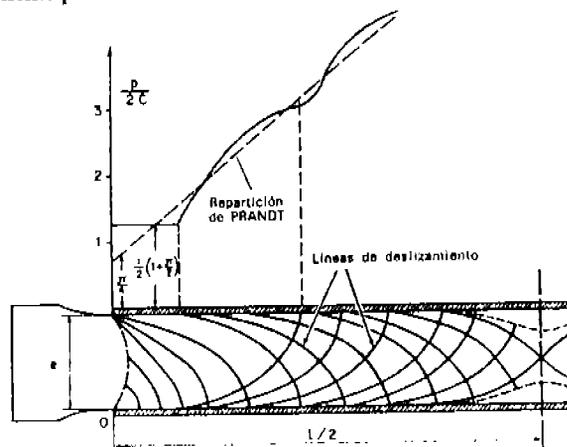


Fig. 16. Repartición de las presiones que provocan la circulación de un cuerpo plástico comprendido entre dos placas paralelas infinitamente largas y de anchura l .

Hagamos una aplicación con $C = 100 \text{ g/cm}^2$ que corresponde a limos poco resistentes. Si $l = 1 \text{ m}$ y $e = 1 \text{ cm}$, resulta $p \# 5 \text{ kg/cm}^2$. Si la anchura de la fisura es de 10 m e iguales los demás valores, $p \# 50 \text{ kg/cm}^2$.¹

No se trata en este caso más que de una aproximación, porque de hecho la repartición teórica de las tensiones sobre la fisura no es uniforme sino triangular. Sin embargo, los esfuerzos resistentes son tan considerables que esta aproximación es ampliamente suficiente. Pone de manifiesto que basta con que una fisura se rellene para que su resistencia a las sobrecargas normalmente aplicadas sea suficiente.

Un mortero de cemento-arcilla que tenga una cohesión de $1 \text{ a } 3 \text{ kg/cm}^2$ como mínimo y siendo el relleno de una anchura superior a 1 m , puede asegurarse que la inyección de tal producto da a las rocas una resistencia más que superabundante.

Una consecuencia de este resultado es que es inútil querer limpiar una fisura para sustituir su relleno arcilloso por otro producto mejor. Esta consecuencia es importante en extremo porque la experiencia demuestra que no se llega jamás a lograr tal limpieza cualquiera que sea el procedimiento empleado: circulación de agua o aire a presión, o los dos a la vez. La imposibilidad de hacer desprenderse la arcilla de las fisuras no presenta ningún inconveniente para la resistencia del conjunto. Se puede incluso afirmar que si las fisuras y diaclasas están bien inyectadas no se produce ningún asiento de la arcilla por expulsión de agua intersticial alrededor de la fisura. Aunque el relleno sea de cierta potencia, este asiento es inapreciable.

1.4.2 RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE UNA FISURA INYECTADA.

La ejecución de una pantalla de estanqueidad tiene por objeto mantener un nivel agua arriba, a una cota superior al nivel agua abajo. El relleno de las fisuras, cemento o arcilla, está entonces sometido a una presión que tiende a hacerle deslizar hacia agua abajo.

El estudio de este fenómeno fue realizado por MANDEL (1943), quien estableció dos hipótesis: relleno coherente dotado o no de rozamiento interno (fig. 17).

Si el relleno es únicamente coherente tendremos con las notaciones de la figura:

$$q = \frac{Q}{e} = 2C \frac{x}{e} \dots \dots (\text{ec. } 3)$$

¹ Se debe destacar, aunque se expresa en el texto anteriormente, que se trata de fisuras infinitamente largas y la anchura l de la fisura se refiere a su longitud al estudiar el caso en forma bidimensional. Así, al hablar de la anchura l de la fisura no debe confundirse con su espesor e .

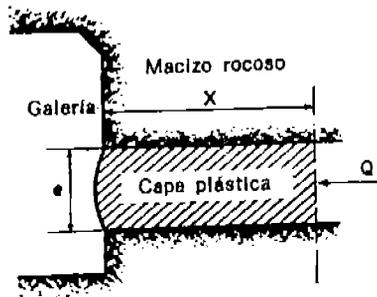


Fig. 17. Deslizamiento de una fisura.

Con el ejemplo precedente $e = 100 \text{ g/cm}^2$, $x = 1 \text{ m}$ y $e = 1 \text{ cm}$; de donde $q = 20 \text{ kg/cm}^2$. Por tanto, si existe un limo de mala calidad relleno una fisura de 1 m de longitud y de 1 cm de abertura, no es expulsado de la fisura más que cuando haya una diferencia de presión de 200 m de agua entre la parte de arriba y la de abajo. Esta resistencia es ampliamente suficiente en la totalidad de los casos reales.

Si además el relleno tiene rozamiento interno, tendremos:

$$q = \frac{Q}{e} = \frac{C}{\text{tg} \varphi} (e^{Kx/e} - 1) \dots\dots (\text{ec. 4})$$

$$\text{con } K = 2\text{tg}^2 \varphi (\cot g \varphi + \varphi + \frac{\pi}{2}) \dots\dots (\text{ec. 5})$$

Esta función crece muy rápidamente. Si suponemos en el caso precedente que $C = 0,1 \text{ kg/cm}^2$ y $\varphi = 1^\circ$, tendremos que $q = 200 \text{ kg/cm}^2$ aproximadamente.

Estos resultados, que, naturalmente, no expresan más que órdenes de magnitud, muestran que se puede conservar sin ningún riesgo el relleno natural de las fisuras, o que es suficiente, cuando tienen huecos, introducir un producto cualquiera para obtener buen resultado.

1.4.3 RESISTENCIA A LA ROTURA DE LOS ALUVIONES INYECTADOS.

Una inyección en arenas y gravas que no dé lugar más que a una penetración de mortero, rellena los huecos intersticiales pero conserva el contacto intergranular. Como el mortero posee una determinada cohesión, su inyección tiene por objeto reemplazar un suelo incoherente por un suelo que tenga a la vez una cohesión y un ángulo de rozamiento interno. Este es el mismo que antes de la inyección y la cohesión es la del mortero. Este resultado lógico es confirmado por ensayos triaxiales efectuados en laboratorio.²

² Hemos podido confirmar este resultado en ensayos de corte *in situ* realizados en fisuras limpias antes y después de inyectarse.

Si se supone, aunque sea inverosímil, que la inyección ha sido hecha exhaustivamente, todos los granos del terreno estarán rodeados de un gran espesor de mortero. Entonces habremos sustituido un suelo incoherente por un suelo coherente. Según sean los valores del ángulo de rozamiento inicial y de la cohesión final, el resultado puede ser favorable o no serio. Se trata aquí de un caso límite, porque una inyección no puede físicamente lograrse tan perfectamente como para poder obtener tal resultado. Antes rompería el mortero.

Por el contrario, son posibles los estados intermedios. Los granos del terreno quedan entonces recubiertos por una película más o menos gruesa de mortero, que no modifica prácticamente su posición relativa. Los ensayos en laboratorio muestran que en esta fase de inyección puede admitirse en primera aproximación la proporcionalidad entre ángulo de rozamiento interno y densidad después de la inyección (fig. 18), disminuyendo esos dos valores cuando la inyección va más allá del relleno de los huecos iniciales.

Este aspecto del problema corresponde al caso en que el mortero constituye un simple relleno de los huecos intersticiales del suelo. Probablemente sea este el caso general de los morteros de cemento-arcilla.

Pero puede concebirse perfectamente que una afinidad química entre el mortero y los granos del terreno transforme un medio incoherente en un medio «continuo».

El nuevo sólido así obtenido tendría entonces características mecánicas sin relación directa con las del medio inyectado y con las del mortero.

Un fenómeno de tales características parece producirse, en particular, más o menos claramente, en la inyección de arenas finas, en general silíceas, *con morteros a base de silicato de sodio*. Mientras que esos morteros dan geles líquidos de gran viscosidad, la arena inyectada con ellos no presenta ninguna fluidez y da resistencias a la rotura claramente superiores a las obtenidas por inyección rápida de gel puro.

C. CARON (1964), ha demostrado que con esos geles la resistencia a la rotura era una función lineal de la raíz cuadrada de la superficie específica de la arena (fig. 19). Son, pues, las arenas finas las que se consolidan más fácilmente.

Sin embargo, es preciso ser prudente en el empleo de geles, obtenidos a partir de productos diluidos con el fin de disminuir su precio o aumentar su penetrabilidad. Estos geles pueden presentar sinéresis en estado puro. Lo mismo sucede con suelos de granulometría gruesa, pero en las arenas finas ese fenómeno no se produce.

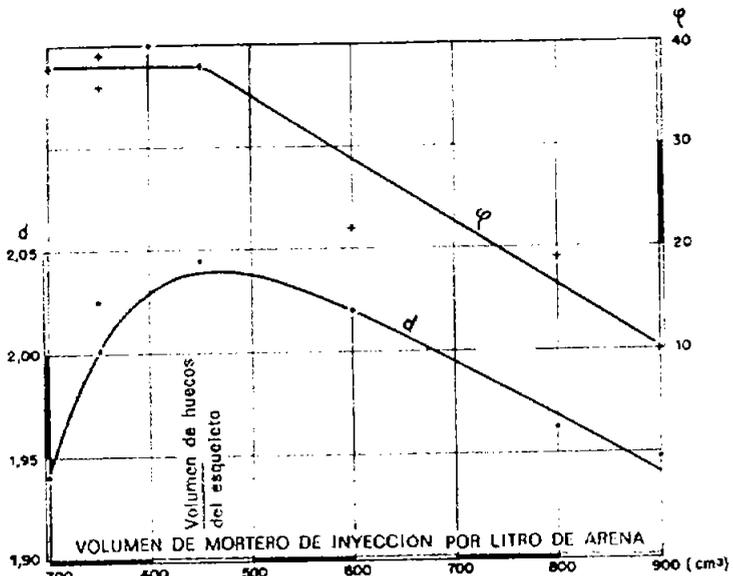


Fig. 18. Influencia del porcentaje de mortero de inyección en la densidad y ángulo de rozamiento interno de un medio inyectado. Este ángulo no varía en tanto que el volumen del mortero no exceda al volumen de huecos del (esqueleto).

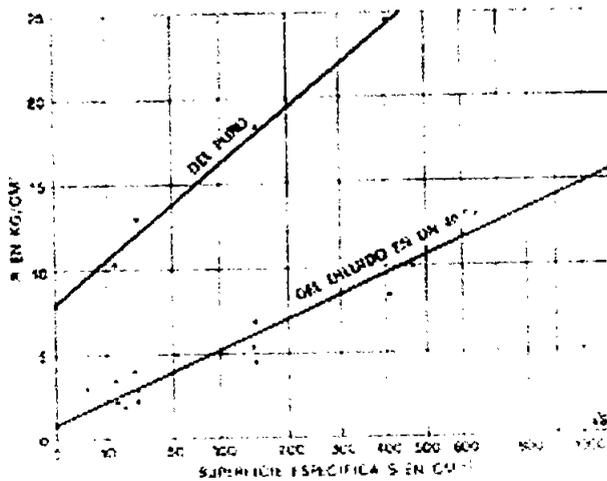


Fig. 19. Resistencia a rotura de las mezclas arena-gel de silicato en función de la superficie específica del terreno.

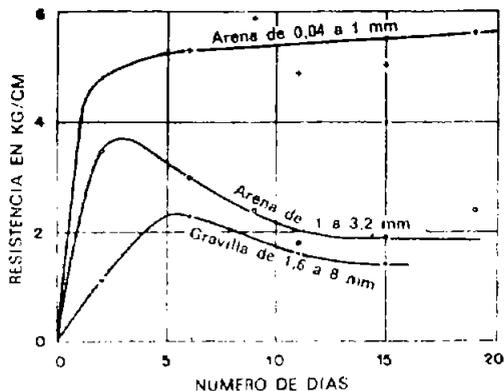


Fig. 20. Influencia de la sinéresis de un gel de silicato de sodio, diluido en un 20 % en la resistencia a la rotura de diferentes arenas inyectadas.

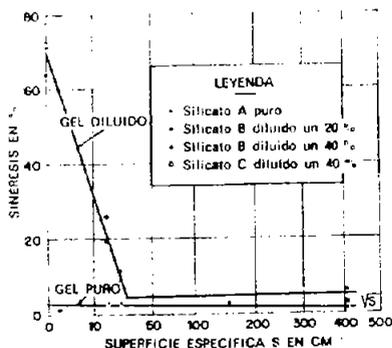


Fig. 21. Influencia de la superficie específica del medio inyectado en la importancia de la sinéresis.

Para demostrarlo, C. CARON rompió probetas de arena, con inyecciones centrífugas a pequeña velocidad, con objeto de poder conocer el valor de la sinéresis (fig. 20). Solamente con arenas de 0,04 a 1 mm se conservan las resistencias; con las arenas de 1-3,2 mm y la gravilla de 1,6-8 mm, las resistencias alcanzan un máximo; después se estabilizan al cabo de 15 días. Puede considerarse que la sinéresis en este momento no existe, al menos para estos ensayos.

Observándose los porcentajes de líquido eliminado al cabo de 15 días por sinéresis en función de la superficie específica de las arenas inyectadas, se comprueba que la sinéresis no tiene un valor aceptable más que para arenas cuya superficie específica sea superior a 30 ó 40 cm^{-1} (fig. 21).

Muestran estos resultados hasta qué punto es delicado elegir un simple gel de silicato de sodio para lograr una pretendida economía. Asimismo influyen hasta en la forma en que ha de organizarse la inyección, porque son poco frecuentes los casos en que el subsuelo tiene una arena de granulometría uniforme. Tienen que ser empleados varios morteros y el orden de su inyección no puede ser cualquiera.

Con las *resinas orgánicas* se comprueban fenómenos análogos. Han sido mucho menos estudiadas, pero algunos ensayos de rotura efectuados sobre mortero de arena-resorcina-formol, dan las resistencias siguientes (cuadro 2):

CUADRO 2

Naturaleza de las arenas	Sena más Fontainebleau	Sena	Arenas arcillosas	Sena	Fontainebleau	Gravilla
Dimensiones externas aproximadas en mm	0,1-1	0,2-1	0,001-0,2	0,2-10	0,10-0,14	2-5
R en kg/cm ²	8,5	7	3,5	3	2,5	1,8

Todos estos morteros tenían sensiblemente la misma compacidad y la resina era la misma desempeñando el papel de aglomerante (resistencia a la rotura aproximadamente 1,5 kg/cm²).

Estas resistencias tan variables hacen resaltar la clara influencia de la extensión de la granulometría y el tamaño medio de los granos.

También puede tener influencia la naturaleza química del (esqueleto). Para que ésta aparezca, se realizó un mortero de arena de barita cuya granulometría era análoga a la arena del Sena, 0,2-1 mm. Esta nueva muestra tuvo una resistencia de 10,8 kg/cm² en lugar de los 7 kg/cm² obtenidos con la arena del Sena.

Un ejemplo más claro nos lo ofrece el Polytixon 35 FM que es un aminoplasta catalizado en un medio ácido. La resina pura tiene una resistencia de 50 kg/cm². Mezclada con una arena silícea, su resistencia es de 60 kg/cm², pero con una arena caliza no es más que de 7 kg/cm². Esta misma resina diluida en su volumen de agua tiene una resistencia que desciende a 7 kg/cm².

Mezclada con arena silícea, su resistencia es de 30 kg/cm², mientras que con arena caliza es de 7 kg/cm².

Resulta, pues, evidente que la naturaleza química de los granos, su dimensión media, la extensión de su granulometría y probablemente su forma tienen una gran influencia en la resistencia a la rotura de las arenas inyectadas con ciertos morteros. No se puede establecer ninguna ley con carácter general, pero como puede verse es suficiente hacer varios ensayos a rotura sobre un mortero con arena, antes de ser inyectado, para conocer la resistencia del producto final.

Esta afinidad entre los granos del «esqueleto» y el mortero es algo análoga a la que se observa en los hormigones que no contienen más que aglomerantes calizos.

1.4.4 RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE LOS ALUVIONES INYECTADOS.

Esta resistencia al deslizamiento puede ser calculada adaptando el razonamiento empleado en el caso de una fisura de un cuerpo exclusivamente coherente.

Sea n el índice de huecos de los aluviones y S su superficie específica. Ésta es igual a $6/d$ para granos esféricos de diámetro d . Si l es la longitud de la muestra, s su sección y C la cohesión entre el mortero y los granos, la presión de deslizamiento P vendrá dada por:

$$sP = s l S (1-n) C \dots (\text{ec. 6})$$

de donde:

$$P = (1-n) l S C \dots (\text{ec. 7})$$

Se ha podido comprobar fácilmente esta relación, con la realización de 40 ensayos, en los que se medía la presión de deslizamiento de un mortero de rigidez conocida C , inyectado en bolas de vidrio. En la (fig. 22), que da esos resultados se comprueba que la relación es satisfecha, a pesar de la gran dispersión de las medidas. Se ha comprobado, además, que el estado de la superficie de los granos no tenía influencia alguna apreciable en los resultados.

A partir de esta fórmula se calcula, por ejemplo, que es preciso una presión de 36 kg/cm^2 para que deslice un mortero de cohesión 100 g/cm^2 , inyectado entre granos de 10 mm de diámetro cuyo apilamiento en 1 mm de longitud tenga un índice de huecos del 40 %. Este resultado es muy tranquilizador porque es muy poco frecuente que se inyecten morteros tan poco resistentes en estructuras tan abiertas.

Estos valores de deslizamiento extremadamente elevados, incluso cuando el mortero tiene una débil rigidez, parecen estar en contradicción con la experiencia de los trabajos. En efecto se comprueba con frecuencia que arenas finas inyectadas con morteros apropiados pueden ser arrastradas por pequeños rezumos de agua. Este fenómeno extremadamente molesto e incluso peligroso durante la ejecución de ciertos trabajos se explica por un deslizamiento del mortero. No tiene mayor importancia. Consiste simplemente que el mortero no ha podido impregnar perfectamente el terreno.

Ha quedado interrumpido en los medios muy cerrados, no inyectados y, a la larga, el agua de percolación, termina por arrastrarlo incluso con un caudal débil.

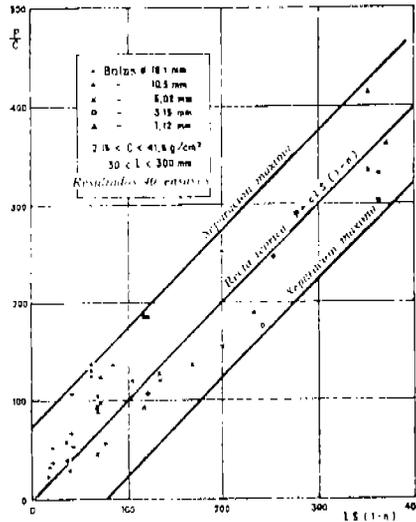


Fig. 22. Presión de deslizamiento P para un mortero de cohesión e en función de la superficie específica S , del índice de huecos n y de la longitud del medio inyectado.

Estamos viendo perfectamente uno de los aspectos más importantes de la inyección, no sospechado por los ingenieros poco familiarizados con estos trabajos. Como consecuencia de la propia naturaleza del suelo no puede hacerse de manera homogénea la inyección de un mortero. Para poderlo hacer es preciso utilizar diferentes clases de mortero, pero aún en ese caso, no es siempre posible, en particular cuando utilizamos arenas finas.

Afortunadamente, la experiencia nos dice que los tratamientos perfectos no son indispensables. Son necesarias algunas precauciones; pero esto no es grave cuando se sabe. La dificultad mayor de estos tratamientos heterogéneos proviene de las dificultades de control tanto para el empresario que desea realizar un buen trabajo, como para el encargado de la obra que quiere asegurarse de que el trabajo es correcto.

1.4.5 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 del fraguado, es muy débil, 10^{-5} unidades Darcy e incluso menos con cemento puro, la estanqueidad es prácticamente absoluta.

Independientemente de la teoría, los ensayos en laboratorio muestran que la realidad es mucho menos satisfactoria. En efecto, arenas cuyos granos están comprendidos entre 3 y 5 mm fueron inyectadas con diferentes morteros. La

inyección no fue posible más que con morteros estables; sin embargo, para estudiar los morteros inestables se ha confeccionado un mortero con esa arena y un mortero de cemento puro de C/A próximo a 2. Mientras que la permeabilidad de los morteros puros estaba comprendida entre 10^{-3} y 10^{-4} unidades Darcy (10^{-8} a 10^{-9} m/s) la de la arena inyectada ha sido mucho más elevada: 10^{-1} a 10^{-2} unidades Darcy.

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 taladros. La permeabilidad final del medio inyectado depende, por tanto, casi exclusivamente, de la proporción de huecos no inyectados. Esta proporción es incommensurable y aunque pudiera medirse, no se deduciría nada. Pero es suficiente que un conjunto de huecos, incluso de gran dimensión, quede rodeado de un cerco estanco, 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, a través de las pantallas inyectadas de dimensiones conocidas, independientemente de las medidas locales que en el transcurso de los trabajos haya sido necesario realizar. Las experiencias nos demuestran, efectivamente, que esas 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. Se trata en este caso de una dificultad de control sobre la cual volveremos a ocuparnos.

Las permeabilidades después de la inyección, indicadas a continuación, son, por lo tanto, valores estadísticos sobre medidas efectuadas en millares de metros cuadrados de pantalla, realizadas en condiciones idénticas. Todo lo que puede esperarse de los nuevos trabajos es que su permeabilidad media sea análoga a la de los antiguos. A menos de adoptar márgenes de seguridad muy grandes, es imposible garantizar una permeabilidad media con precisión. Afortunadamente, esas permeabilidades medias son suficientemente débiles para justificar las inyecciones en numerosos casos.

En un macizo fisurado se llega con bastante facilidad a una permeabilidad final inferior a 0,1 unidades Darcy (10^{-6} m/s). Pero en aluviones, este valor corresponde a un límite inferior, difícil de alcanzar, que no puede sobrepassarse más que en casos particulares: arenas y gravas muy permeables que se dejan impregnar bien o aplicación sistemática de productos químicos.

Por ello, es preferible admitir como permeabilidad media un valor del orden de 0,5 unidades Darcy.

De este valor medio se deduce que los suelos incoherentes que tienen una permeabilidad de 1 unidad Darcy, aproximadamente, son muy difíciles de

inyectar, porque como puede comprenderse fácilmente, aunque generalmente no, se piense en ello, son los terrenos permeables donde el mortero discurre con más facilidad, los más fáciles de impermeabilizar.

Esta dificultad de inyección nos enseña que a medida que la permeabilidad del terreno disminuye, no conviene valorar la calidad del trabajo en razón de las permeabilidades inicial y final. Esta relación es inversamente proporcional a la dificultad, 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.

1.4.6 DESLAVADO DE LOS MORTEROS DE INYECCIÓN.

Desafortunados tratamientos con inyecciones, realizados por empresas de poca solvencia, han desacreditado en cierto modo este sistema. Algunos ingenieros, poco enterados de la importancia de estos trabajos y particularmente timoratos, llegaron a la conclusión de que era necesario evitar las inyecciones en los trabajos definitivos.

Realmente, estos fracasos eran fácilmente previsibles en razón de la misma naturaleza del mortero utilizado. Efectivamente, estos morteros eran betunes o suspensiones de arcilla pura, desprovistos de toda rigidez, geles de silicatos de sodio confeccionados con un reactivo inadecuado que les hacía, efectivamente, deslavables. Eran suficientes unos pocos años, para que la presión del agua les afectara o las circulaciones subterráneas los destruyeran.

La experiencia de estos malos resultados nos demuestra que no basta con saber bombear morteros de inyección para saber inyectar; es preciso saber elegir 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.

Ensayos en laboratorio realizados durante varios meses con medidas muy precisas, permiten prever el comportamiento de un mortero.

Probetas de arena inyectadas, de 40 mm de diámetro y 50 mm de altura, de las que ya hablamos en el apartado precedente, fueron sumergidas en agua destilada constantemente renovada y medidas después las presiones de vez en cuando. Se comprueba que las permeabilidades decrecen durante los 30 ó 40 primeros días de inmersión, estabilizándose a continuación y creciendo después nuevamente (fig. 23). Se creará que, al principio, la dureza del cemento tendrá un efecto más pronunciado que el tratamiento con agua destilada. A continuación veremos lo contrario. Este ensayo es extremadamente severo porque el agua destilada no es frecuente en la naturaleza. Pocos cementos la resisten. Sin embargo, todos esos morteros se comportan muy aceptablemente, por lo que pueden ser utilizados sin ningún temor para la creación de zonas estancas.

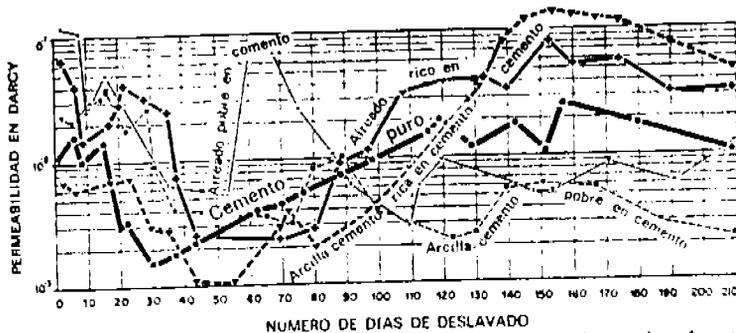


Fig. 23. Evolución de la permeabilidad de las probetas de arena, inyectadas, durante el tratamiento de agua destilada a que fueron sometidas (la dispersión de las medidas proviene de la irregularidad de la limpieza de las caras de las muestras, realizada antes de las medidas).

Varios ensayos de desludamiento efectuados en laboratorio, sobre bloques de aluviones inyectados de arcilla-cemento y extraídos *in situ*, han demostrado que a pesar de una ligera disolución de la cal la permeabilidad no aumenta. Estos resultados confirman el excelente comportamiento de ciertas pantallas de estanqueidad realizadas desde hace algunos años, pasando a formar parte de los trabajos definitivos. Tomaremos como ejemplo la pantalla de estanqueidad de la nueva basílica de Lourdes descrita más adelante. Su perfecto aspecto, a pesar del tiempo, no puede ser justificado por un depósito de limas, como algunos quieren hacernos creer cuando se trata de rastrillos de una presa.

No es necesario justificar la perennidad de las inyecciones de cemento. Han sido tantos los tratamientos realizados que ya no pueden ser puestos en duda sus satisfactorios resultados.

No ocurre así con el empleo de productos químicos, de no creer mucho en los ensayos de laboratorio, pues se trata de morteros recientes que no tienen edad para ser, sancionados por el tiempo.

Son, sin embargo, los ensayos de laboratorio quienes han informado que no todos los geles de silicatos de sodio son indeslavables. La elección del reactivo tiene una gran importancia. Ignorarlo no conduce más que a decepciones.

Debemos hacer resaltar los trabajos de impermeabilización del dique de Lac Noir (ISCHY, 1948) en los cuales se utilizaron morteros a base de cemento, arcilla y sobre todo de silicato de sodio. Quince años después de la terminación de los trabajos, la eficacia de las inyecciones controlada regularmente no ha disminuido prácticamente. El aumento de caudal observado es muy posible que se realizara a consecuencia de que la pureza de las aguas haya disuelto ligeramente el cemento.

Puede, pues, asegurarse que con algunos conocimientos, es posible utilizar morteros que mantengan todas sus propiedades a través del tiempo. El mito de que

las inyecciones son únicamente aceptables para trabajos provisionales ha pasado. Los rastrillos de las presas de Serre-Poncon y Nôtre-Dame de Commiers en Francia, Sylvenstein en Alemania, Stramentizzo en Italia, Gardik y Asen en Suecia, Shek Pik en Hong-Kong, Mission en Canadá, El Bosque, en México, etcétera, realizadas por inyección de los aluviones, así lo demuestran.

CAPÍTULO II

INYECCIONES EN ROCA.

La inyección es el proceso por medio del cual se introduce un fluido a presión en el terreno con el objeto de sustituir el aire o el agua en las fisuras, grietas y oquedades con un producto, el cual reducirá el flujo de agua (impermeabilización) y en algunos casos incrementará la resistencia y el módulo de deformabilidad del medio en forma significativa (consolidación).

En las inyecciones en roca generalmente se requiere rellenar los planos de fracturas así como las cavidades de disolución y otras oquedades que están asociadas a las discontinuidades del macizo rocoso. Estas representan los principales conductos por los cuales el agua fluye y por lo tanto requieren de ser selladas. En contraste, la permeabilidad atribuible a la porosidad de una roca es insignificante y no requiere de ser tratada, excepto en algunas rocas muy porosas, como las areniscas no cementadas y los travertinos, en que se puede aplicar este tratamiento con el objeto de reducir las filtraciones.

2.1 TIPOS DE TRATAMIENTOS

2.1.1 LOS CUATRO DIFERENTES TIPOS DE TRATAMIENTOS.

a) Pantallas impermeables: su objetivo principal es el de reducir la permeabilidad del terreno y las filtraciones a través del macizo rocoso. Una pantalla impermeable es un plano formado por medio de la perforación de barrenos y su inyección con mezclas que dan como resultado una zona dentro del macizo rocoso donde la permeabilidad del terreno es muy baja. Fuera de esta zona prevalece la permeabilidad natural.

Una pantalla puede estar formada por varios planos de inyección, los cuales poseen una geometría definida (inclinación, profundidad y extensión lateral), acorde con la permeabilidad y las características estructurales del terreno y de la obra civil que se desea proteger.

b) Tapetes de consolidación: son inyecciones realizadas para mejorar las propiedades de deformabilidad de la masa rocosa. Generalmente la profundidad de inyección es de 5 a 10 m de profundidad y se realiza cubriendo una superficie que está determinada por la obra civil que se construirá sobre ella.

c) Relleno: algunas rocas poseen grandes cavidades formadas naturalmente, como los ductos de carsticidad en las rocas calizas o las oquedades que quedan entre distintos derrames de lava en las rocas ígneas extrusivas.

Para evitar su colapso es indispensable rellenar estas cavidades cuando la cimentación de una estructura se va desplantar en este tipo de roca. La

exploración previa juega un papel importante para la localización de las cavidades y la planificación de los trabajos por desarrollar.

d) Inyecciones de contacto: tienen por objetivo rellenar las oquedades que quedan entre el revestimiento de concreto de un túnel o una cimentación y la roca para garantizar la adecuada transmisión de los esfuerzos de la estructura al terreno. Como en los casos anteriores, la inyección conlleva el efecto benéfico de la impermeabilización del terreno, ya que siempre se introduce parte de la mezcla inyectada a las fisuras de la roca.

En los tratamientos de impermeabilización y consolidación el papel de las exploraciones es vital para su adecuado diseño. Entendiendo por exploración tanto la parte geológica, rocas y discontinuidades y, la determinación de las propiedades mecánicas e hidráulicas del terreno.

2.1.2 PRODUCTOS EMPLEADOS EN LA INYECCIÓN.

Las mezclas empleadas en la inyección de macizos de roca fisurados se pueden dividir en dos grandes grupos: las suspensiones y las soluciones.

Las suspensiones se fabrican con agua y cemento tipo Pórtland, también se adicionan con materiales inertes como la arena, ceniza volante o puzolana y aditivos químicos para mejorar sus propiedades reológicas. Las mezclas fabricadas con cemento se pueden dividir en:

Lechada: formada por agua, cemento y bentonita o aditivo químico para estabilizarla, fluidificarla y/o incrementar la velocidad de fraguado.

Mortero: formado por agua, cemento, bentonita y arena. También adicionada con aditivos químicos para estabilizarlo, fluidificarlo y/o incrementar la velocidad de fraguado.

Concreto: formado por agua, cemento, arena, grava y puede o no tener algún aditivo químico para fluidizarlo y mejorar su resistencia.

Las soluciones son, productos químicos líquidos que reaccionan una vez inyectado en el terreno, las más empleadas son:

Silicato de sodio, utilizando como re activo el cloruro de calcio para formar un gel. **Polímeros,** que reaccionan al contacto con el agua. **Resinas,** que se polimerizan por medio de un catalizador.

La selección de la mezcla depende del ancho de las fisuras y del tamaño de los poros que se requieren rellenar. En la (fig. 2.1), se muestra la relación entre tipo de mezcla y el ancho de fisuras o bien, en el caso de suelos, el tamaño granulométrico del material.

La gran mayoría de los trabajos de inyección en rocas fisuradas se logran terminar exitosamente empleando las mezclas elaboradas con cemento. Sólo en casos muy especiales es necesario el uso de soluciones a base de silicatos de sodio y resinas. Los polímeros han dado buen resultado cuando se requieren inyectar fracturas grandes con agua en circulación, provocando un taponamiento temporal que permite entonces la inyección de las suspensiones de cemento, morteros y lechadas, más resistentes y con vida útil más prolongada.

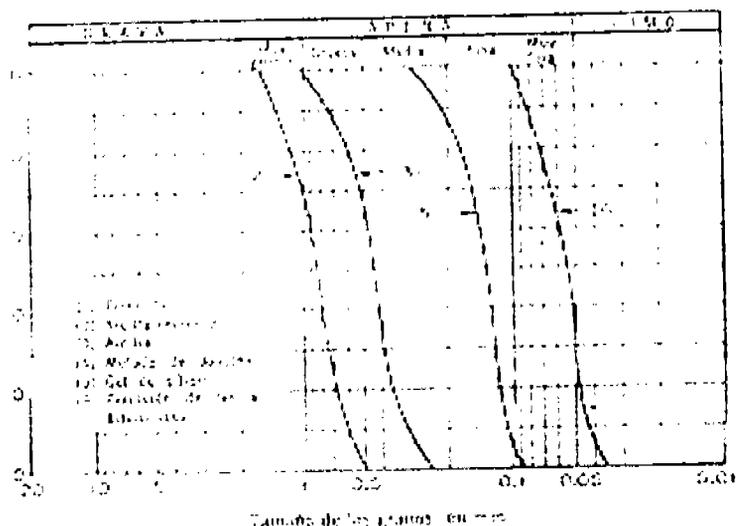


Fig. 2.1. Materiales empleados en la inyección de acuerdo con el tamaño de partículas en suelos.

2.1.3 MEZCLAS DE INYECCIÓN FABRICADAS CON CEMENTO.

Las mezclas de inyección fabricadas con cemento pueden dividirse, dependiendo de su comportamiento reológico, en:

Mezclas estables: son aquellas en que los granos de cemento se mantienen en suspensión por un período de tiempo prolongado.

La estabilidad de una mezcla se determina mediante la prueba de decantación. Esta prueba consiste en colocar 300 ml de lechada en una probeta de 500 ml de capacidad y medir durante 2 horas la cantidad de agua libre acumulada en la parte superior de la probeta. Se considera estable si el agua libre es menor o igual al 5%.

Mezclas inestables: son aquellas que durante la prueba de decantación tienen más del 5% de agua libre.

En la actualidad se emplean, en la mayoría de los tratamientos de inyección y consolidación, las mezclas estables debido a que poseen mejores características reológicas.

Hasta antes de la introducción de los aditivos químicos las mezclas estables se elaboraban en proporciones de 2:1 a 3:1 (agua: cemento), utilizando bentonita en 1 o 2 % para estabilizar y reducir la sedimentación y caracterizaban por su bajo contenido de cemento y baja resistencia final. Los aditivos modernos tipo superfluidizantes y estabilizadores permiten fabricar mezclas con mayor contenido de cemento empleando proporciones que van de 0:6 a 1:1 (agua: cemento), poseen mayor resistencia final y buena fluidez y alcanzan mayor penetrabilidad en el terreno fisurado, siempre que se tenga control continuo de su cohesión.

Las mezclas estables se comportan como un fluido tipo Bingham durante el flujo, el cual se caracteriza tener viscosidad y cohesión que son parámetros de resistencia al flujo. La viscosidad controla la velocidad de flujo y la cohesión la distancia máxima de penetración.

La penetrabilidad de una mezcla es directamente proporcional a la presión aplicada y a la apertura de las fisuras y es inversamente proporcional a la cohesión, por lo que para un ancho de fisura dado, se puede manipular la presión de inyección o la cohesión de la mezcla. En la práctica es más conveniente manipular la presión de inyección y fabricar un solo tipo de mezcla pero de baja cohesión.

