

84
291



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PRINCIPIO DE INTENSIDAD DE
INYECCION METODO GIN:
CONSIDERACIONES PARA MEJORAR LA INYECCION
DE ROCAS EN LA CONSTRUCCION DE
PANTALLAS ESTANCAS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
EDMUNDO MUNGUIA GARCIA



(D) UNIVERSITARIA

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-051/97

Señor
EDMUNDO MUNGUÍA GARCÍA
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **M. I. HUGO HASS MORA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

PRINCIPIO DE INTENSIDAD DE INYECCION, METODO GIN.

Consideraciones para mejorar la inyección de rocas en la construcción de pantallas estancas.

- I. INTRODUCCION
- II. GENERALIDADES
- III. ENSAYOS LUGEON
- IV. PENETRABILIDAD Y ABSORCION EN MEDIOS FISURADOS
- V. DESARROLLO DEL CONCEPTO CONSTANTE DE INYECCION
- VI. PRINCIPIO DE INTENSIDAD DE INYECCION (I = PV)
- VII. EJEMPLO DE APLICACION A LA CONSTRUCCION DE LA PANTALLA ESTANCA DE LA PRESA DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA ZIMAPAN
- VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 2 de julio de 1997.
EL DIRECTOR.



ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLÍS

FMCS/GMP*lmf

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
I. Generalidades	3
I.1 Medios Inyectables	3
I.2 Rocas Fisuradas	3
I.3 Rocas Cársticas	4
II. ENSAYOS LUGEON	5
II.1 Permeabilidad	5
II.2 Longitud de los Tramos de Prueba	5
II.3 Disgregación sobre Pruebas de Agua	6
III. PENETRABILIDAD Y ABSORCIÓN EN MEDIOS FISURADOS	9
III.1 Influencia de la Presión en la Abertura de las Fisuras	9
III.2 Inyección de un Fluido no Newtoniano en una Fisura	12
III.3 Número y Tamaño de las Fisuras	18
III.4 Influencia de la Granulometría en los cementos de Inyección	19
III.5 Inyección de una Lechada Inestable en una Fisura	20
III.6 Inyección de una Lechada Estable en una Fisura	21
III.7 Inyección de Varias Fisuras	22
III.8 Presión de Inyección y de Rechazo de un Mortero	23
IV. DESARROLLO DEL CONCEPTO CONSTANTE DE INYECCIÓN n	24
IV.1 Fundamentos para la implementación del Método	24
IV.2 Influencia de las Propiedades de la Lechada	30
IV.3 Constante de Inyección	35
V. PRINCIPIO DE INTENSIDAD DE INYECCIÓN , $i=P \cdot V$	39
V.1 Características del Método	39
V.2 Selección de la Mezcla y Diseño de los Trabajos de Inyección	41
V.3 Inyectado de Fisuras con el Método GIN	43
V.4 Reducción del Espaciamiento de las Perforaciones de Inyección	45
V.5 Energía Aplicada en el Método de Intensidad de Inyección	46
V.6 Límites Envolventes para Diferentes Intensidades de Inyección	46
V.7 Inyección Controlada por Computadora	49
V.8 Las curvas GIN y de Penetrabilidad-Volumen como Controles	50
V.9 Prácticos de la Inyección.	52
V.9 Aplicación a Pantallas Estancas.	52

VI.	APLICACIÓN A LA PANTALLA IMPERMEABLE DE LA PRESA	54
	DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ZIMAPÁN.	
VI.1	Breve Descripción del Proyecto	54
VI.2	Geología de la Boquilla	58
VI.3	Fracturamiento y Carsticidad	60
VI.4	Disposición de la Pantalla Impermeable	65
VI.5	Mezcla de Inyección	66
VI.6	Intensidad de Inyección	70
VI.7	Resultados	71
VII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1	Ensayos Lugeon	7
Figura II.2	Fisuras Plana de Espesor Constante	8
Figura III.3	Deformación de la Roca por Efecto de la Presión de Inyección	10
Figura III.4	Circulación de Agua en una Fisura Única (R=10)	11
Figura III.5	Inyección de una Fisura con Mortero Inestable	13
Figura III.6	Pruebas de Agua en Varias Presiones (Ficticias)	15
Figura III.7	Pruebas de Agua Reales	16
Figura III.8	Pruebas de Agua Graficadas en Coordenadas Logarítmicas	17
Figura III.9	Granulometría de Varios Tipos de Cemento	20
Figura III.10	Inyección de Fisuras Paralelas y que se Unen de de Espesor Variables	23
Figura IV.11	Leyes Reológicas de los Fluidos Newtonianos y Binghamianos	25
Figura IV.12	Limites teóricos y del Factor A/C, Presa PAUTE Ecuador.	27
Figura IV.13	Fórmulas para la Inyección de una Grieta	28
Figura IV.14	Recorrido de la Lechada (Ejemplo)	28
Figura IV.15	Ley de Flujo en una Tubería o Grieta para un cuerpo Binghamiano	30
Figura IV.16	Fluidez Vs. Viscosidad y Cohesión (Cono Marsh Eur)	30
Figura IV.17	Resistencia a los 28 Días Vs. Fluidez en Cono Marsh.	31
Figura IV.18	Volumen Vs. Tiempo y Fuerza de Levantamiento Vs. Tiempo para Lechadas y Agua en la Presa ITAIPU.	34
Figura IV.19	Recorrido de la Lechada Contra Tiempo	35
Figura IV.20	Procedimiento de Inyección Usual y Rápido	36
Figura IV.21	Regla de Inyección Usando la Constante N	37
Figura IV.22	Recorrido de Lechada y Presión para una Propuesta Combinada.	38
Figura V.23	Ejemplos de Curvas de Inyectado	48
Figura V.24	Propuestas de Envolventes de Límite para Inyección	48
Figura V.25	Inyección en una sola Progresión Respecto al Tiempo	50
Figura V.26	Inyección en una sola Progresión Respecto al Volumen de Toma.	51
Figura V.27	Puntos Finales de las trayectorias de las Progresiones de Inyección.	53
Figura VI.28	Esquema Hidráulico de la Central Hidroeléctrica	55
Figura VI.29	Disposición de las Obras en la Zona de Boquilla y Casa de Máquinas	57
Figura VI.30	Sección Geológica Desarrollada por la Pantalla Impermeable.	60
Figura VI.31	Esquema de la dirección de Filtraciones en Fracturas y Estratificación.	63
Figura VI.32	Tratamiento de Carst en Galerías	65
Figura VI.33	Pantalla de Inyección	67

Figura VI.34	Curva de Intensidad de Inyección para la Pantalla del P.H. Zimapán	71
Figura VI.35	Esquema de Definición de Número y Orden	72
Figura VI.36	Gráficas de Monitoreo en la Inyección del Tramo 95-90 m, para el Barreno No I-373-I-01	73
Figura VI.37	Gráficas de Monitoreo en la Inyección del Tramo 90-85 m, para el Barreno No.I-373-I-01.	73
Figura VI.38	Tabla de Monitoreo, incluye la Gráfica Gasto/Presión Vs. Volumen Inyectado.	75

PRINCIPIO DE INTENSIDAD DE INYECCIÓN, METODO GIN

CONSIDERACIONES PARA MEJORAR LA INYECCIÓN DE ROCAS, EN LA CONSTRUCCIÓN DE PANTALLAS ESTANCAS.

INTRODUCCIÓN

La inyección de suelos es un procedimiento reconocido por todos los ingenieros que, sin embargo se encuentra poco difundido. Su empleo se limita en la construcción de presas, principalmente, y algunas obras de ferrocarriles e hidráulicas. Apenas es conocida la posibilidad de efectuar regeneración de obras de cimentación, o la reparación de estructuras a su nivel original derivado de los asentamientos sufridos durante su vida útil empleando el procedimiento de inyección.

Por otra parte, las mezclas reflejan también la evolución que las propias técnicas de inyectabilidad ha sufrido, y aún más, ahora se cuenta, además de las tradicionales mezclas de mortero con cemento o arcillas que emplean procedimientos mecánicos de dispersión, con aquellas que emplean vías químicas de desfloculación y existe la posibilidad real, aunque antieconómica aún, de aplicar procedimientos ultrasónicos de dispersión en las mezclas, para mejorar en beneficio de la inyección la tendencia a la floculación y sedimentación, con lo que se esta en posibilidad de obturar, con toda seguridad, los intersticios más pequeños de un suelo.

Pero no sólo el desconocimiento o la falta de experiencia ha limitado el empleo diversificado de la técnica de inyección. En estos trabajos (y en general en todos los trabajos ingenieriles) siempre esta presente un arte, el cual, (a diferencia de lo que sucede en lo que entendemos por arte tradicionalmente), no es precisamente el de un solo individuo. Si bien es el ingeniero quien debe definir el procedimiento o mezcla a utilizar, es necesario el respaldo de un amplio laboratorio y el sólido conocimiento de los principios de inyección que le permitirán decidir o cambiar de morteros o procedimientos cuantas veces sea necesario, en función de los resultados que se obtengan de las exploraciones previas y de los primeros trabajos, si se quiere llegar a un resultado óptimo desde el punto de vista económico y técnico.

Para solucionar la problemática que se presenta en un medio a tratar es necesario asociar tanto la estructura de los suelos o estratos, los cuales siempre presentan una mayor o menor heterogeneidad, como las propiedades de las mezclas o morteros cuyas características variadas son sin embargo más controlables. Por último, las leyes de circulación de los fluidos o suspensiones por conducciones de forma geométrica mal definida y repartidas de manera errática en un medio elástico, como generalmente se presentan en la naturaleza, contribuyen a generar una mayor incertidumbre. Todas estas circunstancias son determinantes al momento de tomar resoluciones que estén de acuerdo con las observaciones realizadas durante los primeros trabajos.

Como se puede ver esto amplía el grado de dificultad cuando se trata de determinar el procedimiento y parámetros de la inyección que deban aplicarse a un determinado trabajo, por este motivo no es raro escuchar de ingenieros, inclusive de gran reconocimiento, que las inyecciones sirven para poca cosa.

En este sentido en las últimas décadas se ha generado un procedimiento que permite disminuir la incertidumbre que se produce cuando una inyección se lleva a cabo, ya sea con fines de consolidación o de impermeabilización, y aun más, permite que la inyección sea monitoreada y controlada en el instante mismo de su ejecución, dando la libertad al diseñador de tomar decisiones rápidas y acertadas por el gran conocimiento que se obtiene empleando este procedimiento de inyección, el cual se ha denominado Método de Intensidad de Inyección o Número de Intensidad de Inyección, GIN (por sus siglas en inglés: Grouting Intensity Number). En la última década se ha aplicado en un importante número de lugares en el mundo como son Argentina, Australia, Ecuador, México, Suiza, Turquía. En nuestro país dicho procedimiento ha sido empleado en los proyectos hidroeléctricos de Aguamiña, en el estado de Nayarit y de Zimapan, en el estado de Hidalgo. Este trabajo trata la exposición del principio de Intensidad de Inyección y su aplicación en la construcción de la pantalla impermeable de la presa construida en el Proyecto Hidroeléctrico Zimapan.