Debido a que existen diferentes marcas patentadas y de composición química de los aditivos, es necesario primero diseñar una mezcla base empleando los materiales que se utilizarán en obra (cemento y agua), y posteriormente, durante el desarrollo de la inyección, llevar un control riguroso y continuo de sus propiedades reológicas para realizar los cambios necesarios. El laboratorio de campo es indispensable en estos casos, ya que las propiedades de la mezcla son afectadas por varios factores como: temperatura ambiente y del agua, composición química del agua, tipo de cemento y su grado de finura, proporcionamiento del aditivo, secuencia de preparación de la mezcla y equipo de fabricación (mezcladoras de alta y bajas revoluciones).

Una mezcla tiene un tiempo limitado útil, ya que desde el inicio de su preparación los componentes que la forman empiezan a reaccionar, en especial los aditivos que empiezan a perder efectividad. Las investigaciones desarrolladas hasta la fecha muestran que al volver a dosificar una mezcla con aditivos no se logra obtener las propiedades reológicas deseadas (cohesión y fluidez), por lo que es necesario desecharla. La vida útil se determina por medio de los ensayos de laboratorio, pero en general éste tiempo oscila entre 1 y 2 horas.

Las mezclas al ser inyectadas pueden perder parte del agua de composición si la superficie de las fisuras están secas, incrementándose rápidamente la cohesión y reduciéndose su penetrabilidad. Por ello, cuando se inyectan tramos de barrenos localizados arriba del nivel freático siempre es necesario inyectar previamente agua para saturar las fisuras.

El comportamiento de las mezclas inestables durante la inyección es errático e impredecible por lo que se tratan de evitar al máximo en este tipo de tratamientos.

2.1.4 MATERIALES EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE CEMENTO.

Agua: limpia y libre de materia orgánica, con bajo contenido de sales y sólidos disueltos. La alta temperatura influye en las propiedades de la mezcla por que es necesario tener una fuente de abastecimiento que proporcione agua a temperatura entre 15° y 25°C.

Cemento: tipo puzolánico con superficie específica Blaine de 4200 a 5100 cm^2/g como mínimo, de buena calidad, no hidratado, para lo cual se deberá almacenar bajo techo y colocado en tarimas de madera.

La cantidad de cemento almacenado debe ser suficiente para que la inyección no se suspenda y se pueda desarrollar en forma continua. Cada lote de cemento nuevo debe estar verificado para que cumpla con la superficie específica seleccionada.

Los cementos con mayor superficie Blaine, dentro del rango señalado antes, permiten fabricar mezclas más estables y de mayor penetrabilidad, ya el tamaño del grano de cemento es menor y se pueden inyectar fisuras más finas. Solo en casos muy especiales se aconseja el uso de mezclas fabricadas con micro cementos ya que su costo es muy elevado y requiere de otro tipo de aditivos y forma de preparación.

Aditivos: Su presentación es líquida y se utilizan sobre todo los de tipo superfluidizante y estabilizadores de volumen. Son productos químicos sintéticos y generalmente libres de cloruros que producen mezclas de inyección fluidas de alta trabajabilidad y estables.

El porcentaje de aditivo empleado en una mezcla estable es variable desde 0.25 a 1 %, los ensayos de diseño de la mezcla se inician utilizando el porcentaje recomendado por el fabricante.

El aditivo debe ser almacenado en un lugar cubierto ya que sus propiedades se pierden con los cambios constantes de temperatura.

Orden de preparación: la secuencia de preparación de la mezcla es muy importante en los resultados. Se emplea un turbo mezclador al cual se van adicionando los componentes en el orden siguiente: agua, cemento y finalmente los aditivos: El tiempo de mezclado en este equipo es corto, del orden de 1 a 3 minutos, posteriormente se traslada la mezcla a los agitadores de bajas revoluciones mientras se inyecta al terreno.

2.1.5 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ELABORADAS CON CEMENTO.

Las propiedades que se deben medir en una *mezcla estable* son:

- *Decantación (estabilidad).*
- *Viscosidad al cono Marsh.*
- *Cohesión con placa.*
- *Coefficiente de filtración.*
- *Resistencia a la compresión uniaxial.*

Las propiedades anotadas antes se verifican constantemente durante los trabajos de inyección, por ejemplo, 2 o 3 veces al día o bien, se puede establecer un volumen determinado de mezcla para llevar a cabo las pruebas de verificación. Se utilizan los siguientes métodos de ensaye para evaluarlas:

Decantación (estabilidad). Consiste en colocar 300 ml de lechada en probeta de 500 ml de capacidad y medir durante 2 horas la cantidad de agua libre en la parte superior de la probeta, debiendo ser menor o igual al 5 %.

Viscosidad al cono Marsh. Se define como el tiempo, en segundos, que tardan en salir 946 ml de mezcla de un embudo de dimensiones estándar (denominado cono Marsh), cuando se pusieron en el embudo 1500 ml de mezcla. Es una medida de la fluidez de la mezcla. Con base en la experiencia, se prefieren mezclas cuya fluidez oscile entre 20 y 35 segundos. Con más de 35 segundos las mezclas son espesas y difíciles de bombear lo que además reduce su penetrabilidad.

Cohesión con placa. Se mide por medio de una placa de acero inoxidable cuadrada de 10x10 cm y espesor de 0.4 mm rayada en ambas caras (el rayado recomienda en cuadrícula a cada 0.5 cm), se procede de la siguiente forma: se pesa la placa seca, después se introduce totalmente en la mezcla, se saca, escurre y pesa nuevamente. Se obtiene la diferencia de los pesos seco y con mezcla y se divide entre el área de la placa, obteniéndose así la cohesión en gr/cm^2 . Para una mezcla estable y de baja cohesión es conveniente que el valor sea menor o igual a $0.03 \text{ gr}/\text{cm}^2$.

Coefficiente de filtración. Se obtiene a partir de la prueba de filtrado de la mezcla. Consiste en medir la cantidad de agua que se extrae de un volumen equivalente a 200 cm^3 de mezcla por medio de un filtro - prensa, aplicando una presión de 7 kg/cm^2 durante un intervalo de 30 minutos. El coeficiente de filtración se obtiene utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Coeficiente de filtración} = (\text{Volumen de agua filtrada} \times \text{tiempo})^{-0.5} / \text{Volumen total inicial.}$$

Los sólidos retenidos en el papel se denominan *cake* y su espesor se reporta en mm. El valor del *cake* debe ser menor o igual a 15 mm.

Resistencia a la compresión uniaxial. Consiste en aplicar un esfuerzo axial a una probeta no confinada con una velocidad de $10 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ hasta la falla.

La probeta debe ser cilíndrica con una relación de esbeltez de 2.0, se deben ensayar a las edades de 7 y 28 días. Las mezclas estables elaboradas con aditivos alcanzan resistencias mínimas de 100 kg/cm^2 a 28 días, mientras que las elaboradas con bentonita menos de 30 kg/cm^2 en igualdad de estabilidad y fluidez.

2.1.6 PRESIÓN DE INYECCIÓN.

La determinación de la presión de inyección es muy importante y debe tomar en cuenta las propiedades del macizo rocoso y el objetivo que se persigue con la inyección. Presiones de inyección incorrectas pueden ser la causa de sobrecostos, prolongado tiempo de ejecución e incluso, afectar las propiedades del terreno inyectado.

En las inyecciones de penetración, donde solo se desea rellenar los vacíos del terreno, no es deseable el hidrofracturamiento, el cual se produce al aplicar altas presiones en rocas blandas, alteradas o amplias zonas de fallamiento.

En las inyecciones de remplazamiento el hidrofracturamiento es necesario y se produce en forma intencional para lograr que la mezcla penetre al terreno y mejore su rigidez, en estos casos se emplean presiones de inyección un poco superiores a la crítica del terreno.

Para el diseño inicial de una pantalla de impermeabilización se puede considerar una presión máxima equivalente a 1.5 a 2 veces la presión hidráulica del embalse, siempre que el terreno permita aplicar estas presiones sin llegar al hidrofracturarse. Si la roca es débil se establecen presiones menores a la crítica pero se reduce el espaciamiento entre las perforaciones para que la mezcla alcance a cerrar todos los espacios.

En ocasiones es necesaria la construcción de más de un plano de impermeabilización cuando la roca es demasiado débil o muy fracturada y es imposible aplicar altas presiones.

2.1.7 EQUIPO UTILIZADO PARA LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS E INYECCIÓN.

El equipo que se emplea para la fabricación de las mezclas elaboradas con cemento es el siguiente:

Turbo mezclador de altas revoluciones, de 1250 rpm mínimo.

Mezclador de bajas revoluciones de 60 a 80 rpm, se emplea para mantener en agitación la mezcla durante la inyección. Se puede adaptar para medir el volumen de mezcla inyectado.

Bombas de tornillo sinfin o de doble pistón, accionadas por medio de un gato hidráulico o neumático con capacidad de inyección de lechada variable de 0 a 60 l/min y presión ajustable de 0 a 30 o 40kg/cm², (fig. 2.2).



Fig. 2.2, Bombas de inyección
a) tipo pistón b) de tornillo sin fin.

Obturadores mecánicos, neumáticos ó hidráulicos: de diámetro adecuado para obturar la perforación y de longitud y resistencia suficientes para las presiones de inyección especificadas. (fig.2.3).

Manómetros registradores de paso integral, con carátula de 6" de diámetro con glicerina, con capacidad para medir un tercio más de cada una de las presiones de inyección máxima especificadas.

En la (fig. 2.4), se presenta un arreglo típico del equipo de inyección.



Fig. 2.3. Obturador neumático y manómetro con paso integral.

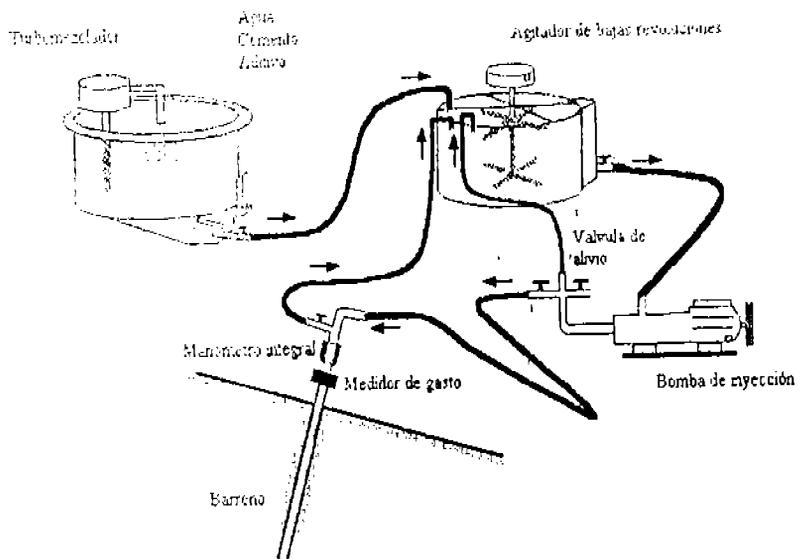


Fig. 2.4. Arreglo del equipo de inyección.

2.2 DISEÑO DE TRATAMIENTOS

2.2.1 PRUEBAS DE INYECCIÓN.

En ocasiones es necesario realizar pruebas de inyección in-situ para determinar la permeabilidad natural y las características de inyectabilidad de macizo rocoso. Estas pruebas también permiten realizar un diseño del tratamiento acorde con las condiciones de fracturamiento existentes en el sitio.

La prueba de inyectabilidad permite determinar la geometría más apropiada de la pantalla de impermeabilización y/o del tapete de consolidación, entendiéndose por geometría la distribución, dirección, inclinación, separación y longitud de las perforaciones, así como definir el procedimiento y presiones de inyección más convenientes.

En la prueba in-situ se utiliza la mezcla base diseñada inicialmente y que es elaborada con los componentes que se dispondrán durante el trabajo definitivo.

La ejecución de una prueba de inyectabilidad, requiere primero, de la revisión y análisis de la información geológica estructural, para seleccionar el sitio de prueba que sea representativo del macizo rocoso y segundo, establecer el procedimiento de ejecución más adecuado con base en las propiedades de permeabilidad y resistencia del mismo.

La prueba consiste, en términos generales, en los siguientes puntos:

- a) Determinación de la permeabilidad natural por medio de pruebas de agua tipo Lugeon, Lefranc o en general pruebas inyectando agua a presión.
- b) Inyección del terreno utilizando un cierto arreglo geométrico en las perforaciones y empleando la mezcla estable base. Las perforaciones se inyectan por etapas, a veces, es conveniente ensayar otras mezclas o realizar modificaciones conforme se obtienen los primeros resultados.
- c) Registro detallado de todos los datos de la prueba, como las presiones y consumos obtenidos en de cada tramo inyectado.
- d) Finaliza la prueba determinando la permeabilidad residual después de la inyección mediante pruebas con agua o bien perforando e inyectando nuevos barrenos en el área de prueba, de tal manera que se pueda verificar la penetrabilidad de la mezcla inyectada previamente, mediante comparación de consumos entre etapas.

c) Finalmente se analiza la información obtenida, para ajustar los parámetros geométricos del tratamiento, el proporcionamiento de la mezcla de inyección y definir el procedimiento de inyección y control más acorde con el terreno. Dentro de estos parámetros uno de los más importantes es la presión máxima de inyección.

2.2.2 PANTALLAS DE IMPERMEABILIZACIÓN

Tienen por objeto reducir la permeabilidad del macizo rocoso y las potenciales filtraciones a través de sus discontinuidades.

Una pantalla se forma por medio de la perforación e inyección de una serie de barrenos dispuestos en una o más líneas paralelas.

Las pantallas para presas se extienden por debajo del cuerpo de la cortina, desde el fondo del cauce hasta la parte alta de las laderas de apoyo o empotramiento de la estructura. Las características de una pantalla se definen por:

Número de líneas: es el número de líneas que forman la pantalla de impermeabilización, el cual depende de la resistencia mecánica, fracturamiento y permeabilidad del terreno. Cuando es difícil aplicar altas presiones para realizar la inyección por que el terreno es débil, se proyectan dos o más líneas paralelas.

Profundidad: depende generalmente de las condiciones geológicas del terreno. Existen casos extremos donde la roca presentó muy baja permeabilidad y no se requirió de pantalla, mientras que en otros las condiciones geológicas eran muy desfavorables e involucraban zonas profundas con alta permeabilidad que resultó la profundidad de pantalla mayor que la misma cortina.

Para definir esta característica, resultan imprescindibles las perforaciones exploratorias con ensayos de permeabilidad y/o las pruebas de inyectabilidad antes descritas.

Cuando existen dudas acerca de la permeabilidad del terreno a profundidad, se proyectan las pantallas de tal forma que las primeras perforaciones sean más profundas que las siguientes, con separación de 12 o 24 m entre ellas para que sirvan como barrenos exploratorios. En ellas se efectúan pruebas de permeabilidad antes de ser inyectadas y en caso necesario, los barrenos subsecuentes se profundizan hasta las zonas de alta permeabilidad.

Inclinación del plano de pantalla: la superficie hipotética que forma el conjunto de las perforaciones de inyección se denomina plano de pantalla. Si salirse de este plano las perforaciones pueden tener una inclinación distinta, con el objeto de cruzar las principales discontinuidades.

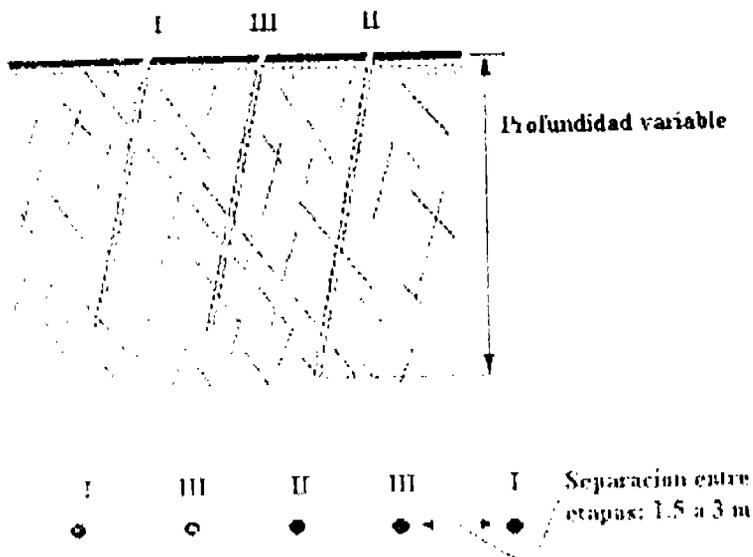


Fig. 2.5. Secuencia de perforación e inyección de barrenos de pantalla, Cambefort (1967).

La inclinación del plano de pantalla generalmente varía desde la vertical hasta 5° o 10° con respecto a ésta y hacia aguas arriba. El objetivo de esta inclinación es que la resultante del empuje hidrostático sobre la pantalla tenga una dirección hacia el interior del macizo rocoso.

Inclinación y dirección de las perforaciones: Estas características de la pantalla dependen de la densidad, rumbo y echado de las discontinuidades.

La dirección de las perforaciones se proyecta de tal forma, que estas crucen el mayor número de discontinuidades y en la forma más apropiada, para que la mezcla de inyección penetre en los huecos con facilidad. El ideal sería que las perforaciones atravesaran los planos en forma normal, lo cual es poco factible de lograr en todos los casos, pero ángulos hasta de 60° entre la discontinuidad y el barreno, son aceptables.

Separación de barrenos: la separación entre las perforaciones se establece en función de la penetrabilidad de la mezcla y de la resistencia mecánica del macizo.

En rocas muy fracturadas la separación entre los barrenos se reduce, ya que no es posible aplicar presiones de inyección altas sin correr el riesgo de provocar su hidrofracturamiento.

Valores típicos de separación final de barrenos son de 2 a 23 m en rocas con fracturamiento regular (RQD entre 50% y 80%).

Durante la construcción, el consumo de mezcla inyectada en cada etapa, permite establecer la densidad de barrenos y la separación final entre ellos, para que se garantice el sellado total de las fracturas.

Etapas de inyección: la perforación e inyección de los barrenos se realiza por etapas con el objeto de lograr la impermeabilización progresiva de las fracturas en el terreno.

En la primera etapa la separación entre los barrenos es generalmente de 10 a 12 m, los barrenos se inyectan en toda su longitud en tramos de 5 m. En la segunda etapa, se perforan a 5 o 6 m de separación y se inyectan los barrenos que quedan situados al centro de los de primera etapa. La tercera etapa de barrenos se realiza colocándolos al centro de los de segunda etapa, o sea 2.5 o 3m de separación. Por lo general esta etapa es la última que se realiza en forma sistemática. Solo se perforan e inyectan barrenos adicionales en aquellas zonas donde los consumos de mezcla hayan sido altos.

Se considera que un consumo es alto cuando se superan 20 kg. de cemento por metro de perforación inyectada. Esta cifra es convencional ya que se han empleado en varios casos valores de hasta 50 kg/m, siempre tomando en consideración las propiedades mecánicas del terreno.

Las pruebas de inyectabilidad permiten establecer con más seguridad este límite de consumo. Su importancia estriba en que de él depende, la ejecución de perforaciones de inyección adicionales, que se traducen en mayor tiempo y costo de la obra.

Forma de inyección: la inyección de los barrenos se puede realizar siguiendo el método de progresiones ascendentes o descendentes. (fig. 2.6).

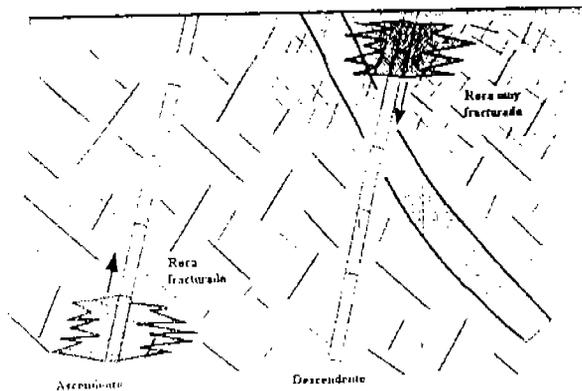


Fig. 2.6. Inyección por medio de presiones ascendentes y descendentes.

El primer método se aplica cuando el terreno donde se ha realizado la perforación está muy fracturado y provoca que las paredes de la perforación no sean estables. Se perforan una progresión de 5 m de longitud, se inyecta y se vuelve a perforar el siguiente tramo inferior, avanzando en esta forma hasta que se encuentra roca más estable.

El segundo método se aplica cuando la perforación es estable y permite ser perforado a toda su longitud, entonces la inyección se realiza a partir del fondo hacia arriba, avanzando en tramos de 5 m de longitud.

Durante la inyección de cada progresión se lleva un registro de la presión y del consumo de mezcla, también se elaboran gráficas de control que permiten conocer el comportamiento del terreno y decidir los cambios necesarios en la presión, con el objeto de evitar el hidrofracturamiento del terreno lograr el correcto inyectado del tramo.

2.2.3 TAPETES DE CONSOLIDACIÓN.

Tienen por objeto mejorar las propiedades mecánicas de la roca bajo la cimentación de la estructura civil, con el objeto de reducir las deformaciones producidas por los esfuerzos transmitidos, además de mejorar la permeabilidad del terreno al sellar las fracturas. También se realiza la consolidación de la roca alrededor de túneles que trabajan a presión.

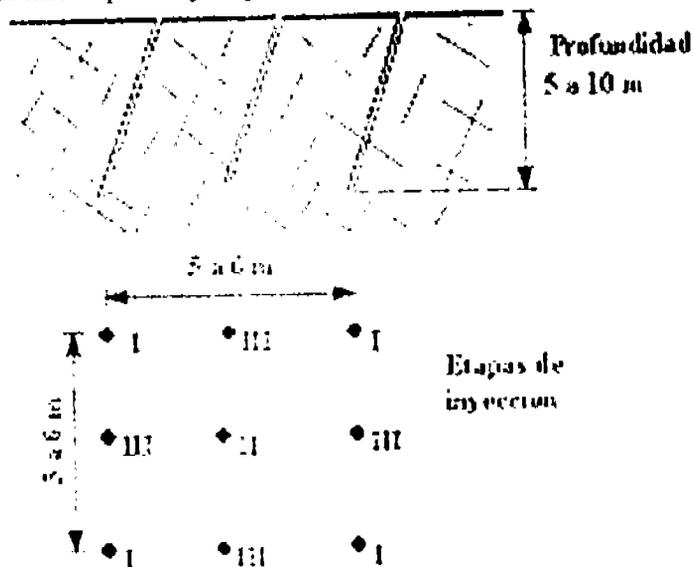


Fig. 2.7. Etapas de inyección de un tapete de consolidación, Camberfort (1967).

Cuando la roca es masiva y ocasionalmente presenta fracturas importantes, el tratamiento se limita al inyectado de éstas. Cada una se intercepta con barrenos perforados a ambos lados de la grieta y se inyectan.

En un macizo rocoso con fracturamiento sistemático, se proyectan el tapete de consolidación en toda el área y a una profundidad máxima 10 m. Las perforaciones pueden ser verticales o inclinadas y dispuestas en una retícula cuadrangular o en tresbolillo, (fig. 2.7).

Las características de un tapete de consolidación se definen por:

Profundidad: la profundidad del tapete de consolidación depende de las condiciones geológicas del terreno. Por lo general este tratamiento se reduce a 5 m en terrenos poco fracturados y a 10 m donde el fracturamiento y la alteración de la roca son más intensos.

Inclinación y dirección de las perforaciones: estas características dependen de la densidad y del rumbo y echado de las discontinuidades. De la misma forma que en el caso de una pantalla de impermeabilización, la dirección de las perforaciones se proyecta de forma que crucen el mayor número de discontinuidades.

Separación de barrenos: los barrenos se disponen en una retícula cuadrangular, la separación entre las perforaciones también depende de las condiciones geológicas del terreno.

En macizos rocosos muy fracturados la separación entre los barrenos se reduce a 2 o 3 m, ya que no es posible aplicar presiones de inyección elevadas, mientras que en terrenos menos fracturados la separación puede ser de 5 a 6 m.

Etapas de inyección: la inyección también se realiza por etapas. En la primera se inyectan los barrenos de las esquinas de cada cuadrado de la retícula, los barrenos se inyectan en tramos de 5 m de longitud. En la segunda etapa, se perforan e inyectan barrenos situados al centro de cada cuadro y en la tercera etapa los barrenos situados en la parte media entre los barrenos de primera etapa. Esta etapa es la última que se realiza en forma sistemática, solo se perforan e inyectan barrenos adicionales en aquellas zonas donde los consumos de mezcla hayan sido altos, utilizando el mismo criterio aplicado para las pantallas impermeables.

2.2.4 INYECCIONES DE RELLENO.

Cuando en el macizo rocoso existen grandes cavidades, como las producidas por la disolución en rocas calizas o las cavernas que presentan muchos derrames de lava en rocas ígneas extrusivas, el relleno es indispensable si se quiere construir sobre ellas una estructura civil.

Por lo general una vez rellenas en su mayor volumen estas cavidades, se realizan inyecciones adicionales para impermeabilizar o consolidar el terreno así como para sellar los contactos y límites de la cavidad.

El relleno de cavidades grandes y cuya geometría es bien conocida con anticipación, se pueden realizar introduciendo directamente en la cavidad materiales granulares, los cuales son cementados posteriormente por medio de la inyección de una mezcla fluida introducida por medio de tubos dejados expofeso.

Cuando este no es el caso, el relleno se realiza empleando una mezcla gruesa, tipo mortero de cemento fabricada con agregados de arena y gravilla. También se han utilizado, en muchas ocasiones, concreto pobre para lograr el relleno más voluminoso y después empleando mezclas tipo lechada para el sellado final.

Si hay flujo de agua a través de fracturas grandes y de las cavidades el relleno y sellado es muy difícil, ya que la mayoría de las mezclas normales son deslavadas, erosionadas o arrastradas antes de que logren depositarse y alcanzar cierta resistencia.

En estos casos es necesario recurrir a mezclas especiales de cemento, o al uso de asfalto caliente introducido al terreno en forma aún líquida o bien a productos químicos del tipo polímeros que reaccionan y se expanden al contacto con el agua.

La técnica consiste en lograr un taponamiento local de la cavidad o fractura disminuyendo el flujo de agua a tal grado, que permita la inyección de mezclas de cemento gruesas para realizar el relleno principal sin que sean arrastradas o erosionadas, posteriormente se inyectan y sellan los contactos con mezclas normales tipo lechada.

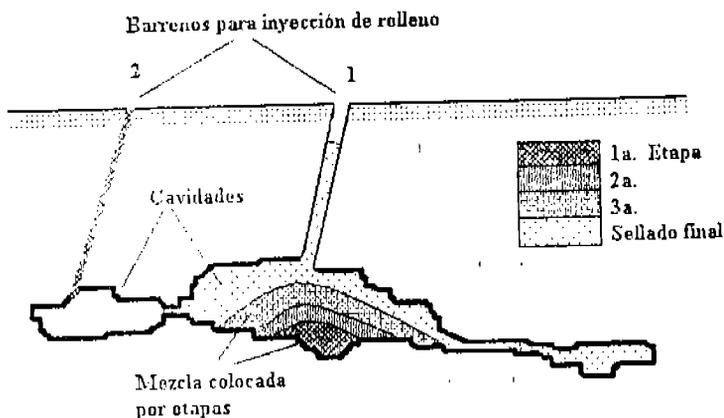


Fig. 2.8. Inyección de relleno de oquedades de grandes, Cambefort (1967).

En la (fig. 2.8), se muestra un proceso de relleno de cavidades donde el flujo de agua es mínimo o nulo. Para que la mezcla no se desplace más allá de la zona de importancia, la mezcla se introduce por etapas y volumen definido. Entre cada etapa se deja pasar tiempo suficiente para que la mezcla colocada previamente endurezca y así limitar el desplazamiento lateral excesivo.

2.2.5 INYECCIONES DE CONTACTO.

Es un tipo particular de inyecciones de relleno. El objetivo son las oquedades o fisuras que han quedado entre el concreto o placas metálicas y la roca. Estos casos se presentan frecuentemente en los revestimientos de túneles (fig. 2.9) o lumbreras, losas o zapatas de cimentación de edificios y puentes, plinto de presas de cara de concreto, cimentación de presas de tipo rígido y en los taponos de concreto para el cierre definitivo de túneles de desvío.

Las inyecciones de contacto tienen como objetivo el evitar o reducir flujo de agua o bien asegurar la transmisión de esfuerzos entre la estructura y la roca.

Las presiones de inyección se limitan generalmente para que no se levante, mueva o dañe la estructura de concreto y también para evitar el hidrofracturamiento de la roca que ocasionaría la inyección de mezcla al terreno en forma innecesaria.

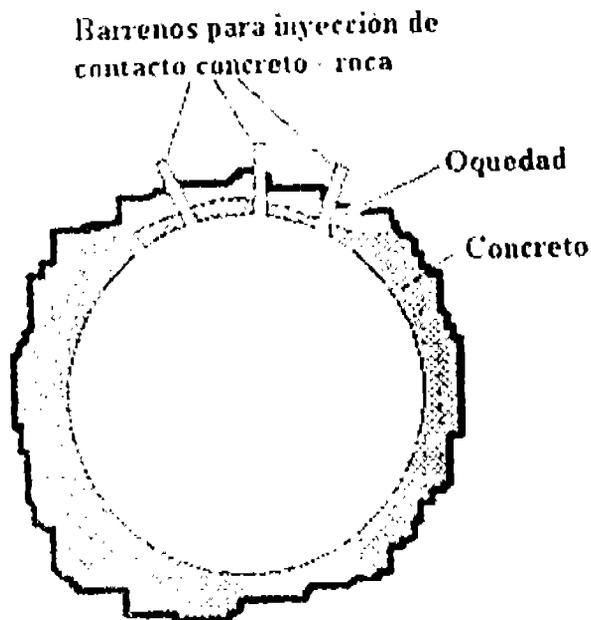


Fig. 2.9. Inyección de contacto concreto - roca en la bóveda de un túnel.

2.3 MÉTODOS DE INYECCIÓN Y CONTROL DEL PROCESO

2.3.1 MÉTODO DE INYECCIÓN CONVENCIONAL.

Consiste en definir una presión máxima de inyección o también llamada de rechazo y el empleo varias mezclas tipo lechada con un proporcionamiento cada vez menor de agua (4:1, 3:1, 2:1, etc.), que se cambian conforme el consumo de mezcla en el tramo inyectado alcanza un volumen especificado.

La cohesión de estas mezclas va aumentando de una a la siguiente y en algún punto la resistencia al flujo por cohesión detendrá el proceso de inyectado. Una vez alcanzada la presión de rechazo, se mantiene el tiempo necesario hasta que el consumo de mezcla sea muy bajo, si esto no ocurre durante la inyección de una mezcla delgada se procede a cambiar a una más espesa, llegando inclusive a la inyección de morteros.

En las inyecciones de penetración la presión de rechazo es un parámetro crítico ya que un valor mal establecido puede provocar el hidrofracturamiento sistemático del terreno, con desventajas económicas y de tiempo.

Al emplear varias mezclas de inyección con diferente proporcionamiento, además de los problemas asociados a su comportamiento reológico, se pierde más tiempo en preparación.

2.3.2 MÉTODO GIN (PRESIÓN Y VOLUMEN CONSTANTE).

Este método permite reducir y evitar casi totalmente el problema de hidrofracturamiento si se establecen adecuadamente los parámetros de control. Las pruebas de inyectabilidad permiten conocer aproximadamente estos parámetros, junto con la información geológica y de mecánica de rocas del sitio, para asegurar que los límites de presión y volumen de la curva GIN sean apropiados a las características del terreno y también para evaluar la necesidad de diferentes curvas GIN en diferentes partes de la obra.

Mediante las gráficas Presión - Volumen (curva GIN), Gasto - Tiempo y Presión - Tiempo, que se elaboran en tiempo real, es posible llevar un registro de todo el proceso de inyectado y controlado manipulando la presión.

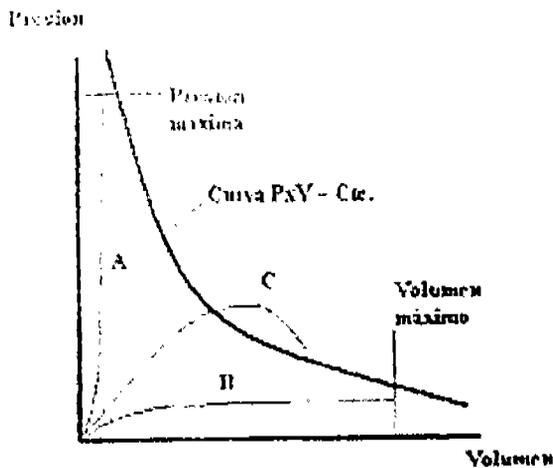
Se controla el proceso por medio de una computadora de campo, para seguir en tiempo real la trayectoria de la curva P-V sobre la curva GIN seleccionada y para indicar la terminación del inyectado, utilizando además las curvas Gasto - Tiempo y Presión - Tiempo.

Durante toda la inyección se procura emplear una sola mezcla de tipo estable y de baja cohesión.

Antes de dar inicio a la inyección es conveniente asegurar que el terreno tenga suficiente humedad para evitar que este absorba el agua de la mezcla, de lo contrario se provocarían deficiencias en el tratamiento del terreno. Se satura solo la roca localizada arriba del nivel freático. La saturación se hace a través del propio barreno antes de ser inyectado con mezcla y en tramos de longitud variable.

La inyección se suspende cuando la trayectoria de la curva de inyectado alcanza la curva GIN o cuando se alcanza la presión máxima preestablecida, en ambos casos, el consumo de mezcla debe ser bajo (menos de 5 l/min) o nulo. También se suspende la inyección cuando se alcanza un volumen máximo de inyección, que es indicador de una fractura abierta, en este caso, se suspende temporalmente la inyección para reiniciarla posteriormente, (fig. 2.10).

Los resultados del tratamiento se presentan en forma, estadística para asegurarse de un cierre progresivo de las fisuras de la roca.



Gráfica típica P x V

Fig. 2.10, Gráficas de control empleadas en el procedimiento de Presión - Volumen constante.

2.3.3 VERIFICACIÓN DEL TRATAMIENTO.

En las zonas tratadas por medio de inyecciones y en especial aquellas en donde se tuvieron muy altos consumos de mezcla (más de 50 kg de cemento por metro), es necesario realizar ensayos de inyección de agua para verificar el grado de impermeabilización alcanzado. Pruebas tipo Lugeon o Lefranc se pueden ejecutar en esos sitios para medir la permeabilidad residual.

La verificación se realiza también perforando e inyectando barrenos adicionales, cuidadosamente localizado y orientados para atravesar la zona donde hubo alto consumo. En la actualidad, es la forma de verificación más empleada.

2.3.4 CASO PRÁCTICO.

Presas Aguamilpa. Esta presa de 180 m de altura, propiedad de la Comisión Federal de Electricidad, es la más alta de tipo enrocamiento con cara de concreto en el mundo. Su llenado se inició en el año de 1993, (fig. 2.11).

En esta presa se aplicó por primera vez en México el método de inyección GIN, con resultados muy exitosos, ya que las filtraciones a través de la pantalla impermeable escasamente alcanzan los 5 l/s en total.

La roca de cimentación es una ignimbrita de edad terciaria de alta resistencia. Localmente se dividió en dos unidades litológicas, la más extendida en la boquilla es la unidad Aguamilpa, mientras que la unidad Colorines solo aflora en la parte alta de la margen derecha. La unidad Aguamilpa presenta una alteración de 6 m de espesor, **RQD** de 80% y, permeabilidad Lugeon de 5 a 29 unidades, valores promedio. La unidad Colorines tiene una alteración mayor, cercana a los 30 m, **RQD** de 50% y permeabilidad mayor a 20 unidades Lugeon.

Además la masa rocosa en general presenta fracturas con mayor continuidad, tanto perpendiculares como paralelas al río, que con frecuencia están rellenas de arcilla o rocas intrusivas de composición diabásica alteradas.

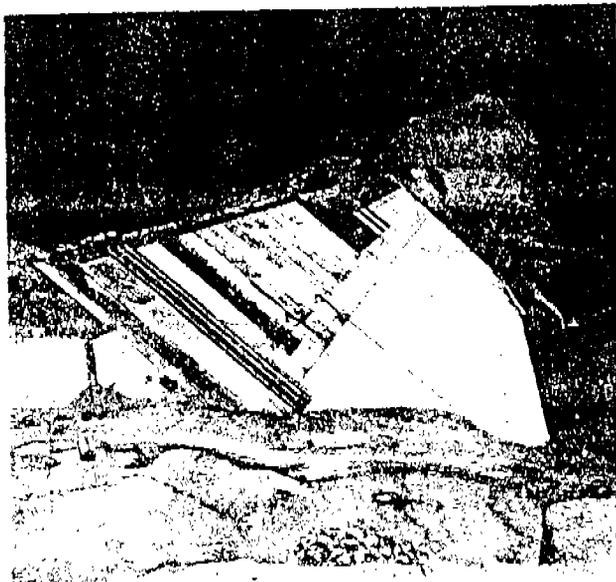


Fig. 2.11, Presa Aguamilpa, en la última etapa de construcción de la cara de concreto.

La pantalla impermeable comprende un área total de 66000 m² aproximadamente para proteger la cortina, la estructura vertedora en la margen izquierda y las obras subterráneas para generación en la margen derecha. Para la construcción de esta pantalla se emplearon aproximadamente 56 Km. de perforaciones en la roca, distribuidos en forma variable dependiendo de las condiciones del terreno y de localización de cada obra.

La profundidad de la pantalla tiene en promedio 50 m, sin embargo, se realizaron sistemáticamente exploraciones hasta los 70 m empleando las perforaciones de primera etapa a cada 24 m de separación.

Bajo el plinto de la cara de concreto se creó una zona de consolidación e impermeabilización perforando e inyectando barrenos de 10 m de profundidad.

En ambos casos, pantalla impermeable como tapete de consolidación bajo el plinto se realizó el tratamiento en forma de cierre progresivo, empleando tres etapas sistemáticas y, cuando aún se tenían altos consumos en la última, se recurrió a una cuarta etapa. El consumo de cemento para pasar a la etapa adicional se fijó en 20 kg/m en las zonas superiores de las perforaciones y de 50 kg/m en las inferiores.

La separación mínima de los barrenos de pantalla en tercera etapa fue de 3 m. Esta separación se estableció desde los estudios de campo previos realizados en la margen izquierda mediante una prueba de inyectabilidad.

Todo el tratamiento se realizó empleando una mezcla estable, de cohesión baja, elaborada con cemento tipo Portland puzolánico con superficie Blaine de 4500 cm²/g, agua de pozo y aditivo superfluidizante. La mezcla se diseñó para tener una fluidez del orden de 30 a 32 segundos en cono Marsh y resistencia final de más de 100 kg/cm².

Se emplearon aproximadamente 1350 toneladas de cemento en todo el tratamiento, con un consumo promedio de cemento de 24 kg por metro lineal de perforación o 20 kg de cemento por m² de pantalla.

La presión de inyección máxima se estableció como 1.5 veces la carga hidráulica en el punto en consideración, excepto en los primeros 10 m de profundidad de cada, barreno donde la presión se redujo a 5 y 10 kg/cm², para evitar levantamiento del terreno por la poca cobertura.

Para el control de todo el proceso de inyectado se empleó el método GIN (Grout intensity number) y se utilizó la curva correspondiente a $P \times V = 2000$ kg/cm²/l/m en la mayor parte de la cimentación sobre la unidad Aguamilpa y se redujo este valor en la unidad Colorines por presentar menores propiedades mecánicas.

El control del proceso se realizó instalando una computadora de campo en la margen izquierda con intercomunicación directa con cada sitio de inyección. Por medio del programa diseñado por la CFE para este caso especial, se llevaban cuatro gráficas de control en tiempo real por cada tramo en proceso de inyección, se podían controlar en forma simultánea hasta cinco tramos de inyección, lo que era suficiente dada las condiciones en que progresaba esta actividad en forma normal. El control lo realizaba un ingeniero entrenado en esta actividad el cual, con base en el comportamiento que observaban las curvas, decidía cuando debía continuar o suspenderse el proceso.

En esta forma se controlaron los más de once mil tramos de inyección que se requirieron para completar todo el tratamiento.

Los resultados de cada tramo eran graficados en una sección donde se presentaba el avance general del área de pantalla inyectada y eran procesados estadísticamente para observar el cierre progresivo y determinar la necesidad de perforaciones adicionales, en que sitio y a que profundidad.

Las filtraciones que se han medido a través de la roca son del orden de 2 a 3 litros por segundo en el área de, la cortina, mientras que en la obra de excedencias y de generación prácticamente son nulas.

CAPÍTULO III

TIPOS DE INYECCIÓN EN ROCA.

3.1 INYECCIÓN DE ROCAS FISURADAS.

La estanqueidad o consolidación de rocas fisuradas se hace por inyección. Se obtienen cualquiera de estos dos resultados simplemente adaptando la naturaleza del mortero utilizado que, generalmente, es más resistente para una consolidación que para una impermeabilización.

Por el contrario, el estado de fisuración del macizo impone un esquema de inyección variable. Conviene, en efecto, en el caso de una fisuración muy fuerte, en que existan fisuras de gran abertura, evitar una propagación lejana del mortero. Sin embargo, es poco importante en el caso de que la fisuración sea fina. El método de inyección debe ser adaptado a cada caso.

En principio se intenta, con una inyección previa, reducir el caso de rocas muy fisuradas a otras, en que las fisuras más grandes tengan solamente unas décimas de milímetro de abertura.

3.1.1 INYECCIÓN DE FISURAS MUY ABIERTAS.

En inyección se llaman fisuras muy abiertas a las que no son suficientemente grandes para permitir a un hombre circular por ellas, pero que no son tan pequeñas como para que puedan inyectarse económicamente con un mortero de cemento ordinario. Su abertura puede, por tanto, variar de unos decímetros a varios centímetros o incluso a varios milímetros, si son muy numerosas.

Su obturación se efectúa con un mortero extremadamente denso y tixotrópico, inyectado casi sin presión: 1 a 2 kg/cm² como máximo. Esta pequeña presión y la tixotropía limitan la progresión del mortero. Es necesario, por lo tanto, prever taladros de inyección muy próximos. Su separación será de 1 a 2 m, incluso de 3 m. Depende ante todo de la roca y de la calidad del mortero. Éste puede confeccionarse, por ejemplo, con cemento, arcilla, silicato de sodio y eventualmente, arena fina. Además de su tixotropía, que le permite espesarse antes que el cemento fragüe, posee una rigidez que le da un talud de base tres por uno de altura.³ Cuando se desea hacer una consolidación, se puede fácilmente regular la proporción de sus diferentes constitutivos, para darles una resistencia final comprendida entre 20 y 50 kg/cm², valores estos más que suficientes.

³ Se entiende que el ángulo de rozamiento interno φ de este material es tal que $\operatorname{tg} \varphi = 1/3$. Aproximadamente $\varphi = 18^\circ 30'$.

La propagación de este mortero no es muy grande. Pueden realizarse con él verdaderas ataguías de espesor relativamente pequeño, inyectando de abajo hacia arriba en taladros próximos.

Las fisuras finas se inyectarán deficientemente con este producto. También convendrá completar la inyección con un mortero especialmente adaptado a este uso: una simple suspensión de cemento, realizado como veremos más adelante, cumple perfectamente el objetivo deseado.

3.1.1.1 Lavado de las fisuras.

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.

La inyección se acomoda a este relleno. La comprime sin expulsada. Conviene a veces limpiar las fisuras con un lavado previo a la inyección. Este lavado se hace por intermedio de los taladros que cortan las fisuras.

Con la ejecución de trabajos de esta índole se comprueba que el radio de acción de un taladro es pequeño. El lavado no debe realizarse más que cuando está bien definido el canal por donde han de circular las aguas. Una simple inyección de agua no resuelve nada. Vuelve a salir rápidamente tan limpia como cuando entró.

Es necesario, por tanto, realizar numerosos taladros próximos, espaciados uno o dos metros, e inyectar sucesiva o simultáneamente agua y aire a presión. Puede incluso añadirse al agua del lavado algún producto químico que facilite la peptización de las arcillas.

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 kg/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 taladros 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.

Las conducciones de agua y aire tienen que estar sucesivamente comunicadas con todos los taladros sin excepción. El cambio de sentido de la circulación que se produce entre dos taladros en comunicación provoca un nuevo arrastre de materiales. Esto prueba que la limpieza no puede ser jamás perfecta.

El rendimiento de la operación está lejos de ser satisfactorio. En las muy numerosas medidas realizadas en una obra de importancia se comprobó que por cada metro cúbico de agua salía de 4 a 6 kg de materia seca. El agua de las resurgencias es generalmente de lodos, pero de vez en cuando aparecen algunas piedras grandes arrastradas por la violencia de la corriente.

Es innegable que este tratamiento permite eliminar una cantidad de arena o de arcilla más o menos importante. Pero no es jamás perfecto. Conviene comprobar su eficacia con pozos o galerías. A partir de ese momento es cuando sabremos con certeza su resultado.

Los deficientes rendimientos y la necesidad de un riguroso control hacen que el lavado de fisuras sea poco utilizado.

3.1.1.2 Compactación de los rellenos arcillosos.

El relleno natural de las fisuras no es grave inconveniente cuando se trata de una *pantalla de estanqueidad*. Lo esencial es que se mantenga ante la presión del agua. Así suele ocurrir, en el límite líquido por ejemplo, salvo en los casos en que existen grandes fisuras o karst rellenos de arcilla blanda.

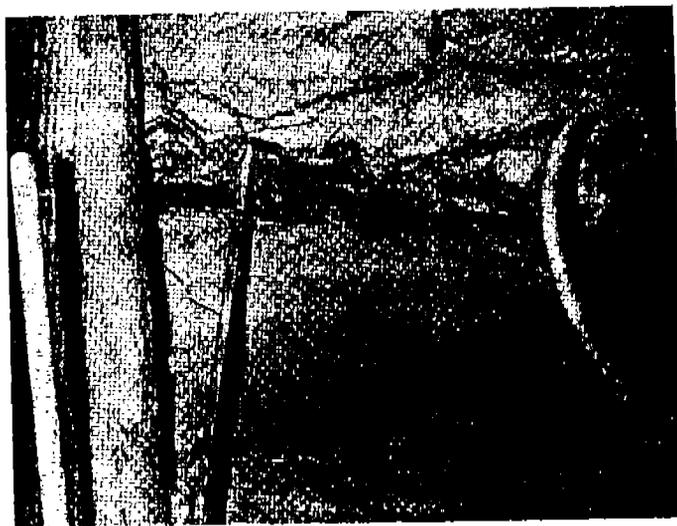


Fig. 3.1. Consolidación de un limo por inyección. El mortero no ha penetrado, ha circulado por las fracturas (bandas negras en la fotografía).

En este caso, la inyección debe airear progresivamente la arcilla para darle una mayor resistencia. Se llega a este resultado inyectando a alta presión, hasta 20 ó 30 veces seguidas los mismos taladros, dejando un espacio de tiempo de varios días entre dos inyecciones sucesivas. Después de este tratamiento, siempre resulta

prudente comprobar con un pozo o galería de reconocimiento si el resultado esperado se ha obtenido.

En un caso semejante pudimos comprobar que, gracias a las numerosas y grandes fracturas provocadas por la inyección, el espesor de una capa de arcilla rojiza había disminuido en un tercio, más o menos, y su resistencia había pasado de 40 g/cm^2 a 1 kg/cm^2 aproximadamente, resultado verdaderamente notable (fig. 3.1).

Si esas múltiples inyecciones y costosos pozos de reconocimiento resultan imposibles de efectuar, conviene levantar la arcilla blanda y reemplazarla por concreto. Es preciso operar así, siempre que se trate de consolidar una roca, en la que existan volúmenes importantes de arcilla, porque cualquiera que sea la resistencia dada a ésta por la inyección, nunca será comparable a la de la roca misma.

Si las fisuras no son suficientemente importantes para que pueda realizarse esta operación, entonces es la inyección quien desempeña tal misión, pero a condición de que se haga a altas presiones. Las arcillas irán comprimiéndose por efecto de la presión a que son sometidas, pero teniendo en cuenta el grado de compactación de éstas y su pequeño espesor, los asientos provocados no podrán ser muy importantes. Se trata de casos especiales que deben ser examinados en función de la geología de la zona y de la naturaleza de la construcción prevista.

3.1.2 INYECCIÓN DE FISURAS FINAS.

3.1.2.1 Ensayos de agua.

La inyección de las fisuras finas se hace partiendo de taladros más o menos espaciados. En cada taladro se realizan ensayos de agua por tramos sucesivos de unos 5 m de longitud, como para el reconocimiento.

Este ensayo, sin embargo, se simplifica para no perder demasiado tiempo. Su objeto no es exclusivamente el de lavar las fisuras, como se cree con frecuencia (lavado, por otra parte, prácticamente inoperante), sino establecer la dosificación inicial del mortero. Cuanto más elevadas son las absorciones, más fuerte es la dosificación. Se intenta de esta manera no perder inútilmente el tiempo, inyectando un mortero demasiado diluido que llegue a perderse. Como se sabe, el ensayo LUGEON no da más indicación que sobre la abertura total de las fisuras que atraviesan cada tramo. Cuando existen numerosas fisuras finas se corre el riesgo de comenzar con una dosificación demasiado fuerte. No se puede hacer nada contra esto. Afortunadamente se ha comprobado en numerosas obras que ese método de trabajo es satisfactorio y que, en fin de cuentas, el ensayo inicial de agua es rentable.

3.1.2.2 Inyección por tramos.

La inyección de mortero se hace, como el ensayo de 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 el sistema de inyección adoptado.

Puede pensarse que la inyección por este sistema es larga y costosa y que es mejor inyectar el taladro en toda su longitud, pero no es así, pues los granos de cemento sedimentarían con el agua y obturarían lentamente el taladro en lugar de introducirse en las fisuras. Ya se manifiesta este fenómeno cuando los tramos tienen unos 10 m de altura. Cuando el taladro se ha rellenado por este procedimiento, la presión sube enormemente, llegando a creerse que se ha llegado a la contrapresión de rechazo, pero si se volviera a perforar e inyectar de nuevo se comprobaría que el macizo absorbía tan fácilmente como antes de la considerable subida de presión.

Es posible suprimir la sedimentación del mortero en el taladro haciéndole circular por medio de una conducción suplementaria que llegue al fondo del taladro (fig. 3.2). Una válvula colocada sobre la conducción de salida permite regular la presión. Entonces el taladro es inyectado de una sola vez en toda su longitud.

Este método, aparentemente muy claro, no conviene más que cuando todas las fisuras a travessadas tienen, más o menos, la misma abertura. Si no es así no se puede saber cómo determinar la composición del mortero.

Basta que una fisura se diferencie claramente de las otras en el tamaño de la abertura para que el mortero destinado a inyectar las fisuras más finas se vaya indefinidamente por la más grande. Y si se hace el mortero de inyección más denso para evitar que se produzca este fenómeno, se bloquea la entrada de las fisuras finas, impidiendo el progreso de la inyección hacia dentro.

Teóricamente es posible realizar un buen tratamiento con este procedimiento. 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 las fisuras que tienen la entrada obturada, con el fin de impulsar hacia delante el tapón causante de la obturación y permitir la circulación normal del mortero.

De esta forma, en principio, todo queda bien inyectado, pero la técnica es demasiado complicada para que en la obra se pueda eficazmente adaptar la dosificación del mortero que más conviene a la calidad del macizo. La adaptación es mucho más sencilla en la inyección por tramos. Este último método es el adoptado en todos los tratamientos de inyección importante.

A veces, el macizo rocoso es de tan mala calidad que no es posible mantener un obturador a la profundidad deseada. En este caso hay que inyectar a medida que avanza la perforación. Solamente quedan abiertas las fisuras del tramo que se acaba de perforar, ya que las otras han sido cerradas, con las perforaciones precedentes. Entonces el obturador puede colocarse donde se quiera dentro de esta última zona e incluso suprimirlo si se ha tomado la precaución de anclar un *tubo* al terreno en la entrada del taladro de inyección.

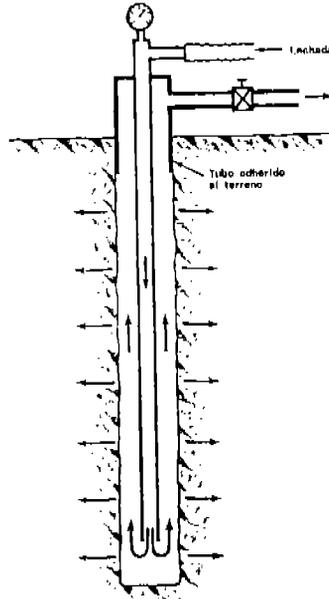


Fig. 3.2. Inyección simultánea de la perforación en toda su altura. Procedimiento defectuoso que hay que evitar.

A pesar de las apariencias, la inyección se ha realizado por tramos sucesivos desempeñando la parte de taladro inyectado la misión de conducción que termina normalmente en el obturador.

Pero este método sencillo no es conveniente cuando el subsuelo está constituido por una superposición de capas de naturaleza marcadamente diferente tales como arcillas y arenisca fisurada. Las presiones de inyección a utilizar para tratar correctamente esas dos naturalezas del terreno no son las mismas. Las presiones elevadas, necesarias en la inyección de fisuras de areniscas, rompen las arcillas que, en definitiva, son solamente las que quedarían inyectadas.

La utilización de tubos de manguitos perfeccionados, empleados en las juntas de contracción, permite resolver este problema. Pero antes de este descubrimiento se inyectaba en terrenos de este tipo utilizando un conjunto de tubos de revestimiento telescópicos, que se anclaban en la perforación a medida que

avanzaba la inyección. De esta manera, el mortero inyectado en areniscas no podía penetrar en la arcilla sobrepasando este medio, quedando aislada por los tubos de revestimiento.

Una vez inyectado el taladro en toda su magnitud, se recuperaban estos tubos perforando de nuevo. Como puede verse, era un sistema incómodo y además muy costoso.

3.1.2.3 Inyección de arriba abajo y de abajo arriba

Ya que es conveniente inyectar los taladros por tramos de 5 m aproximadamente, los métodos a seguir son dos: a) De arriba abajo, y b) De abajo arriba.

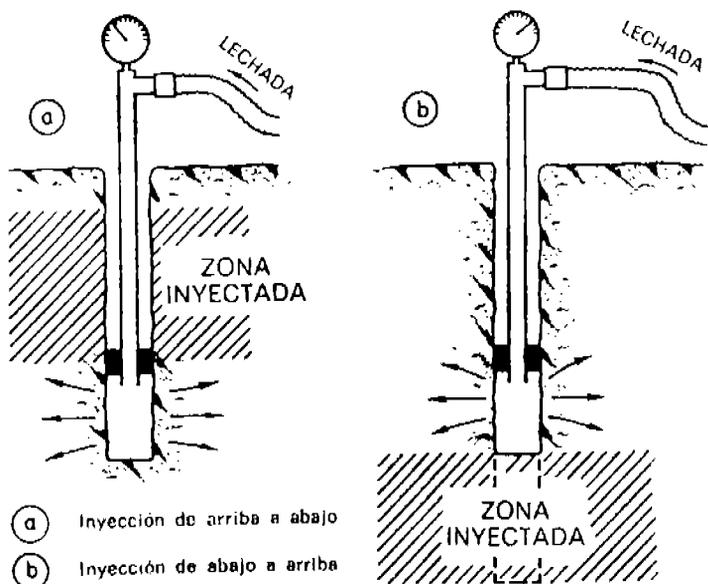


Fig. 3.3. Inyección de una perforación por tramos. Procedimiento satisfactorio.

Como su nombre indica, la *inyección de arriba abajo*, se realiza después de la perforación de cada tramo. Una vez terminada la inyección, se vuelve a perforar el tramo inyectado, de donde pueden extraerse interesantes testigos como los de BERNATZIK (fig. 3.5). Después se hace el taladro del tramo siguiente. La inyección progresa, por lo tanto, desde arriba hacia abajo.

Este método satisface plenamente el espíritu que guía la inyección. Las primeras inyecciones sirven de «techo» en el que se apoyan las inyecciones siguientes que, en principio, deben poder ser inyectadas a una presión más elevada que si este «techo» no existiera.

Las consideraciones teóricas expuestas, así como la experiencia alcanzada en inyecciones, nos muestran sin embargo, que el procedimiento que exponemos es uno más, sin superioridad sobre cualquier otro. Si después de haber ejecutado la perforación en toda su altura comenzáramos por inyectar el tramo más profundo y, después, sucesivamente, los tramos superiores haciendo progresar la inyección de abajo arriba, se podrían comprobar que las cantidades absorbidas eran prácticamente idénticas a las obtenidas de arriba abajo, con la misma contrapresión de rechazo.

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

La inyección por tramos de abajo-arriba presenta una gran ventaja económica. Permite realizar el taladro con el máximo rendimiento y después desplazar la máquina de perforación a otro emplazamiento durante la inyección.

Pueden separarse los dos trabajos de perforar e inyectar y así es posible especializar equipos y reducir al mínimo el tiempo muerto. Además, no hay necesidad de volver a perforar el cemento, obturando el taladro cada vez que se finaliza la inyección.

Como hemos visto anteriormente, la inyección de abajo arriba no puede realizarse más que colocando un obturador en diferentes puntos del taladro. Es necesario que el macizo rocoso no esté demasiado fisurado, porque entonces el mortero podría remontar el obturador y cimentarle en el terreno al impedir su movimiento.

3.1.3 INYECCIÓN DE ROCAS FUERTEMENTE FISURADAS.

3.1.3.1 Inyección de un mortero estable.

Cuando un ensayo de agua da una absorción superior a 10 unidades Lugeon puede decirse que es interesante comenzar la inyección con un mortero estable. Sin embargo, es evidente que un mortero de estas características no se puede utilizar más que en el caso de que el reconocimiento informe que existen numerosas zonas del macizo que poseen una permeabilidad superior a este valor, porque, de lo contrario, es más económico inyectar las zonas de fuerte permeabilidad con las suspensiones habituales de cemento.

Los morteros estables tienen un fraguado extremadamente lento: 24 horas o más si no se toman medidas especiales. Se comportan como un verdadero fluido.

La presión de inyección no depende más que de la dimensión de las fisuras, de la viscosidad del mortero, del caudal y del radio de acción de la inyección.

Además, la sedimentación no se produce tan lentamente que reduzca la abertura de las fisuras y provoque un aumento progresivo de la presión, como sucede en los morteros inestables.

Con un mortero de estas características se puede inyectar a una presión muy baja, reduciendo el caudal lo necesario. Esta posibilidad debe ser utilizada para la inyección de capas superficiales del macizo de 5 a 10 m de espesor, por ejemplo, con el fin de reducir el número e importancia de las resurgencias, aún cuando la fracturación del macizo sea inferior a la del caso indicado anteriormente.

El aumento de radio de acción de la inyección puede hacer subir ligeramente la presión. Este fenómeno es de poca importancia, pero se corre el riesgo de inyectar cantidades de mortero considerables sin gran ventaja. Es suficiente con que encuentre un paso favorable a su circulación, para que todo el mortero se vaya fuera de la zona que se desea tratar.

Para limitar automáticamente las cantidades, como ocurre en la inyección de morteros inestables, se ha probado inyectar morteros estables de fraguado acelerado. El tiempo de fraguado, de una media hora de duración, era notablemente inferior a la duración de la inyección.

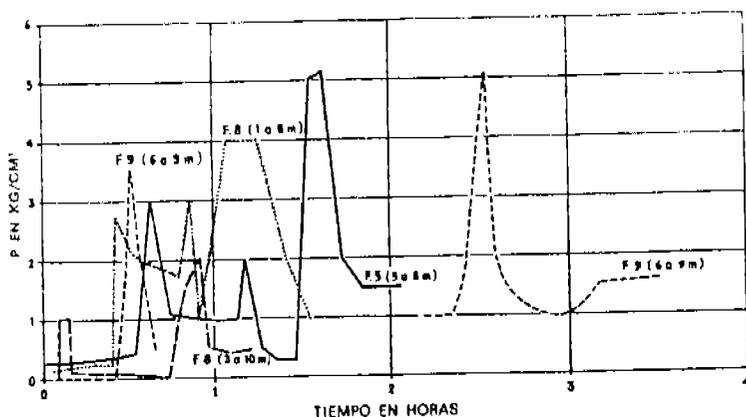


Fig. 3.4. Inyección de un mortero de fraguado acelerado en las capas superficiales de una roca fisurada.

Como puede verse por el gráfico (fig. 3.4), la presión pasa por puntos sucesivos de corta duración, volviendo después a la presión inicial o ligeramente superior en algunos casos. Pero las cantidades susceptibles de ser inyectadas eran siempre bastante grandes.

Puede explicarse este fenómeno por la abertura, a causa de la presión de fisuras demasiado finas para ser inyectadas a baja presión con ese mortero, o por una reapertura de las fisuras que estaban obturadas. El fraguado del mortero no

permite efectivamente, deslizamientos. Es posible que este fenómeno, muy claro en la inyección de capas superficiales, lo sea menos en la inyección de capas profundas.

Para terminar diremos que es necesario detener la inyección de un mortero estable cuando una cierta cantidad haya sido inyectada. Esta cantidad puede ser calculada, suponiendo que el mortero se reparte uniformemente alrededor del taladro. Debe calcularse en metros cúbicos y no por el peso de sus materiales, por tratarse de un mortero estable.

Como ya hemos visto, a causa de la débil sedimentación de los morteros estables y de la baja presión de inyección que impide abrir las fisuras, la inyección de un mortero de estas características no puede bastarse a sí misma.

La experiencia confirma perfectamente este acierto. Conviene por ello inyectar un mortero inestable después de haber fraguado el mortero estable. Su dosificación se calcula por un ensayo de agua preliminar, siguiendo las instrucciones expuestas más adelante. Esta inyección puede hacerse partiendo de un taladro ya inyectado sin embargo, pero perforado de nuevo o a partir de un taladro próximo.

Sabemos, sin embargo, que la inyección de un mortero inestable puede suprimirse si se inyecta inicialmente un mortero estable que se dilate y cuya dilatación sea superior a la sedimentación medida en laboratorio para el mortero que no se dilate. Este tratamiento da resultados muy aceptables, aunque inferiores en calidad al precedente.

3.1.3.2 Inyección de un mortero inestable.

Recordemos que los morteros inestables no sirven más que para el transporte hidráulico de los granos de cemento.

Sabemos que cuanto mayor dosificación tenga un mortero inestable más elevada es la velocidad de la circulación para la que los granos comienzan a sedimentarse.

Si se quiere que un taladro de inyección permita el tratamiento de un volumen de terreno importante, es necesario empezar con un mortero poco dosificado. De lo contrario, se corre el riesgo de perder irremediablemente el taladro, al no poder progresar todo lo necesario, un mortero demasiado espeso.

La dosificación ideal es la más pequeña que permita alcanzar la contrapresión ideal de rechazo, establecida de antemano. Es prácticamente imposible determinar *a priori* esta dosificación ideal, pero para evitar pérdidas de tiempo comenzando por la dosificación mínima, se determina la dosificación del mortero inicial, a partir del resultado del ensayo de agua.

Siendo las relaciones cemento/agua habituales de estos morteros $1/8$, $1/6$, $1/4$, $1/2$, $3/4$ y $1/1$, pueden adoptarse las reglas siguientes que corresponden a las dosificaciones satisfactorias más fuertes y a una contrapresión de rechazo de $50-60 \text{ kg/cm}^2$. No son reglas fijas sino simplemente orientadoras.

De 1 a 2 unidades LUGEON, la presión de rechazo se obtiene con una dosificación de $1/4$; se comenzará, por tanto, con $1/8$.

De 2 a 5 unidades LUGEON, el rechazo se alcanza a $1/2$, pero seguiremos empezando con $1/8$ para pasar en seguida a $1/4$ y después a $1/2$, porque en determinados casos se puede tener la presión de rechazo a $1/4$.

De 5 a 10 unidades LUGEON, se obtiene casi tan frecuentemente a $1/2$ como a $1/1$. Podremos entonces comenzar a $1/4$.

Por encima de 10 unidades LUGEON, se tomará un mortero inicial con una dosificación de $1/2$, pero este caso es excepcional porque esos tramos deben, en principio, inyectarse con un mortero estable.

Las diferencias en la dosificación del mortero final para un mismo número de unidades LUGEON provienen del pequeño error que pueda cometerse en la determinación de este número o también del tamaño de las fisuras anchas o de las más finas. Ya hemos visto que el ensayo LUGEON no permite precisar este punto. Esta incógnita justifica que el comienzo de la inyección se haga con una dosificación pequeña. Ésta puede ser suficiente para llevar hasta el final la inyección del tramo considerado.

Hace algún tiempo se comenzaban las inyecciones con morteros diluidos en la relación $1/50$ ó $1/20$. Con estas dosificaciones e incluso con concentraciones más fuertes se provoca una segregación de los granos de cemento, separándose los granos finos de los gruesos. (fig. 3.5). Esas condiciones permitieron a BERNATZIK hacer interesantes estudios sobre los testigos.

Desgraciadamente, los granos finos tienen una velocidad de fraguado mucho mayor que los gruesos, sobre todo bajo el efecto de la presión. Puede, pues, suceder que su fraguado se haga antes que el depósito se haya oreado suficientemente para que alcance una compacidad satisfactoria.

Se obtienen así rellenos blanquecinos fáciles de rayar con la uña, pero estancos. Por lo tanto, no es necesario, comenzar siempre con un mortero extremadamente diluido, a pesar de las ventajas técnicas que pueden presentar.



Fig. 3.5. Testigo de cemento de 55 mm. de diámetro extraído de una perforación después de la inyección de un mortero de cemento muy diluido.

Este mortero inicial se inyecta durante 25 minutos, por ejemplo. Si al cabo de ese tiempo la presión ha aumentado o manifiesta tendencia a hacerlo, se conserva esa dosificación. Cuando la presión no aumenta, se pasa a la dosificación inmediatamente superior, continuando así hasta obtener la presión de rechazo.

Cuando se reanuda la inyección de un tramo que fue interrumpida para taponar una resurgencia, surgida por el fraguado del cemento u otra razón, se hace con una pequeña dosificación e incluso con agua pura, dispuestos a pasar rápidamente a la dosificación que se utilizaba en el momento de la interrupción.

Esta práctica se realiza cuidando de no bloquear el taladro con un mortero demasiado espeso. Bajo la presión de inyección del agua o de morteros de inyección dosificados en pequeña cantidad, las fisuras más o menos rellenas de un cemento duro, se abren ligeramente, lo que permite a los morteros más espesos progresar hacia delante.

Para ilustrar estas observaciones veamos algunos ejemplos reales:

Con un mortero convenientemente dosificado, la presión sube lenta y progresivamente (fig. 3.6 *a*), mientras que con un mortero demasiado ligero, no empieza a subir hasta pasado bastante tiempo (fig. 3.6 *b*), y con un mortero demasiado espeso sube demasiado de prisa (fig. 3.6 *e*).

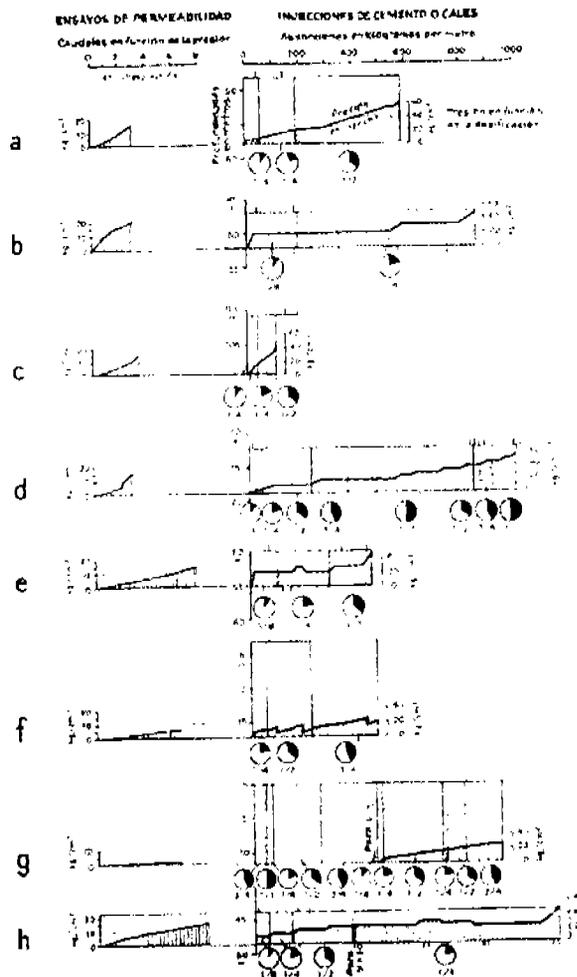


Fig. 3.6. Absorciones y presiones de inyección de un mortero inestable.

Esos errores de dosificación son inevitables porque se conocen mal las propiedades hidráulicas del macizo. Además, durante las inyecciones se duda de aumentar la dosificación porque se tiene la esperanza siempre de que la presión va a comenzar a subir.

A veces la presión sube «a golpes» (fig. 3.6 *d*), porque algunas fisuras se cierran y al reducirse la sección total de circulación del mortero, no tiene más remedio que subir.

En ocasiones, la presión sube enormemente, manteniéndose un momento antes de alcanzar su valor inicial (fig. 3.6 e), o desciende de nuevo rápidamente (fig. 3.6 f). Se ha formado un tapón, pero al aumentar la presión ha sido impulsado hacia delante. La inyección continúa como si nada hubiera ocurrido.

Las figuras (3.6 g y 3.6 h), muestran las variaciones de dosificación adoptadas al reanudarse una inyección interrumpida. La nueva presión puede ser igual a la anterior (fig. 3.6 h). Si la interrupción se ha hecho para bloquear resurgencias, no sirve de mucho. La marcha del mortero es la misma haya o no endurecido el depósito de cemento. Podemos ver en esto una prueba indirecta del proceso de inyección indicado anteriormente.

3.2 INYECCIÓN DE LAS ARENAS Y GRAVAS.

3.2.1 GENERALIDADES.

Desde hace tiempo se vienen realizando impermeabilizaciones y consolidaciones inyectando productos químicos tal como silicato de sodio más o menos diluido y reactivo. De esta forma vieron la luz numerosos procedimientos conocidos por los nombres de JOOSTEN, GAYRARD, FRANCOIS, RODIO, etcétera.

Se trata de procedimientos cuyo precio de costo muy elevado ha limitado su empleo. En el momento actual se les reserva para el tratamiento de casos muy especiales, como por ejemplo, la impermeabilización de arenas finas, siendo las arenas y gravas propiamente dichas inyectadas con suspensiones de arcilla o de arcilla-cemento relativamente más baratas. Ya es conocido que las suspensiones de cemento puro no son convenientes.

El empleo de morteros estables es casi evidente en el momento actual. No obstante, durante más de veinte años se practicó la inyección de morteros de cemento para transformar los aluviones en concreto. Esta insistencia se debió a que en algunas obras en que los aluviones presentaban una estructura abierta, se había podido inyectar cemento puro. Otras veces, muy pocas, se pudo eliminar la arena fina que se encontraba entre los granos y reemplazada por cemento, pero constituyendo excepciones.

Hasta llegar a los métodos actuales fue necesario hacer tabla rasa con todas las experiencias anteriores. Más exactamente, se ha estimado que los granos de cemento eran demasiado gruesos y que debería ser suficiente con tomar partículas mucho menores para lograr buenos resultados. Se hicieron entonces morteros de arcilla cuyos granos son extremadamente reducidos. Para hacer estos morteros indeslavables se les sometió a un tratamiento de silicato de sodio que tuvo por efecto producir un mortero estable. La primera inyección importante coronada de éxito efectuada por este método fue la del rastrillo de la atagüa, agua arriba de la

presa de Génissiat en 1937, inyección realizada bajo la dirección de los señores MAYER y J. FLORENTIN, de la Sociedad S.E.C., cuya actividad fue continuada posteriormente por SOLÉTANCHE.

La gran absorción de mortero observada en el curso de estos trabajos se disminuyó al añadir cemento al tratamiento de arcilla. Esos nuevos morteros prefiguraron los morteros actuales de arcilla-cemento.

En esa época, la misma sociedad procedía a la inyección de geles Rodio en Bou-Hanifia (Argelia), partiendo de cales con silicato de sodio, sustituido éste, en parte, por margas para economizar silicato. A continuación, la cal fue también sustituida por cemento. De esta forma, por un camino totalmente distinto se había logrado un mortero absolutamente análogo al que excepcionalmente se utilizó en Génissiat.