En los primeros capítulos se aborda a manera de resumen, tanto los principios y problemática que comúnmente se presentan durante la inyección en rocas, como las ideas fundamentales sobre el comportamiento para las lechadas inestables y estables en una y varias fisuras, de manera que con estos antecedentes sea posible entender y justificar, en cierto modo, el empleo del método GIN. En el capítulo III, se trata sobre las pruebas Lugeon, no con propósitos informativos, más bien, con la finalidad de discutir sus resultados y valorar lo que representan en los trabajos de inyección y consolidación al emplear el método GIN.

Cabe hacer notar que la parte fundamental del desarrollo del presente trabajo está dirigida a la inyección de rocas poco fisuradas ya sea con fines de consolidación o para la construcción de las pantallas impermeables en macizos rocosos sanos, cuya circunstancia dificulta obtener una eficiente inyección debido al estado de fisuración generalmente muy fina. (no obstante que este método puede ser aplicado también al tratamiento en suelos pulverulentos). Para estos trabajos, se discuten y analizan las circunstancias que han permitido que algunos dogmas se establezcan y generalicen en las decisiones que los ingenieros deben asumir durante el diseño y construcción de estas pantallas.

En el presente trabajo se han incorporado experiencias de ingenieros en esta especialidad, las cuales han sido recopiladas de diversas reuniones, informes, conferencias y reportajes de los cuales se han tomado, algo de este material es inédito y sólo se encuentra en los archivos de las dependencias para la cual fue generada, por este motivo, considero prudente aclarar que es responsabilidad

exclusivamente del autor de la tesis, la interpretación, estructuración y exposición del método Intensidad de Inyección, así como los comentarios, digresiones y ejemplos tomados, para el desarrollo de los temas, es prudente aclarar también, que parte de los temas aquí contenidos, han sido tomados del libro de Henry Cambefort "Inyección de suelos", con la idea de "ligar" lo que se tiene como ya conocido en un proceso de inyección, tanto con mezclas estables e inestables, y los parámetros y procedimientos contenidos en el principio del GIN

I GENERALIDADES

I.1 Medios Inyectables

El objeto de la inyección, comúnmente perseguido, es el de impermeabilizar o consolidar los cuerpos sólidos porosos y permeables. En la construcción de grandes presas, por ejemplo, es el de garantizar el apoyo adecuado a la cortina para soportar las cargas a que quedará sujeta durante el llenado de sus vasos y operación en el período vida útil, además de constituir una barrera efectiva al paso del agua reduciendo pérdidas económicas por las cantidades de energía eléctrica que se dejan de producir, en el caso de centrales hidroeléctricas, o por las cantidades de agua que dejan de suministrarse a las superficies agrícolas en el caso de las presas para irrigación, por citar sólo dos ejemplos. Al mismo tiempo se incrementa la seguridad estructural y la de los habitantes asentados aguas abajo de estos embalses, al evitar el deterioro de los medios donde se han fundado estas estructuras, por la acción de la disolución de la roca o por la erosión que genera el agua a través del macizo rocoso.

La forma o procedimiento de construcción tanto para las pantallas como para la consolidación de la roca, es mediante la ejecución de barrenos en los mantos rocosos y su relleno con un producto líquido que endurece con el tiempo, la inyección.

En los trabajos de consolidación, por ejemplo, el objetivo a alcanzar es la de proporcionar mayor competencia a la roca, que servirá de soporte a una importante estructura, más que a impermeabilizarla. El líquido inyectado se conoce con el nombre de mortero o mezcla de inyección.

Los morteros de inyección y los procedimientos utilizados son diferentes, según sea la forma de los huecos y la naturaleza de los medios a tratar.

Las fisuras, por ejemplo, suelen considerarse de aberturas sensiblemente constante, mientras que los huecos de suelos sueltos son desiguales y sucesiva o alternativamente grandes y pequeños. Esta diferencia hace que la inyección de aluviones, por ejemplo, se practique de manera diferente que la de los mantos de roca.

1.2 Rocas Fisuradas

Para efecto de los tratamientos a base de inyecciones, lo que predomina de manera importante es el estado en que se encuentra la roca y su permeabilidad. Por tal motivo podemos decir a este respecto, que los mantos rocosos se caracterizan porque con toda seguridad se encuentran afectadas por una gran abundancia de fisuras y fallas, de tal suerte que una sola perforación ejecutada en cualquier punto puede absorber una cantidad de mezcla más o menos importante.

Las rocas porosas y fisuradas, como las areniscas, no son tratadas de la misma forma que las impermeables. Esta porosidad le confiere a la roca una pequeña permeabilidad que provoca una desecación del fluido en su circulación a través de las fisuras, las propiedades del fluido evolucionan, como se verá más adelante, demasiado rápido para que la inyección sea satisfactoria. Contrario a esta permeabilidad, se llama gran permeabilidad, aquella que facilita la circulación del fluido a través de las fisuras.

1.3 Rocas Cársticas

Las rocas cársticas son rocas calizas en que las aguas subterráneas o pluviales, han provocado la disolución de zonas importantes, generando desde pequeñas oquedades hasta cavernas enlazadas por pozos, túneles, sifones, etc., conocidos como carst.

La dificultad en el tratamiento de estas rocas proviene de que los carst, son en general, poco numerosos, y los lugares donde se localizan aislados, tienen un trazado caprichoso e invisible desde la superficie, pueden tener grandes dimensiones y generalmente son recorridos por una corriente de agua.

Para impermeabilizar esta roca, no es suficiente establecer una pantalla de perforaciones e inyectar, como se hace comúnmente en las rocas fisuradas. Cuando una o varias perforaciones desembocan en carst, es posible que se necesite inyectar toda una gama de productos para detener las disoluciones y evitar su deterioro por efecto de las aguas subterráneas.

Sin embargo, la experiencia ha demostrado que cada caso es distinto de los anteriores, no pudiéndose establecer una regla que resuelva los problemas que van presentándose; por ejemplo, en la presa Charmine (Francia), la inyección de una sola perforación fue suficiente para suprimir casi la totalidad de las filtraciones, inyectándose alrededor de 20,000 m³ de diversos productos.

II ENSAYOS LUGEON

II.1 Permeabilidad

Para las rocas fisuradas o las cársicas se puede definir un coeficiente de permeabilidad de la misma forma que para los suelos pulverulentos como los aluviones.

El coeficiente de permeabilidad determina aproximadamente el estado de fisuración del terreno y facilita la evaluación de los gastos de infiltración. En la etapa de los estudios de escurrimientos subterráneos, sólo las pruebas con agua realizados en los barrenos, a medida que avanza la perforación, permite obtener estos resultados.

A manera de recordatorio se menciona que estos ensayos consisten en anotar los caudales absorbidos a presiones crecientes y decrecientes, manteniendo cada caudal durante 10 minutos. El resultado expresa la cantidad de agua absorbida en litros por minuto y metro, a una presión de inyección de 10 kg/cm^2 . Cada tramo de sondeo ensayado es de 5 m de longitud. Todas estas condiciones definen la **Unidad Lugeon**.

Con cantidades inferiores a una Unidad Lugeon se ha considerado que la inyección resulta innecesaria. El criterio establecido por Maurice Lugeon es adecuado para ser aplicado en presas de más de 30 m de altura. Por debajo de ésta se puede establecer como límite de permeabilidad el inferior a tres Unidades Lugeon.

Respecto a estos ensayos, conviene hacer algunas reflexiones sobre los resultados que de ellos se obtienen. Por ejemplo, raras veces se presentan los mismos resultados con presiones crecientes o decrecientes. No hay que olvidar que antes de la ejecución del ensayo, las fisuras cortadas por la perforación están más o menos colmatadas por los sedimentos producto de ésta. Esto entre otras cosas impide efectuar ensayos largos de 10 m, o deducir las Unidades Lugeon por diferencias de pruebas. Hacer la comparativa de las presiones crecientes y decrecientes es muy significativa, sobre todo en lo que concierne al comportamiento del terreno. Algunas veces se puede observar gastos más elevados cuando la presión es menor, esto puede deberse al efecto de lavado de las grietas.

No debe perderse de vista que estas pruebas son ensayos simples y que sólo aportan una indicación cualitativa de la permeabilidad del medio, su interpretación cuantitativa es difícil e incierta.

II.2 Longitud De Los Tramos De Prueba

Las longitudes de pruebas deben adaptarse a la naturaleza del terreno. Se acostumbra realizar las pruebas en tramos de 5 m, pero si el terreno es estratificado,

y tiene un espesor menor a esta dimensión, es conveniente reducir la longitud de prueba, ya que seguramente la permeabilidad será variable dentro de ésta. La reducción, obviamente, sólo puede programarse después de efectuada la perforación y la clasificación de las muestras de rocas recuperadas.

Es aconsejable entonces, siguiendo el ejemplo, reducir los tramos de prueba a 4m o menos, y en profundidades donde se note pérdidas del agua de perforación.

Cuando la calidad de la roca es buena se aconseja comenzar con tramos de 5 m. Si la roca es fisurada y se mantiene esta longitud, no es posible formarse una idea más precisa sobre el estado de la fisuración. Una absorción de 50 litros por minuto, bajo una presión de 10 kg./m², en un tramo de prueba de 5 m de longitud puede deberse a una sola fisura grande, a 10 menores, o a 100 fisuras muy finas, como se analizará con más detalle en el capítulo siguiente.

A fin de lograr un conocimiento más preciso de la fisuración de la roca podría efectuarse en este mismo tramo, por ejemplo, una prueba a cada metro; es decir, cinco pruebas en vez de una. Es obvio que si sólo existe una fisura, cuatro registrarán absorciones nulas y en una aparecerá toda la absorción. Si la fisuración de la roca tiene una distribución homogénea, las absorciones medidas en las cinco pruebas serán semejantes.

II.3 Disgresión Sobre Pruebas De Agua

A partir de Maurice Lugeon, es tradición efectuar sondeos de reconocimiento en los barrenos de inyección mediante pruebas de agua bajo presión por tramos. Con el gasto inyectado se obtiene una absorción, evaluada en litros de agua por minuto y por metro de perforación, llamada, como ya se mencionó, en unidades Lugeon. Esta medida sirve a la aplicación de la Regla de Lugeon, la cual recomienda que un macizo es considerado como impermeable, y no es inyectado, si absorbe menos de 1 unidad Lugeon, y es considerado permeable, y debe ser inyectado, si absorbe más de 1 unidad Lugeon.

Era normal que una recomendación tan sencilla, demasiado simple, obtuviera un gran éxito en los proyectos. Esta recomendación y la regla que fija la presión de inyección a 1Kg/cm² por metro de profundidad, el proyectista estaría armado para todos los problemas de inyección, la realidad, sin embargo, es más compleja.

Primeramente es necesario medir correctamente las presiones de la prueba de agua (figura II.1); es decir, que debe ser corregida la presión manométrica (pm) aumentándole la carga hidráulica presente por arriba del nivel freático y restándole las pérdidas de carga que se producen en el gasto de prueba, entre el manómetro y el tramo ensayado.

Con ciertos tipos de obturadores esta pérdida de carga puede no ser despreciable y conducir, aun en terrenos con gran permeabilidad, a limitar solo el gasto con lo que se mide entonces la permeabilidad del obturador y no la del terreno

En los macizos rocosos la absorción de agua se produce esencialmente por las fisuras. La matriz, es decir, el macizo sin fisuras, puede prácticamente considerarse como impermeable.