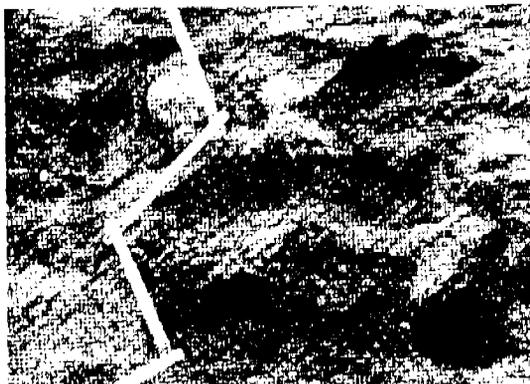


Fig. 3.7. Arenas y gravas impregnadas de arcilla-cemento.

Más tarde, fue suprimido el silicato, dosificándose la arcilla y cemento de manera que se obtuvieran al mismo tiempo un mortero estable y un fraguado de cemento que impidiera el deslavado.

La mayor dimensión de los granos de cemento de estos morteros, del orden de la décima de milímetro, les dio una penetración algo peor que la de los morteros de arcilla pura. Pero la experiencia demuestra que, a pesar de este inconveniente, la inmensa mayoría de los aluviones pueden ser inyectados con él (fig. 3.7).

Esto no quiere decir que solamente hayan de utilizarse morteros de arcilla-cemento para reducir a su justo valor la permeabilidad de aluviones que lo sean excesivamente. Esos morteros no son convenientes más que para impermeabilización de los medios más permeables. Para los otros, son necesarios otros morteros. Existen en el mercado y son más o menos caros, pero lo esencial es saberlos elegir con todo conocimiento de causa. Así es cómo se ha negado a la creación de un nuevo arte.

Existen varios métodos de inyectar aluviones. Ninguno de ellos se asemeja a los utilizados en macizos rocosos. En efecto, no es posible en las gravas mantener sin protección un taladro de varios metros de longitud y colocar allí un obturador, el terreno se desprendería.

Pueden distinguirse tres procedimientos:

1. De abajo arriba.
2. Utilizando tubos con manguitos.
3. De arriba abajo a medida que se hace el taladro.

3.2.2 INYECCIÓN DE ABAJO ARRIBA.

Este es el procedimiento más sencillo (fig. 3.8). Consiste en introducir un tubo en el suelo hasta que alcance el límite más profundo que deba ser inyectado.

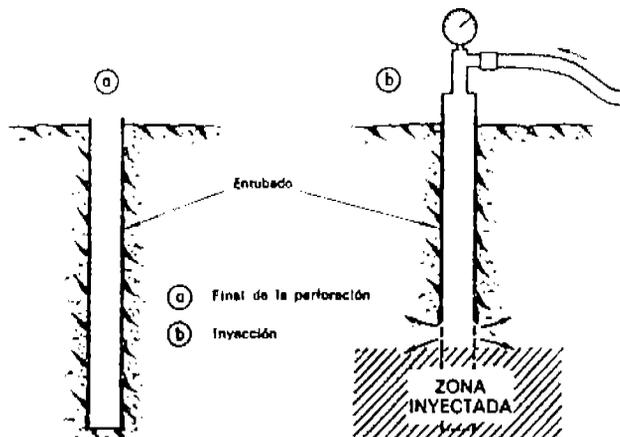


Fig. 3.8. Inyección de abajo arriba, partiendo del tubo provisional del taladro.

Se limpia el interior del tubo y después se le conecta con la máquina inyectora. Una vez hecho esto, se hace subir el tubo 20 ó 30 cm y se inyecta el mortero. Cuando la cantidad prevista se ha introducido en el terreno, se vuelve a remontar el tubo otros 20 ó 30 cm y así hasta el final. El diámetro del tubo puede ser uno cualquiera: por ejemplo, de 0 a 100 mm.

Este procedimiento presenta tres graves inconvenientes:

a) Las resurgencias que pueden manifestarse alrededor del tubo alcanzan el conducto de la inyección soldando a veces el tubo con el terreno.

b) La inyección de capas profundas no puede hacerse más que empalmando unos tubos con otros. Es una operación costosa y, además, el peligro de soldarse al terreno de estos tubos aumenta.

c) Cuando se da fin a la inyección no es posible reanudarla, a menos que se haga un nuevo taladro. El trabajo se lleva a ciegas.

Para sacar provecho de la simplicidad de este método, eliminando todo riesgo de soldadura de los tubos, se le mejoró de la manera siguiente:

Como primer procedimiento utilizable para la inyección de rellenos poco profundos se emplean unas lanzas de inyección que se introducen en el terreno con un mazo o martillo.

Estas lanzas suelen estar constituidas por una punta cónica y dos manguitos que limitan el tramo que se inyecta y que a su vez están unidos a un tubo de diámetro más pequeño que el suyo, que va provisto en su parte inferior de unas ranuras destinadas a dejar pasar el mortero (fig. 3.9).

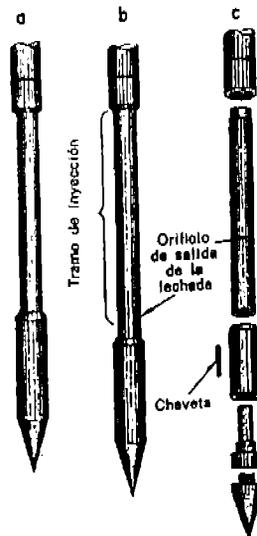


Fig.3.9. Lanza de inyección para pequeñas profundidades.

Durante el proceso de hincar en el terreno, las ranuras se protegen por el manguito inferior, que se descubren antes de la inyección empujando el manguito con una varilla que se introduce en el tubo. Una chaveta o pasador permite su recuperación posterior. Gracias a la cavidad existente entre los dos manguitos, la inyección se hace con facilidad.

Un segundo procedimiento está inspirado en la utilización de tubos con manguitos, que describiremos más adelante.

Cuando el taladro alcanza la profundidad deseada, se introduce un tubo de igual diámetro en toda su longitud de superficie exterior lisa y provista de una

válvula en la base. Después de retirar la columna de revestimiento provisional del taladro, se vierte un mortero análogo al que se utiliza para el anclaje de los tubos con manguitos. La válvula de la base del tubo impide que el mortero ascienda por su interior. Después de su fraguado, el mortero forma alrededor del tubo un cinturón de revestimiento más o menos rígido que se solidariza con el terreno (fig. 3.10).

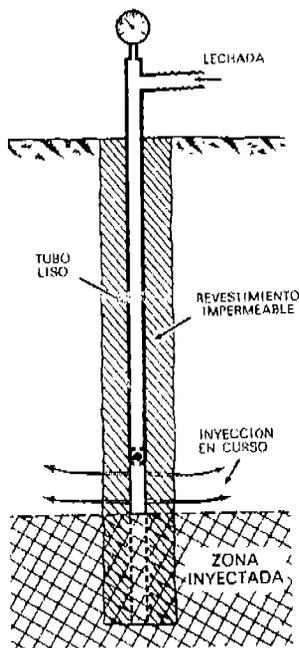


Fig. 3.10. Inyección de abajo arriba partiendo de un tubo incrustado en el taladro.

Para proceder a la inyección basta con acoplar el tubo al aparato inyector y levantarlo progresivamente. Para que esto sea posible, es necesario que el cinturón mencionado pueda romperse con la presión del mortero y que su composición no le dé una adherencia demasiado grande al tubo que impida la salida del mortero a lo largo del mismo.

Los morteros de este recubrimiento tienen unas características parecidas a las que se utilizan en el anclaje de tubos con manguitos. Pero solamente la experiencia directa permite precisar su composición óptima.

Este procedimiento es sencillo en extremo, pero no conviene en todos los casos. Frecuentemente se prefieren los tubos con manguitos que describimos a continuación.

3.2.3 INYECCIÓN CON LOS TUBOS CON MANGUITOS.

El tubo con manguitos, utilizado y patentado por la Sociedad SOLÉTANCHE, constituye la evolución normal y lógica del vulgar tubo de revestimiento de taladro que se volaba con explosivos a la altura del medio a inyectar.

Este viejo sistema fue sustituido por el empleo de perforadoras con explosivos o con balas, utilizadas por los técnicos dedicados a la investigación petrolífera. Pero a pesar de ese perfeccionamiento es un método violento que no tiene la flexibilidad del procedimiento seguido con los tubos de manguitos.

Veamos en qué consiste este último:

Después de haber limpiado el entubado provisional de la perforación, se introduce en toda su profundidad un tubo de 50 a 60 mm de diámetro aproximado, perforado a distancias iguales (fig. 3.11). Estos agujeros suelen estar hechos en grupos de tres por cada metro de longitud. Cada grupo está recubierto por un trozo de tubo o casquillo de caucho que actúa como válvula y que se denomina manguito. De esta manera, el mortero de la inyección puede salir del tubo, pero no entrar en él.

Mientras se procede al alzamiento del tubo provisional del taladro, se rellena un espacio anular comprendido entre éste y el tubo de manguitos, con una mezcla de cemento-arcilla. Una vez fraguado este mortero, constituye un recubrimiento no tan espeso que facilite la adherencia del tubo con manguitos al terreno.

Para que la inyección pueda realizarse, tiene que romperse el recubrimiento plástico en la parte que corresponde a los manguitos.

Esta operación se hace con una inyección de agua o de mortero a presión, localizada en el tramo de tubo con manguitos determinado por dos obturadores opuestos.

Las presiones de rotura pueden ser o muy bajas o muy elevadas: desde unos kilos por centímetro cuadrado hasta 60 ó más kg/cm^2 . A veces no se puede conseguir romper el recubrimiento. Esas presiones de rotura dependen del estado en que se encuentren las paredes del taladro; de la composición del mortero de recubrimiento o de la elasticidad del terreno.

Un desprendimiento en el taladro al proceder al alzado del tubo puede dar un espesor al recubrimiento que haga difícil su rotura.

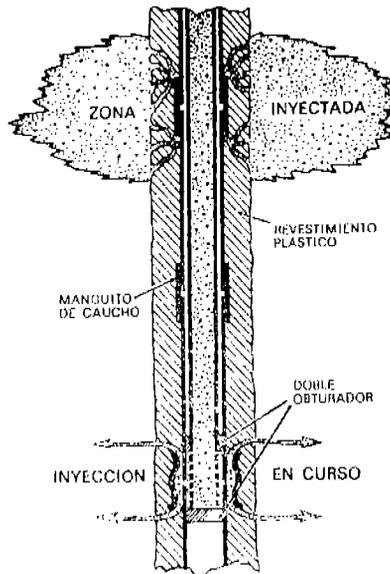


Fig. 3.11. Inyección con un tubo de manguitos.

Lo mismo sucederá con un recubrimiento normal si se emplea una dosificación de cemento muy elevada. Pero si ésta es insuficiente, el recubrimiento será demasiado plástico y no se romperá frágilmente. Todo lo más, hará que se desprenda del tubo, favoreciendo la aparición de resurgencias a lo largo de éste e incluso expulsando el mortero hasta la superficie.

Un manguito adherido normalmente al macizo no funciona si no se tiene la precaución de aumentar la elasticidad natural del mismo recubriendo el manguito con una gruesa placa de caucho esponjoso.

La composición del mortero de recubrimiento es, pues, de determinación delicada. Solamente algunos de los ensayos basados en la experiencia anterior y realizados con los materiales disponibles permiten obtener un resultado satisfactorio.

La presión de rotura nos da una indicación sobre la presión de inyección. Aunque siempre inferior, ésta es sensiblemente proporcional. Sin embargo, para una misma presión de rotura y recubrimiento de idéntica composición en un terreno determinado, la presión de inyección decrece a medida que la edad del recubrimiento aumenta.

Podría pensarse que, puesto que el recubrimiento endurece con el tiempo, la constancia de la presión de rotura se debe a una menor resistencia del terreno. Parece normal que la presión de inyección sea más baja.

Estas comprobaciones nos llevan a suponer que el terreno se rompe también, porque de otro modo la presión de inyección por impregnación, función de la permeabilidad de los aluviones, sería independiente de la presión de rotura del recubrimiento. En efecto, cuidadosas observaciones han demostrado que la rotura se realizaba claramente dos veces. La primera corresponde a la rotura del recubrimiento y la segunda a la rotura del terreno. Sin embargo, es posible que no sea siempre así y que las roturas del recubrimiento sean únicamente seguidas de una impregnación del terreno.

La inyección de los morteros se hace exactamente siguiendo el mismo proceso que el que ha servido para romper el recubrimiento. Cuando está detenido el doble obturador a la altura de un manguito, se envía el mortero de inyección con el inyector.

Gracias a este dispositivo es posible inyectar fácilmente capas muy profundas y separar los trabajos de perforación de los de inyección, lo que constituye una ventaja económica importante. Además, la inyección puede comenzarse por donde se quiera. Suele tener interés comenzar por los medios más permeables. Una vez obturados éstos, los morteros que se inyecten en las capas próximas de granulometría más fina no podrán aprovechar los niveles permeables para progresar hacia delante. Desgraciadamente, se trata de un proceso delicado y costoso que, por estas razones, no se utiliza jamás en la práctica.

Por el contrario, si el reconocimiento previo ha comprobado la existencia de capas de granulometría claramente diferente, con este procedimiento es fácil adaptar el mortero a la granulometría de la capa que se quiere inyectar. Por ejemplo, se podrá inyectar un mortero de arcilla-cemento en las formaciones más gruesas y gel de sílice en las arenas finas que no pueden inyectarse con arcilla-cemento.

En resumen, este método permite realizar una inyección correcta y relativamente económica a gran profundidad, por ejemplo 100 m, y además volver sobre cualquier punto de la pantalla para finalizar una impermeabilización que fuera insuficiente o estuviera sin terminar.

Conviene, sin embargo, recordar que la inyección provoca deformaciones en el terreno extremadamente importantes. Si los tubos con manguitos no son de buena calidad pueden destruirse al inyectar en los taladros próximos. Siendo capaces de conservar íntegra su sección, deben ser igualmente flexibles para adaptarse a las deformaciones del terreno. Estas deformaciones pueden incluso llegar a ser de tal magnitud que al arquearse el tubo impidan la colocación del obturador.

A pesar de que tengan que perderse en el terreno estos tubos, que además tienen que ser de buena calidad, y a ún necesitando una reparación importante para su utilización (perforación del tubo y colocación de los manguitos), este método de inyección no es más costoso que los otros, porque permite separar

perfectamente los trabajos de perforación y de inyección. La buena organización de cada uno de estos trabajos proporciona un aumento del rendimiento que, en definitiva, compensa bastante del precio de los tubos que se pierden. Por otra parte, este método es el único que permite garantizar la calidad del trabajo. Podemos asegurar que las mejores realizaciones en trabajos de inyección de aluviones se han conseguido con este procedimiento.

3.2.4. INYECCIÓN DE ARRIBA ABAJO.

La inyección de arriba abajo no se practica más que cuando se taladra a rotación. Se comienza por empotrar, a la entrada del taladro, un tubo provisto de un prensaestopa, a través del cual pasan los tubos, que tienen un diámetro sensiblemente igual al del aparato extractor de testigos (fig. 3.12). Después de haber perforado en una cierta profundidad, se inyecta por tales conductos un mortero conveniente, remontándolos progresivamente a medida que vaya terminándose de inyectar. Estos tubos desempeñan la función de tubo provisional en la inyección de abajo arriba.

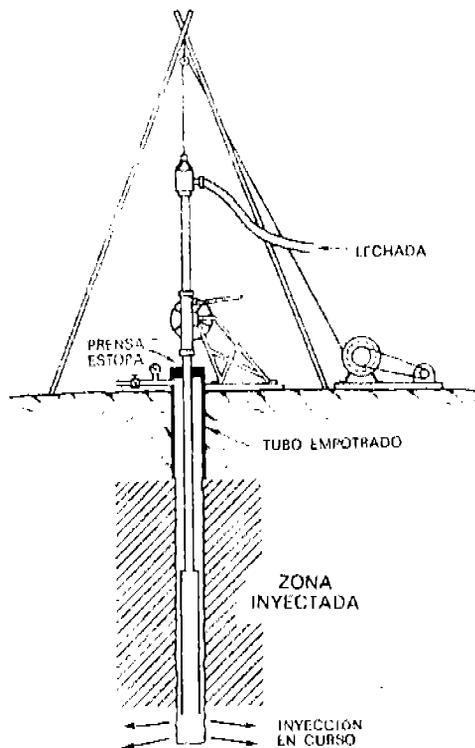


Fig. 3.12. Inyección de arriba abajo.

Para que esta operación sea posible, es necesario, naturalmente, que la corona impida la formación de testigos en el seno del tubo. Esto se logra fácilmente en los aluviones.

Puede modificarse este método reemplazando el fluido de circulación por un mortero de inyección, impidiendo todo retorno del mortero, cerrando el vano solidario del tubo prensaestopa, incrustado a la entrada de la perforación.

Este método resulta bastante inverosímil porque el mortero que debería servir de fluido de circulación no vuelve a la superficie. Se pierde íntegramente en el terreno con todos los sedimentos del taladro.

Sin embargo, la práctica demuestra que con uno u otro procedimiento pueden inyectarse aluviones incluso a gran profundidad. Tienen gran interés cuando los aluviones contienen bloques que con frecuencia son difíciles de atravesar por percusión. Por el contrario, el control de la inyección es prácticamente imposible. No se trata de comenzar por niveles más o menos permeables ni de elegir la naturaleza del mortero para adaptada al terreno.

3.2.5 PRESIÓN DE INYECCIÓN.

La presión de inyección siempre se mide a la entrada de la perforación. Pero en la inyección de aluviones da mucha menos información que en la inyección de macizos rocosos. Esto proviene de la naturaleza del mortero que: siempre es estable.

En este caso, la presión depende únicamente:

- a) De la dimensión de los huecos del terreno.
- b) De la viscosidad y rigidez del mortero.
- c) Del caudal de inyección.
- d) De su radio de acción.

Cuando estas cantidades son constantes, la presión también lo es. Sin embargo, la experiencia nos dice que la viscosidad de un mortero de cemento-arcilla aumenta ligeramente con el tiempo. Por consiguiente, sucede lo mismo con la presión.

Además, es fácil de cometer pequeños errores de dosificación en el momento de la preparación del mortero. Como actúan rápidamente sobre la viscosidad y rigidez, la presión varía más, o menos en el curso de la inyección. El diagrama del manómetro acusa fielmente todos estos errores.

La presión de inyección es muy difícil de medir con exactitud. El funcionamiento alterno del inyector provoca vibraciones en el sistema inyector-conducción-terreno. El compresor que acciona el inyector impone también la frecuencia de llenado y vaciado del depósito de aire. Por eso, no hay más remedio

que conformarse con una presión media. Son raros los casos donde sin un dispositivo especial, sea suficientemente pequeña la amplitud de esas vibraciones para que pueda registrarse una presión sensiblemente constante.

Normalmente, las presiones son del orden de 10 a 30 kg/cm², pero esto no quiere decir que no se inyecte nunca a 5 kg/cm², por ejemplo, o que no se subirá a 80 kg/cm².

Para un terreno y mortero determinados, la presión viene fijada por el caudal, que puede fácilmente regularse. Esta regulación es cuestión de práctica. No es preciso que el caudal sea muy pequeño, para no aumentar demasiado el costo de los trabajos, ni muy grande para no elevar demasiado la presión, corriéndose el riesgo de romper el terreno o de afectar a las construcciones próximas.

3.2.6 CANTIDADES INYECTADAS Y PERMEABILIDAD FINAL.

Acabamos de ver que la inyección de un mortero estable se hace a presión constante. Si la viscosidad y rigidez del mortero conservan sensiblemente su valor en el transcurso de la inyección, se podrá inyectar sobrepasando todo límite. Es necesario limitar siempre *a priori* las cantidades inyectadas de mortero estable.

Si el terreno es homogéneo, pueden calcularse fácilmente los volúmenes a inyectar, basándonos en el índice de huecos del suelo, pero en realidad, nunca ocurre esto. Existen siempre medios más permeables que otros, gracias a los cuales el mortero progresa, en lugar de introducirse por niveles más próximos, pero menos permeables. Es en esto donde estriba la dificultad del trabajo. Solamente la práctica permite determinar las cantidades y el método de inyección más favorables.

En la hora actual, esta experiencia es muy incompleta. Se pueden realizar pantallas de una permeabilidad media comprendida entre 0,1 y 1 unidad Darcy (10^{-6} a 10^{-5} m/s).

Una décima de unidad Darcy constituye el límite inferior de las impermeabilizaciones posibles por inyección. Para alcanzar este límite se han utilizado varios tipos de morteros de inyección y no se ha dudado en aproximar al máximo los taladros.

A veces, es inútil esta impermeabilización. La economía de un proyecto puede ser mayor con una permeabilidad de 10 unidades Darcy (10^{-4} m/s), por ejemplo, sin necesidad de tener que llegar a impermeabilizar hasta 0,1 unidad Darcy. Desgraciadamente, no se sabe detener a tiempo una marcha errónea. Es más fácil llegar al límite señalado de antemano que quedarse cortos.

Para obtener esas impermeabilizaciones parciales, la primera idea que acude a la mente es hacer una regla de tres con las cantidades inyectadas o a lo sumo con

la separación de los taladros. Un ensayo así se realizó en una pantalla estanca y el resultado fue lamentable.

Esto puede concebirse fácilmente. Efectivamente, como consecuencia de la heterogeneidad de los aluviones, es necesario establecer varias correlaciones entre las cantidades inyectadas, la permeabilidad final y las diferentes reparticiones que puedan existir entre las capas de espesor y de permeabilidad inicial conocidas. Como la obtención de este último punto necesita de reconocimientos extremadamente amplios, que casi nunca se realizan, podemos asegurar que este método de inyección no se pondrá en práctica durante mucho tiempo.

Otro método que debería permitir llegar a ese resultado podría estar basado en el control de los resultados, durante el transcurso de los trabajos. Ese sería probablemente el método más sencillo si los controles fueran fácilmente realizables. Veremos más adelante que los controles más serios son los que se realizan cuando han terminado los trabajos y entonces es demasiado tarde. En este aspecto tampoco existe una gran esperanza.

Por el contrario, abstenerse de fijar *a priori* la permeabilidad final trae consigo conformarse con la impermeabilización exclusiva de las capas de fuerte permeabilidad. La permeabilidad final es entonces la de las capas que tienen una permeabilidad claramente inferior a la de las capas inyectadas. Un reconocimiento bien llevado debe permitir determinar de antemano esta permeabilidad e informar si es suficiente para la economía del proyecto.

Para terminar, recordemos que, efectivamente, pueden limitarse automáticamente las cantidades inyectadas acelerando el fraguado de los morteros, pero entonces se trabaja a ciegas, porque según sea la permeabilidad de las capas y la presión de inyección, el mortero progresa más o menos en su marcha. La aceleración del fraguado no debe ser adoptada más que en casos muy especiales como, por ejemplo, en la obturación de resurgencias o en circulaciones de agua importantes que puedan deslavar los morteros de fraguado lento. En la inyección normal hay que evitarlos.

3.3 CONTROL DE LAS INYECCIONES.

El control de los trabajos efectuados por inyección es, sin ninguna duda, uno de los más difíciles de efectuar.

El único método seguro consiste en dar fin a los trabajos y esperar a ver qué pasa. Pero procediendo así, hacemos un control *a posteriori* que con frecuencia impide cualquier refuerzo eventual. Sucede así, por ejemplo, en la ejecución por inyección de aluviones, de un rastrillo para una presa de tierra. La ausencia de galerías impide mejorar el tratamiento que debe conseguirse en una única fase.

Para evitar este mayor inconveniente se ha intentado poner a punto numerosos métodos de control en el curso de los trabajos. Desgraciadamente, la experiencia confirma que esos métodos no permiten calcular con mucha precisión la permeabilidad media de las pantallas inyectadas. Estos métodos solamente están destinados a asegurar que las reglas de ejecución son respetadas. Existen numerosos métodos. Unos convienen en determinados casos y otros no.

Para poder establecer estos casos con precisión es necesario distinguir las inyecciones que se hacen por impregnación de las que se destinan a romper la estructura previa. Esta distinción es muy compleja, porque nunca se presenta la impregnación separadamente de los agrietamientos, sino un conjunto de los dos con predominio de uno u otro fenómeno.

3.3.1 INYECCIONES POR IMPREGNACIÓN.

La inyección por impregnación es la que corresponde a la inyección de un macizo fisurado. Las fisuras son obturadas por impregnación del mortero y si se producen ciertos agrietamientos, también quedan rellenos por él.

Ocurre lo mismo con las arenas y gravas cuando se adapta la naturaleza del mortero de inyección a su permeabilidad. Es un método muy costoso, pero el mortero rellena todos los huecos intersticiales y los posibles agrietamientos no hacen más que completar una inyección de por sí satisfactoria.

Dicho de otro modo, con la inyección por impregnación quedan rellenos todos los huecos del terreno. Para controlar la inyección, basta con asegurarse de que el mortero ha penetrado en su totalidad o de que la permeabilidad en diferentes puntos del medio inyectado es suficientemente débil. Esto es relativamente fácil.

Pueden ser suficientes los ensayos de agua realizados en los taladros de inyección. Así es como se controla la inyección de un macizo fisurado. Se puede operar de la misma forma con los aluviones de estructura abierta, inyectados con morteros económicos, pero generalmente el reconocimiento no se lleva tan lejos como para poder afirmar que no existen más que estas estructuras.

Como consecuencia de la heterogeneidad de los aluviones existen siempre niveles que no son impregnados por el mortero. Si esos niveles constituyen un pequeño porcentaje del total, el método de los ensayos de agua es satisfactorio, si no es así, es defectuoso, porque la estanqueidad debe conseguirse entonces por roturas de suelo.

3.3.2 INYECCIONES POR ROTURAS.

Una inyección que no origine más que grietas no existe. Hay siempre niveles que terminan por estar bien impregnados por el mortero de inyección, pero no son los más numerosos, y a menos que se haga uso, como acabamos de ver, de los

morteros de impregnación, frecuentemente muy caros, la inyección no rellena todos los huecos. Comprime las capas y las tabica con sus grietas.

Después de la inyección, nos hallamos ante un medio heterogéneo en el que los controles locales son deficientes, pero que un control global, realizado al final de los trabajos, nos lo muestra satisfactorio.

Aún haciendo muchos ensayos no se puede determinar la calidad del conjunto hallando la media de sus elementos constitutivos. Basta con un solo surco de inyección bien dispuesto para que la pantalla desempeñe su misión, mientras que los ensayos puntuales no podrán dar ni un solo resultado satisfactorio.

Naturalmente, se trata aquí de un caso extremo, puesto que existen siempre niveles bien impregnados. Un ensayo de agua en esas capas dará buenos resultados, pero inmediatamente más arriba o más abajo ya no será lo mismo.

Veamos un caso real típico. Un primer taladro de inyección da en 23 m de profundidad una permeabilidad de 10 unidades Darcy e 0,1 unidades Darcy a 28,50 m. Un segundo taladro colocado a 2 m del primero permite obtener una unidad Darcy a 23 m y 30 unidades Darcy a 28,50 m. La heterogeneidad del tratamiento es claramente manifiesta y, sin embargo, la pantalla tiene una permeabilidad media de unas 0,4 unidades Darcy, valor deducido de los caudales de a gotamiento de la excavación protegida por esta pantalla de inyección. Este valor medio es muy satisfactorio, contrariamente a lo que podían hacer creer los ensayos puntuales.

Como puede verse, este procedimiento de inyección, que es generalmente el utilizado en todos los macizos aluvionares cuando se les quiere tratar con morteros económicos, es particularmente incontrolable durante la inyección. Más exactamente, no se puede calcular la evolución que va experimentando la impermeabilidad. Todo lo que puede hacerse es realizar observaciones indirectas; que permitan aligerar o fortalecer la inyección en función de la experiencia que se tenga de estos trabajos.

Algunas de estas observaciones son verdaderos controles del tratamiento. Estos controles cuestan a veces muy caros y como las conclusiones que se obtienen no son absolutas se utilizan muy poco. Conviene saber sin embargo cómo se hacen y lo que se puede obtener de ellos.

3.3.3 MEDIOS LOCALES DE CONTROL.

No consideraremos aquí más que los medios de control que nos proporcionen indicaciones sobre la marcha de los trabajos. Se trata pues, únicamente de medios de control no destructivos. Los controles destructivos, como por ejemplo, la ejecución de una excavación en la zona inyectada serán examinados en el capítulo siguiente.

Estos controles se realizan a partir de los taladros de inyección del mortero inyectado de una combinación de ambos o desde la superficie del medio tratado.

Por ello están basados en:

- a) la velocidad de perforación de los taladros.
- b) los ensayos de agua.
- c) los morteros diferenciados por colorantes o huellas radiactivas.
- d) la resistividad eléctrica.
- e) la deformación del medio.

3.3.3.1 Velocidad de perforación de los taladros.

Se trata de una observación típica de la inyección de aluviones, porque en un macizo rocoso la inyección de fisuras no modifica la velocidad de avance en un taladro. Por el contrario puede comprobarse en los aluviones que la ejecución de un taladro situado entre otros ya inyectados no se hace tan fácil como en terreno virgen.

La disminución de velocidad de la perforación es debida a la impregnación de ciertas capas por un mortero que ha fraguado o al aumento de compactidad del terreno como consecuencia de grietas inyectadas. La velocidad de avance disminuye también al atravesar niveles de arenas finas no impregnadas de mortero sino simplemente comprimidas por la inyección inmediata.

Se trata pues de una observación únicamente cualitativa que no da ninguna indicación sobre la calidad del tratamiento. Nos informa simplemente de que la inyección ya efectuada ha producido cierto efecto sobre el terreno. Para ampliar más este estudio es necesario efectuar ensayos de agua o intentar descubrir los morteros de inyección entre el material extraído de la perforación.

3.3.3.2 Ensayos de agua.

Ya se ha precisado anteriormente el campo de aplicación de los ensayos de agua. Cuando se trata de inyecciones de agua según el método LEFRANC es necesario evitar presiones muy fuertes, para no correr el riesgo de romper el terreno y que el ensayo se malogre.

Es posible también que en niveles bien impregnados de mortero, la simple ejecución del taladro desgare en cierto modo el mortero de su alrededor. La medida en que esto sucede no se puede conocer con precisión, para poder establecer un coeficiente que pudiera aplicarse al ensayo, por lo tanto, éste no es representativo y el control resulta defectuoso.

Para evitar este inconveniente se han probado tubos con manguitos para realizar estos ensayos. Puede asegurarse que este método ejerce poderosa

atracción entre los especialistas en inyección, hasta el punto de que se utiliza en cada nuevo trabajo, y, sin embargo, se sabe desde hace mucho tiempo que no aporta nada nuevo. Ni en terreno virgen, es posible establecer una correlación seria entre los ensayos LEFRANC y los ensayos con manguitos. Este mal resultado proviene, sin ninguna duda, de la gran variedad de pérdidas de carga debidas al recubrimiento. Para eliminarlas sería preciso medir la presión en el exterior del recubrimiento y esto jamás se ha hecho y no parece fácilmente realizable.

Como no es posible realizar una gran cantidad de ensayos LEFRANC en un mismo taladro atravesando niveles sucesivamente impregnados y simplemente agrietados, puede tener interés equipar como pozo filtrante una parte de ese taladro de inyección. La parte agujereada de este equipo debe prolongarse hasta la superficie por un tubo soldado al terreno.

El resultado del ensayo, que puede hacerse por inyección o por bombeo, según los casos, da una permeabilidad más cercana a la realidad que la media de algunos ensayos puntuales. Pero aún no se trata más que de una permeabilidad local. Para tener una idea de la permeabilidad media de la pantalla es necesario realizar un gran número de esos ensayos.

Como puede verse, el precio de estos ensayos y la complejidad de los mismos no aconsejan su utilización más que para determinar la calidad de un trabajo ya terminado. No pueden utilizarse sistemáticamente para controlar el avance de los trabajos que se están efectuando.

3.3.3.3 Coloración de los morteros.

Aunque los morteros tengan generalmente un color diferente del terreno, esta diferencia no es suficiente como para que permita descubrir fácilmente las fisuras finas inyectadas, que pueden hallarse en la muestra de un macizo rocoso o en las paredes de una excavación. Además, para que estos testigos no sean dislocados por las vibraciones de la maquinaria o para evitar su atascamiento en el tubo que lo aloja, es necesario que el mortero presente una fuerte resistencia después del fraguado. Por esto solamente, los fuertes espesores de cemento pueden ser observados en los testigos extraídos de un macizo (fig. 3.13).

Señalemos el caso particular en que se pueden extraer muestras intactas de arena fina, inyectada de gel de silicato. Éste es invisible, pero como es fuertemente básico, basta con vaporizar en el testigo una solución alcohólica de fenolfaleína, que tiende a rojo violeta en contacto con el gel, para de esta forma descubrir inmediatamente la presencia de éste.



Fig. 3.13. Testigos de un macizo rocoso muy fisurado e inyectado. El cemento que rellena las fisuras finas está frecuentemente dislocado por la acción del útil de perforación.

Este método puede, naturalmente, utilizarse en las paredes de una excavación. Así es como se ha estudiado la repartición de mortero en el pozo de control del Lac Noir.

En casos particulares es preciso colorear los morteros antes de su inyección para poder observados fácilmente. Se utilizan dos procedimientos: coloración en la masa o marcar el mortero con un colorante.

Los colorantes utilizados pueden ser solubles o insolubles en el agua y no producen efecto alguno en las características del mortero (CARON, 1951).

Para la *coloración en la masa*, pueden ser suficientes colorantes como la fluoresceína, eosina, rodamina, etc. Además de su coloración, esos productos son fluorescentes y se puede reparar en ellos durante la noche iluminándolos con una luz ultravioleta. Es lo que hizo P. LÉVEQUE (1957) para el control del gran ensayo de l'Oum er-R'bia. Estos colorantes, diferentemente absorbidos por los granos gruesos y finos del mortero, han permitido seguir incluso la separación de fases de éste.

Se pueden también utilizar polvos minerales coloreados, a base de óxido férrico (rojo o anaranjado), sales de cromo (verdes) o sales de cobre (azules). Las sales de cromo y las sales de cobre permiten, además, una investigación química como la de comprobar que los cationes Cr y Cu no se encuentran normalmente en el terreno.

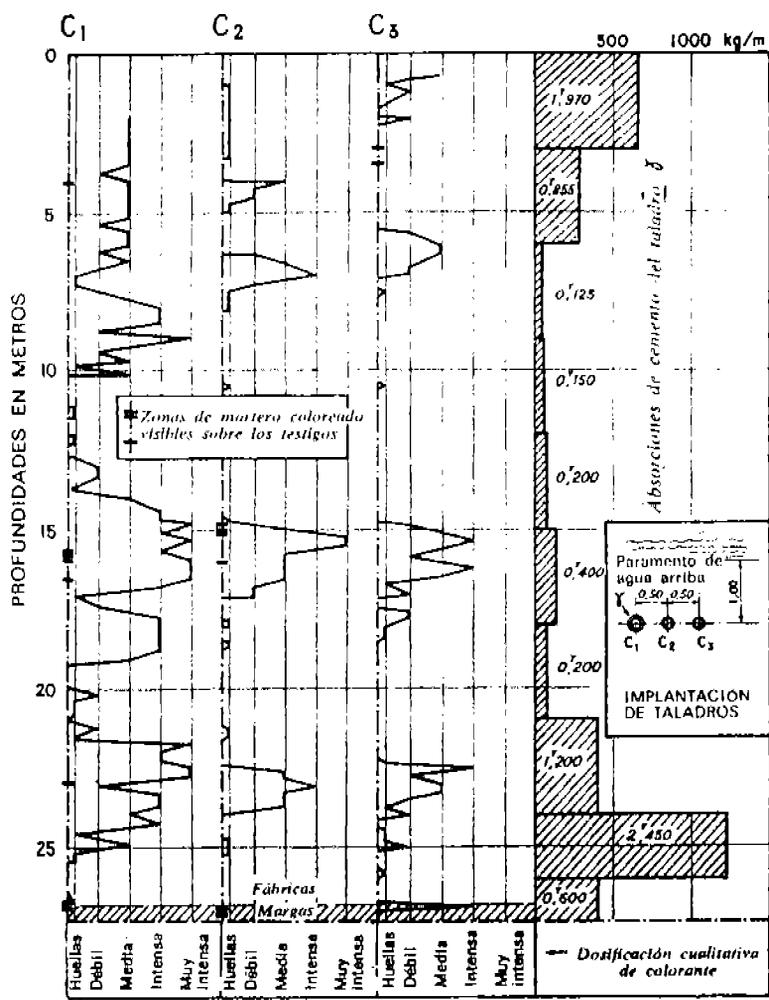


Fig. 3.14. Señales realizadas en el concreto de una presa por coloración del mortero inyectado.

Estos colorantes no son siempre muy claros. Acabamos de ver que es necesario activar algunos con una luz ultravioleta y esto no siempre es posible. El color de los polvos minerales es también muy atenuado. Puede tener interés en este caso utilizar un colorante que llame poderosamente la atención, aunque exija una pequeña manipulación, siempre que ésta no sea muy complicada. Es el caso de las sales de cobre o de cromo y de algún otro colorante.

Llegamos así al *marcado del mortero* con un colorante que conviene perfectamente para el reconocimiento del mortero entre los sedimentos de

perforación de un taladro de inyección. La presencia del mortero es reconocida sin pasar por los testigos. Puede incluso prescindirse de éstos como en la perforación de aluviones.

La coloración total del mortero no es, pues, indispensable. Es suficiente con que el colorante pueda ser descubierto fácilmente. La alizarina, que es un colorante quinónico utilizado en los tintes, permite ese resultado, pero hay que utilizarlo con una concentración relativamente fuerte. Por eso vale más hacer uso de los organoles que pueden descubrirse en dosis muy pequeñas. Estos colorantes son rojos, verdes y amarillos.

Los organoles insolubles en el agua son solubles en ciertos disolventes orgánicos como la tricloretilina o la bencina. Pueden descubrirse con facilidad entre los sedimentos de la perforación. En casos extremos llegan a detectarse 10 mg de cemento por litro de pasta de sedimentos.

Si se deseara podría hacerse con estos colorantes medidas cuantitativas aproximadas. Empezaron a hacerse en un ensayo de inyección de cemento con el hormigón de la presa de Grosbois (fig. 3.14).

El resultado de este ensayo indicó que el número de pasos de mortero visibles en el testigo era muy reducido en relación con las zonas donde el mortero penetró efectivamente. Los otros pasos fueron destruidos por el taladro. La observación de los testigos es, por tanto, insuficiente para determinar el efecto de una inyección.

Es interesante hacer notar que las cantidades de mortero descubiertas dadas al colorante no tienen nada que ver con las cantidades absorbidas.

Así vemos que en 15 m de profundidad, zona de absorción relativamente pequeña, se destacan numerosos pasos de mortero y esto sucede hasta menos de 1 m del taladro de inyección, mientras que a 25 m, a pesar de la fuerte absorción, solamente fue observado uno. Corresponde, sin duda, a una fisura importante en que el mortero pudo penetrar más.

3.3.3.4 Trazadores reactivos.

En lugar de utilizar un colorante, puede marcarse el mortero con un trazador radiactivo. Éste no debe modificar las características del mortero, debe ser fácilmente detectable y tener un período relativamente corto: unas semanas, por ejemplo. Será líquido para un mortero líquido en el sentido propio de la palabra y eventualmente de polvo fino para una suspensión.

Para descubrirle se utilizará un contador Geiger que se descenderá por la perforación. Podemos, entonces hacer lo mismo que con un colorante, el determinar las zonas inyectadas después de terminada la inyección.

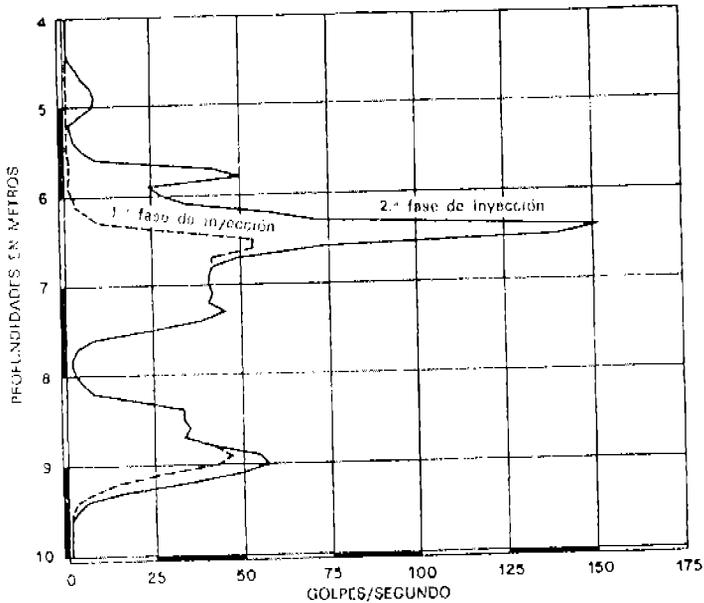


Fig. 3.15. Señales o marcas realizadas con un trazador radiactivo en el mortero inyectado en aluviones.

Pero se puede también seguir la progresión del mortero que se está inyectando, soldando en el terreno un tubo metálico por el cual se hace descender el contador.

Así lo hizo la Sociedad SOLÉTANCHE con el concurso del Comisariado de Energía Atómica. La (fig. 3.15), muestra claramente la distribución del mortero. Es interesante observar que ciertos niveles han sido bien impregnados y otros no tanto.

Aunque sea muy práctico este procedimiento, no es perfecto, porque es suficiente que una pequeña cantidad de mortero radiactivo esté en contacto con el tubo de control para que el contador funcione. Cuando la inyección se prosigue, el contador da poco más o menos las mismas indicaciones. Puede, por lo tanto, estimarse que se trata de un control cualitativo.

3.3.3.5 Medida de la resistividad eléctrica.

Se sabe que la resistividad eléctrica ρ de un macizo poroso, cuando las partículas sólidas están aisladas y los huecos están rellenos de un fluido de resistividad ρ_0 viene dada por la relación (CAMBEFORT, 1955)

$$\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right)^{0,9} = \frac{1,56}{e} \dots\dots(\text{ec. 8})$$

siendo e el índice de huecos (relación entre el volumen de huecos y el volumen sólido). Esta relación ha sido verificada para valores de e comprendidos entre 0,06 y 5,7.

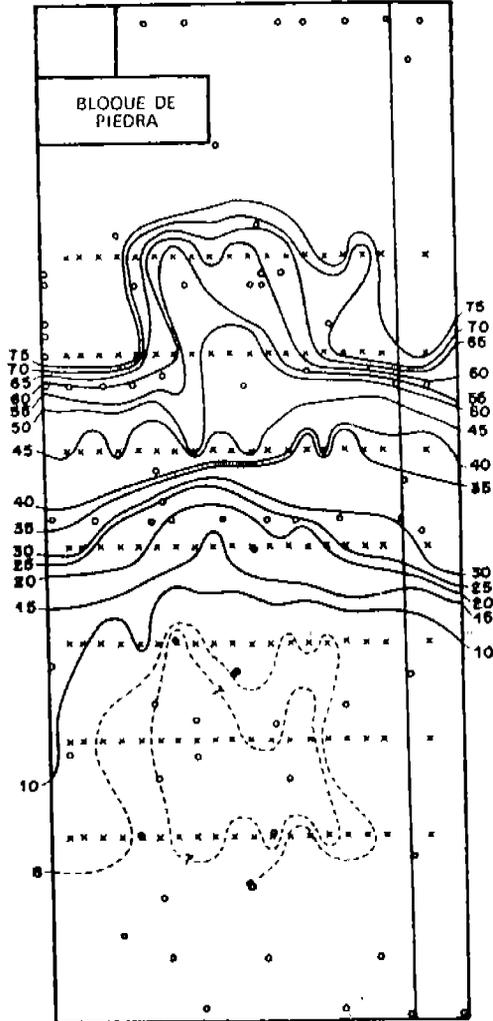


Fig. 3.16. Control eléctrico de la progresión de un mortero de inyección en la regeneración del concreto.

Teniendo el mortero de inyección una resistividad natural y eventualmente artificial, diferente de la del agua de los poros del terreno se comprende que las medidas eléctricas permitan detectar su presencia.

Igualmente que para la prospección eléctrica, son posibles dos clases de medidas, unas partiendo de la superficie del terreno y otras de una perforación (sondeos eléctricos).

SOLÉTANCHE ha realizado medidas de superficie en el caso de una pantalla de estanqueidad realizada en aluviones, no llegando hasta la superficie del terreno, que es lo que corresponde a un caso normal. Las medidas realizadas en el terreno fueron repetidas en la cubeta de analogías eléctricas para que dieran la clave de su interpretación.

Si es cierto que la inyección modifica la resistividad del terreno y que se puede seguir en cierta medida la progresión del mortero; no es menos cierto que es imposible interpretar los resultados con suficiente precisión para indicar, por ejemplo, las zonas de la pantalla en las que el mortero utilizado ha penetrado deficientemente. En un caso como éste, el procedimiento no merece la pena recordarlo.

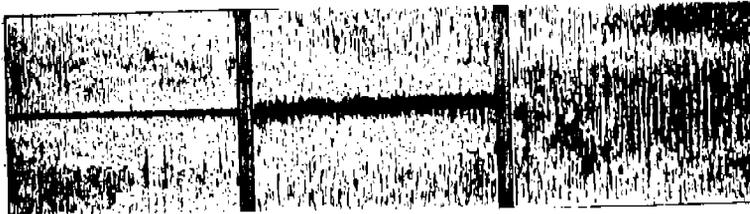


Fig. 3.17. Utilización de los campos magnéticos para reconocimiento de fisuras en el acero. A la izquierda la fisura llega hasta la superficie y hacia la derecha profundiza cada vez más.

Por el contrario, si se trata de un volumen inyectado limitado, que llega hasta la superficie, puede dar útiles indicaciones sobre la distribución del mortero. Es lo que ha hecho V. FRITSCH (1956), para el control de la regeneración del hormigón de un pilar (fig. 3.16).

Un ejemplo de la incapacidad del método para descubrir las modificaciones profundas nos es dado por el control magnético de las fisuras del acero. En la (figura 3.17), se comprueba en efecto que las líneas de fuerza del campo eléctrico no dan una gran cosa, cuando la fisura no llega hasta la superficie. No es nada de extraño que el reconocimiento de una zona más conductora que el medio que la rodea sea todavía más difícil.

Las medidas en un taladro son poco más o menos tan deficientes como las medidas en superficie. La (fig. 3.18), muestra el resultado de una prospección eléctrica efectuada entre cada fase de inyección.

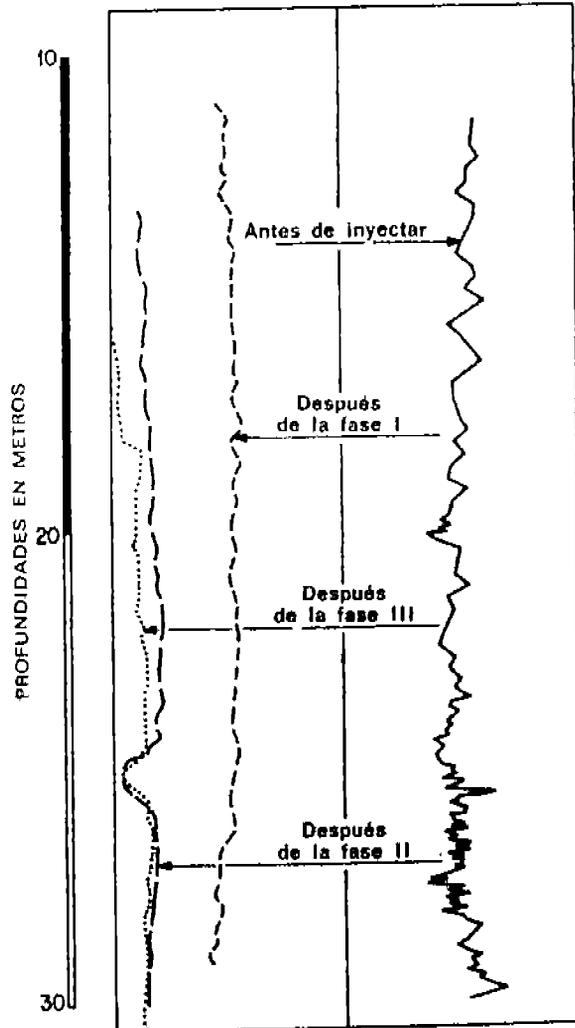


Fig. 3.18. Disminución de la resistividad del suelo a medida que se practica la inyección.

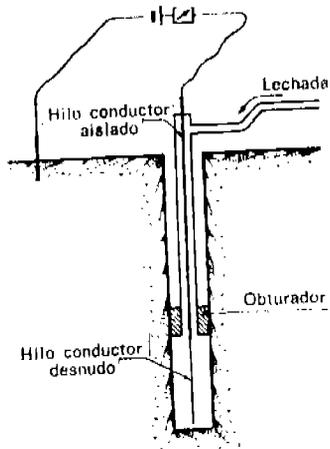


Fig. 3.19. Dispositivo para control eléctrico durante la inyección.

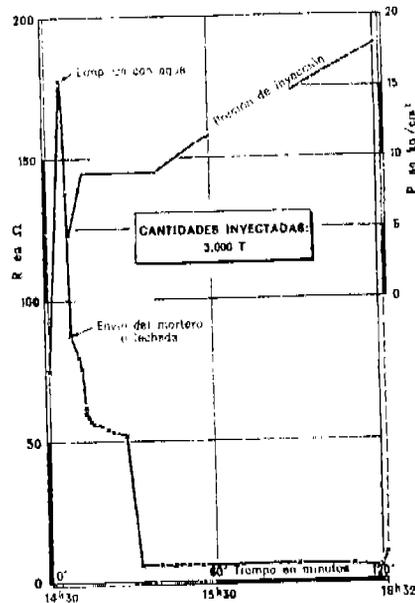


Fig. 3.20. Disminución muy rápida de las resistencias eléctricas medidas en un taladro de inyección con un mortero inestable.

Se trata de una arena fina inyectada con gel de silicato. Todo lo que puede decirse es que el mortero ha impregnado bien toda la zona y que la tercera fase de inyección no aportó una gran mejora, por lo menos aparente.

Para vencer estos inconvenientes *a posteriori*, V. FRITSCH tuvo la idea de realizar medidas en el transcurso de la inyección.

El método es de fácil aplicación en el macizo. Como consecuencia de la gran longitud del tramo inyectado, en relación con su sección, fue necesario prever un conductor eléctrico a todo lo largo de este tramo (fig. 3.19). Si no se toma esta precaución, las medidas estarían falseadas. Contrariamente a lo que pudiera creerse, el mortero no es bastante conductor como para poder suprimir este hilo

La resistencia eléctrica disminuye muy rápidamente al comienzo de la inyección; después conserva un valor prácticamente constante (fig. 3.20).

Se observa, además, en la inyección de un mortero inestable que la resistividad inicial medida en un tramo antes de su inyección disminuye a medida que avanza la construcción de la pantalla (fig. 3.21).

Si pensamos que los taladros de inyección están separados solamente unos metros y que el volumen de agua necesaria para el transporte de cemento es muy grande, puede suponerse que en las proximidades de la pantalla el agua del manto acuífero es reemplazada por el agua del mortero mucho más conductora. Se creerá que el terreno ha sido inyectado desde taladros alejados, pero no ha sido así.

Estos dos fenómenos, disminución rápida de la resistencia eléctrica al comienzo de la inyección de un tramo y disminución progresiva de las resistencias iniciales a medida de la progresión de la pantalla, son suficientes para no tener en cuenta este método de control.

Conviene, sin embargo, comprobar por el cálculo estas observaciones hechas en el trabajo. Es lo que ha hecho R. CHADEISSON para algunos casos sencillos. La (figura 3.22), resume esos resultados. Se puede observar en ella que:

a) El decrecimiento de las resistencias en función de las cantidades de mortero inyectado tiene el mismo aspecto y es casi el mismo para un macizo que presente un índice de huecos conocido, que para el constituido por una infinidad de fisuras delgadas (curva 1), o por cuatro fisuras planas del mismo espesor (curva 2).

b) Si los huecos están constituidos por agujeros cilíndricos, el aspecto de las curvas 3 (paso privilegiado del mortero), y 1 (macizo infinitamente fisurado), es claramente diferente.

c) Si el agua de imbibición del terreno se transforma en conductora, esta diferencia desaparece (curvas 4 y 5).

d) En este último caso, la resistencia se estabiliza para una cantidad muy pequeña de mortero inyectado.

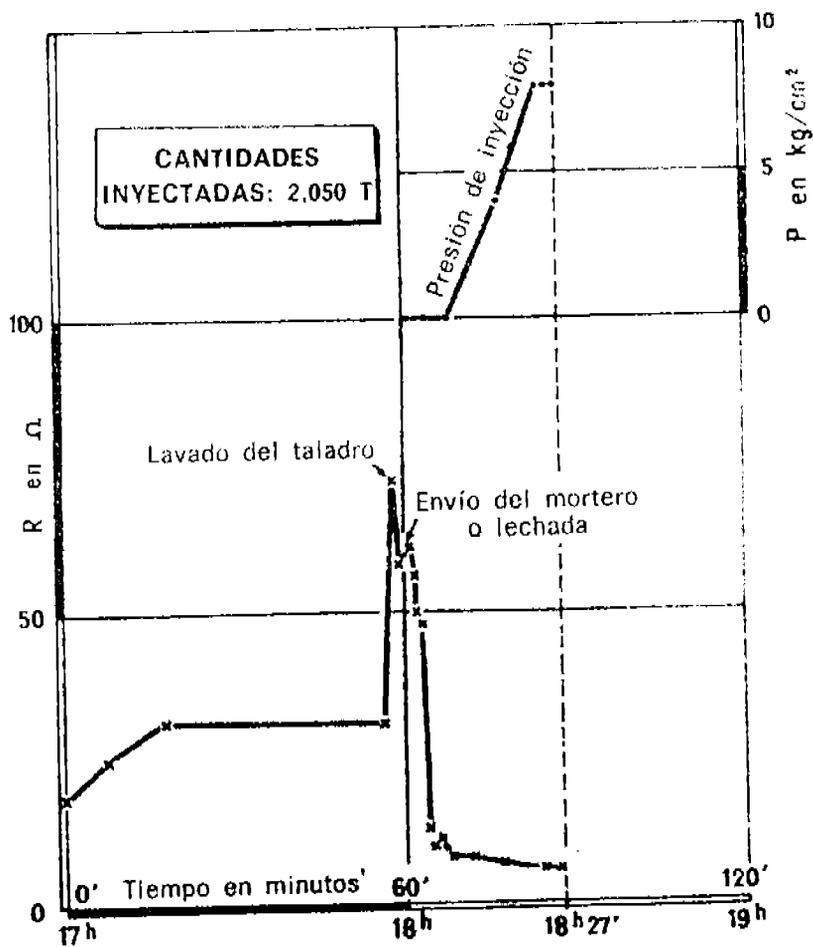


Fig. 3.21. Control eléctrico de las inyecciones de un taladro situado al otro lado del anterior (figura 3.19). Obsérvese la disminución de la resistencia inicial (20 a 30 ohms en lugar de 75).

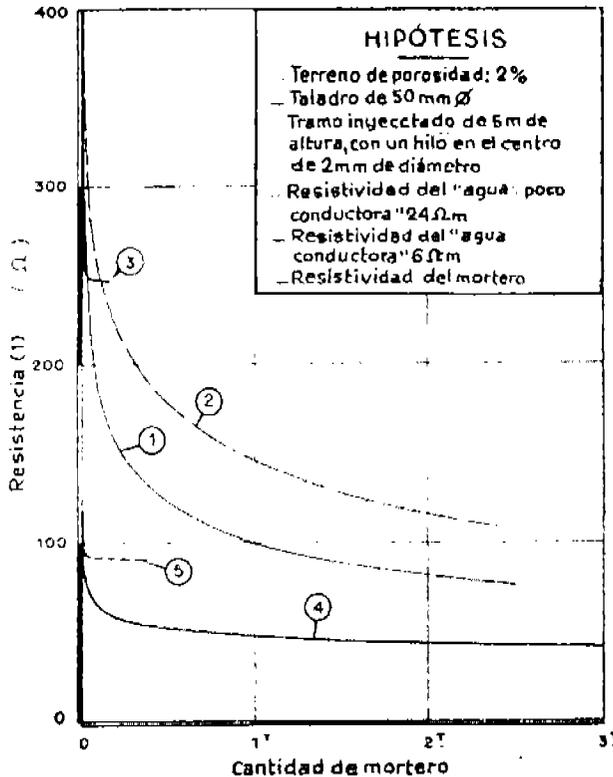


Fig. 3.22. Evolución teórica de la resistencia eléctrica del suelo según diversas hipótesis:

- Curva 1. Macizo rocoso infinitamente fisurado, embebido de agua poco conductora.
- Curva 2. Cuatro fisuras horizontales de 1 cm. de espesor rellenas de agua poco conductora.
- Curva 3. Agujeros de 50 mm de diámetro rellenos de agua poco conductora.
- Curva 4. Macizo infinitamente fisurado, embebido de agua conductora.
- Curva 5. Tres agujeros de 50 mm de diámetro rellenos de agua conductora.

a) El decrecimiento de las resistencias en función de las cantidades de mortero inyectado tiene el mismo aspecto y es casi el mismo para un macizo que presente un índice de huecos conocido, que para el constituido por una infinidad de fisuras delgadas (curva 1), o por cuatro fisuras planas del mismo espesor (curva 2).

b) Si los huecos están constituidos por agujeros cilíndricos, el aspecto de las curvas 3 (paso privilegiado del mortero), y 1 (macizo infinitamente fisurado), es claramente diferente.

c) Si el agua de imbibición del terreno se transforma en conductora, esta diferencia desaparece (curvas 4 y 5).

d) En este último caso, la resistencia se estabiliza para una cantidad muy pequeña de mortero inyectado.

Como es poco frecuente que la inyección de una fisura se haga simétricamente alrededor de un taladro, porque existen siempre direcciones más o menos privilegiadas, puede estimarse que la teoría confirma perfectamente las observaciones.

Es suficiente que el mortero penetre en una pequeña distancia alrededor del taladro para que la resistividad medida alcance un valor sensiblemente constante. Dicho de otra forma el radio de acción de la medida eléctrica es muy pequeño en relación con el radio de acción de la inyección.

Han sido realizados también con poco éxito ensayos análogos en la inyección de aluviones. Es, pues, cierto que esas medidas no son de ninguna utilidad para realizar un control serio. Todo lo más pueden servir para calcular el índice de poros existente alrededor del taladro.

3.3.3.6 Indicadores de movimientos.

Es sabido que la inyección no puede hacerse de otro modo que deformando el medio inyectado. Por sí mismas, esas deformaciones no son peligrosas; pero es necesario que no sean demasiado grandes cuando afectan a construcciones próximas. Para limitadas se utilizan aparatos llamados indicadores de movimientos, dispuestos en los lugares que se quiere observar.

Merced a un contacto eléctrico, esos indicadores encienden una lámpara eléctrica y accionan un claxon cuando la deformación límite es alcanzada.

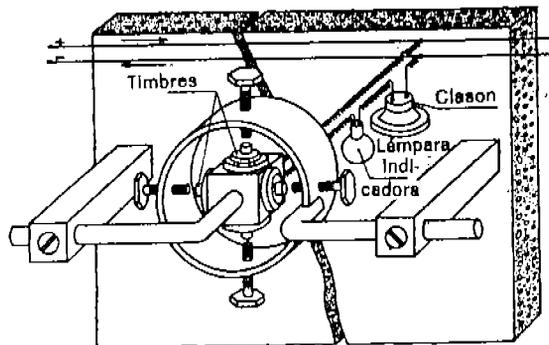


Fig. 3.23. Control de la apertura de una fisura.

Es necesario que se pueda regular fácilmente la separación de los contactos con el fin de poder determinar en el curso de un ensayo preliminar, la magnitud de las deformaciones peligrosas. La separación que se decida debe ser ligeramente inferior al límite obtenido, con objeto de no reducir demasiado las presiones de inyección, por el consiguiente peligro de hacer imposible la penetración del mortero.

Existen actualmente en el comercio excelentes contactos que simultáneamente abren un circuito eléctrico y cierran otro, pero pueden construirse indicadores de movimientos que funcionan muy bien, con simples timbres que se les sustituye con más o menos frecuencia. Las (figuras 3.23, 3.24 y 3.25), muestran algunos ejemplos.

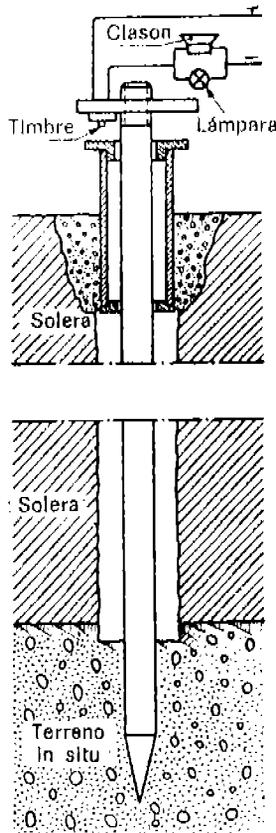


Fig. 3.24. Control del levantamiento del suelo.

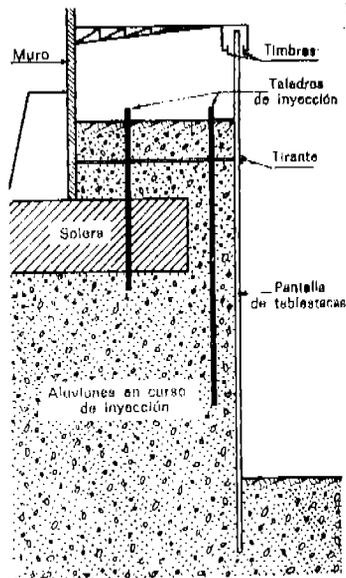


Fig. 3.25. Control de los movimientos de una cortina de tablestacas, detrás de la cual se inyecta.

Pueden clasificarse en esta categoría de aparatos las simples bornas de nivelación que permiten seguir, en terreno aluvionar, el efecto de la inyección. Lo mismo ocurre con las indicaciones en profundidad que precisan los movimientos. Con estos aparatos se puede descubrir la formación de grietas horizontales que interesa conocer y limitar siempre que sea posible.

De todos los controles que se han descubierto hasta el momento, no existe ninguno verdaderamente satisfactorio. Es, sin duda, este aspecto de la inyección uno de los más característicos.

Son muchas las personas que se dedican a introducir morteros de inyección en el terreno, pero pocas las que llegan a alcanzar resultados satisfactorios. Las que lo logran es porque conocen el oficio. La evolución de las velocidades de perforación, las variaciones en la presión, los cráteres, las resurgencias y, también, algunos ensayos de agua, son, suficientes para que se decida un cambio de naturaleza del mortero o para realizar algún taladro suplementario. Por todo esto, es por lo que la inyección es un arte. Algunas personas lo dudan, o tras no. Es probable que sean necesarios bastantes años para que el artista sea sustituido por un cerebro electrónico, en el supuesto de que esto sea posible.

Pero si son delicados los controles locales durante la ejecución de los trabajos de inyección, no sucede lo mismo con los controles globales efectuados después de los tratamientos e incluso en el curso de los mismos.

3.3.4 CONTROL GLOBAL DE LA CALIDAD DEL TRATAMIENTO.

Solamente aplicando las cargas previstas en un macizo inyectado puede verse si el tratamiento ha sido satisfactorio, aunque éste sea un control *a posteriori* no muy convincente.

Existen, sin embargo, cierta clase de trabajos en los que la carga se ejerce más o menos progresivamente durante la inyección. Sucede así, por ejemplo, en el momento de la ejecución de una pantalla de estanqueidad, situada bajo una presa, que cierra totalmente el valle aluvionar. Puede, entonces, estimarse la calidad del terreno inyectado a medida de su ejecución.

No se trata de comparar los caudales que circulan antes y después de la inyección; no se conocen ni el coeficiente medio de permeabilidad de los aluviones no inyectados, ni la sección exacta de circulación. Además, el caudal final depende del espesor de la pantalla fijado *a priori*. Para un trabajo de igual calidad, una pantalla delgada dejará pasar más agua que una pantalla de mayor espesor.

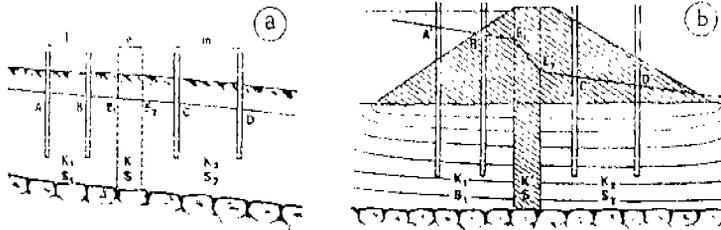


Fig. 3.26. Determinación de la calidad de una pantalla estanca:
a) Circulación en el estado inicial de los trabajos;
b) Circulación después de los trabajos.

Por el contrario, la variación de los niveles piezométricos observada en lugares convenientemente escogidos, permite valorar la calidad del trabajo.

Sea, por ejemplo, una pantalla estanca que sirve de rastrillo en una presa (fig. 3.26).

Anotemos que el caudal que atraviesa las diferentes secciones de circulación es el mismo. Antes de comenzar los trabajos, con las notaciones de la figura y designando por A, B, C , etc., la altura piezométrica, tendremos:

$$K_1 S_1 \frac{A-B}{l} = K S \frac{E_1 - E_2}{e} = K_2 S_2 \frac{C-D}{m} \dots \dots (\text{ec. } 9)$$

Después de los trabajos (fig. 3.26 b), se escribe de la misma manera:

$$K_1 S_1 \frac{A'-B'}{l} = K' S' \frac{E'_1 - E'_2}{e} = K_2 S_2 \frac{C'-D'}{m} \dots\dots(\text{ec.10})$$

Dividiendo miembro a miembro (de la ec.9), y (ec. 10), tenemos:

$$\frac{A-B}{A'-B'} = \frac{K}{K'} \frac{E_1 - E_2}{E'_1 - E'_2} = \frac{C-D}{C'-D'} \dots\dots(\text{ec. 11})$$

de donde

$$R = \frac{K}{K'} = \frac{A-B}{A'-B'} * \frac{E'_1 - E'_2}{E_1 - E_2} = \frac{C-D}{C'-D'} * \frac{E'_1 - E'_2}{E_1 - E_2} \dots\dots(\text{ec. 12})$$

Esta relación R que define el cociente de permeabilidades medias, a la altura de la pantalla, antes y después de la inyección, no puede ser más que un coeficiente de calidad, ya que no se conocen ni las permeabilidades iniciales ni finales. Cuanto más elevado es éste, mejor es el tratamiento.

Hay que hacer notar que se obtiene R con medidas piezométricas. Las permeabilidades K_1 y K_2 así como las secciones S_1 y S_2 correspondientes y S no aparecen en la fórmula y esto es correcto porque ningún reconocimiento, por completo que sea, permitirá determinar estos valores con toda la precisión deseable.

Para calcular este coeficiente R , se utilizan generalmente las medidas piezométricas C y D aguas abajo de la pantalla, que son las más fáciles de realizar. Sin embargo, la experiencia nos dice que en esta zona, la circulación de la capa acuífera queda modificada por las venas de agua que atraviesan las laderas rocosas. Para evitar esta perturbación, conviene colocar los piezómetros muy cerca de la pantalla, de manera que la distorsión debida a las aportaciones laterales tenga poca influencia. Esto permite, además, colocar las tomas de presión en una circulación paralela, indispensable para la aplicación de la (ec. 12).

A título de ejemplo, la (figura 3.27), ofrece el resultado de tales medidas. Se ve que el coeficiente R caracteriza muy bien la evolución del tratamiento.

Cuando se trata de *inyecciones de consolidación*, el control de la calidad del trabajo puede hacerse con ensayos de gato o por microsfmica.

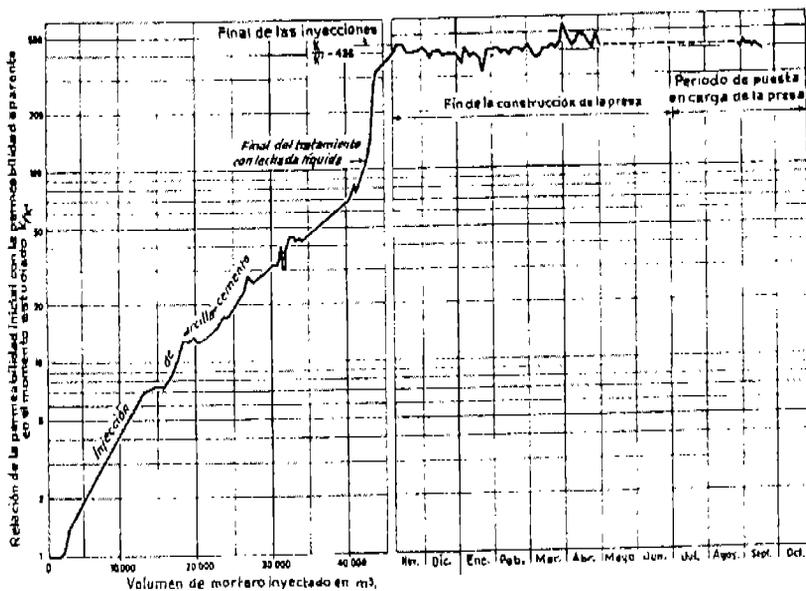


Fig. 3.27. Inyección de aluviones para la construcción del rastrillo de una presa. Evolución del tratamiento en el curso de los trabajos y después de su terminación.

Se realizan antes de las inyecciones una serie de medidas que definen el estado inicial del suelo. Casi siempre se toma como término de comparación el módulo de elasticidad, a pesar de ser muy difícil de definir.

Después del tratamiento se vuelven a hacer las mismas medidas. Los gatos deben estar en los mismos emplazamientos, los sismógrafos y las cargas explosivas de la microsísmica también.

Si esta condición es fácil de cumplir por los sismógrafos, no sucede lo mismo con los gatos.⁴ Además, los emplazamientos de éstos deben ser numerosos. No estando la superficie del terreno consolidada por inyecciones, es necesario trabajar en galería, por lo que cualquier complejidad que surja representa su no utilización, conformándose solamente con la microsísmica. Ésta es menos precisa que los gatos, pero permite obtener una visión de conjunto de la eficacia del tratamiento. Pero la experiencia demuestra que estas medidas, aparentemente muy sencillas, deben ser hechas por un especialista; si no es así; los resultados de interpretación corren el riesgo de ser poco veraces.

⁴ En el estado actual de la técnica de ensayos creemos que no son tan difíciles de cumplir las condiciones que el autor señala. Se han realizado controles con diversos tipos de gato en importantes cerradas españolas, con resultados realmente satisfactorios en lo que al estudio de las condiciones mecánicas se refiere.

La comparación hay que realizarla partiendo de las celeridades de la onda sísmica transmitida por el suelo. Se calcula el módulo de elasticidad a la vista de estas celeridades, pero debemos recordar que los resultados obtenidos no pueden considerarse como absolutos.

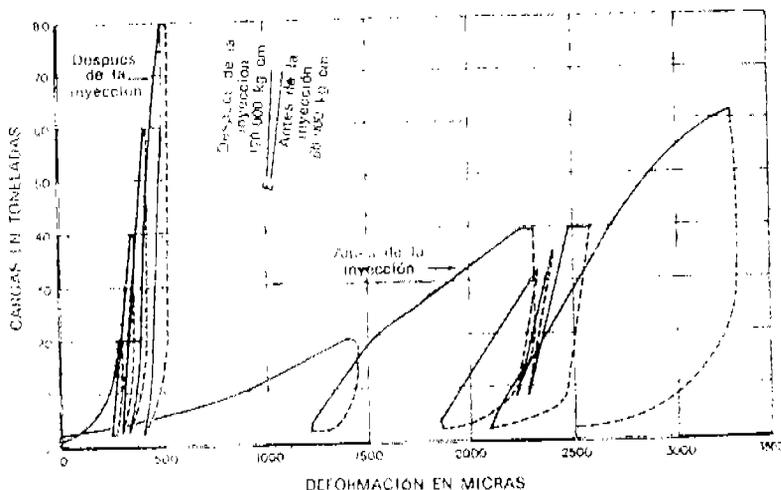


Fig. 3.28. Ensayos de gato ejecutados en una roca fisurada antes y después de la inyección. Los esfuerzos son normales al buzamiento general.

Se comprueba entonces que cuanto peor es el terreno, más eficaz es la inyección. Es relativamente fácil pasar de un módulo de 50 000 a 200 000 kg/cm^2 , mientras que es muy difícil ir de 200000 a 250000 kg/cm^2 .