Para que el fenómeno sea accesible al cálculo, es necesario, como siempre, simplificar en extremo. El resultado de este cálculo se debe considerar entonces con prudencia, pero permite obtener resultados muy útiles

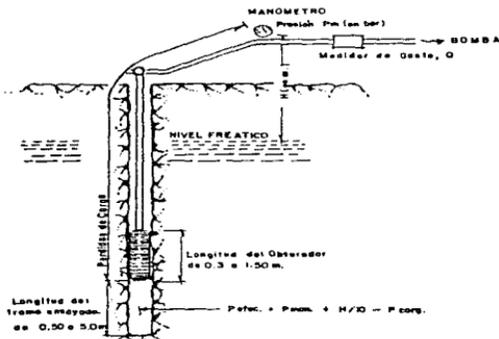


fig. II.1 Ensayo de Lugeon

Consideremos la fig.II.2(a), una fisura plana, indeformable, de espesor constante y atravesada perpendicularmente por un barreno de radio r_0 , se inicia la inyección de agua a la presión P , y a una distancia R del centro de la perforación, la presión dentro de la fisura es nula se establece la siguiente relación:

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

siendo q el gasto absorbido y ν la viscosidad del agua suponiendo el flujo laminar y desdénado los tiempos debidos a las variaciones de velocidad del agua, que en general es justificado en la práctica, el caudal es entonces y principalmente, proporcional a la presión y al cubo del espesor de la fisura e , esto es de gran importancia en la práctica W J Baker, encontró que el paso del régimen laminar a turbulento se presentaba para un número REYNOLDS V_{av}/ν , siendo V , la velocidad media comprendida entre 2000 y 4000 y ν el peso específico de la lechada, entonces el paso de un régimen a otro no depende más que de R , y la abertura de la fisura no tiene influencia en la aparición de la turbulencia.

Una variación importante de R/r no cambia el orden de la magnitud del fenómeno, puesto que ésta relación no interviene más que por su logaritmo. Si se elige un valor Limite igual a 2900, el caudal que le corresponde es de 1 l/seg para $r_0 = 5$ cm. con agua a la temperatura normal, por otra parte la circulación de una fisura de espesor cualquiera atravesada por una perforación de 100 mm. de diámetro no es laminar más que para caudales inferiores a 1 l/seg.

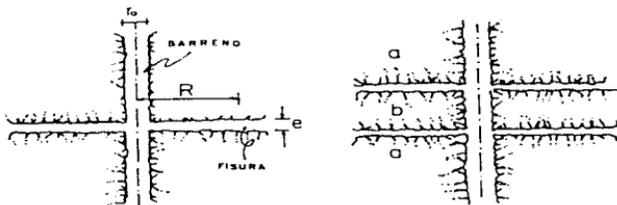


fig. II.2. Fisuras planas de espesor constante

Para una absorción de 1 unidad Lugeon (U L) en una prueba de agua efectuada en un tramo de 5m, es decir, un gasto de 5 l/min., corresponde a la absorción de una fisura única de 0.1 mm. de espesor aproximadamente, y una absorción de 10 U.L., o sea 50 l/min., permeabilidad ya apreciable, corresponde a sólo una fisura de 0.2 mm. de espesor aproximadamente, por último una absorción de 100 U.L., considerada enorme, puede ser debida a una fisura de no más de 0.5 mm. de espesor.

Si en lugar de una sola fisura, la perforación atraviesa muchas otras en el tramo de 5 m. las dimensiones de cada una son entonces aún más delgadas.

Se puede concluir con esto que en las pruebas Lugeon es posible aumentar la presión, aún si las absorciones son considerables, ya que las fisuras del macizo son muy finas, de espesor inferior a algunas décimas de milímetros

Es claro entonces que la prueba Lugeon no proporciona informes sobre el estado de fisuración de macizo. Si el tramo de 5 m absorbe bajo 10 bars 100 l/min, esta puede ser debido a una sola fisura de 0.25 mm de espesor, o 10 fisuras de 0.12 mm, o 100 fisuras de 0.06 mm. Se nota entonces la necesidad de volver a hacer pruebas metro a metro, por ejemplo

Continuando con el mismo ejemplo, si en la primera hipótesis de fisura única, entonces al hacer pruebas metro a metro, cuatro de los cinco tramos de 1m no absorberán nada, en el quinto se volverá a encontrar la fisura y ella sola absorberá los 100 l/min. En la otra hipótesis de fisuras numerosas, si se encuentran regularmente espaciadas, cada tramo de un metro absorberá aproximadamente 20 l/min. Es entonces importante hacer las pruebas Lugeon por tramos cortos y después acumular los tramos; la comparación realizada de esta forma puede dar indicaciones más precisas sobre el estado de fisuración del macizo.

III PENETRACIÓN Y ABSORCIÓN EN MEDIOS FISURADOS

III.1 Influencia De La Presión En La Abertura De Las Fisuras

En 1968, F. Sabarly dijo que "no era verdad en general, que el caudal de absorción de una fisura fuera proporcional a la presión de inyección del agua". Su afirmación la fundamentó en lo siguiente: sin tomar en cuenta los efectos dinámicos de la velocidad de partida del flujo y admitiendo por otro lado que este es laminar (W.J Baker) y no pasa a la fase de turbulento, ya que para un caudal dado y un mismo fluido, el paso de un régimen a otro no depende más que del radio R (cap. III.3) por tanto la abertura de la fisura no tiene influencia en la aparición de la transición del flujo y el macizo en el cual esta abierta la fisura no es infinitamente rígido. Una presión aplicada en la fisura deformará el macizo y tenderá a abrirla más. Esto no es de un efecto despreciable, sino todo lo contrario, muy sensible.

Consideremos una o dos fisuras atravesadas por un tramo de ensayo fig II.2.(b), bajo el efecto de la presión se comprimen los espacios a y b . Estos provocan el endurecimiento en la zona aledaña a la abertura de la fisura.

Es imposible realizar un cálculo exacto para evaluar dicho efecto, pero puede intentarse determinar el orden de magnitud. La compresión de los espacios a y b puede determinarse aplicando la fórmula de BOUSSINESQ, que da el hundimiento W de un disco de radio R cargado por una fuerza F (fig. III.3). Si E es el coeficiente de elasticidad del medio y l/m el coeficiente de Poisson se tiene:

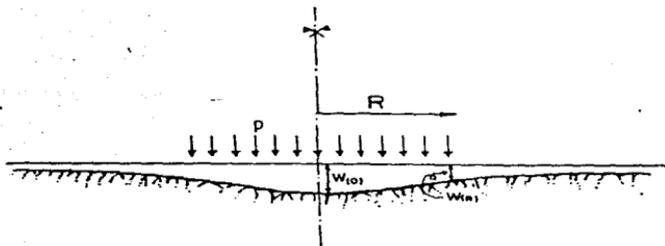


fig. III.3 Deformación de la roca por efecto de la presión de inyección

$$W = \frac{2F}{\pi} \frac{1-(1/m)^2}{RE} \dots\dots\dots(2)$$

podemos suponer $1/m=v$, y designar la presión P por unidad de superficie:

$$W = \frac{2(1-v^2)}{E} \frac{F}{\pi R}$$

$$W = \frac{2(1-v^2)^2}{E} \frac{FR}{\pi R^2} \quad \text{como } P = F/A$$

$$\text{entonces } W_{(0)} = 2 \frac{(1-v^2)}{E} PR \quad \dots\dots\dots (3)$$

Esta relación nos da el hundimiento al centro de la fisura, para el borde de ella se puede determinar.

$$W_{(R)} = 4 \frac{(1-v^2)}{\pi E} PR \quad \dots\dots\dots(4)$$

Como se trata de una fisura, la abertura debida a la presión aplicada será el doble de estas deformaciones, ya que el mismo fenómeno se produce sobre la cara superior, por ejemplo, si tenemos las condiciones siguientes:

$$R = 1 \text{ m, } P = 10 \text{ kg./cm}^2, v = 0.5, E = 100,000 \text{ kg/cm}^2$$

Se obtiene $2 W_{(0)} = 0.3 \text{ mm}$ al centro del círculo
 $2 W_{(R)} = 0.2 \text{ mm}$ al borde del círculo

Esto implica que la abertura de una fisura varía con la presión de circulación y este procedimiento permite tomarla en cuenta, ya que en la determinación no interviene más variable que la presión. Como se mencionó, la pérdida de carga debida a la variación de la energía cinética es pequeña, comparada con la pérdida de carga debida al rozamiento.

Como ejemplo H. Cambefort realizó el cálculo para una fisura de 0.2 mm de abertura inicial, situada en el macizo rocoso cuyo coeficiente de elasticidad es de 400,000 kg./cm², para una presión de 6.7 kg./cm², el resultado se muestra en la figura VI.4.

Las gráficas reflejan la influencia de la turbulencia, el diámetro de la perforación y la abertura de la fisura, donde ésta última es sin duda la más preponderante. Por lo que podemos ver que en el caso de una fisura única, el resultado del ensayo Lugeon depende

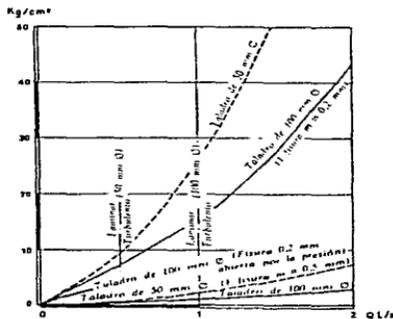


fig. III.4 Circulación de agua en una fisura única. Ensayo Lugeon (R= 10 m)

totalmente de la naturaleza de la corriente de circulación y del diámetro de la perforación y como ya vimos, toda búsqueda de precisión respecto a las pruebas de agua es inútil. Contrariamente el orden de magnitud del resultado caracteriza perfectamente la abertura de la fisura, y es en esta característica donde se encuentra el valor de este ensayo, como ya lo veremos en el capítulo IV.

En la misma figura III.3, se ha graficado las curvas para un $r_0 = 100$ mm, se aprecia el mismo fenómeno que para $r_0 = 50$ mm, sin embargo, el régimen turbulento se presenta a un gasto mayor, ya que éste depende del diámetro del barreno.

Precisamente este comportamiento en la abertura de las fisuras —que impide una interpretación correcta de los ensayos Lugeon— es extremadamente favorable en la inyección de las rocas, se puede decir que gracias a este comportamiento la inyección en los macizos fisurados se consigue de manera satisfactoria, con el empleo de una simple suspensión de cemento.

III.2 Inyección De Un Fluido No Newtoniano En Una Fisura

J. Brillant, estableció una relación para la inyección de un fluido newtoniano, esta misma relación se aplica para el caso de un fluido no newtoniano, porque permite cálculos relativamente sencillos, mientras que son prácticamente imposibles si se adopta la ley de Brillant que es la de todos los morteros inestables.

Consideremos entonces la relación (1) en el momento en que se inicia la inyección en una fisura indeformable, la circulación se rige por la relación e la fórmula 1:

$$q = \frac{\pi P e^3}{6 \nu \ln \frac{R}{r_0}}$$

Como R se comporta bajo el signo logarítmico, sus variaciones no influyen de manera importante en la presión. Puede decirse que P es proporcional a q , por ello la presión al comienzo de la inyección (como ya mencionamos) no depende más que del caudal.