De nuevo se nos presenta el mismo fenómeno que en una impermeabilización. Son los suelos de peor calidad, los más fáciles de tratar. No se puede, por tanto, cifrar la calidad del tratamiento por la relación de módulos antes y después del mismo. Hay que comparar el módulo final con el módulo de la roca sana que es un límite prácticamente imposible de alcanzar.

Estos controles nos indican que la inyección conduce a resultados sorprendentes. La (figura 3.28), no necesita comentarios. Es, sin embargo, probable que los resultados sean mejores que los indicados, porque para mantener en el gato la misma línea de acción, antes de la inyección se ha rellenado de arena la cavidad de los ensayos. Numerosas resurgencias de mortero han impedido en este emplazamiento que el tratamiento fuera más satisfactorio.

Este ensayo, realizado en galería, fue completado por medidas microsísmicas. Según los emplazamientos, éstas dieron unos módulos teóricos que oscilan de 50000 ó 60000 kg/cm^2 a 150000 kg/cm^2 y de 125 000 kg/cm^2 a 140000 ó 170000 kg/cm^2 . El valor final es prácticamente independiente del módulo inicial. En profundidad, el macizo rocoso que puede suponerse sano da unos módulos de

400000 a 500000 kg/cm². Estos valores son muy superiores a los obtenidos en una consolidación, aunque se inyecte con presiones hasta 80 kg/cm². En este caso particular existe una buena concordancia entre los resultados proporcionados por el gato y la microsísmica. No siempre es así, pero no importa mucho porque se trata de comparar los resultados obtenidos antes y después de la inyección.

CAPITULO IV

MORTEROS DE INYECCION Y MATERIAL UTILIZADO.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MORTEROS.

Los productos utilizados en inyecciones tienen como misión la obturación de fisuras, cavidades o intersticios del medio tratado con objeto de aumentar la resistencia mecánica de éste, o simplemente asegurar su estanqueidad. Es necesario, pues, que en su estado final, el producto se presente en una forma sólida, de buena resistencia mecánica o en una forma viscosa y rígida para que no pueda sufrir desplazamientos a pesar de las presiones hidrostáticas a que se verá sometido. Debe además resistir la acción de las aguas agresivas.

El mismo proceso de inyección impone de por sí un fluido poco viscoso y, sobre todo, poco rígido para facilitar su penetración. Se aumenta de esta forma el radio de acción, la duración de la inyección se reduce, el número de taladros disminuye y en fin de cuentas, el coste total de la operación se mantiene en su justo valor.

Los productos que responden a estas condiciones no son muy numerosos, sobre todo cuando se rehúsa utilizar productos caros, como determinadas resinas sintéticas que, por lo demás, se comportan perfectamente.

Desde 1827, en que BEAUDEMOULIN decidió utilizar «un mortero bastante líquido con polvo de cemento grueso y cales energicas de Oberenheim» para inyectar zanjas de drenaje, hasta principios de siglo, fue así como se concibieron las suspensiones de cemento en el agua.

Estas suspensiones de cemento presentan a la vez la ventaja y el inconveniente de no ser estables. Desde que cesa la agitación que mantiene los granos en suspensión, éstos se depositan. Estos morteros no pueden ser utilizados en cualquier tratamiento, por ello se sintió la necesidad de poner apunto las suspensiones estables y puede decirse que esta puesta al día es lo que ha dado a la inyección su extensión actual.

Resumiendo, en fisuras recorridas por violentas corrientes de agua o por el contrario, arenas extremadamente finas, ninguno de estos productos es conveniente. Entonces se decidió la utilización de productos mucho más caros, como betunes calientes, emulsiones de betún, etc., productos químicos que se comportan como verdaderos fluidos y no como suspensiones.

El inyector tiene así a su disposición una gran variedad de morteros que se obtienen haciendo variar las proporciones de algunos elementos básicos como cemento, arcilla, arena, silicato o betún, utilizados aisladamente o combinados. Todo su arte consiste en saber utilizar en el momento preciso el mortero mejor adaptado. Casi nunca un mortero único puede ser suficiente para terminar satisfactoriamente un trabajo de inyección. El conocimiento de las propiedades de estos diferentes morteros le es indispensable para orientarle en su elección. Para ello, utiliza métodos o aparatos que vamos rápidamente a pasar revista, indicando después las características de los diferentes morteros.

Determinados morteros han sido estudiados con el fin de obtener ciertas características y éstas no son forzosamente las mismas para todos ellos, aparentemente idénticos. Las exigencias de la práctica nos han llevado a estos estudios, muy lejos de una investigación sistemática. Queda mucho por hacer desde el punto de vista científico. De todas maneras, esta ignorancia no ha impedido la ejecución de magníficas realizaciones de las cuales se hablara más adelante.

4.1.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS MORTEROS.

Para obtener un mortero inyectable que una vez colocado satisfaga, es necesario entregarse a un estudio de laboratorio. De esta forma determinaremos exactamente la proporción exacta de los diversos productos que entran en la composición del mortero. Este estudio debe repetirse en cada nuevo trabajo. Por ejemplo, un simple cambio en la naturaleza del agua puede transformar completamente el comportamiento de una mezcla dada, y es necesario, entonces modificado e incluso a veces abandonado.

Este estudio está basado en un determinado número de medidas. Recordamos de memoria las medidas de resistencia a la rotura, de retracción y de permeabilidad que son perfectamente conocidas.

Solamente se pretende lograr una buena resistencia a la rotura en anclajes o en ciertas consolidaciones, pero aun en estos casos, serán suficientes valores relativamente débiles. El mortero depositado en forma de lámina delgada puede soportar esfuerzos considerables sin ser destruido. Más bien desempeña una función de cuña en las partes resistentes que de un cuerpo resistente por sí mismo.

En cuanto a los morteros de impermeabilidad su resistencia puede ser prácticamente nula, si se trata de trabajos provisionales. Una buena viscosidad es suficiente. Este es el caso de los betunes calientes enfriados en el suelo, pero para trabajos definitivos es necesaria cierta rigidez, si no se quiere que al cabo de varios años la presión del agua haya desplazado al mortero.

Las medidas de *permeabilidad* se hacen solamente para reconocimientos iniciales en un mortero. Cuando la naturaleza de éste ha sido determinada gracias a esos reconocimientos, no se realizan más. La permeabilidad es, en general, suficientemente débil para que merezca atención.

Prácticamente, ocurre lo mismo con la *retracción* porque después de ser inyectados los productos se encuentran en forma de lámina delgada, relleno de las fisuras o de masas fuertemente divididas por un esqueleto rígido, como sucede con las arenas y gravas. Si puede manifestarse la retracción del mortero, suele ser despreciable y como, además, las inyecciones están casi siempre en contacto con el agua, esta retracción no se produce. Su influencia ha sido varias veces examinada para el estudio de los morteros destinados a consolidar los anclajes.

Contrariamente, las medidas de *viscosidad*, *rigidez* y de *rezumo* son realizadas sistemáticamente en el momento del estudio de los morteros por muy poco complejos que sean. Pueden ser realizadas con los aparatos de laboratorio más avanzados o, por el contrario, con aparatos más sencillos y de más fácil manejo. Estos últimos presentan el inconveniente de no dar resultados que puedan asimilarse a magnitudes físicas, por ejemplo, no son disociadas la viscosidad y rigidez, pero se trata de un pequeño inconveniente en las inyecciones, porque la medida obtenida en el trabajo está más próxima a la realidad que la de laboratorio.

4.1.2 MEDIDA DE LA VISCOSIDAD.⁵

Para realizar estas medidas pueden utilizarse dos clases de viscosímetros:

- Viscosímetro de circulación.
- Viscosímetro de cilindros coaxiales.

El viscosímetro de cilindros coaxiales COUETIE-HATSCHEK (1932), (fig. 4.1), permite trazar por puntos la curva que da la desviación del cilindro interior en función del número de vueltas del cilindro exterior. M. PAPADAKIS (1955), perfeccionó este aparato acoplándole un registro semiautomático.

Es el único viscosímetro que permite separar la viscosidad y la rigidez de un fluido plástico, a juicio de BINGHAM. Permite, asimismo, calcular la tixotropía de un mortero (fig. 4.2).

El viscosímetro de STORMER utilizado para la medida de las características de los lodos de perforación es intermedio entre el viscosímetro de cilindros coaxiales y el viscosímetro de circulación. La medida se efectúa determinando el peso necesario para arrastrar un agitador a una velocidad de 600 revoluciones por minuto. Con este aparato pueden hacerse también medidas de rigidez.

⁵ Existen fórmulas, en particular la de Einstein, que dan la viscosidad de las suspensiones en función de su concentración. Estas fórmulas corresponden a suspensiones muy diluidas y no se adaptan a los morteros de inyección, que son, en general, suspensiones concentradas.

Los viscosímetros de circulación son simples conos calibrados. La medida se hace anotando el tiempo de circulación de un volumen de mortero dado. Como puede verse, el resultado depende, a la vez, de la viscosidad, rigidez y densidad del mortero. Pero si este método no tiene nada de físico, corresponde perfectamente a las necesidades de la práctica, porque define muy bien las posibilidades de circulación de un mortero.

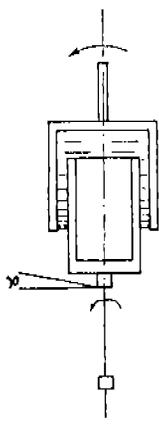


Fig. 4.1. Esquema del principio de viscosímetro de cilindros coaxiales.

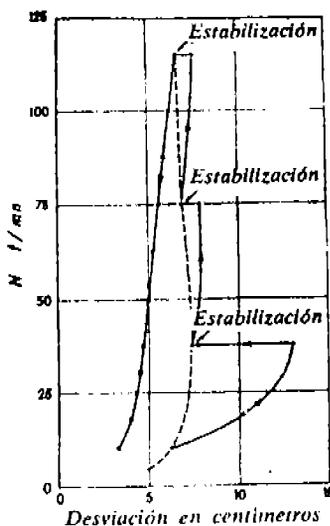


Fig. 4.2. Ejemplo de evolución tixotrópica de un cemento.

Según sea la consistencia del mortero, podrá ser utilizado uno u otro de los conos siguientes (fig. 4.3):

- a) Tipo Marsh, utilizado para los lodos de perforación. El apéndice inferior tiene 5 mm de diámetro.
- b) Tipo Mécasol, cuyo apéndice es de 8 mm.
- c) Tipo Prepakt, provisto de un apéndice de 14 mm.

La capacidad normalmente utilizada es de 1 litro ó 1,5 litros hasta el borde. Las posibilidades son buenas, pero los resultados no se corresponden directamente. C. CARON (1952) ha establecido curvas de correspondencia considerando una recta para el cono Mécasol con 1,5 litros (fig. 4.4).

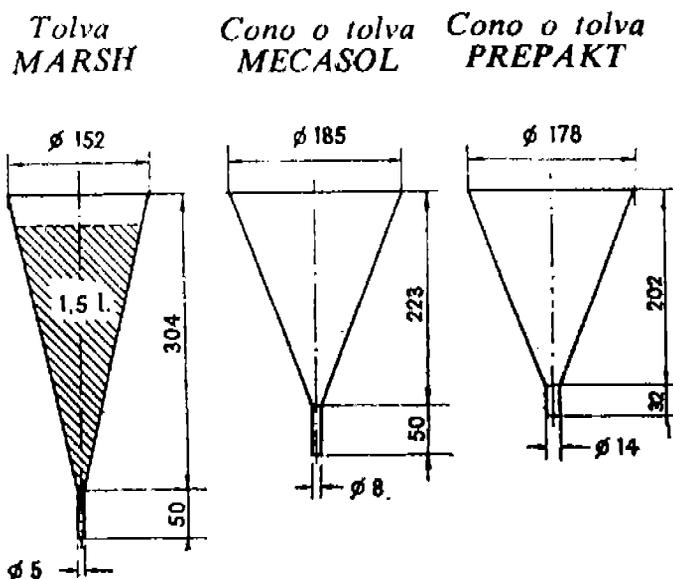


Fig. 4.3. Diferentes tipos de conos.

Es probable que esta correspondencia no convenga a todos los morteros, pero la figura da una idea de la diferencia que existe entre estos conos. Señalemos que el estado de la superficie y sobre todo la unión del cono con el apéndice inferior, tiene una gran importancia en los resultados. Por ello, debe ser siempre el mismo el utilizado en la obra, para obtener resultados comparables.

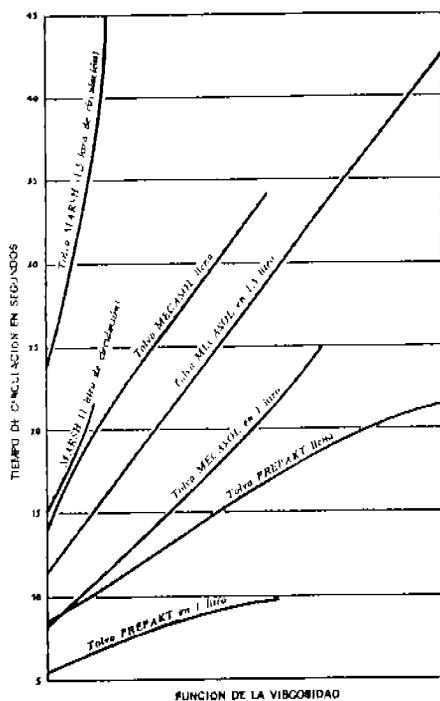


Fig. 4.4. Variación de las viscosidades según el cono utilizado.

Para calcular la *viscosidad de los morteros después del fraguado* se hace uso de los métodos reológicos cuya descripción se saldría fuera del marco de esta obra. Recordemos, sin embargo, que uno de estos métodos consiste en ejercer una compresión simple, constante, sobre una probeta y anotar las variaciones de altura de ésta en función del tiempo.

4.1.3 MEDIDA DE LA RIGIDEZ.

Acabamos de ver que el viscosímetro de cilindros coaxiales y el viscosímetro STORMER permiten en laboratorio la medida de la rigidez. Puede añadirse también el rigidímetro BOURCART-FLORENTIN-ROMANOWSKY (1948). Es también un aparato delicado y mucho más sencillo utilizando un cuerpo cilíndrico, hueco, en el que pueda medirse la profundidad de asiento o hundimiento del mortero. El resultado hace intervenir la densidad del mortero que debe conocerse con precisión.

A título de ejemplo citemos el empleo de una probeta de cristal de 1,4 cm de diámetro, con un peso de 32 gramos. Cuando el asiento de la probeta era inferior a 5 cm el mortero no podía inyectarse.

Empleando morteros para los que la probeta se hundía entre 7 y 9 cm, se pudo medir una pérdida de carga de 5 kg/cm^2 durante la circulación en un tubo de 1 pulgada de diámetro y de 100 m de longitud. En otra obra, la *inyección* de una columna de 10 cm de diámetro y de 10 m de longitud, llena de grava con granos que variaban de 10 a 30 mm, provocó una pérdida de carga de 9 kg/cm^2 con un mortero en el que el hundimiento de la probeta fue de 5 cm.

La experiencia nos dice que una lechada de inyección no es más inyectable porque su fluidez, medida en un cono Prepakt lleno, haya excedido los 16 segundos. Esto sucede solamente a ciertos cementos diluidos con una dosificación de 2/1 a 2,3/1.

Estos morteros han sido estudiados por M. PAPADAKIS (1955-1959), que ha determinado su viscosidad y su rigidez. Las figuras 4.5 y 4.6 indican que esas dos cantidades son exponenciales de la cantidad de C/A. Resulta de estas medidas que la viscosidad de una suspensión en el límite de inyectabilidad está comprendida entre 0,8 y 1,5 poises y su rigidez entre 60 y 150 dinas/cm².

El betún caliente desprovisto de rigidez, pero de una viscosidad del orden de varios poises, se inyecta con relativa facilidad. Puede, pues, deducirse que la rigidez del mortero es lo que se opone a su inyección. La teoría de la circulación de fluidos rígidos permitía preverlo. Se mejorará, por lo tanto, un mortero de inyección reduciendo sobre todo su rigidez. La medida de ésta, aunque delicada, presenta, por consiguiente, un cierto interés.

La medida de la *rigidez después del fraguado de la lechada* se hace de dos maneras diferentes:

Para grandes rigideces obtenidas con la mezcla cemento-arcilla se confeccionan probetas cúbicas o cilíndricas que se rompen con una prensa. El valor de la resistencia a compresión simple constituye una medida de rigidez. Es doble en los morteros que no tienen rozamiento interno.

Cuando la rigidez es muy pequeña, como sucede con los geles, se utiliza una pequeña caja de corte análoga a la de CASAGRANDE o, más sencillamente, un medidor de la hendidura que se produce al comienzo de la rotación rápida de la manivela y que se toma como valor de la rigidez.

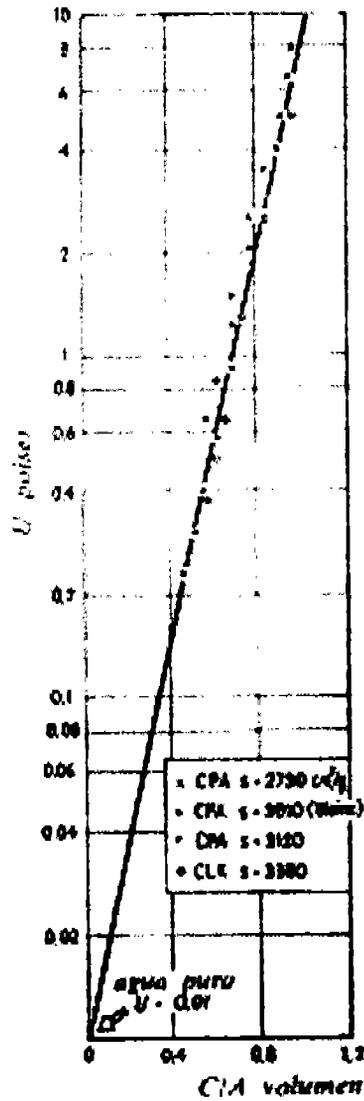


Fig. 4.5. Influencia de la concentración en la viscosidad U.

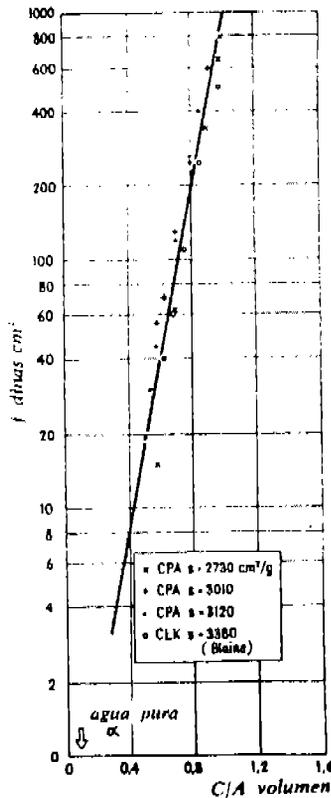


Fig. 4.6. Influencia de la concentración en el umbral de deslizamiento f .

Cuando la rigidez es muy pequeña, como sucede con los geles, se utiliza una pequeña caja de corte análoga a la de CASAGRANDE o, más sencillamente, un medidor de la hendidura que se produce al comienzo de la rotación rápida de la manivela y que se toma como valor de la rigidez.

4.1.4 MEDIDA DEL AGUA REZUMADA (O DE LA SEDIMENTACIÓN O DECANTACIÓN).

Se designa por (rezumo), a la ascensión de agua que se produce en la superficie de una suspensión, después de la sedimentación de sus partículas.

Con morteros espesos puede hacerse el ensayo llenando un recipiente cualquiera de este mortero. De vez en cuando se inclina el recipiente para eliminar el agua que sobrenada y se pesa.

Con morteros fluidos, no conviene este procedimiento porque existe el riesgo de eliminar parte del mortero con el agua. En casos como éste se llena una probeta de un litro, por ejemplo, y se anota la altura del agua decantada en un tiempo determinado. La superficie de separación agua-mortero es, generalmente, muy clara. En este ensayo, en el que no aparece el sentido físico inmediatamente, se manifiesta el influjo de la rigidez y tixotropía de la suspensión. Es considerado por algunos como una medida de la posibilidad de deslavado del mortero. Pero no es evidente en absoluto. Pastas de cemento que tienen un rezumo muy pequeño e incluso prácticamente nulo, están lejos de ser indeslavables. Al contrario, pueden confeccionarse morteros poco deslavables aunque la resudación exista. Esto es una prueba de que la técnica de inyecciones no es más que una técnica experimental.

La sedimentación como fenómeno físico es muy compleja. Las leyes que la regulan son mal conocidas. BOYCOTT (1920), estudiando la sedimentación de los glóbulos rojos de la sangre, comprobó que aquélla aumentaba con la inclinación del tubo de ensayos. KINOSITA (1949), continuando sus experiencias, descubrió que la inclinación de las paredes del recipiente tenía en ciertos casos un efecto análogo (fig. 4.7).

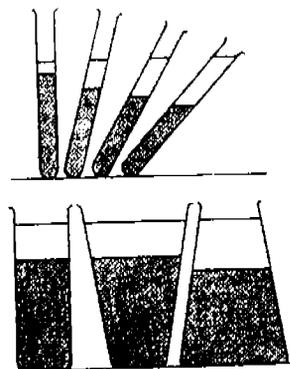


Fig. 4.7. Influencia de la inclinación del recipiente o de su forma de sedimentación de una suspensión.

El diámetro de las probetas tiene una influencia fácilmente concebible; sin embargo, es menor la de la altura del mortero. Cuando ésta aumenta, la altura libre del agua aumenta como debe, pero su porcentaje en relación con la altura inicial disminuye, cuando era de esperar se mantuviera constante (fig. 4.8). Probablemente es el aumento de la rigidez lo que provoca este fenómeno. Volveremos a tratar de ello cuando hagamos el estudio de los morteros inestables.

Es necesario operar siempre de la misma manera, utilizando solamente las clásicas probetas de un litro. Aunque después de esto las medidas de laboratorio no tuvieran nada que ver con lo que sucede efectivamente en el suelo, servirían, al menos, como medio de comparación.

4.1.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MORTEROS.

Resistencia a la compresión simple. Se determinó en especímenes colados en moldes de 5.6 cm de diámetro y 11 cm de altura; las muestras se curaron en ambiente húmedo y sumergidas en agua y se probaron a 7, 14 Y 28 días de edad. En estos ensayos se examinó la influencia de los siguientes parámetros en la resistencia de la relación agua/cemento, el contenido de cal o bentonita y los contenidos de arena y de cemento.

Deformabilidad. Estas pruebas se realizaron en el consolidómetro para suelos, con un anillo de consolidación típico de 8 cm de diámetro y 2 cm de altura; los especímenes, después de elaborados, fueron conservados en un ambiente húmedo para no alterar su proceso de curado normal y se ensayaron cuando tenían dos semanas de edad, la resistencia de los morteros era del orden del 85%, de la máxima, aplicando presiones de consolidación entre 8 y 9 kg/cm².

Los resultados de los primeros ensayos permitieron concluir que la edad de las mezclas es un factor importante que influye en los resultados obtenidos, los cuales varían en cada caso, si la misma mezcla se prueba a 7, 14 ó 28 días después de elaborada.

A partir de las curvas de deformación, presentados en escala aritmética se determina la rigidez (K_m), de las mezclas, definida como el inverso del modulo de compresibilidad volumétrica m_v :

$$K_m = \frac{1}{m_v} \dots\dots(ec. 13)$$

Estos ensayos se realizaron con finalidad de establecer una correlación entre la resistencia de los morteros (q_u), y la rigidez del mismo (K_m), definida esta ultima como el inverso del modulo de deformación volumétrica.

Elección de los morteros para inyección. El diseño de los morteros de inyección empieza con la definición de su deformabilidad, y su resistencia; el parámetro es inversamente proporcional a su rigidez

Por sus características físicas y sus propiedades mecánicas, los morteros que se recomienda utilizar en la inyección de las arcillas blandas, con la finalidad de reducir su compresibilidad, pueden ser elaboradas con cemento, cal, arena pómez y cemento, bentonita y arena pómez. Los primeros tienen ventajas sobre los segundos debido a su propiedad puzolánica que les permite aceptar mayores deformaciones sin disminuir su resistencia. En cuanto a su resistencia máxima, se alcanza a edades del orden de 6 meses que en algunos casos puede ser compatible con el objetivo de reducir la compresibilidad a largo plazo. Los morteros a base de cemento, bentonita y arena pómez adquiere su resistencia máxima a 28 días de edad.

4.1.6 INFLUENCIA DE LA SEDIMENTACIÓN.

El aumento relativo de la sedimentación, cuando la altura del mortero disminuye, es extremadamente importante en inyección, donde los huecos a rellenar tienen una altura del orden del milímetro. Se sabe que los morteros estables tienen una estabilidad muy relativa, justamente la necesaria para su inyección. Se cree que su débil decantación se debe despreciar cuando las alturas del mortero son de unos milímetros e incluso menos. Pero, como acabamos de ver, lo que se produce es lo contrario. Cuando las alturas de sedimentación son tan pequeñas, los estudios cuantitativos son prácticamente imposibles en laboratorio y hay que conformarse con los estudios cualitativos.

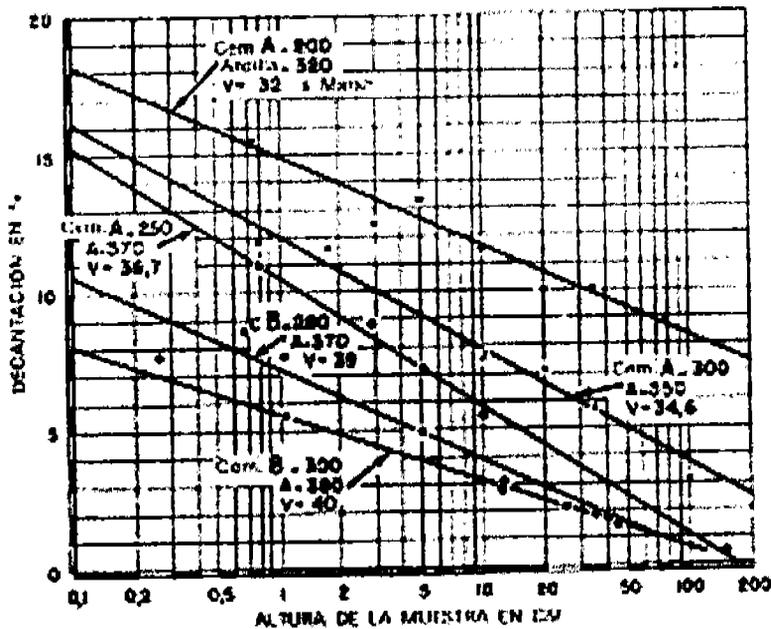


Fig. 4.8. Influencia de la altura de la muestra ensayada en la determinación de los diferentes morteros de arcilla-cemento.

La (figura 4.9), muestra el efecto de la sedimentación en un mortero cemento arcilla clásico, inyectado en bolas de cristal de 5 mm de diámetro. Las bolas han sido deliberadamente escogidas de un gran diámetro para que el fenómeno sea perfectamente observable. Se pueden ver debajo de cada bola pequeñas fisuras aisladas unas de otras y llenas de agua. El aislamiento más o menos perfecto de esos meniscos permite cierta circulación de las aguas. Es por ello por lo que la permeabilidad intrínseca del mortero después del fraguado no es suficiente para definir la del medio inyectado, pero la experiencia nos dice que, a pesar de este inconveniente, las arenas y gravas inyectadas de este modo tienen una permeabilidad residual suficientemente baja para dar entera satisfacción.

No sucede lo mismo en las fisuras horizontales del macizo, inyectadas con un mortero estable. Después de fraguado el mortero, las aberturas de las fisuras resultan sensiblemente disminuidas aunque queda siempre un paso por donde puede realizarse la circulación de agua. La importancia de ese paso depende de la inclinación de las fisuras. Si se quiere suprimirla hay que terminar la inyección con un mortero inestable o utilizar un mortero estable expansivo.

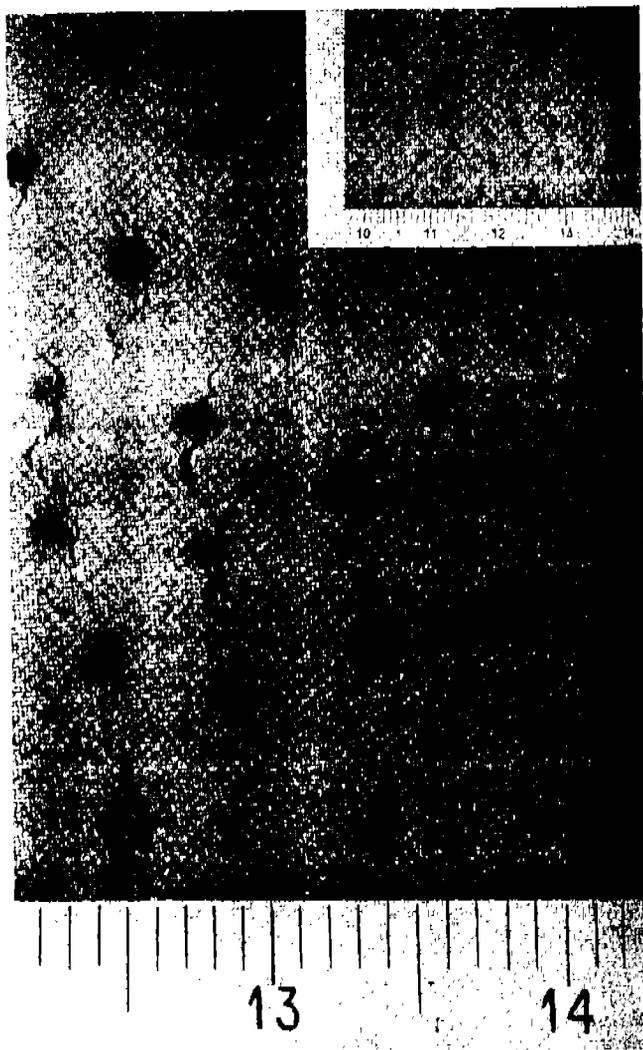


Fig. 4.9. Sedimentación de un mortero arcilla-cemento inyectado en bolas de cristal de 5 mm de diámetro. Los puntos negros son los puntos de contacto de las bolas con el cristal de la cubeta. El efecto muro amplía el fenómeno.

Esta sedimentación del mortero antes de su fraguado provoca una disminución del contenido de agua de la fase sólida y por consiguiente un aumento de su rigidez. Este fenómeno se comprueba muy bien en la inyección de los aluviones y hasta el momento ha sido explicado haciendo intervenir una aireación del mortero análoga a la de las suspensiones inestables. Si esa aireación puede producirse efectivamente en determinados casos, no puede hacerse cuando el mortero impregna niveles de gran espesor. El aumento de rigidez que se observa es debido, entonces, a la sedimentación del mortero.

Puede comprobarse en laboratorio que después del fraguado y sin aireación con eliminación exterior del agua, la rigidez del mortero inyectado en bolas de cristal es claramente superior a la del mismo mortero conservado en un tubo de ensayos.

Las numerosas medidas realizadas sobre muestras de suelo inyectado, extraídas en el momento de la ejecución de la excavación, indican que la disminución relativa del contenido de agua, o de su volumen, en el mortero antes y después del fraguado, está comprendida entre 10 y 30 %. Esto viene a decir que el coeficiente de relleno de huecos del suelo es, después del fraguado, del orden del 70 al 90 %. Esta diferencia proviene de la naturaleza del mortero y de la granulometría del terreno.

Este fenómeno, característico de las suspensiones, se aproxima a la sinéresis de los geles que en ciertos casos influyen notablemente en la resistencia a la rotura de los suelos inyectados. Puede pensarse que también depende de la superficie específica del esqueleto, pero hasta ahora no se ha sentido la necesidad de tal estudio.

4.2 MORTEROS INESTABLES.- SUSPENSIONES DE CEMENTO PURO Y REBAJADO

4.2.1 MORTEROS DE CEMENTO.

El mortero habitual de cemento es el prototipo de mortero inestable con la condición sin embargo, de que el cemento esté suficientemente diluido. El límite de la dilución es imposible de precisar porque depende de la naturaleza del cemento. Las figuras 4.10, 4.11 Y 4.12 debidas a C. BLATTER (1949), dan el valor de la decantación para 15 morteros italianos de diferentes dosificaciones. La dilución máxima de 1/3 utilizada en estos ensayos (1 kg de cemento por 3 de agua), corresponde aún a un mortero concentrado pues no es raro que se utilicen morteros de 1/10.

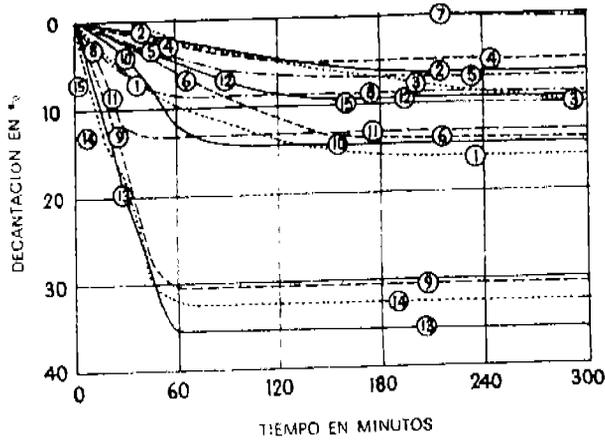


Fig. 4.10. Decantación de los diferentes morteros de inyección (C/A = 1/1. Decantación del amasado 10 minutos).

Con tal cantidad de agua puede uno preguntarse cómo se comporta el cemento y, en particular, si su fraguado y su resistencia mecánica final son normales.

La continuación de las experiencias de C. BLATIER (1949), da una respuesta a esta pregunta (fig. 4.13). Determinados cementos con dosificación de 1/1 no han fraguado nunca. Es evidente que no deben ser utilizados en inyecciones.

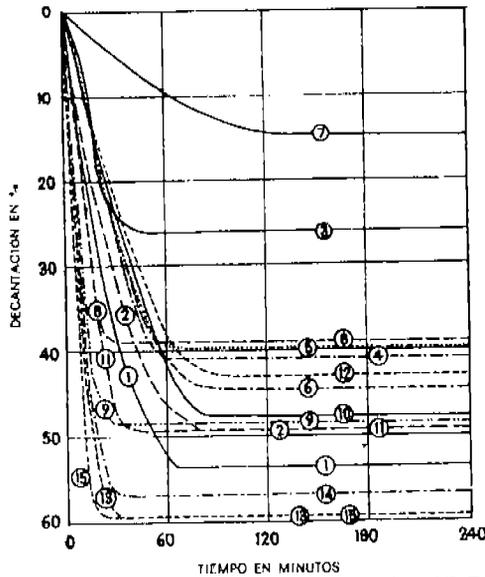


Fig. 4.11. Decantación de los diferentes morteros de inyección (C/A = 1/2. Duración del amasado, 10 minutos).

C. CARON (1953), abordó el problema en la investigación de un mortero para anclaje de cables, estudiando con la aguja Vicat la velocidad de fraguado de 18 morteros de cemento diferentes diluidos en la proporción de 1/10 y sometidos a decantación durante 24 horas sobre una altura total de 45 cm. Los resultados se dan en el (cuadro 3), que indican, igualmente, la altura del cemento decantado en porcentajes con la altura inicial del mortero; la densidad de ese sólido y su resistencia a los 15 días en probetas de altura igual al diámetro (84 mm), sumergidas en agua.

Como en otros casos, algunos cementos no fraguaron y otros lo hicieron con bastante retraso.

Las densidades estaban comprendidas entre 1,34 y 2. Si la densidad mayor corresponde a la altura decantada más pequeña (B), no sucede lo mismo con la densidad más débil (I 250/315 y K).

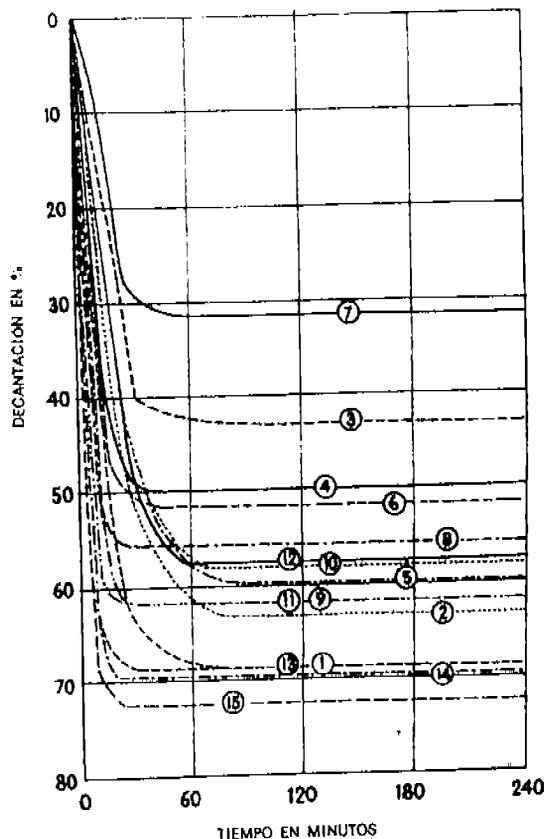


Fig. 4.12. Decantación de los diferentes morteros de inyección (C/A = 1/3. Duración del amasado, 10 minutos).

Las resistencias no tienen ninguna relación con las densidades (cuadro 4). Además, algunos cementos considerados como excelentes para el concreto (J 250/315 y L 315/400), no fraguan, mientras que otros dos cementos de la misma marca, pero menos apreciados para el concreto (J 160/250 y L 250/315), son de una notable calidad el primero, y muy aceptable el segundo. Esta circunstancia puede proceder de la finura de grano en el molido, mayor en un caso que en otro, pero tampoco es muy convincente esta razón porque el cemento A es en el momento presente y desde hace tiempo, el que tiene el grano más fino y no ha dado mala resistencia.

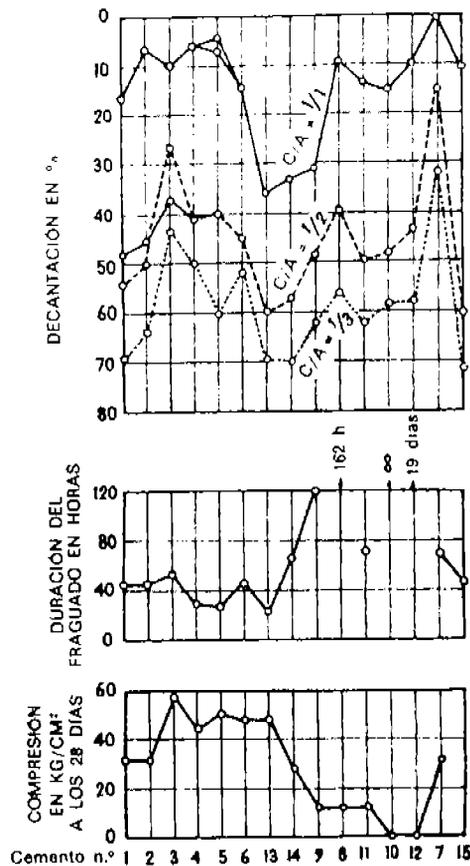


Fig. 4.13. Decantación, duración del fraguado y resistencia a la compresión de los diferentes morteros de inyección.

Pueden concebirse estas anomalías y explicadas al menos cualitativamente, considerando a la vez la velocidad de *decantación* de los granos y el aumento de rigidez de la suspensión como consecuencia del *fraguado del cemento*.

CUADRO 3

Cemento	Altura decantada %	Fraguado en un día	Densidad	Resistencia en 15 días Kg/cm ²
A	14,4	Comienzo del fraguado	1,41	4,8
B	8	Final del fraguado	2	42
C 250/315	11,1	Final del fraguado s/ ½ Comienzo del fraguado s/ ½	1,72	35
D 230/215	18,9	Comienzo del fraguado	1,36	3
E 250/315	8,9	Final del fraguado s/ 9/10 Comienzo del fraguado s/ 1/10	1,57 1,60	30 22
E 160/250	8,9	Final del fraguado s/ 9/10 Comienzo del fraguado s/ 1/10		
E 100/160	12	Final del fraguado s/ 1/4 Comienzo del fraguado s/ 3/4	1,50	15,6
F 250/315	17,8	Comienzo del fraguado	1,44	4,8
B 250/315	20	Comienzo del fraguado	1,35	2,1
G 160/250	11,1	Final del fraguado s/ ½ Final del fraguado s/ ½		20

<i>H 250/315</i>	12,2	<i>Final del fraguado s/ 9/10</i> <i>Comienzo del fraguado s/ 1/10</i>	1,52	24
<i>I 250/315</i>	15,6	<i>Comienzo del fraguado</i>	1,34	26
<i>J 250/315</i>	-	<i>No fraguó</i>	-	-
<i>J 160/250</i>	14,4	<i>Comienzo del fraguado</i>	1,41	14,5
<i>K</i>	21,6	<i>Final del fraguado s/ 9/10</i> <i>Comienzo del fraguado s/ 1/10</i>	1,57	48
<i>L 250/315</i>	8,9	<i>Final del fraguado s/ ½</i> <i>Final del fraguado s/ ½</i>	1,76	75
<i>L 315/400</i>	-	<i>No fraguó</i>	-	-
<i>M</i>	8,9	<i>Final del fraguado</i>	1,97	50

CUADRO 4

<i>Cemento</i>	<i>d</i>	<i>R, kg/cm²</i>
<i>B</i>	1,35	2,1
<i>I</i>	1,34	26
<i>L</i>	1,76	75
<i>B</i>	2	42

Si el cemento considerado tiene un molido fino y un fraguado rápido este detendrá la sedimentación. El residuo sólido será de una densidad débil. Si el cemento considerado tiene un molido fino y un fraguado rápido éste detendrá resistencia ya que, para un cemento dado ésta es proporcional a la densidad (el cuadro precedente que parece confirmar ese punto de vista corresponde a cementos de naturalezas diferentes contrariamente al caso examinado aquí).

Consideremos, por ejemplo, un mortero de cemento H 250/315 con una dosificación de 1,7/1. La (figura 4.14), nos da la evolución de la rigidez de esta suspensión en función del tiempo.

Este cemento tiene un falso fraguado muy claro, y si no se tiene la precaución de destruirlo por agitación antes de la inyección, no podrá realizarse la decantación de los granos.

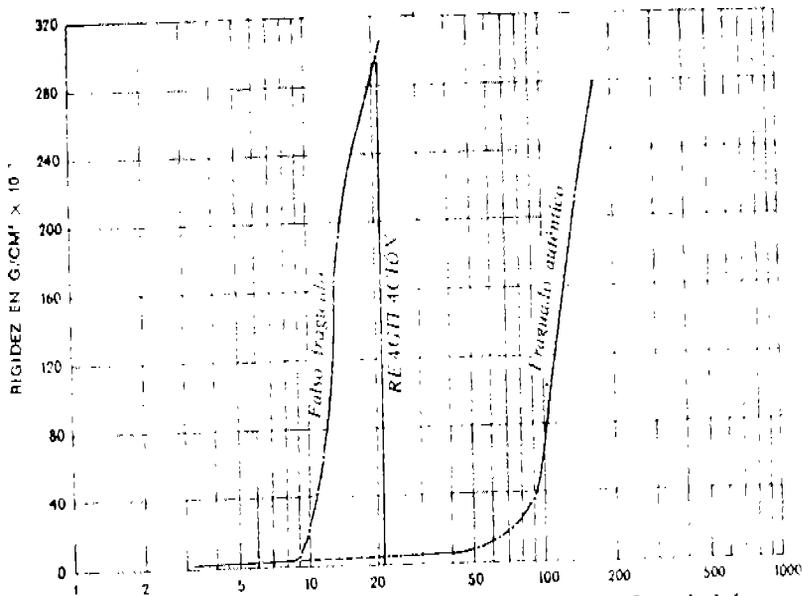


Fig. 4.14. Evolución de la rigidez de un mortero de cemento que tenga un fraguado dado (C/A = 1,7/1).

Para calcular ésta, aplicamos la relación:

$$D = \frac{50r}{3-d} \dots\dots(\text{ec. 14})$$

que nos da en milímetros el diámetro D de los granos de cemento en suspensión en un fluido de densidad d y de rigidez r (J. FLORENTIN, G. L'HÉRITTEAU, 1950).

En el caso considerado, se tiene:
 $d = 1,69$ $r = 2 \text{ g/cm}^2$ al cabo de 15 minutos,

de donde:

$$D = 76 \text{ mm.}$$

Se ve claramente que no es posible decantación alguna de cemento durante el falso fraguado.

Para mejor precisar el problema, C. CARON estudió la decantación de esos morteros partiendo de alturas de sedimentación diferentes.

El cemento utilizado es siempre el mismo, pero en este caso el mortero tiene una concentración de 1,5/1. Los resultados vienen dados en la (figura 4.15), para los tres casos siguientes:

- fraguado falso no destruido,
- fraguado falso destruido por agitación,
- adición de un producto que evite la floculación, retardando el fraguado normal y suprimiendo el fraguado falso.

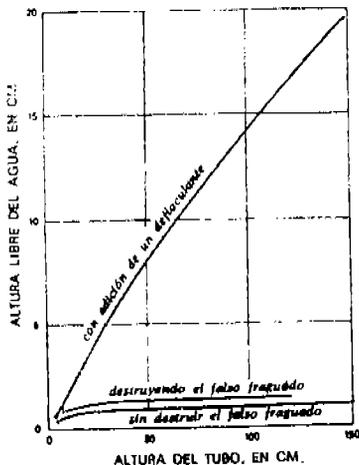


Fig. 4.15. Decantación de un mortero de inyección ($C/A = 1,5/1$), en función de la altura de sedimentación.

Es necesario este producto para que la decantación sea proporcional a la altura inicial del mortero. En la (figura 4.8), podemos ver que sin él las pérdidas de agua son proporcionales al logaritmo de la altura del tubo. Estos resultados se resumen en el (cuadro 5), donde se expresan los porcentajes de agua para tres alturas iniciales del mortero.

Estos fenómenos tienen que dar una gran dispersión de resistencia al cemento depositado. Para precisar este punto se han roto probetas extraídas después del fraguado en tubos de 150 cm de altura (mortero normal o agitado), y de 30 cm (mortero más producto desfloculador), (cuadro 6).

Contrariamente a lo que se esperaba, el mortero con el producto desfloculador es el que da los resultados más heterogéneos.

Este fenómeno se explica porque la sedimentación no está entorpecida por el fraguado del cemento, los granos más gruesos de éste se concentran debajo y los más finos encima, ya que esas dos clases de granos puede ser que no tengan la misma composición química.

CUADRO 5

Altura inicial del mortero cm	Decantación con:		
	Mortero normal %	Mortero de inyección reactivado al cabo de 15 minutos %	Mortero de inyección con producto defloculante %
5	8	16	14
50	1,7	2,6	14
500	0,3	0,4	14

CUADRO 6

Emplazamiento de las probetas	Mortero normal kg/cm ²	Mortero de inyección reactivado kg/cm ²	Mortero de inyección con producto defloculante kg/cm ²
Arriba	85	115	20
En medio	150	160	65
Abajo	200	195	200

Es posible también que la substancia defloculadora haga que el retraso en el fraguado de los granos gruesos sea diferente del de los finos.

También puede suponerse que el defloculante elegido no convenga a ese tipo de cemento. Veamos el resultado de la decantación del mortero en una proporción de 1/6 con ese mismo cemento adicionado o no del producto defloculador (volumen inicial 1 litro), (cuadro 7).

CUADRO 7

Naturaleza del mortero	Volumen del sedimento cm ²	C/A del sedimento	Velocidad de sedimentación
Preparado con el agitador	175	1,2/1	Rápida
Preparado con la mano	192	1,05/1	Lenta
Con producto fluidificante A	130	1,9/1	Muy lenta
Con producto fluidificante B	200	1/1	Rápida
Con producto fluidificante C	375	0,45/1	Muy rápida

Los morteros afectados del producto que retrasa el fraguado dan diferentes resultados unos de otros. Hemos querido subrayar estos ensayos para exponer lo complejo del problema y cómo se puede involuntariamente falsear una experiencia. Efectivamente, los defloculantes no se emplean más que para

aumentar la dosificación del cemento en el mortero, sin perjudicar su inyectabilidad.

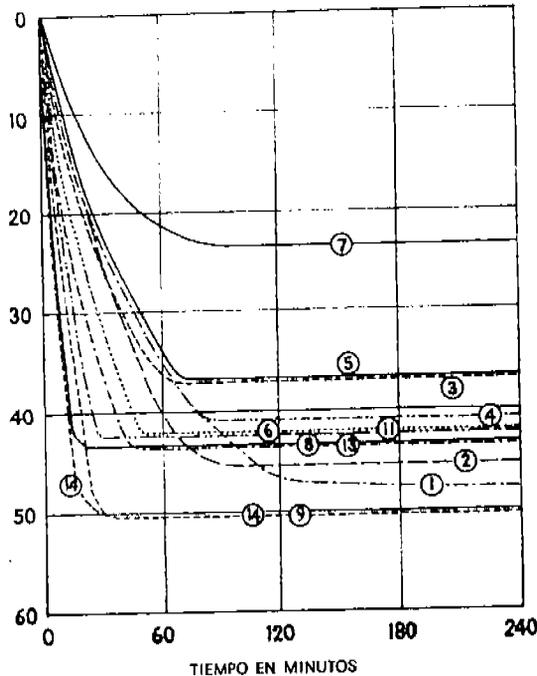


Fig. 4.16. Decantación de los diferentes morteros de inyección (C/A \approx 1/1), sometidos a una presión de corriente (compárese con la fig. 4.10).

Para terminar, diremos que solamente el fraguado del cemento puede interrumpir su sedimentación. La agitación del agua que baña el terreno inyectado puede conducir a la obtención de productos aún menos resistentes que los obtenidos durante el falso fraguado del cemento. Al mantenimiento en suspensión de los granos por la agitación hay que añadir el deslavado del mortero. El producto final tiene entonces una resistencia despreciable.

Como ejemplo señalemos el caso de un mortero de proporción 1/1 conteniendo además el 5 ó 6 % de Kieselguhr. Se tuvo en una cavidad bajo la acción de una corriente de agua, que le diluyó impidiéndole la decantación. El producto final, de densidad igual a 1,35, no presentaba ninguna resistencia mecánica. Su densidad seca era de 0,525 y en estas condiciones su resistencia a la rotura estaba comprendida entre 1 y 2 kg/cm². Se trata de una excepción, porque ese mismo mortero depositado en una cavidad próxima presentaba las características que de él se esperaban.

Por otra parte, se ha podido observar que sin la agitación del agua del terreno, un mortero inicial, dosificado en la relación 2/1 que tiene una decantación del 4 % daba un producto final dosificado en la proporción 1,5/1.

Esta característica es bastante general porque cualquiera que sea la dosificación del mortero inicial, el depósito obtenido en un simple ensayo de decantación tiene una dosificación comprendida entre 1,5/1 y 1,8/1.

Que nosotros sepamos, solamente C. BLATTER (1949), ha intentado calcular en laboratorio la influencia de la presión de corriente. Los resultados que ha obtenido son poco diferentes de los que corresponden a la sedimentación solamente. Las decantaciones son casi todas las mismas o ligeramente más fuertes que las obtenidas sin corriente (fig. 4.16), pero su presión de inyección, muy cerca de $0,5 \text{ kg/cm}^2$, es muy pequeña comparada con la que se emplea corrientemente en los trabajos, donde llega a alcanzar varias decenas de kg/cm^2 . Todavía se realizarán ensayos a tales presiones aunque no correspondan exactamente a las empleadas en el relleno de fisuras. Es sabido que el cemento se deposita en las fisuras en forma de sedimentación hidráulica y que son los descensos de presión al comprimir el terreno, los que provocan la compactación de los sedimentos. Cuanto más elevada sea la presión de inyección más fuerte será la compresión del cemento.

Por el contrario, el cemento que rellena el taladro de inyección está sometido a una fuerte presión de corriente y ésta debe tener una clara influencia en el comportamiento de ciertos cementos porque se puede comprobar con mucha frecuencia que después de la inyección de una suspensión de cemento a presiones del orden de 50 a 60 kg/cm^2 se obtienen testigos de cemento puros al repetir la perforación. Para que esos testigos no sean destruidos por la corona, es necesario que el cemento haya adquirido una resistencia no despreciable al poco tiempo de haberse puesto en obra. Existe una aceleración en el fraguado que no puede atribuirse más que a la presión.

Nunca nos permitimos inyectar cemento extremadamente diluido, pero es posible que esta dilución se facilite con presiones elevadas. Para poder precisar este punto habría que realizar ensayos sistemáticos *in situ*. Es poco probable que en laboratorio puedan reproducirse las condiciones reales de una inyección para poder responder con exactitud a esta cuestión.

Señalemos, además, un efecto inverosímil de la presión y hasta de la temperatura. Haciendo una inyección a gran profundidad con presiones del orden de 200 a 300 kg/cm^2 y temperaturas de 50 a 60°C , se encontraron en las fisuras, rellenas de cemento Portland, nichos de cristales de carbonato cálcico (fig. 4.17). No puede atribuirse a la naturaleza de las aguas del manto acuífero ni a la roca, que era de cuarcita aurífera.

Todas estas circunstancias atraen la atención sobre el efecto de la presión de inyección, que no se conoce aún muy bien, pero la experiencia confirma todos los

días que es interesante utilizar presiones lo más fuertes posible, procurando que el valor máximo no produzca desórdenes que sean incompatibles.

No se quisiera que, como consecuencia de esta exposición, se pueda pensar que la inyección de una suspensión de cemento deba siempre dar un producto que presente una fuerte resistencia mecánica; en general, ésta es siempre superabundante.

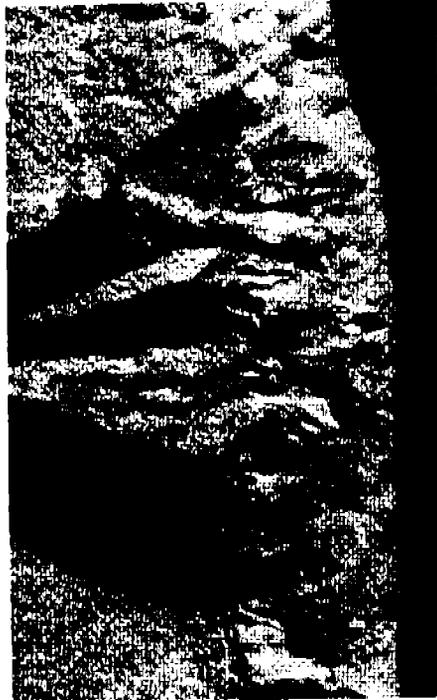


Fig. 4.17. Relleno por inyección de cemento Portland, de una fisura situada en una cuarcita aurífera ($p = 200$ a 300 kg/cm^2 , $t = 50$ a 60°C). A la izquierda, cemento; a la derecha, cristales de carbonato cálcico.

Hemos visto la justificación teórica de esta afirmación. La confirmación práctica nos la proporciona el empleo de morteros rebajados. Por el contrario, es interesante lograr morteros de fuertes resistencias finales, cuando se quiera realizar anclajes de un cable o de una barra de acero. Esta fuerte resistencia tiene únicamente por objeto suprimir cualquier deslizamiento del anclaje cuando se le someta a tensión. Si se admiten corrimientos de varios centímetros, se pueden realizar en un macizo rocoso anclajes de barras de acero tan resistentes como ellas mismas, simplemente rellenando con arena el espacio circular, comprendido entre la barra y las paredes de la perforación. Este hecho queda confirmado en numerosos ensayos efectuados por F. ROSSET y se concibe fácilmente por el acodamiento de los granos de arena entre la barra y el macizo.

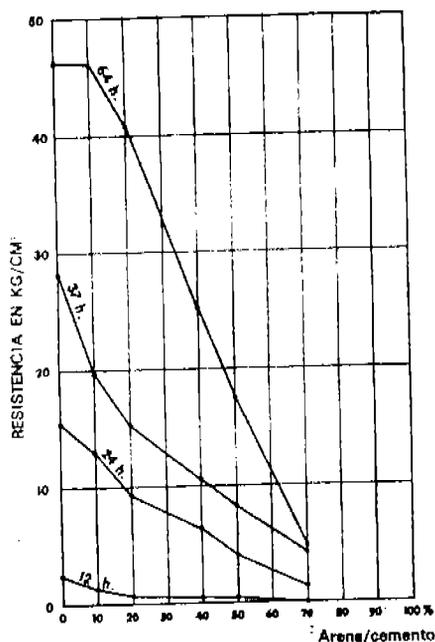


Fig. 4.18. Resistencia a la compresión de morteros de diferentes edades, con dosificación 1/1 rebajados progresivamente.

Los resultados precedentes se refieren a la investigación de un mortero de anclaje y no al estudio de un mortero de impermeabilización o consolidación para el que no se necesita una resistencia elevada. Podemos asegurar que para una inyección de este tipo, el cemento previsto puede fraguar, a pesar de su dilución. El ensayo es muy fácil de hacer y puede estimarse que un cemento diluido que tarde en fraguar más de 50 horas debe ser rechazado.

4.2.2 MORTEROS REBAJADOS.

Cuando son grandes las absorciones, puede reducirse el gasto correspondiente a los productos inyectados, reemplazando el cemento por un polvo inerte de arena fina, por ejemplo.

Esta sustitución no modifica prácticamente la inyectabilidad del mortero si la granulometría del nuevo producto es comparable con la del cemento.

No se ha hecho ningún estudio sistemático sobre los morteros rebajados, porque la experiencia nos dice que se inyectan tan fácilmente como los morteros de cemento puros. Solamente algunos ensayos de rotura han mostrado que la resistencia era muy apreciable con la utilización de harinas. La (figura 4.18), nos muestra la evolución de las resistencias en función del tiempo y en función del

porcentaje de harina de un mortero cuyos áridos (cemento y arena), tengan el mismo peso que el agua utilizada.

La resistencia decrece rápidamente cuando el porcentaje de arena aumenta. Como se ha visto, esto no es un grave inconveniente para la estanqueidad pura donde no es necesaria resistencia alguna y una lámina delgada de un producto de débil cohesión ofrece una considerable resistencia a la compresión, como consecuencia de su autozunchado.

En lugar de harinas para rebajar la calidad del mortero, puede emplearse hollín de las centrales térmicas o de Kieselguhr. Nada se opone al empleo de esos productos porque son tan finos como el cemento. Presentan, además, la ventaja de tener un efecto puzolánico. Es una ventaja no despreciable, cuando no se dispone más que de cemento Portland para la inyección en un terreno bañado por aguas agresivas.

No se puede decir lo mismo de las arenas, cuyo tamaño máximo de granos sea de 1 mm, ya que decantan con demasiada rapidez en los morteros inestables. Además, el desgaste del material de inyección, en particular de las bombas, es muy rápido. Por ello, estos morteros no se emplean casi nunca.

4.3 MORTEROS ESTABLES.- SUSPENSIONES DE ARCILLA.

4.3.1 MORTEROS INYECTABLES.

La adición de arena a un mortero de cemento estable da como resultado la obtención de un mortero inyectable.

Según el resultado que se desee, la cantidad de arena será más o menos grande y su granulometría más o menos fina. De manera general, cuanto más fuerte es la dosificación de arena, más fácilmente pueden permanecer en suspensión los granos más gruesos.

Por eso, se pueden realizar morteros que contengan granos de 5 a 8 mm de diámetro, pero estos morteros no pueden ser inyectados con cualquier bomba.

Además, se les debe reservar para la inyección de cavidades relativamente importantes.

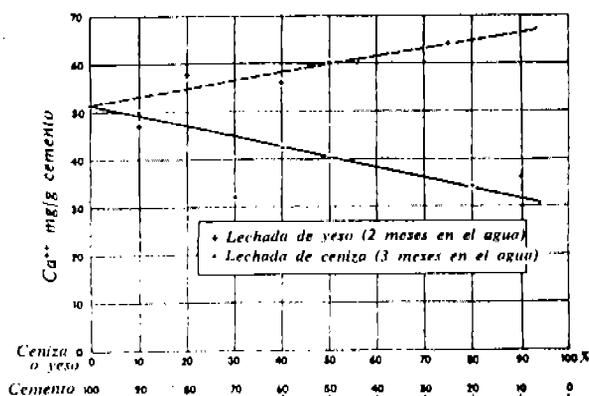


Fig. 4.19. Disolución de calcio en morteros de yeso o de cenizas diferentemente dosificados.

Veamos, como ejemplo, las características de algunos morteros, estudiados para hallar uno que alcance rápidamente una gran resistencia mecánica. Se trata de morteros activados mecánicamente, sin ningún producto adicional y en el límite de la inyectabilidad. La arena utilizada es del Sena, tamizada en mallas de 1 mm y conteniendo un 3 % de granos inferiores a 0.1 mm (cuadro 8).

CUADRO 8

Clase de cemento	Composición (en partes)			Tiempo de circulación en el cono Prepakts	Decantación hasta el fraguado %	Resistencia a la rotura	
	Cemento	Arena	Agua			2 días k/cm ²	7 días k/cm ²
F	3	0	1	15	0,7	355	443
	3	3	1,3	14,8	0,8	330	386
	3	6	1,9	15	0,8	280	310
	3	9	13	13,8	3,5	142	129
P	2,7	0	1	15	1,5	83	200
	2,7	2,7	1,4	15	3,2	65	142
	2,7	5,4	2,1	14,5	8,3	35	75

Pueden hacerse las siguientes observaciones:

a) La dosificación C/A del mortero de cemento puro en el límite de inyectabilidad depende de la naturaleza del cemento.

b) La adición de arena necesita un aumento de agua para conservar la inyectabilidad.

c) El aumento de arena se traduce por un descenso de la resistencia mecánica, pero es fácil comprobar que ésta es proporcional a C/A .

d) La adición de arena aumenta la sedimentación de los morteros realizados con cemento P. No sucede lo mismo con el cemento F, salvo en aquellos morteros fuertemente dosificados de arena. Por otra parte, la sedimentación de este cemento es mucho más débil que la del otro.

Los morteros Colcreet y Prepakt, que sirven para la confección de morteros del mismo nombre, se obtienen de esta forma. La arena de esos morteros es relativamente fina (el grano máximo es del orden del milímetro), de manera que no necesita un «esqueleto» de concreto de fuerte granulación. Esos morteros son indeslavables y permiten la confección de concretos sumergidos en agua y también de excelentes anclajes. El mortero Prepakt, para ciertas aplicaciones, es claramente superior a los otros debido a la presencia de un producto expansivo, que elimina toda sedimentación antes del fraguado.

4.3.2 MORTEROS DE ARCILLA TRATADA.

Estos morteros son suspensiones de arcilla en el agua, adicionadas de productos químicos convenientes para permitir una inyección satisfactoria. Sabemos, por experiencia, que después de la inyección la suspensión sedimenta e incluso en ciertos casos se orea, quedando en el terreno una masa pastosa relativamente consistente.

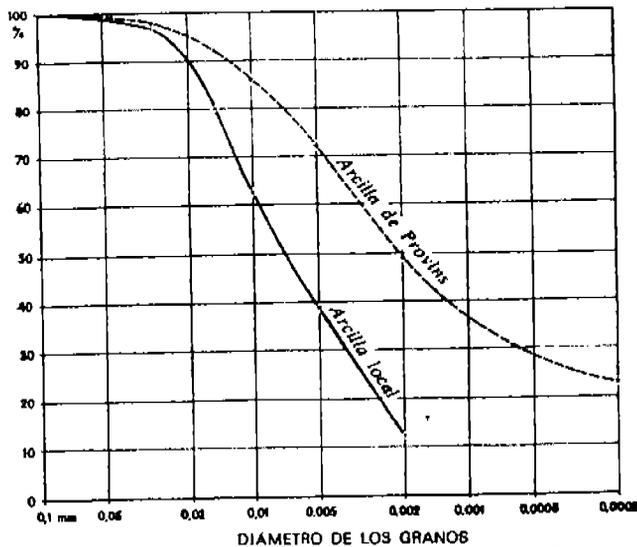


Fig 4.20. Ejemplo de composición granulométrica de las arcillas.

Pueden realizarse de este modo pantallas estancas susceptibles de resistir cargas de agua apreciables. Por el contrario, estos productos no tienen prácticamente ninguna resistencia mecánica, por lo que no se les puede utilizar para consolidación alguna por muy pequeña que sea.

Una arcilla, en el sentido más amplio de la palabra, que tenga prácticamente todos sus granos con un diámetro inferior a una centésima de milímetro (figura 4.20), debe poder utilizarse para obturar los intersticios más pequeños del suelo. Pero para ello es preciso desflocular al máximo la arcilla en el mortero. Esta exigencia es muy difícil de satisfacer y no siempre puede lograrse. Las posibilidades de estos morteros dependen, pues, de su tratamiento.

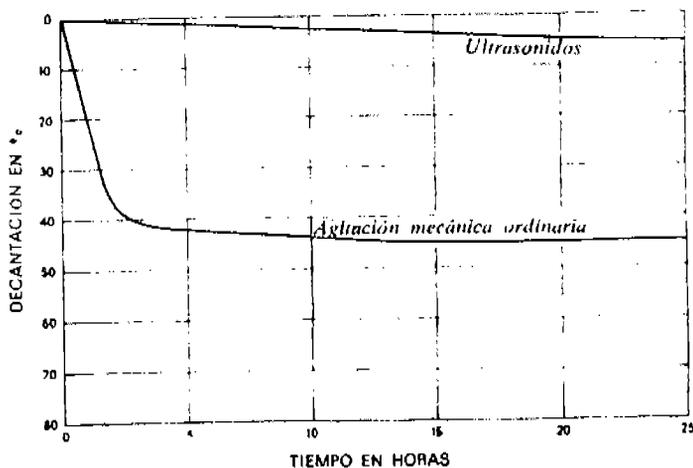


Fig. 4.21. Decantación de un mortero de arcilla (20 g de arcilla por 100 cm. de agua), puesto en suspensión por agitación mecánica y por ultrasonido.

Una simple agitación mecánica es impotente para poner en suspensión la arcilla en el agua cuando la dosificación es baja. Sin embargo, los ensayos de laboratorio indican que esto puede alcanzarse utilizando los ultrasonidos.

Un ensayo de este tipo se realizó a petición nuestra en 1949 por la (Station de Recherches Hydrologiques), de Nancy. El generador de ultrasonidos tenía una potencia de 300 W y la frecuencia utilizada era de 970 kg/s. Al cabo de una permanencia de diez minutos en el aparato, la sedimentación de un mortero conteniendo 20 g de arcilla por 100 cm³ de agua era la indicada en la (figura 4.21). A título de comparación se indica sobre este diagrama la curva de sedimentación de un mortero análogo, sometido a una violenta agitación mecánica.

El efecto de los ultrasonidos es prodigioso. Desgraciadamente, sería costosísimo utilizar generadores que permitieran tratar cantidades industriales de mortero y probablemente de empleo muy delicado en una obra.

No hay otro remedio, por el momento, que dejar para el laboratorio este método de suspensión. Sucede casi lo mismo con el método que vamos a exponer a continuación, que normalmente no se utiliza por su delicada puesta en obra.

Se trata de un *método químico*. Con un producto apropiado se lleva el pH de la solución a un valor próximo a 12. La estabilidad de la suspensión pasa entonces por un mínimo como indican los resultados del cuadro 9.

CUADRO 9

pH de la solución	Sedimentación en 24 horas mm
3,77	10
11,6	0,54
12,6	11

Si se observa que la sedimentación disminuye progresivamente cuando el pH aumenta hasta 12 y que por encima de este valor aumenta enormemente, se comprenderá por qué no se utilizó un método tan sencillo.

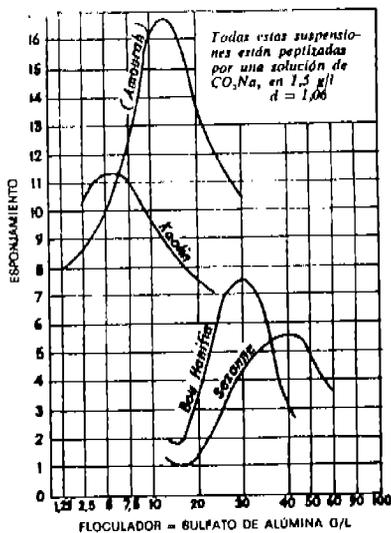


Fig. 4.22. Peptización de las arcillas: Influencia de la arcilla.

En una obra no pueden hacerse dosificaciones químicas tan precisas ni medidas de pH exactas. El empleo de un peptizante, convenientemente elegido permite la desfloculación de las arcillas. Este procedimiento, generalmente, está patentado. A veces, este producto se vende con un atractivo nombre y su inventor le atribuye propiedades universales.

Con bentonita se obtiene un mortero tixótopo que se adapta perfectamente para la inyección de arenas finas, como por ejemplo arena de Fontainebleau.

Si no se tratara de bentonita propiamente dicha, el resultado es más o menos perfecto, según la naturaleza de la arcilla y del producto añadido. Y. POISSON (1948), caracteriza la peptización por lo que él llama «esponjamiento», que es la relación entre el volumen de flocúlos de arcilla peptizada y no peptizada, por otra parte iguales, obteniéndose la floculación por adición de una sal: sulfato de alúmina, cloruro de calcio, etcétera.

Los resultados dependen de la naturaleza de la arcilla (fig. 4.22), del agente peptizante (fig. 4.23), del agente floculante (fig. 4.24), y por último, de la densidad del mortero (fig. 4.25).

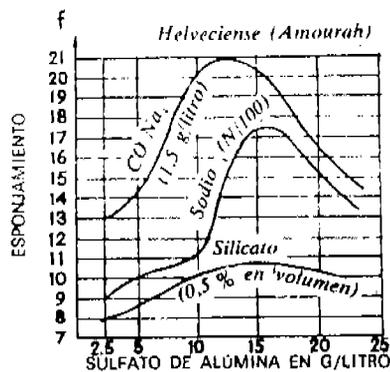


Fig. 4.23. Peptización de las arcillas Helveciense (Amourah). Influencia del agente peptizante.

Las suspensiones preparadas de este modo son suficientemente viscosas para que pueda añadirse arcilla de grano no muy fino e incluso limo. Dicho de otro modo, se proporcionan a los productos ordinarios los elementos que les faltan para obtener suspensiones estables. Se obtienen así las arcillas tratadas.

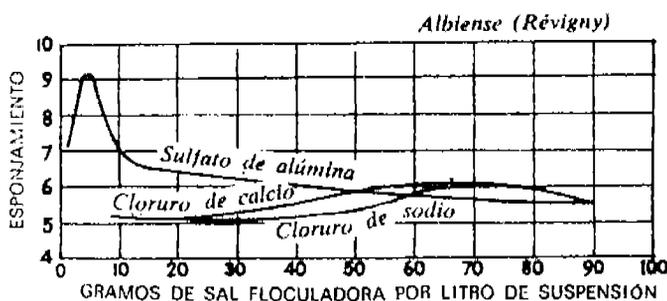


Fig. 4.24. Peptización de las arcillas Albiense (Révigny). Influencia del agente floculante.

Puede, por tanto, señalarse que los morteros así obtenidos serán estables, pero una parte de la suspensión no habrá sido desfloculada. La experiencia nos muestra claramente que estos morteros no admiten arenas de Fontainebleau.

En lugar de utilizar una arcilla convenientemente peptizada, para obtener coloides adicionales, es mucho más sencillo recurrir a un gel de sílice obtenido partiendo de silicato de sodio y de un reactivo, ácido clorhídrico, por ejemplo.

En el cuadro 10 puede verse, a título indicativo, dos composiciones de mortero utilizadas en el mismo trabajo, señalándose las dos maneras de proceder.

CUADRO 10

<i>Arcilla local seca</i>	460 kg	500 kg
<i>Arcilla de Provins seca</i>	40 kg
<i>Nitrato de Potasia</i>	7 kg
<i>Silicato de sodio (36° B)</i>	alrededor de 3 litros
<i>Reactivo</i>	alrededor de 10 litros
<i>Agua</i>	800 litros	800 litros

Estas proporciones corresponden a 1 m³ de mortero. La densidad de éste es de 1,3 aproximadamente.

4.3.2.1 Anomalías de la viscosidad.

La mezcla de arcillas de naturalezas diferentes y la eventual adición de productos químicos pueden dar al mortero una viscosidad sin relación alguna con la que podía esperarse.

Esto no tiene nada de extraño porque se trata de una mezcla de productos coloidales. R. HATSCHEK (1932), señala al efecto: Según la proporción de los constitutivos la mezcla de dos líquidos tiene una viscosidad que pasa por un máximo o un mínimo. Mc LEOD supone que la viscosidad de las mezclas de líquidos puros es una función de su "espacio libre". Esta hipótesis explica cualitativamente las anomalías (N. TCHERKEZOFF, 1962).