La inyección de un mortero inestable no es más que la clásica sedimentación hidráulica que comienza a presentarse cuando la velocidad de circulación del mortero es lo suficientemente baja para que los granos de cemento se depositen, es necesario entonces que esta velocidad sea elevada en la mayor distancia posible en torno a la perforación; es decir, es preciso inyectar con un caudal grande. Conviene aclarar que la presión a aplicar es proporcional a la viscosidad del mortero.

Estos fundamentos justifican, teóricamente, el porque la dosificación del mortero se determina a partir del resultado de un ensayo con agua, realizados, inclusive, en

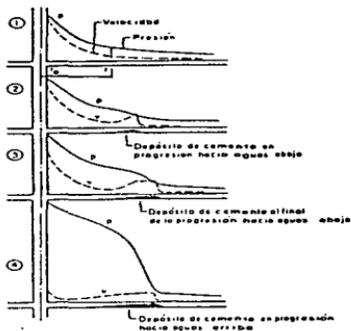


fig. III 5 Inyección de una fisura con mortero inestable.

progresiones grandes, con morteros demasiado espesos o con la velocidad crítica de sedimentación.

La fórmula no explica lo que ocurre después del comienzo de la inyección, pero al final del proceso, cuando la fisura está casi totalmente rellena de cemento y no existe por encima de ésta más que un ligero paso de abertura e_0 , la fórmula constituye una buena aproximación del régimen de circulación que, paradójicamente, en ese momento se establece.

Para comprender el proceso de sellado por la inyección de fisuras mediante lechadas inestables se recordará que la velocidad del fluido inyectado decrece hacia el interior de la grieta y que debajo de cierta velocidad crítica, las partículas sólidas se depositan obstruyendo el conducto. Es decir, que a partir de un cierto punto en el interior de la grieta se forma un depósito de partículas sólidas que a medida que crece, la sección del conducto disminuye y la velocidad del fluido aumenta. Datos experimentales muestran que la velocidad de erosión es muy superior a la velocidad crítica de sedimentación; por lo tanto el material sedimentado permanece en su sitio. Aguas abajo del depósito la velocidad decrece en forma considerable, extendiéndose la sedimentación. El aumento de pérdida de carga resultante reduce el caudal

inyectado por la bomba y la velocidad de la lechada disminuye aguas arriba propagándose la sedimentación. Al no alcanzarse la velocidad de erosión la fisura se rellena aguas arriba hasta llegar a la perforación de inyección.

La presión P correspondiente a esta última etapa es lo que se llama presión de rechazo y es la que se ha fijado, en el mayor de los casos, más a sentimiento que técnicamente. Si esta presión de rechazo es muy baja la inyección no se realiza bien. Si la circulación en este momento es débil, no puede lograr comprimir el depósito de cemento. Este fenómeno se puede superar con el sólo hecho de aumentar fuertemente la presión de rechazo admitida.

El relleno resultante en la forma descrita, no es completo puesto que queda una parte de la sección de la grieta por donde circula el fluido inyectado, sin embargo debe tomarse en cuenta que la presión de inyección ha aumentado la abertura de la fisura y que cuando se suspende la inyección las paredes de la grieta tienden a recuperarse comprimiendo el depósito, mejorando el relleno y el sellado de la fisura.

La fórmula anterior (3) deberá ser corregida para tener en cuenta la deformación del macizo bajo el efecto de la presión; sin embargo, debe tomarse en cuenta la hipótesis que se ha efectuado antes, dado que el cálculo explícito es imposible (F. Sabarty), y la determinación práctica muy laboriosa, además de que no vale la pena poseer una precisión estricta sobre este aspecto.

Simplificado para obtener cualitativamente la magnitud del fenómeno, admitamos que la deformación del macizo, es decir, el aumento del espesor de la fisura, e , es proporcional a la presión e inversamente al coeficiente de elasticidad del macizo.

$$e = \alpha \frac{P}{E}$$

Esta fórmula es análoga a las fórmulas 3 y 4; en un principio, antes de la inyección de agua bajo la presión P , el espesor de la fisura es e_0 , entonces,

$$e_0 + e = e_0 + \alpha \frac{P}{E}$$

La fórmula (1) podrá escribirse entonces:

$$q = \frac{\pi}{6\nu \ln(R/r_0)} \frac{P(e_0 + \alpha P)^3}{E}$$

tomando en cuenta que en las fisuras deformables, la abertura es directamente proporcional a la presión de inyección (ver fórmula 3) y que además el gasto es proporcional al producto del cubo de la magnitud de la abertura de la fisura por la

presión de inyección y si el espesor e_0 de la fisura al inicio es muy pequeña y casi nula tendremos

$$q = A P^4$$

Siendo A una constante

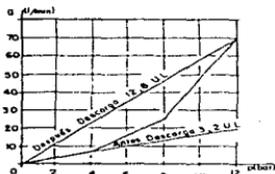
El gasto variará como la cuarta potencia de la presión. Esto explica porque frecuentemente haciendo las pruebas Lugeon a presión ascendente, se presenta lo que se llama una presión de "descarga", esto es, una presión a partir de la cual los caudales absorbidos aumentan muy rápidamente. No existe en realidad presión de descarga, sino que debido al crecimiento a la cuarta potencia, una pseudodiscontinuidad tiende a presentarse, dado que las medidas no registran más que algunos puntos. Este fenómeno se le conoce en México como "fracturamiento hidráulico" o "hidrofracturamiento".

En la figura III 6 (a), se ha representado una prueba de agua ficticia de varias presiones 2, 4, 8, 10 y 12 kg /cm² en una fisura abierta originalmente de 0.1 mm

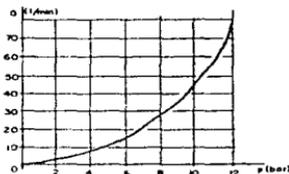
Una interpretación rápida (superficial) concluirá a una "descarga" en 6 kg /cm² de presión aproximadamente, en la figura III 6 (b), se ha representado esta prueba bajo la forma de una curva del tipo

$$q = AP^2 (e_0 + Bp)^3$$

se puede ver que el fenómeno es perfectamente continuo



(a)



(b)

fig. III 6 Pruebas de agua a varias presiones (ficticias)

En la figura III.7, se muestran algunos ejemplos de pruebas de agua reales, extraídos de un informe de obra, con la interpretación que ha sido dada por la empresa. Estos parecen poner en evidencia una "descarga de presiones variables, y habían sido

interpretadas así, pero si vemos los valores obtenidos en éstas, graficadas en coordenadas log - log, (fig III 8), se puede ver que estos puntos se alinean sobre las rectas representando una relación en la forma

$$q = AP^4$$

No solamente no hay descarga, sino simplemente abertura elástica de la fisura, pero con la proporcionalidad directa de la potencia de 4 de las presiones, muestra que la abertura inicial de las fisuras es casi nula

Siguiendo con el análisis de las pruebas reales se encuentra que el coeficiente α / E varía de 1.5 a 2.5×10^{-2} mm por bar, es la medida de 2/100 mm por bar de presión aplicada; este es el orden de magnitud ya encontrado (0.2 mm para 10 bares). Resalta el hecho de que estos cálculos muy simplificados, encuentren una justificación experimental precisa

De lo anterior se puede resumir que las pruebas LUGEON a una sola presión y efectuadas en progresiones de 5 m, proporcionan muy poca información, por el contrario, se puede obtener mejor información de pruebas efectuadas a varias presiones y en longitudes variables, en tanto que el terreno se preste, ya que la influencia de la presión sobre la abertura de las fisuras esta lejos de ser despreciable y ser tan preponderante

que un terreno originalmente podrá dar lugar a absorciones de agua notables bajo una presión de 10 bars, y por último que los gastos son muy sensibles a la abertura de la fisura, puesto que estos crecen con el cubo del espesor de las fisuras

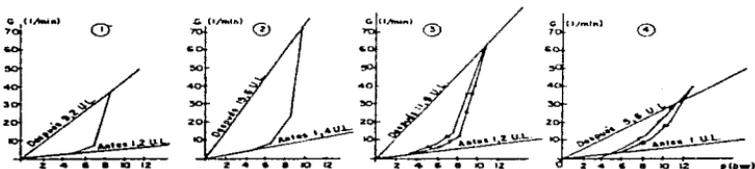


Fig. III.7 Pruebas de agua reales

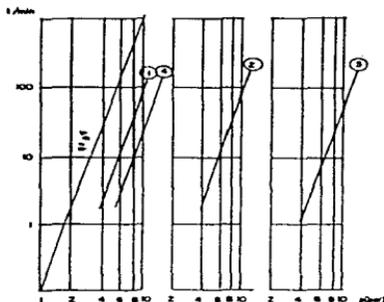


fig III.8 Pruebas de agua en coordenadas logarítmicas

Se debe considerar que este análisis es muy superficial, porque básicamente analiza la existencia de una sola fisura en el tramo de ensayo y no tiene en cuenta el estado de tensión preexistente en el macizo o el creado por las propias inyecciones; sin embargo, es claro que con estos elementos se cuenta con un instrumento eficaz para comprender mejor los fenómenos de inyección.

Ahora bien, respecto a la relación sobre las pruebas de agua y la inyección: es clásico ya, decir, que no existe ninguna relación entre ellas; en efecto, la tentativa para establecer esta relación ha fracasado siempre. Esto no es sorprendente, primero y sobre todo porque la prueba es ejecutada bajo una presión de 10 bars, mientras que la inyección se efectúa a 30 ó 40 bars; además la lechada de cemento de una suspensión consiste en un material fino, pero granuloso, en disolución y no se comporta como el agua limpia.

Si la lechada es estable, se comporta como un cuerpo de Bingham, con cohesión y viscosidad a la vez; si la lechada es inestable el agua se separa del cemento y su comportamiento será completamente impredecible, siendo alternativamente un fluido Newtoniano o Binghamiano.

III.3 Número Y Tamaño De las Fisuras

Consideremos una vez más el régimen laminar en una fisura, y un macizo rocoso rígido y además que las pérdidas de carga por razonamiento son las importantes. Tenemos entonces que la pérdida de carga es proporcional al cubo de la abertura e de la fisura. (H. CAMBEFORT 1968). Si la perforación atraviesa n fisuras de abertura e_1, e_2, \dots, e_n el ensayo de agua dará el mismo resultado que para una sola fisura de abertura e , entonces:

$$e^3 = e_1^3 + e_2^3 + e_3^3 + \dots + e_n^3$$

En la tabla III 1, H. Cambefort, obtuvo los resultados de dos tramos de longitudes diferentes que ponen de manifiesto la influencia del número y abertura de las fisuras, este cuadro, a pesar de presentar resultados con números decimales, son solamente orientativos, lo fundamental son las conclusiones a que puede llegarse con ellos.

Una permeabilidad de 100 U.L. es muy elevada y como se ve, puede ser debida a 1, 10 ó 100 fisuras de una décima de milímetro de abertura; estas fisuras no son inyectables con mortero de cemento a pesar de la fuerte permeabilidad registrada, las decisiones que el ingeniero debe tomar son difíciles, ya que se tendrá, paradójicamente, una fuerte permeabilidad y una absorción, casi nula

Tabla No. III.1

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

Inversamente, se puede tener una permeabilidad de una unidad Lugeon, con una sola fisura de una décima de milímetro, permeabilidad muy baja que obligará al ingeniero a tomar precauciones extremas, sin embargo la inyección es posible y relativamente fácil, y la absorción, inclusive, podrá no ser pequeña.