En inyección se observa que un mortero de bentonita B₂ que tenga una viscosidad Marsh de 70 segundos, mezclado en partes iguales con un mortero de arcilla A de viscosidad 76,5 s proporciona un mortero de viscosidad 46 seg. Otras mezclas con proporciones distintas dan viscosidades diferentes.

Este fenómeno fue estudiado por C. CARON (1952), indica que si se añade a un mortero de bentonita una cantidad creciente de arcilla, la viscosidad no crece regularmente como podría esperarse.

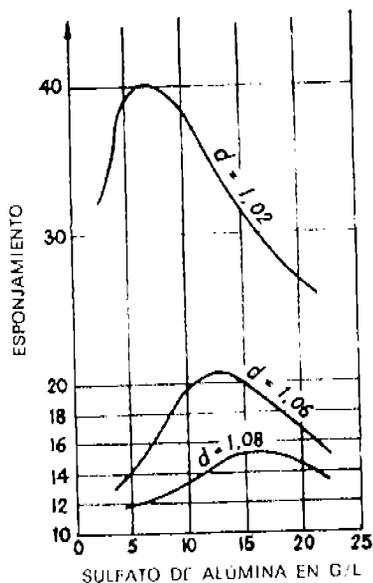


Fig. 4.25. Peptización de las arcillas. Influencia de la densidad del mortero.

Con una arcilla A y una bentonita B₁ pasa por un máximo relativo y después por un mínimo, mientras que con una arcilla P y una bentonita B₂ no pasa más que por el mínimo.

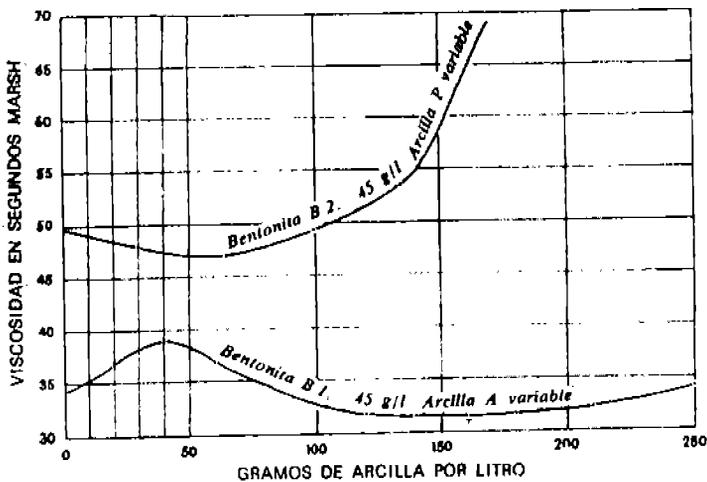


Fig. 4.26. Viscosidad de un mortero de bentonita al que se añade arcilla.

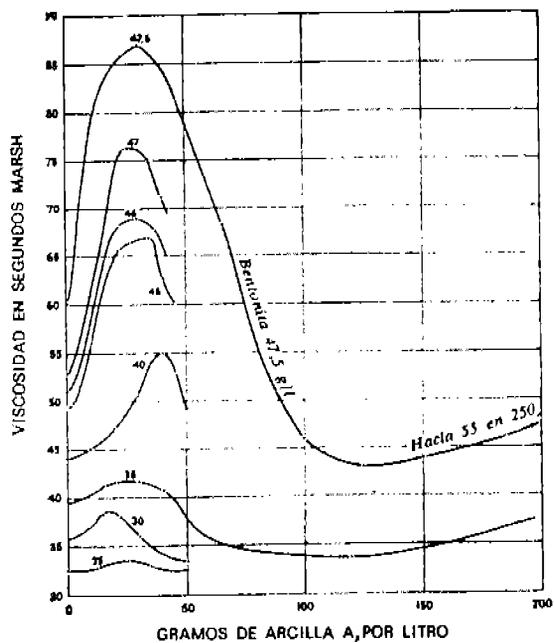


Fig. 4.27. Viscosidad de un mortero de bentonita B, en diferentes dosificaciones al que se le añade una arcilla A.

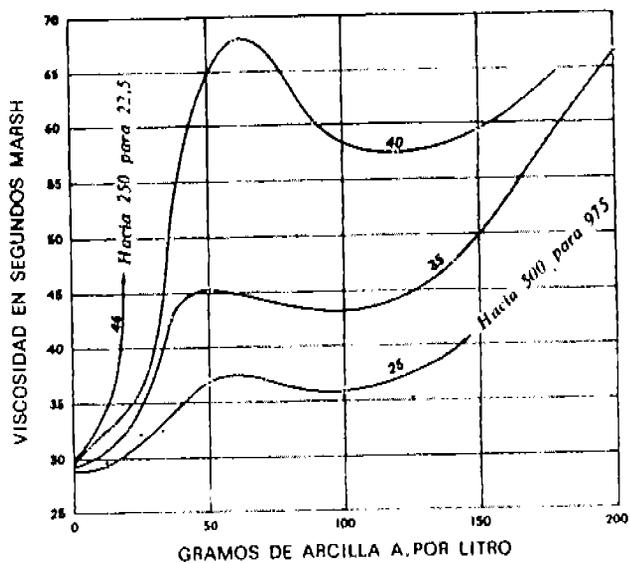


Fig. 4.28. Viscosidad de los morteros, cuando se les añade más de un 2 % de silicato de sodio.

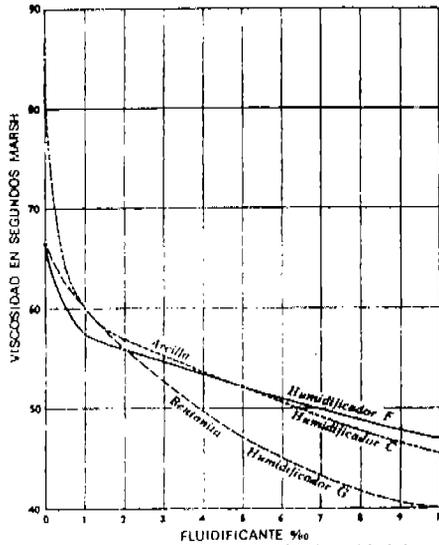


Fig. 4.29. Influencia de diferentes fluidificantes en la viscosidad de un mortero de arcilla (arcilla P: 390 g/litro).

La adición de arcilla A al mortero de bentonita B₂ vuelve a dar un máximo y un mínimo de viscosidad cualquiera que sea la dosificación inicial de los morteros de bentonita (fig. 4.27). Pero si se añade a estas mezclas un 2 % de silicato de sodio, la variación de la viscosidad es diferente (fig. 4.28).

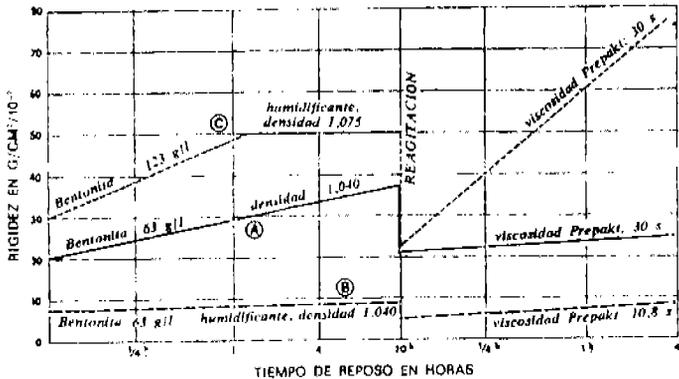


Fig. 4.30. Influencia de un fluidificante en tixotropía de la bentonita.

El orden de mezclas tiene una gran importancia. Los resultados precedentes son relativos a este orden: bentonita-arcilla y, eventualmente, silicato. Invertiendo el orden se tiene una viscosidad más débil, cualquiera que sea el máximo o el mínimo. El cuadro 11 nos ofrece varios resultados relativos a morteros sin silicatos.

CUADRO 11

<i>Dosificación del mortero de inyección</i>	<i>Viscosidad Marsh en segundos</i>	
	<i>Bentonita antes de la arcilla</i>	<i>Arcilla antes de la bentonita</i>
<i>B₂: 30-A: 15</i>	38	32,5
<i>B₂: 40-A: 20</i>	45,4	36,4
<i>B₂: 45-A: 22,5</i>	66	42,5
<i>B₂: 50-A: 125</i>	49	36

Igualmente, si ponemos silicato antes del constitutivo arcilloso, la viscosidad final es más débil. Este resultado es muy interesante porque permite aumentar la dosificación en arcilla conservándose la misma fluidez.

Este aumento de fluidez puede obtenerse de manera más eficaz con un fluidificante en lugar del silicato (fig. 4.29).

Con bentonita pudiera temerse que el fluidificante no destruyera la tixotropía de la suspensión, porque, efectivamente, en algunos ensayos no solamente se ha conservado la tixotropía (fig. 4.30, curvas A y B), sino que incluso ha sido aumentada por suspensiones de la misma viscosidad (curvas A y C). Tenemos, pues, un procedimiento relativamente sencillo para realizar morteros de arcilla, fuertemente tixótopos.

4.3.2.2 Elección de las arcillas.

Como el lector ha podido comprobar, el comportamiento de los morteros de arcilla es muy complejo, y sus características, difíciles de prever de antemano. Una buena indicación en principio es proporcionada por los límites de Atterberg, correspondiente a la arcilla, particularmente por el límite líquido. Si este límite es superior a 60, la arcilla puede ser aceptable. En caso contrario, será necesario añadir coloides. Con ayuda de la experiencia pueden elegirse de este modo las arcillas más aptas y tener una idea de su dosificación en el mortero.

Varios ensayos realizados por J. FLORENTIN y G. L'HÉRITTEAU muestran que la densidad seca de un mortero varía en razón inversa del límite líquido de la arcilla (fig. 4.31). Estos ensayos han sido realizados con morteros estables, en el límite de la inyectabilidad, que se han dejado escurrir por gravedad sobre un lecho de arena.

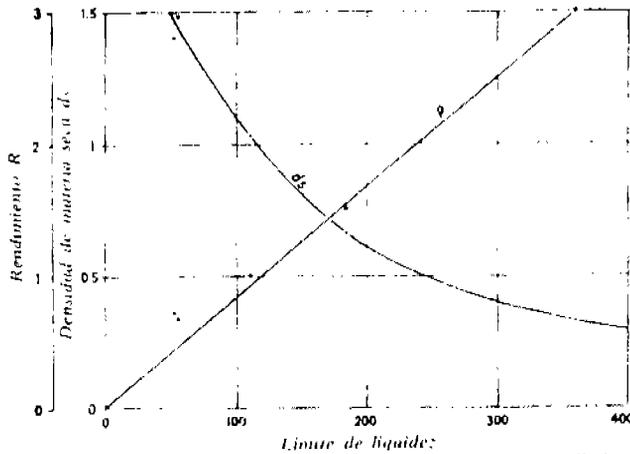


Fig. 4.31. Influencia del límite líquido de una arcilla en la densidad seca y rendimiento de un mortero.

Esos mismos autores definieron el rendimiento R de un mortero como la inversa de la cantidad de materia seca contenida en un metro cúbico de mortero sometido a aireación ($R = 1/d_s$). Cuanto menor es el peso de la materia seca, más elevado es el rendimiento. En igualdad de condiciones los rendimientos mayores corresponden a los morteros más económicos. Los ensayos precedentes muestran que, en primera aproximación, ese rendimiento es proporcional al límite líquido de la arcilla.

Así puede comprenderse cómo una arcilla de un límite líquido alto y de precio elevado permite, a veces, realizar morteros más económicos que los que no contienen más que arcillas de inferior calidad. Sin embargo, no debe olvidarse que un mortero de gran rendimiento expuesto al aire puede tener retracciones muy importantes. En la práctica, este caso es más bien raro porque cuando se impermeabiliza un terreno es porque, generalmente existen circulaciones de agua y entonces esta retracción no se manifiesta.

Estos resultados no permiten establecer una ley. Siendo siempre más fuerte la dilución de una arcilla en un mortero que la que corresponde a la determinación del límite líquido, no es evidente, *a priori*, que este límite constituya un criterio absoluto. El estudio de ciertas arcillas lo demuestra. De esto se deduce que los ensayos son siempre necesarios y no existen recetas maestras (M. W. LEONARD, J. A. DEMPSEY, 1963; G. K. JONES, 1963).

Además, es preciso que en las obras se siga escrupulosamente el proceso establecido en el laboratorio con los productos utilizados realmente, comprendida el agua, si no se quiere tener morteros cuyas propiedades sean totalmente diferentes a las previstas.

4.3.3 MORTEROS DE ACEITE-BENTONITA.

La bentonita seca suspendida en aceite o gas-oil conserva sus facultades de dilatación cuando el mortero está en presencia del agua. Se trata de un fenómeno extraordinariamente curioso utilizado por las compañías petrolíferas para realizar taponamientos o empotramientos en las perforaciones.

En determinados casos pueden utilizarse estos morteros para la inyección, pero siempre que el terreno no esté sumergido para que la bentonita no se hinche en el curso de la inyección. Absorbiendo una parte del agua intersticial del suelo se forma un gel de bentonita que impermeabiliza las fisuras.

4.3.4 GELES DE ARCILLA.

Para que una suspensión de arcilla permita impermeabilizar correctamente un medio permeable cualquiera, es necesario que después de la inyección presente una rigidez suficiente para no ser impulsada por la presión de las aguas. Dicho de otro modo, es necesario que esta suspensión sea claramente tixotropa.

La tixotropía es una propiedad natural de las buenas bentonitas, pero es necesario someter a tratamiento la arcilla para darle esta propiedad. Esto no es fácil porque, para que un mortero sea aceptable, tiene que ser relativamente elevada su rigidez al reposo.

Por ello, se ha pensado confeccionar geles de arcilla. No son morteros tixotropos en el propio sentido de la palabra, pero eso no es demasiado importante, ya que la reversibilidad no tiene mucho interés en inyecciones. Estos geles son análogos a los que se obtienen con productos químicos. Volveremos a tratar de ellos más adelante y los señalamos aquí a consecuencia de su eventual contenido de arcilla (500 a 600 g por litro), que les hace casi análogos a los morteros de arcilla pura.

CONCLUSIONES

Se precisa que en base a los diferentes profesores como son F. Arguillere que la presión de inyección es una característica física del procedimiento de inyecciones en suelos, que las inyecciones aumentan la adherencia de los sedimentos a los terrenos, que una presión alta de inyección puede ensanchar fisuras estrechas pero que esto a su vez hace que penetre más adentro la lechada del cemento.

Se hace la comparación de que en las inyecciones antiguamente hasta hace pocos años se utilizaban campanas de aire comprimido para enviar la lechada pero la presión de carga era de 10 kg/cm^2 , sin embargo, este sistema fue remplazado por la bomba de cemento la cual tiene una presión más alta que alcanza desde los 50 kg/cm^2 o más dependiendo de la zona a inyectar, es importante recalcar que es indispensable considerar los diferentes tipos de suelo, ya que las condiciones de estos siempre pueden variar.

También se llega a recalcar que un macizo rocoso finamente fisurado no puede ser inyectado a baja presión, ya que por el contrario cuando se aumenta la presión, las fisuras se ensanchan y por lo tanto, cualquier cemento puede ser utilizable.

Por otra parte, en la inyección de un mortero estable siempre y cuando el fraguado sea lento sólo se permitirá la transformación de una roca fuertemente fisurada en otra de fisuración más fina por lo tanto, lo que se tiene que realizar, es volver a inyectar por las mismas perforaciones o perforaciones próximas una suspensión de cemento para que dicho fenómeno precedente no se produzca.

En lo que corresponde a la inyección de varias fisuras se puede recalcar que si todas las fisuras tienen la misma abertura es más fácil su realización porque al tener una abertura constante pueden ser utilizados morteros inestables.

La presión de inyección y de rechazo de un mortero inestable, no es más que la clásica finalización de una sedimentación hidráulica, esto se realiza cuando la circulación del mortero es débil para que los granos se depositen, llevándose a cabo con una velocidad elevada de inyección para que se realice un caudal grande, por lo tanto, los primeros depósitos se hacen lejos de la perforación para que en consecuencia el rendimiento de la inyección aumente.

Para el control de la abertura de una fisura se utiliza un aparato que indica el movimiento de ensanchamiento de la misma, el cual consiste en el encendido de una lámpara haciendo sonar una sirena o claxon, un ejemplo real es el ya mencionado del túnel metropolitano de París que mientras se realizaban las inyecciones necesarias para las fisuras que se requerían tratar en ese momento se observaba que las antiguas fisuras aumentaban y que entonces para evitar que las fisuras se ensancharan sobre todo las principales, se instaló el aparato ya mencionado, sin embargo, hubo un problema, que el aparato detectaba fisuras del

orden de la décima de milímetro y no se podía inyectar ya que la sirena entraba en acción desde el momento en que la bomba de inyección era puesta en marcha entonces, fue necesario cambiar el rango de medición de la décima de milímetro a medio milímetro y un milímetro, para poder concluir con eficacia dichas inyecciones.

En el tema de la orientación de las grietas, se deduce que al hacer una inyección se producen grietas horizontales, las cuales hay que tener mucho cuidado, ya que pueden ser peligrosas para las construcciones en la superficie, esto se puede evitar al hacer una eficaz inyección, sin dar tanta presión de inyectado y así satisfacer la inyección en la disminución de las grietas verticales.

Hay que localizar las roturas y tomar en cuenta que una mala inyección en una fisura horizontal podría actuar como un gato hidráulico y levantar las construcciones que existan en la superficie.

Para poder crear inyecciones sin roturas se tiene que inyectar en caudales más pequeños y morteros más fluidos lo cual siempre es muy costoso; dependiendo de la homogeneidad del terreno.

En el presente trabajo también se explica el proceso de la inyección la cual se elabora introduciendo un fluido a presión en el terreno con el objeto de sustituir el aire o el agua en las oquedades con un producto que impermeabilizará y permitirá crear la consolidación.

En cuestión de tratamientos, los cuatro tipos de inyecciones trascendentales, son:

1.-Pantallas impermeables; El objetivo principal de este tratamiento es el de reducir la permeabilidad del terreno, para evitar filtraciones a través del macizo rocoso, la pantalla impermeable es un plano que se forma a través de la perforación de barreno, al hacer esto la permeabilidad del macizo rocoso; es muy baja, fuera de esta zona existe la permeabilidad natural; se menciona también la formación de las pantallas como pueden ser inclinación, profundidad y extensión lateral, esto dependiendo de la obra civil que se desea proteger.

2.-Tapetes de consolidación; Se destaca que son inyecciones para mejorar la deformabilidad de la masa rocosa.

3.-Relleno; Hay rocas que poseen grandes cavidades como las rocas calizas o las oquedades como en las rocas ígneas extrusivas, para esto hay que realizar el relleno de estas cavidades para evitar un colapso de la estructura que se vaya a desplantar encima de ellas.

4.-Inyecciones de contacto; El objetivo de estas inyecciones es cumplir el revestimiento de las oquedades que queden, por ejemplo, en un túnel, una cimentación y entre estas dos que exista una roca.

A partir de los productos empleados en la inyección de macizos de roca fisurados, los cuales son las suspensiones y las soluciones, se determinan los materiales con los que se fabrican dichas suspensiones, esto para mejorar las propiedades reológicas. Las *mezclas* fabricadas con cemento se dividen en lechada, mortero y concreto, las *soluciones* son productos químicos como son: silicato de sodio, polímeros y resinas, las ya explicadas en dicho inciso.

Para un trabajo de inyección exitoso se emplean las mezclas elaboradas con cemento sólo en casos especiales es necesario el uso de soluciones.

En las mezclas de inyección elaboradas con cemento en donde se manejan dos tipos: Las mezclas estables y las mezclas inestables. Para lograr una estabilidad en las mezclas estables los granos de cemento se mantienen en suspensión por un periodo de tiempo prolongado. Las mezclas inestables se emplean en tratamientos tanto de inyección como de consolidación, ya que poseen una de las mejores características reológicas. La mezcla tiene un tiempo limitado útil, ya que empieza a reaccionar desde el inicio y los aditivos que la contienen hacen que pierda efectividad con el paso del tiempo. La vida útil se determina, verazmente por ensayos de laboratorio, en general este tiempo suele oscilar de una a dos horas. Por lo tanto, por no conocer el comportamiento de las mezclas inestables su uso puede ser en ocasiones errático e impredecible.

Los elementos empleados para una buena elaboración de mezclas de cemento son, la temperatura del agua, la calidad y cantidad del cemento, los aditivos de los cuales su presentación es líquida, y el uso y manejo de los porcentajes empleados.

Las propiedades que se deben medir en una mezcla estable son la decantación (da estabilidad de viscosidad para el cono marsh), la cohesión con placa, el coeficiente de filtración y la resistencia a la compresión, consideraciones necesarias para hacer un trabajo adecuado en una mezcla estable.

La presión de inyección es muy importante y debe tomar en cuenta propiedades de macizo rocoso para así lograr el objetivo de hacer una buena inyección, se menciona la forma intencional para lograr dichas presiones en inyecciones de reemplazamiento, así como también se destaca el diseño de la pantalla de la impermeabilización.

Del equipo utilizado para fabricar las mezclas se mencionan las especificaciones de lo que son, el turbo mezclador, las bombas de tornillo sin fin o de doble pistón, obturadores mecánicos, neumáticos o hidráulicos, así como también los manómetros registradores de paso integral.

En el inciso pruebas de inyección, se determina la permeabilidad natural, la inyección del terreno, el registro detallado y la prueba determinada como

permeabilidad residual, después de esto se realiza la información obtenida y se ajustan los parámetros geométricos.

En este trabajo de tesis se explica como se forma una pantalla por medio de barrenos por el número de líneas y profundidad. En el tema de las etapas de inyección se refiere como se realizan para lograr la impermeabilización progresiva en las fracturas del terreno; Así mismo, se menciona cómo se aplica la forma de inyección que pueden ser ascendentes o descendentes dependiendo que tan fracturado y de la inestabilidad de las paredes de la perforación.

Las características de un tapete de consolidación por profundidad, dependen de los terrenos poco fracturados, la inclinación y dirección de las perforaciones, la separación de barrenos y las etapas de inyección.

Cuando existen, o se aparezcan en una obra civil cavidades por la disolución de rocas calizas o cavernas que presenten derrames de lava en rocas ígneas extrusivas, se requiere hacer inyecciones de relleno, este se realiza empleando una mezcla gruesa tipo mortero de cemento fabricada con arena y gravilla o también se puede realizar con concreto pobre sellándolo con mezclas tipo lechada.

Los usos para las inyecciones de contacto se determina que se usan en revestimientos de túneles o lumbreras, lozas o zapatas de cimentación de presas de tipo rígido y en taponos de concreto.

En el apartado de los métodos de inyección y control del proceso se hace énfasis en el método de inyección convencional, el cual consiste en definir una presión máxima de inyección o también llamada de rechazo.

El método GIN (presión y volumen constante), permite reducir y evitar casi totalmente el problema de hidrofracturamiento siempre y cuando se establezcan los parámetros de control que aseguran los límites de presión y que el volumen de la curva GIN sea apropiado para las características del terreno. El proceso de este método se controla mediante una computadora de campo para ir viendo en tiempo real el proceso, un caso práctico que se aplicó por ejemplo, es el de la presa Aguamilpa, una presa de tipo enrocamiento en la cual las filtraciones a través de la pantalla impermeable que se medían con el método GIN fueron escasamente del orden 5 l/s en total, es uno de los métodos más efectivo, en el uso de la presa de Aguamilpa.

En el capítulo tres denominado Tipos de Inyección en Roca, se explica la inyección en rocas fisuradas, se hace saber que la estanqueidad o consolidación de rocas fisuradas se hace por inyección, en principio es tratar de reducir las fisuras de las rocas que tengan un tamaño bastante considerable a otras donde las aberturas tengan solamente unas décimas de milímetro, cuando las fisuras se encuentren muy abiertas, el mortero que se debe de efectuar debe de ser denso y ser inyectado casi sin presión.

En el lavado de fisuras, no se puede negar que este tratamiento permite eliminar una gran cantidad de arena o de arcilla, más o menos importante, y así concluir con una inyección más libre de residuos.

En el apartado de la compactación de los rellenos arcillosos, se dice que si las fisuras no son lo suficientemente importantes para que pueda realizarse esta operación entonces es la inyección quien desempeña tal misión, pero a condición de que se haga a altas presiones. Las arcillas irán comprimiéndose por efecto de presión, pero se debe también de poner este método en función de la geología de la zona y de la obra que se vaya a construir.

En la inyección de fisuras finas, los ensayos de agua, se realizan por tramos sucesivos de 5 metros de longitud para reconocimiento; el objeto no es lavar las fisuras, sino establecer la dosificación inicial del mortero, si es más elevada la absorción, más fuerte es la dosificación.

Se descarta que la inyección por tramos sea larga y costosa, también se precisa que no es mejor inyectar el taladro en toda su longitud, ya que los granos de cemento se sedimentarían con el agua y obturarían lentamente el taladro en lugar de introducirse en las fisuras.

Es posible realizar un buen tratamiento con este procedimiento, como ya se comentó con anterioridad. Se comienza con una lechada espesa y se disminuye 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 objetivo ensanchar las aberturas de las fisuras que tienen la entrada obturada, con el único fin de impulsar hacia delante el tapón causante de la obturación y permitir la circulación normal del mortero.

La inyección de arriba-abajo se realiza después de la perforación de cada tramo. Una vez terminada la inyección se vuelve a perforar el tramo inyectado de ahí se pueden obtener algunos testigos, después se hace el taladro del siguiente tramo, de la misma manera y así cuantas veces sea requerido. Este método satisface plenamente el punto final que guía la inyección. Las primeras inyecciones sirven de techo, si no existieran estas inyecciones se tendrían que inyectar a una presión mayor cada uno de los tramos.

Por otra parte, la inyección por tramos de abajo-arriba presenta una gran ventaja económica. Permite realizar el taladro con el máximo rendimiento y después desplazar la máquina de perforación a otro emplazamiento durante la inyección.

Se precisa también que los morteros estables tienen un fraguado extremadamente lento: 24 horas o más si no se toman medidas especiales. Se comportan como un verdadero fluido.

Es necesario detener la inyección de un mortero estable cuando una cierta cantidad haya sido inyectada, esta cantidad se calcula, suponiendo que el mortero se reparte uniformemente alrededor del taladro, dicha cantidad se calcula en metros cúbicos.

En los morteros inestables sirven solamente para el transporte hidráulico de los granos de cemento, se recalca también que la dosificación ideal es la más pequeña que permita alcanzar la contrapresión ideal de rechazo, establecida de antemano.

La inyección de gravas y arenas es un procedimiento de costo elevado por el cual se ha limitado su empleo, actualmente esta práctica solamente se reserva para el tratamiento de casos como lo sería la impermeabilización de arenas finas.

Se menciona que el empleo de morteros estables es evidente en el momento actual, pero que más de veinte años se practicó la inyección de morteros de cemento para transformar los aluviones en concreto. Esto fue porque en algunas obras donde los aluviones tenían la estructura abierta se había podido inyectar cemento puro y muy pocas veces se pudo eliminar la arena fina que se encontraba entre los granos, y remplazándola por cemento, pero constituyendo excepciones.

Se enumeran los métodos de inyectar aluviones y ninguno de ellos se asemeja a los macizos rocosos. No es posible en las gravas, mantener sin protección, un taladro de varios metros de longitud y colocar un obturador, ya que el terreno se desprendería.

Se distinguen tres procesos de inyectar aluviones:

1.-De abajo a arriba; El procedimiento es sencillo se introduce un tubo en el suelo hasta llegar al límite que se tenga que inyectar, se limpia el tubo y se le conecta la máquina inyectora después se hace subir el tubo 20 o 30 cm. y se inyecta el mortero, posteriormente otros 20 o 30 cm. y así sucesivamente hasta acabar con esa inyección, el diámetro del tubo puede ser cualquiera, por ejemplo de 0 a 100 mm.

Los inconvenientes de este proceso son:

- a) Las resurgencias que se manifiestan alrededor del tubo alcanzan el conducto de la inyección soldando a veces el tubo con el terreno.
- b) La inyección de capas profundas se tiene que hacer empalmando los tubos unos con otros es una operación costosa y aumenta el peligro de que los tubos puedan soldarse al terreno.
- c) Cuando se da fin a cada inyección no se puede reanudar, el trabajo se hace a ciegas.

2.- Inyección con los tubos de manguitos; este sistema se sustituyó por el empleo de perforadoras con explosivos o con balas utilizadas por los técnicos dedicados a la investigación petrolífera, este método permite una, inyección correcta y

relativamente económica a gran profundidad, por ejemplo, 100 m y además volver a cualquier punto de la pantalla donde falte impermeabilizar ya sea que fuere insuficiente la impermeabilización o que estuviera sin terminar.

La inyección provoca en el terreno deformaciones de gran importancia, y si los tubos de manguitos no son de buena calidad pueden destruirse al inyectar en los taladros próximos, dichos tubos deben ser de gran flexibilidad para adaptarse a las deformaciones del terreno. Estas deformaciones podrían llegar incluso hasta que el obturador no pueda colocarse por el arco que pudiese formarse.

3.- De arriba abajo a medida que se hace el taladro; esta inyección sólo se hace cuando se va a hacer en rotación, se empotra a la entrada del taladro un tubo con una prensaestopa, a través del cual pasan los tubos que tienen un diámetro sensiblemente igual al del aparato extractor de testigos, después se inyecta por tales conductos un mortero el que más convenga en cada caso.

La presión de inyección no se puede medir con gran exactitud. El funcionamiento interno del inyector provoca vibraciones en el sistema inyector-conducción-terreno, en un terreno y morteros determinados, la presión va fijada por el caudal, que se regula fácilmente, esto es cosa de práctica, no es necesario que sea muy pequeño el caudal para no aumentar demasiado el costo de los trabajos, ni que sea muy grande para no elevar tanto la presión y así romper el terreno o afectar a construcciones próximas.

Se menciona que "la inyección por impregnación" es la que corresponde a la inyección de un macizo figurado. Las fisuras son obturadas por impregnación del mortero y si se producen ciertos agrietamientos, también quedan rellenos por el.

Una inyección no rellena todos los huecos, comprime las capas y las tabica con sus grietas, los medios locales de control, se tratan de utilizar no haciendo daño a la excavación de la inyección, un control que fuere destructivo para la inyección sería, como ejemplo, la ejecución de una excavación en la zona inyectada.

Estos controles de inyección no destructivos se realizan a partir de los taladros de inyección o desde la superficie del medio tratado y se basan en:

- a) La velocidad de perforación de los taladros; esto es una observación de la inyección de aluviones porque en un macizo rocoso la inyección de fisuras no modifica la velocidad de avance en un taladro; al contrario se sabe que en los aluviones no es tan fácil la ejecución de un taladro como en un terreno virgen. Esta observación puramente cualitativa no da ninguna indicación sobre la calidad del tratamiento, informa solamente de que la inyección ya efectuada surgió cierto efecto al terreno.
- b) Los ensayos de agua; el resultado de este ensayo puede hacerse por inyección o por bombeo según los casos, se da una permeabilidad más cercana a la

realidad que la media de unos ensayos puntuales, pero no es más que una permeabilidad local. Para darse la idea de la permeabilidad media de la pantalla es necesario realizar un gran número de esos ensayos.

- c) Morteros diferenciados por colorantes o huellas radioactivas; Una coloración total del mortero no es indispensable, tan sólo con que el colorante pueda ser descubierto fácilmente, es más que suficiente. Un elemento muy útil es la alizarina, es un colorante quinónico utilizado en los tintes, otro elemento del cual se debe hacer uso son los organoles que pueden descubrirse en dosis muy pequeñas, estos colorantes son rojos, verdes y amarillos.
- d) La resistividad eléctrica; en este control de inyección hay dos tipos de medidas unas son partiendo de la superficie del terreno y otras de una perforación de sondeos eléctricos. Han sido realizados con poco éxito ensayos, en aluviones, estas medidas no son para realizar un control serio, pero puede servir para calcular el índice de poros que existe alrededor del taladro.
- e) La deformación del medio; La inyección no se puede hacer de otro modo que deformando el medio inyectado, las deformaciones no son peligrosas, pero es necesario que no sean demasiado grandes para no afectar a construcciones próximas. Para ver las deformaciones límites se utilizan aparatos llamados indicadores de movimientos, aparato el cual su indicación se mide encendiendo una lámpara eléctrica y acciona un claxon cuando la deformación límite es alcanzada.

Solamente aplicando las cargas previstas en un macizo inyectado puede verse si el tratamiento ha sido satisfactorio, aunque éste sea un control a posteriori no muy convincente.

En el capítulo cuatro denominado morteros de inyección y material utilizado, se menciona las características de los morteros, los cuales se tienen que someter a un estudio de laboratorio el cual satisfaga, la proporción exacta de diversos productos que constituyen las diferentes clases de mortero, mas que nada se pretende llegar a una buena resistencia en la rotura de anclajes, o en consolidaciones se explica los esfuerzos y las resistencias de los diferentes morteros que existen, se menciona que no hay que tomar mucho en cuenta la permeabilidad, ya que no es muy fuerte para que se tenga que clasificar mas afondo, la retracción del mortero también se descarta por el hecho de que las inyecciones siempre están en contacto con el agua. Pero no pasa lo mismo con las medidas de viscosidad, rigidez y rezumo solamente el inconveniente es que no dan resultados que puedan asimilarse a magnitudes físicas.

También se hace mención la medida de viscosidad, se cuenta con dos viscosímetros; de circulación y de cilindros coaxiales, el primero define muy bien las posibilidades de circulación de un mortero, el viscosímetro de cilindros coaxiales permite separar la viscosidad y la rigidez de un fluido plástico, calcula también la tixotropía de un mortero.

Se destaca también la medida de la rigidez, se menciona la forma de obtenerlo y se hace destacar que el resultado servirá para conocer la densidad del mortero. También se conoce otra medida más que nada experimental que es la del agua rezumada.

Las propiedades mecánicas de los morteros son, la resistencia a la compresión simple, se examina sobre todo en este ensaye, la influencia de parámetros como lo son la relación agua cemento el contenido de cal y los contenidos de arena y cemento. Otra propiedad es la deformabilidad este la finalidad de este ensaye es ver la correlación entre la resistencia de los morteros y la rigidez del mismo. Y la última propiedad, es la elección de los morteros para inyección, en arcillas blandas, se recomienda para este por diversos parámetros que sean elaborados, con cemento, cal, arena y pómez ó cemento, bentonita y arena pómez, según sea el caso a trabajar.

El aumento de rigidez es debido a la sedimentación del mortero. Se clasifican, también los morteros inestables, que son morteros de cemento puro y rebajado, se muestran sus graficas de decantación

Se hace mención por último a los morteros estables, que son suspensiones de arcilla. De estos morteros existen morteros inyectables de arcilla tratada de aceite-bentonita y geles de arcilla, de ellos se menciona sus características y propiedades químicas para el uso adecuado de los mismos.

BIBLIOGRAFIA

CARON, C. Numerosas notas internas SOLÉTANCHE sobre las características de las lechadas y de las patentes Solétanche.

CAMBEFORT, H. IV Congreso de las grandes presas. Nueva Delhi 1951.

JIMÉNEZ, Víctor, Escudero, Alejandrina. "La Construcción del Palacio de Bellas Artes". INBA, 1984.

OVANDO E. Vega L. "Efectos de la inyección de lodos fraguantes en la compresibilidad de la arcilla de la ciudad de México". Informe del Instituto de Ingeniería, DGAPA UNAM.

RODIO G. "Las inyecciones químicas en los terrenos" La ingeniería. Buenos Aires, 1938.

TAMEZ E. y Santoyo, et. al. "Manual de diseño geotécnico". Vol. 2 Departamento del Distrito Federal, Secretaría General de Obras, Comisión de Vialidad y Transporte Urbano México 1988.

TGC Geotecnia "Endurecimiento de las arcillas blandas del subsuelo bajo la Catedral y el Sagrario mediante la inyección de morteros". Informe Técnico No. TGC 98-2104 a la Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural. Versión preliminar CNCA, 1998.

VEGA Muñoz, L. "Efectos de la inyección de morteros en la compresibilidad de las arcillas del Valle de México". Campus Acatlán UNAM.