Por tanto, es imposible ligar la absorción de agua y la penetrabilidad del cemento. En determinados sitios podrá existir correlación porque la abertura de las fisuras dependa de ciertas condiciones geológicas, pero si se quiere extrapolar estos

resultados a otros lugares, se corre el riesgo de que no respondan a la realidad. Por tal motivo, sigue siendo justificada la inyección de barrenos de reconocimiento geológico, ya que gracias a ellos se puede determinar la naturaleza del mortero y el método de tratamiento mejor adaptado al terreno.

III. 4 Influencia de la Granulometría en los Cementos de Inyección

Para que el cemento pueda penetrar en las fisuras, es necesario, obviamente, que sus granos puedan penetrarla. No solamente los granos finos, sobre todo los granos más gruesos, ya que estos se acunán en la entrada de la fisura y se organizan como un filtro impidiendo a los granos más finos penetrarla.

Por ejemplo, en un tramo de perforación de 5 m. una absorción de 20 U.L., es decir 100 l/min., bajo 10 kg./cm² puede ser debida a una sola fisura de 0.25 mm de abertura aproximadamente.

Si se inyecta con un cemento en el cual la granulometría pasada por tamiz bajo vía húmeda es la del cemento A, mostrado en la figura III.9, (una granulometría real), no hay más que 2/1000 de granos superiores a 0.25 mm. Esto, que pudiera parecer poco, es en realidad demasiado.

Para obstruir la entrada de esta fisura dentro de una perforación de inyección de 5 cm de diámetro, y si la fisura no es demasiado oblicua respecto al barreno, es suficiente, teóricamente, menos de 2 centigramos de granos de cemento de 0.25 mm de diámetro y, para ser ancha, podemos admitir en las fisuras 10 veces más, o sea 0.2 gramos.

Bastará entonces 100 gr. de este cemento para suministrar esos 0.2 gr. de granos de diámetro igual o superior a los 0.25 mm. En el momento en que 100 gr. de cemento hayan penetrados en la fisura, su abertura estará taponada (y con mucha probabilidad mucho antes) pues esos 100 gr. de cemento no obturan más que 100 cm³ de vacíos, si la fisura es de 0.25 mm de espesor sobre radio del orden de 35 cm, a menos de aproximar más los barrenos de inyección a 70 cm, no se llegará a inyectar correctamente esta fisura; aun cuando la prueba LUGEON haya dado una absorción bastante considerable.

Sin duda se llegará a inyectar, porque la inyección a 30 ó 40 Kg./cm²: la fisura que tenía originalmente 0.25 mm de espesor a 10 kg./cm², tendrá ahora 0.6 a 0.9 mm y el cemento pasará a través de ella. Pero si la absorción de 20 U.L. no es debida a una sola fisura de 0.25 mm. sino a 20 fisuras de 0.10 mm de abertura, la abertura adicional debida a la presión será más delgada, entre otras cosas por la proximidad entre ellas, a menos que una fisura no tome mezcla y no se abra. Por otra parte si la inyección tiene lugar a sólo 10 Kg./cm², el cemento A no pasará en ninguno de los casos.

Esto viene a corroborar lo difícil que es establecer una correlación entre una prueba LUGEON y la absorción de cemento.

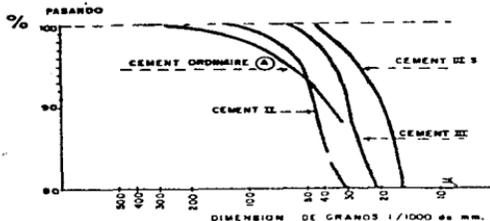


fig. III.9 Granulometría de varios tipos de cemento

III.5 Inyección De Una Lechada Inestable En Una Fisura

Veamos nuevamente la figura III 5, el relleno es una lechada de solamente cemento y agua que se inyecta a un caudal de 1 l/s, gasto máximo para una inyección normal. Al principio la mezcla escurre por la fisura en forma laminar hasta varios centímetros a partir del eje del barrenado cualquiera que sea la abertura de la fisura. En el contacto con las paredes la velocidad es nula ya que la distribución de velocidades es parabólica en una sección cualquiera y como la presión decrece rápidamente con respecto a la distancia al barrenado, la velocidad media decrece aún más de prisa, por lo tanto los granos de cemento pueden depositarse fácilmente.

La curva superior en línea continua muestra la variación de las presiones en función de la distancia, y la de línea punteada la variación de la velocidad de la corriente. Como la velocidad disminuye hasta un valor crítico, en relación a la distancia, la presión también decrece y en ese momento los granos de cemento ya no permanecen en suspensión, depositándose. Las partículas de diámetro igual a 0.5 mm, muy próximos

al diámetro de los granos gruesos de cemento se depositan con velocidad de circulación del orden de 3 a 4 cm/s.; mientras que son necesarias velocidades de 20 a 30 cm/s., (Hulstrom) para volver a colocar en suspensión estos depósitos.

Un efecto secundario se produce cuando los granos que no se adhieren bien a la pared superior de la fisura caen en una región donde la velocidad de circulación puede de nuevo arrastrarlos y ponerlos en suspensión, pero a cierta distancia esta velocidad no es suficiente para mantener la suspensión de los granos. Solo los granos de la parte inferior pueden depositarse y reducir la abertura de la fisura.

Al formarse el depósito en aguas arriba, como ya se vio, se presenta un aumento de la velocidad de circulación en la sección que se ha reducido, sin embargo, no llega a ser del rango de 20 a 30 cm/seg., para poner en suspensión los granos depositados, ya que esta velocidad de erosión es muy superior a la velocidad con que cuenta la lechada en ese momento y en ese lugar dentro de la fisura, por lo que el depósito de cemento progresa hacia aguas abajo.

Puesto que la manera de obturación del mortero impide un relleno de fisuras satisfactorio es suficiente inyectar un mortero que no sedimente para lograr un buen resultado, y completar la obturación de una sola vez. Pero es evidente que así como existen fisuras finas, existen otras más anchas, entonces el mortero marchará preferentemente por estas últimas, siendo sistemáticamente limitadas las cantidades de mortero, de este modo las fisuras más finas no alcanzarán el grado de tratamiento deseado. En la actualidad elaborar un mortero estable para conseguir este objetivo no es ningún problema y para aliviar el problema de la pérdida de agua en la mezcla durante la inyección, previamente se inyecta agua para saturar las fisuras.

III.6 Inyección De Una Lechada Estable En Una Fisura.

Hasta hace poco tiempo se sabía que si la compresibilidad del suelo, por efecto de la inyección, permite comprender porque la inyección de un mortero inestable provoca un relleno de fisuras, también permitía comprender porque no es posible crear una estanqueidad correcta en un macizo fisurado.

Al detener la inyección, la fisura vuelve a su abertura normal generando la expulsión de parte del mortero. En el caso de los morteros estables mas usuales de cemento-arcilla, su estabilidad, en el sentido estricto de la palabra, no es cierta al 100 por ciento, ya que antes de su fraguado se produce un ligero resque de agua. Esto es suficiente para que la estanqueidad no sea completa.

Es por esta razón que un mortero estable, al ser su fraguado más lento, permite que la roca inyectada se transforme, de una roca fuertemente fisurada, a otra con fisuración más fina y en algunas ocasiones, para poder lograr la estanqueidad, es necesario efectuar una reinyección.

Sin embargo, cuando la inyección del mortero estable ha provocado un abombamiento permanente del suelo no existe, evidentemente, necesidad de la reinyección. Este abombamiento se explica por el aumento del tamaño de las fisuras, al entrar en ellas mortero resistente que impide se cierran. Desgraciadamente no pueden admitirse siempre levantamientos del suelo de varios centímetros que además, nunca son sistemáticos

III.7 Inyección De Varias Fisuras.

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

Para poder comprender lo que sucede cuando no son idénticas las fisuras, examinemos el esquema de la figura III.10(b), donde todas están situadas en planos paralelos, dos fisuras AA y BB, están más abiertas que las otras y la presión de inyección es la misma a la entrada de cada fisura. Al principio de la inyección el mortero penetra en todas ellas y en las fisuras AA y BB, va más lejos. Las pérdidas de carga en la circulación son menos fuertes en estas dos fisuras, lo que equivale a que las presiones son en éstas más elevadas. De esto resulta una fuerte compresión de los dos semiespacios, el superior en AA y el inferior en BB, el volumen comprendido entre AA y BB también se comprimen, pero siendo su espesor pequeño, esta es relativamente poco importante.

Por efecto de la compresión entre las fisuras grandes, paradójicamente, las fisuras finas se cierran y solamente las más anchas, son prácticamente inyectadas, pero, en determinado momento, como consecuencia propia de la presión, algunas fisuras finas, abren, inyectándose a su vez.

Esta abertura provoca 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 y parcialmente inyectadas por el depósito de cemento, vuelven a cerrarse. Sus paredes o paramentos pueden llegar a juntarse con el cemento inyectado, provocando una inyección total de la fisura e incluso un pretensado del macizo. De esta forma las fisuras son sucesivamente obturadas; primeramente las grandes y luego las más delgadas.

De lo anterior se infiere que, cuanto más fuerte sea la presión, más posibilidad existe de inyectar las fisuras finas. Al abrirlas permiten inyectarse aquellas que, incluso, en estado normal son demasiado finas para permitir el paso de los granos de cemento. Este punto es de gran importancia, ya que una gran cantidad de fisuras finas permite una circulación de agua tan importante, equivalente a varias fisuras aisladas mucho más abiertas fácilmente impermeabilizables a baja presión. Por lo tanto, es relevante y

de interés constructivo y económico, 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 gran volumen



Fig. III.10 Inyección de fisuras paralelas y que se unen, de espesor variable.

Consideremos ahora el caso, muy simplificado, de fisuras que unen otras dos fisuras horizontales, fig. III.10(a), estas fisuras inclinadas o verticales son el medio de circulación desde la zona de fuertes presiones hacia las de baja, en el caso de la figura mostrada. 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 estar más o menos cerradas por la presión reinante en las fisuras horizontales y su estanqueidad es, si no nula, al menos muy mala

Es necesario, por lo que acabamos de ver, que los barrenos para la inyección, estén dispuestos de manera tal que atraviesen el sistema de fisuración principal, ya que esta situación impide, en la mayoría de los casos, que no sea posible alcanzar totalmente la estanqueidad de una roca fisurada, cualquiera que sea la separación de las perforaciones no obstante que el depósito de cemento que se forme en las fisuras sea perfectamente estanco. Esta disposición de fisuras en un macizo es la que justifica en los proyectos efectuar una campaña de inyección secundaria, y si es necesario, una terciaria (ver capítulo VI.4), el criterio para su espaciamento, simple, pero evidente, es efectuarla a la mitad de distancia entre los barrenos de la primera fase de inyección.

III.8 Presión De Inyección Y De Rechazo De Un Mortero.

Reconsideremos el caso de una fisura única de abertura e , inyectada con un mortero inestable y una presión P , entonces el movimiento o circulación q , del mortero en la

la fisura esta determinado al comienzo de la inyección por la siguiente relación de la fórmula (1), en la cual acomodando terminos queda como sigue:

$$P = \frac{6vq}{\pi e^3} \ln \frac{R}{r_0}$$

Debido a que las variaciones de R, se dan como ya dijimos, bajo el signo logarítmico no influyen mucho en la presión y puede decirse que P es proporcional a q, por ello la presión al comienzo de la inyección, no depende más que del caudal. Esta fórmula no nos dice lo que ocurre después del comienzo de la inyección, la explicación del fenómeno, dada anteriormente, nos da la razón de ello. Sin embargo, puede muy bien pensarse que al final de la inyección cuando la fisura este casi totalmente rellena de cemento y no exista por encima de ésta más que un ligero paso de espesor e_0 , la fórmula constituye una buena aproximación del régimen de circulación.

La presión P correspondiente es lo que se llama presión de rechazo. Esta presión es en general la máxima que se fija de antemano y más bien a sentimiento que técnicamente. Con el empleo del principio de Intensidad de inyección propuesto por el Dr. Giovanni Lombardi, veremos que mucha de esta incertidumbre se ha superado enormemente.

Como ya vimos es preciso que esta presión de rechazo no sea demasiado débil, ya que de esta manera la inyección no se realizaria bien. Si se detiene la circulación en ese momento, el macizo no puede comprimir el depósito de cemento. Veámoslo con más detalle. La sección de abertura e_0 independiente de la dimension de la fisura, es básicamente proporcional a la raíz cúbica de vq/P y no depende más que de v porque P/Q es prácticamente constante. Por el contrario el aumento de la abertura 2W es proporcional a P. La condición indispensable de $2W \gg e_0$ no se obtiene más que si P sobrepasa un valor mínimo que esta en función de la viscosidad del mortero, de la elasticidad del macizo rocoso (espesor de la fisura) y del radio de la inyección. La presión de rechazo depende de las condiciones de la inyección, por lo tanto con el empleo de lechadas inestables por ejemplo es necesario adoptar presiones de rechazo elevadas y alcanzarias con caudales pequeños y lechadas poco viscosas, simple confirmación teorica para una práctica correcta.

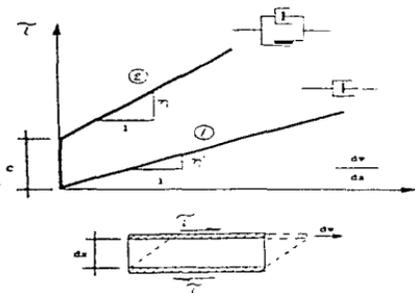
H. Cambefort menciona además que al disminuir los caudales existe una limitación por el peligro de obturación de las conducciones que habitualmente se producen violentamente en el rango de 0.05 a 0.07 l/s.

IV. DESARROLLO DEL CONCEPTO CONSTANTE DE INYECCIÓN

IV.1 Fundamentos En La Implementación Del Método .

En este capítulo veremos como fueron desarrollándose y ordenándose los conceptos que dieron origen al principio de intensidad de inyección

El agua es un cuerpo Newtoniano ya que presenta resistencia a fluir como resultado de la interacción y enlace de sus moléculas (fig IV 11) esta característica es la viscosidad del fluido, si consideramos el movimiento del flujo sobre una frontera sólida, donde las partículas se mueven en líneas rectas paralelas, se supone que éste se produce en forma de capas o láminas cuyas velocidades varían con respecto de la distancia normal a dicha frontera. De acuerdo con Newton el esfuerzo tangencial que se produce entre dos láminas, separadas una distancia diferencial, es proporcional al gradiente transversal de velocidades y a una constante de proporcionalidad representativa de la magnitud característica de la viscosidad del fluido



$$① : \tau = \eta \cdot \frac{dv}{ds}$$

$$② : \tau = c + \eta \cdot \frac{dv}{ds}$$

Leyes reológicas

① Fluido Newtoniano (e.g. agua)

② Fluido Binghamiano (e.g. lechada estable)

τ = Esfuerzo cortante.

$\frac{dv}{ds}$ = Gradiente de velocidad.

η = Viscosidad

c = Cohesión

fig IV 11 Leyes reológicas de los fluidos Newtonianos y Binghamianos

La inyección de una lechada estable (significa que bajo condiciones normales el agua no se separará del cemento), se comporta como un cuerpo de Bingham es decir con cohesión y viscosidad a la vez

La cohesión (límite elástico o límite de fluencia) hace que el comportamiento de una mezcla estable sea fundamentalmente diferente que el del agua, por su parte, una lechada inestable se separará en agua y cemento, siendo este comportamiento a partir de este instante completamente impredecible, tomando alternativamente características de un cuerpo Newtoniano o Binghamiano.

Las investigaciones muestran que tan pronto se presenta o incrementa la fricción interna en la lechada, la inyección ya no es posible. Existe entonces una relación agua/cemento (A/C) bajo la cual los granos de cemento entrarán más en contacto unos con otros desarrollando esta fricción. Este fenómeno se presenta muy comúnmente cuando durante la inyección algo del agua de la mezcla es absorbida por la roca o escapa a través de grietas muy delgadas, el proceso de inyección entonces, se detendrá inmediatamente.

Podemos diferenciar dos situaciones de las cuales una seguramente se presentará para una determinada relación A/C baja, la fricción aparecerá en la lechada y provocará la suspensión de la inyección, y para una relación límite A/C alta, la lechada ya no es estable y su comportamiento deja de ser predecible.

De cualquier forma la inyección de la mezcla necesita de cierto exceso de agua con respecto a la cantidad estrictamente necesaria para el fraguado del cemento. Como una indicación aproximada se puede tomar como límites los siguientes dos valores $A/C_{\text{mín}} = 0.4$ y $A/C_{\text{máx}} = 1.0$ en peso. Estos dos valores pueden estar influenciados por el adicionamiento de algunos aditivos como la bentonita o los fluidificantes.

En la figura IV.12, se muestran los resultados de la fluidez de Marsh y de sedimentación de una lechada de agua-cemento para diferentes relaciones de A/C, en ella se indican los mencionados límites teóricos y el valor correspondiente a la relación A/C = 0.6 seleccionada para la presa PAUTE de Ecuador. Como se puede observar el lado derecho el límite de A/C = 1.0, la lechada no difiere mucho del agua sucia.

En las investigaciones efectuadas sobre procesos de inyección de lechadas estables que siguen la ley de un cuerpo Binghamiano se han encontrado los siguientes resultados: En la inyección de una sola grieta, la máxima distancia recorrida (radio de inyección) está en función solamente de la presión final aplicada, el espesor de la grieta y la cohesión de la lechada. El principal efecto de la cohesión es por lo tanto, limitar la extensión de la zona de inyección y evitar, en lo posible, altos consumos innecesarios de lechada, ver figura IV.13.

La relación entre la presión de la lechada, la distancia efectiva recorrida por ésta, y el espesor de la grieta se muestra para un caso simple en la figura IV.14. La distancia efectiva recorrida fue calculada suponiendo un factor K teórico con una eficiencia igual a 0.2; este factor toma en consideración diferentes hechos como los siguientes:

- La grieta nunca es absolutamente lisa.
- La grieta nunca está completamente abierta, y la lechada se enfrenta a algunos obstáculos.
- El espesor de la grieta no es absolutamente constante, por lo que existen secciones de control para el flujo que producen pérdidas de carga.

- Comúnmente la grieta no se encuentra limpia, razón por la que algunos detritos pueden alterar el flujo
- El proceso de inyección podrá ser finalizado antes del fin teórico.

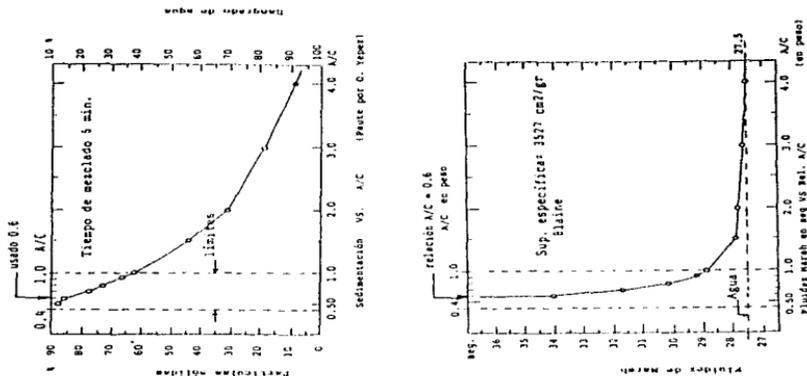
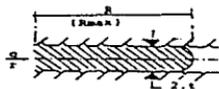


fig IV.12 Límites teóricos y valores usados del factor A/C, Presa PAUTE, Ecuador.

El factor de eficiencia debe de comprobarse en campo. Por supuesto hay un límite más bajo que se aprecia en la misma fig IV 14, ya que los granos de cemento no pueden penetrar en las juntas más delgadas al espesor mínimo de la grieta $S = 0.2$, (depende del tipo de cemento usado) Sin embargo, no debemos de olvidar que el aumento de presión provoca un aumento de espesor de la fisura y las partículas de cemento podrían entonces penetrar

Aunque la cohesión limita la distancia de recorrido, y por lo tanto los aumentos que se pueden lograr son finitos, evidentemente la lechada en nuestro ejemplo y en la realidad, es inyectada a una presión constante, por lo que el tiempo necesario para alcanzar la distancia teórica no está limitada. Esto significa que tiene lugar un proceso asintótico y al estar empleando una presión constante hasta completar la inyección, puede no ser realizada de manera completamente eficiente. Esta conclusión difiere mucho de lo que usualmente se piensa de la inyección, como se caracteriza en la siguiente tabla:



$$R_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{C} \cdot t = h \cdot \frac{t}{Cr}$$

donde: $Cr = \frac{C}{\rho}$ $h = \frac{p}{\rho}$

$$P_{DEC.} = \frac{R \cdot C}{t} = \frac{2 \cdot C}{2 \cdot t_{MIN.}} \cdot R$$

$$V_{MAX} = \frac{2t \cdot p_{MAX}^2}{C^2} \cdot t^3 = 2 \cdot h^2 \cdot \frac{t^3}{Cr^2}$$

$$P_{MAX} = \frac{V_{MAX}}{Q \cdot t} \cdot \frac{P_{MAX}}{t_{MIN.}} = \frac{v^{2/3} p_{MAX} \cdot \rho^{5/3}}{C^{2/3}}$$

$$R_{efec} = R_{MAX} \cdot k$$

$$C \rightarrow 0 : P \rightarrow 00$$

- P = presión
- q = flujo
- R = tramo (recorrido)
- 2t = espesor de la grieta
- C = cohesión
- ρ = densidad
- V = Volumen (take)
- F = Fuerza hendedora o de penetración
- k = eficiencia

IV.13 Fórmulas para la inyección de una grieta.

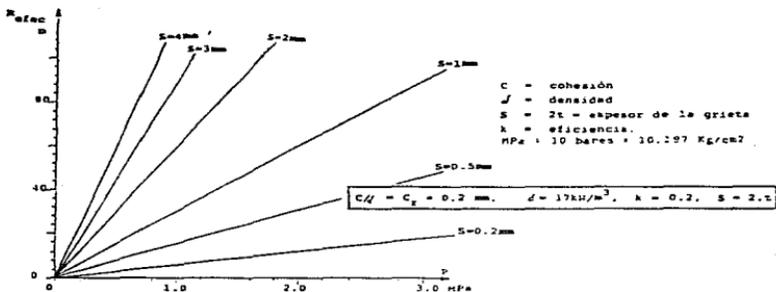


Fig. IV.14 Recorrido de la lechada (ejemplo).

Aunque la cohesión limita la distancia de recorrido, y por lo tanto los aumentos que se pueden lograr son finitos, evidentemente la lechada en nuestro ejemplo y en la realidad, es inyectada a una presión constante, por lo que el tiempo necesario para alcanzar la distancia teórica no está limitada. Esto significa que tiene lugar un proceso asintótico y al estar empleando una presión constante hasta completar la inyección, puede no ser realizada de manera completamente eficiente. Esta conclusión difiere mucho de lo que usualmente se piensa de la inyección, como se caracteriza en la siguiente tabla:

Tabla IV.2 Vol de toma Vs. tiempo, a presión constante para una lechada estable.

P= constante	Volumen límite.	V = 00
t = lim	inyecciones "au refus"	-0-
t = 00	Realidad	Cálculos H Cambefort

La figura IV.13, muestra también que la fuerza de penetración está limitada por la cohesión de la lechada. En inyección con agua, (o con una lechada inestable) las fuerzas de penetración podrían alcanzar cualquier valor alto, ya que la cohesión es nula. La cohesión como ya se vio, determina también la presión mínima necesaria para poner y mantener en movimiento una cantidad de lechada ya introducida en una grieta.

La viscosidad por otro lado influenciará fuertemente el coeficiente de flujo de la lechada para una presión dada, y por lo tanto, determinará el tiempo necesario para un relleno completo en el proceso de inyección.

La figura IV.15, muestra la ley de un flujo visco-plástico en una tubería o en una grieta, como las anteriormente mencionadas, como se nota es el núcleo denso de la lechada el que viaja a lo largo de la grieta.; esta dimensión disminuye con el gradiente de presión. Al final del proceso de inyección el núcleo llena todo el volumen de la grieta razón por la cual el flujo se detiene

La evaluación y el cálculo del proceso de inyección es necesario para conocer viscosidad y cohesión de la lechada. Generalmente se usa la prueba del Cono de Marsh que proporciona solamente un valor simple de lo que se ha llamado "fluidéz". La figura V.16 nos da las relaciones calculadas de "fluidéz" contra cohesión y viscosidad", ambas relacionadas con la densidad de la lechada. Una medida adicional es por lo tanto necesaria para obtener los dos parámetros reológicos mencionados de la lechada. Existen diferentes métodos que prefieren el uso de un viscosímetro o el peso de la lechada adherida a una placa áspera.

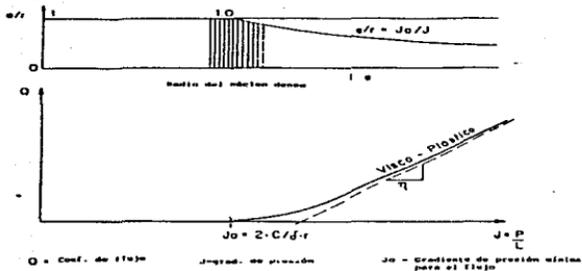


fig IV.15 Ley de flujo en una tubería o grieta para un cuerpo Binghamiano.

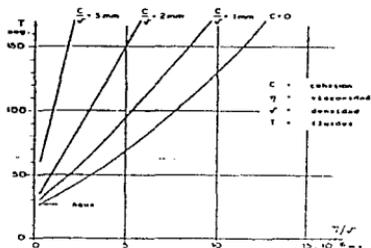


fig IV.16 Fluidez Vs. Viscosidad y Cohesión (Cono Marsh Eur).

IV.2 Influencia De Las Propiedades De La Lechada

Es bien conocido que las propiedades de una lechada de agua-cemento pueden ser modificadas de diferente manera, por ejemplo, el uso de bentonita reduce la

Si por ejemplo, se requiere una fluidez de 30 seg la resistencia será del orden de 10 a 30 kg /cm² con el aditivo de bentonita, pero puede ser de alrededor de 100 kg/cm², lo que representa de 3 a 10 veces más de resistencia, en el caso que el intraplast sea utilizado como fluidificante, esto significa que el Intraplast es capaz de reducir la viscosidad sacrificando la resistencia del fraguado en mucho menor grado que como sucede al usar bentonita. Estos resultados muestran (sin perder de vista que la reducción de la resistencia nunca es deseada), que la razón principal al usar bentonita es el incremento de la cohesión de la lechada, y por lo tanto, limitar la distancia de recorrido de ésta (justo lo contrario de lo que frecuentemente exige el efecto de lubricación).

Se puede observar, sin embargo, que la misma limitación de recorrido puede ser obtenida con bastante facilidad, reduciendo la presión de inyección, por ejemplo, el fluidificante permite, por el contrario, incrementar la penetración de la inyección aún con la presión reducida (se han reportado algunos casos en donde la bentonita se separa de la mezcla y entra en grietas mucho muy delgadas, permitiendo el ingreso del cemento a las más gruesas). El principal y más importante uso de la bentonita es por tanto, e indiscutiblemente, estabilizar mezclas inestables lo que significa exclusivamente, limitar la decantación de la lechada.

De hecho, mezclas estables son las que garantizan un llenado completo de los vacíos después del fraguado, debido a que el agua en exceso no se separa y no es la causa de futuros vacíos u oquedades.

Comparando mezclas estables con mezclas inestables, los resultados de cálculos recientes y la experiencia en la práctica muestran que las mezclas estables:

- Limitan la distancia de recorrido de la lechada de cemento evitando así los consumos innecesarios de ésta.
- Reduce fuertemente los peligros de agrietamiento y desplazamiento de la masa rocosa, incluso, si altas o muy altas presiones son usadas en la inyección.
- Su comportamiento es más o menos predecible.

Las características de alta resistencia mecánica, buena adhesión a la roca, resistencia a la disolución de compuestos solubles (como una consecuencia de las anteriores dos propiedades), y disminución de los vacíos en el proceso de inyección, pueden ser ejecutados con una lechada densa y estable agua-cemento, pero estas características se pierden completa o parcialmente si se ejecuta con una lechada poco densa que se establece con la adición de bentonita, ya que por el contrario la inyección de lechadas densas son generalmente, efectuadas con presiones bastante altas y cualquier burbuja atrapada será comprimida y su volumen fuertemente reducido.

En conclusión, es claro que las mezclas estables son preferibles a las inestables, y que la bentonita podría ser usada solamente para casos muy especiales donde sea necesario intentar estabilizar una lechada, o para ligar con el cemento el exceso de agua en la mezcla, si fuera el caso.

En la tabla IV.3, se muestran una serie de trabajos donde lechadas densas de agua-cemento, sin bentonita (excepto una cantidad muy pequeña en la presa El Cajón) fueron usadas con muy buenos resultados.

Tabla IV 3 Empleo de lechadas estables en diferentes obras.

Presas	A/C	Fluidificante	cant.
PAUTE (Ecuador)	0.60	Intraplast	1.4 %
Aicurá (Argentina)	0.67	Intraplast	1.2 %
El Cajón (Honduras)	0.70	Bentonita	0.2 %
Daule Peripa (Ecuador)	0.60	Intraplast	1.0 %
El Chocón (Argentina)	0.70	en pruebas	-0-

En la presa ITAIPU, por ejemplo, se efectuaron inyecciones en una sola grieta, empleando diferentes factores para A/C. Las propiedades físicas de estas lechadas comparadas con el agua son las que se muestran en la tabla IV.4. También fueron investigados diferentes espesores de grietas, 0.25, 0.5 y 1.0 mm (fig. IV.17) suponiendo una presión de inyección constante de 2 Mpa.

Tabla IV 4 Propiedades físicas de lechadas y agua usadas en ITAIPU

Propiedades	Unidad	Dosificación de lechada				Agua
		A	B	C	D	
Tipo de lechada		muy viscoso	viscoso	medio	diluido	—
Cohesión relacionada	mm	1.25	1.05	0.75	0.20	0
Viscosidad relacionada	10.6 ms	2.3	1.85	1.30	0.68	0.13
Peso específico	kN/m ³	19.00	18.00	17.00	16.00	9.81
Fluidez (Marsh, Am.)	seg	60	50	40	30	27.5

En la figura V.18(a), se indica el volumen de la lechada de cemento contra el tiempo, así como el volumen final teórico de la lechada de cemento (V_{max}). Este volumen puede variar de 1.10 m³ para mezclas densas, en grietas de 0.5 mm, a 306.8 m³ para mezclas delgadas en una grieta de 1.0 mm, de acuerdo por supuesto, para un valor sin límite del agua e indiferente al espesor de la grieta. Es muy importante conocer

Si por ejemplo, se requiere una fluidez de 30 seg la resistencia será del orden de 10 a 30 kg /cm² con el aditivo de bentonita, pero puede ser de alrededor de 100 kg/cm², lo que representa de 3 a 10 veces más de resistencia, en el caso que el intraplast sea utilizado como fluidificante; esto significa que el Intraplast es capaz de reducir la viscosidad sacrificando la resistencia del fraguado en mucho menor grado que como sucede al usar bentonita. Estos resultados muestran (sin perder de vista que la reducción de la resistencia nunca es deseada), que la razón principal al usar bentonita es el incremento de la cohesión de la lechada, y por lo tanto, limitar la distancia de recorrido de ésta (justo lo contrario de lo que frecuentemente exige el efecto de lubricación).

Se puede observar, sin embargo, que la misma limitación de recorrido puede ser obtenida con bastante facilidad, reduciendo la presión de inyección, por ejemplo, el fluidificante permite, por el contrario, incrementar la penetración de la inyección aún con la presión reducida (se han reportado algunos casos en donde la bentonita se separa de la mezcla y entra en grietas mucho muy delgadas, permitiendo el ingreso del cemento a las más gruesas). El principal y más importante uso de la bentonita es por tanto, e indiscutiblemente, estabilizar mezclas inestables lo que significa exclusivamente, limitar la decantación de la lechada.

De hecho, mezclas estables son las que garantizan un llenado completo de los vacíos después del fraguado, debido a que el agua en exceso no se separa y no es la causa de futuros vacíos u oquedades.

Comparando mezclas estables con mezclas inestables, los resultados de cálculos recientes y la experiencia en la práctica muestran que las mezclas estables:

- Limitan la distancia de recorrido de la lechada de cemento evitando así los consumos innecesarios de ésta.
- Reduce fuertemente los peligros de agrietamiento y desplazamiento de la masa rocosa, incluso, si altas o muy altas presiones son usadas en la inyección.
- Su comportamiento es más o menos predecible.

Las características de alta resistencia mecánica, buena adhesión a la roca, resistencia a la disolución de compuestos solubles (como una consecuencia de las anteriores dos propiedades), y disminución de los vacíos en el proceso de inyección, pueden ser ejecutados con una lechada densa y estable agua-cemento, pero estas características se pierden completa o parcialmente si se ejecutan con una lechada poco densa que se establece con la adición de bentonita, ya que por el contrario la inyección de lechadas densas son generalmente, efectuadas con presiones bastante altas y cualquier burbuja atrapada será comprimida y su volumen fuertemente reducido.

En conclusión, es claro que las mezclas estables son preferibles a las inestables, y que la bentonita podría ser usada solamente para casos muy especiales donde sea necesario intentar estabilizar una lechada, o para ligar con el cemento el exceso de agua en la mezcla, si fuera el caso

En la tabla IV.3, se muestran una serie de trabajos donde lechadas densas de agua-cemento, sin bentonita (excepto una cantidad muy pequeña en la presa El Cajón) fueron usadas con muy buenos resultados

Tabla IV 3 Empleo de lechadas estables en diferentes obras.

Presa	A/C	Fluidificante	cant.
PAUTE (Ecuador)	0.60	Intraplast	1.4 %
Alicurá (Argentina)	0.67	Intraplast	1.2 %
El Cajón (Honduras)	0.70	Bentonita	0.2 %
Daule Peripa (Ecuador)	0.60	Intraplast	1.0 %
El Chocón (Argentina)	0.70	en pruebas	-0-

En la presa ITAIPU, por ejemplo, se efectuaron inyecciones en una sola grieta, empleando diferentes factores para A/C. Las propiedades físicas de estas lechadas comparadas con el agua son las que se muestran en la tabla IV.4. También fueron investigados diferentes espesores de grietas, 0.25, 0.5 y 1.0 mm (fig. IV.17) suponiendo una presión de inyección constante de 2 Mpa.

Tabla IV.4 Propiedades físicas de lechadas y agua usadas en ITAIPU

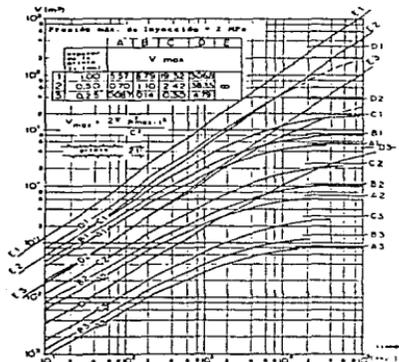
Propiedades	Unidad	Dosificación de lechada				Agua
		A	B	C	D	
Tipo de lechada		muy viscoso	viscoso	medio	diluido	—
Cohesión relacionada	mm	1.25	1.05	0.75	0.20	0
Viscosidad relacionada	10-6 ms	2.3	1.85	1.30	0.68	0.13
Peso específico	kN/m ³	19.00	18.00	17.00	16.00	9.81
Fluidez (Marsh, Am.)	seg	60	50	40	30	27.5

En la figura V.18(a), se indica el volumen de la lechada de cemento contra el tiempo, así como el volumen final teórico de la lechada de cemento (V_{max}). Este volumen puede variar de 1.10 m³ para mezclas densas en grietas de 0.5 mm, a 306.8 m³ para mezclas delgadas en una grieta de 1.0 mm, de acuerdo por supuesto, para un valor sin límite del agua e indiferente al espesor de la grieta. Es muy importante conocer

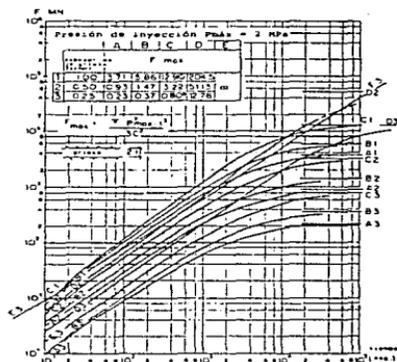
como es sensible el volumen de tomas de la lechada por los cambios de su densidad y por la anchura de la grieta

Como ya se mencionó, y esto es muy importante, el volumen teórico final de lechada nunca es alcanzado. Sin embargo, la figura muestra que el límite práctico se alcanza mucho más pronto con mezclas densas que con mezclas más diluidas.

Las fuerzas han sido obtenidas integrando la presión en la grieta con un valor máximo, hasta cero en el barreno de inyección, al llevarlo al límite de penetración. La enormidad de estas fuerzas es particularmente notable para las mezclas más diluidas. Sin embargo hay que considerar la ya mencionada reducción debido a la eficiencia efectiva del proceso de inyección.



(a)



(b)

fig. IV.18 Volumen Vs. Tiempo y Fuerza de levantamiento Vs. tiempo para lechadas y agua en la presa ITAIPU.

En la figura IV 18(b), se muestra la variación de las fuerzas de cizallamiento o de levantamiento para las mismas lechadas y las mismas grietas, resulta muy interesante ver en que cantidad se diferencian las fuerzas para cada caso

IV.3 Constante De Inyección.

El Dr. Lombardi y algunos otros especialistas, en 1985 propusieron una metodología diferente de inyección, el cual cuenta con las ventajas de ejecutarse más rápida y eficientemente, según lo veremos a continuación. Ambas características inciden en el aspecto económico y la segunda, además, en el aspecto técnico

A) Inyecciones rápidas

Normalmente, se supone, la inyección se efectúa a presiones constantes hasta detenerse y, como ya se ha visto, esto era llevado a cabo teóricamente y en un tiempo infinito. Como una regla un coeficiente de flujo pequeño era elegido de manera un tanto arbitraria y tan pronto como caía por abajo de este límite prefijado la inyección se detenía.

En la figura IV 19, se muestra la distancia alcanzada por la lechada de cemento, para un caso en particular, como función del tiempo y de la presión de inyección. Es claro que una distancia es alcanzada mucho más rápidamente con una presión más alta que con una más baja.

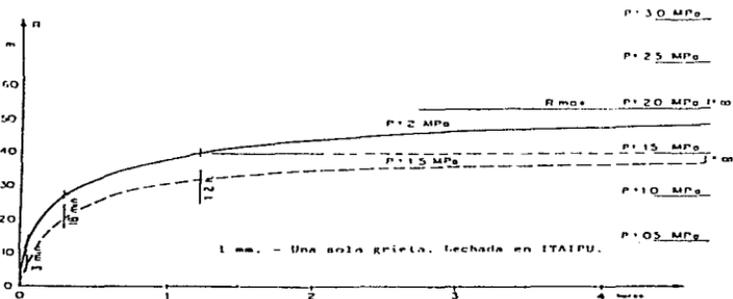


fig. IV.19 Recorrido de la lechada Vs. tiempo.

Por ejemplo, con una presión de 2 Mpa, la lechada podría alcanzar en sólo 1 2 horas la distancia que puede alcanzar con una presión de 1 5 Mpa en un tiempo infinito. Para 1 Mpa, el tiempo para obtener el mismo resultado podría ser de solo 18 minutos y a 3 minutos para el caso de solo 0 5 Mpa

Sobre estas observaciones se propuso como consecuencia y en principio, una inyección del tipo de la mostrada en la figura IV 20, al inyectista le fue permitido sobrepasar la presión final prescrita para acelerar en algún porcentaje la inyección. Después de un tiempo, la presión debería ser reducida al valor teórico y demostrarse que ya no hay lugar a más volumen de toma, en este caso una inyección total, "au refus", es realmente obtenida

También fue posible imaginar un mecanismo automático para dirigir el proceso de inyección y comprobar, de vez en cuando, si en la presión final descrita sucede algo todavía y, si no ocurre nada más, dar por concluida la inyección.

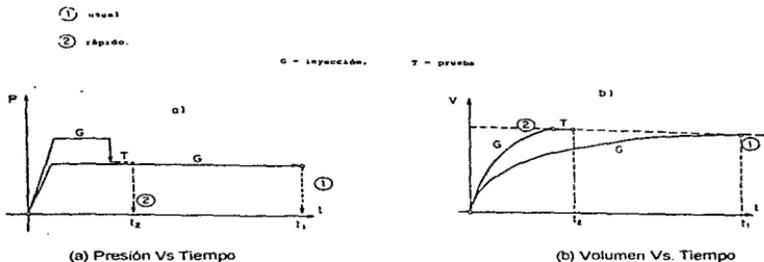


fig. IV.20 Procedimientos de inyección usual (a) y rápido (b).

B) Volumen máximo permitido

Es también costumbre limitar el volumen de toma de un barreno dado, por una cantidad arbitraria (independiente de la presión alcanzada) combinada con la prescripción de una presión máxima.

En la figura IV 21, una inyección diferente también fue propuesta; la lechada podría ser limitada por una cantidad relacionada con la presión alcanzada. La gráfica en línea continua, representa una función hiperbólica y proporciona la relación como una constante de recorrido, que a su vez es una constante particular de la pantalla de

inyección a construir, esto es preferible ya que es independiente del espesor de las grietas a ser llenadas en el macizo que se desea impermeabilizar.

La regla de inyección es de esta manera definida por un número N, el cual, es el producto de la presión por el volumen de la lechada de cemento (en el ejemplo $N = 0.6 \text{ Mpa m}^3/\text{m}$).

Una de las líneas punteadas relaciona el riesgo de que pudiera existir un desplazamiento lateral de la masa rocosa, en algunas ocasiones una combinación entre ambos tipos de líneas puede ser seleccionada.

Por supuesto la expresión "constante", sólo se usa con la intención de expresar "el mismo orden de magnitud", porque obviamente la masa rocosa es una estructura compleja. De cualquier modo, con esta regla fue posible resolver muchos de los problemas encontrados durante los procesos de inyección, evitando al mismo tiempo volúmenes altos de toma innecesarios. Es claro que bajo condiciones especiales, por ejemplo en rocas cársicas, pueden ser recomendadas prescripciones especiales.

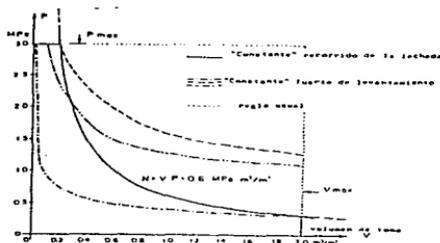


fig IV.21 Regla de inyección empleando la constante N.

C) Resultados mejorados.

Tomando en cuenta que el recorrido de la mezcla en grietas más abiertas es más largo (fig. IV.14) que en grietas delgadas a presiones bajas, es posible mejorar un poco la inyección tomando una acción combinada para la construcción de la pantalla estanca. El método por etapas entonces, es muy conveniente, ya que ha demostrado

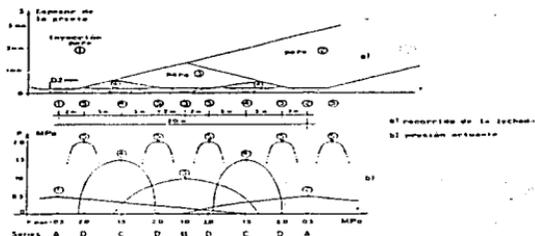


fig IV.22 Recorrido de lechada y presión para una propuesta combinada

ser un buen sistema, sin embargo, la presión de inyección podría ser incrementada entre una serie de barrenos a otra.

La distancia entre barrenos adyacentes no es una constante, puede ser cambiada un poco, una manera de obtener esta distancia es tomarla proporcionalmente incrementada con la suma de la presión a emplear en los dos barrenos adyacentes.

La figura IV.22, muestra el esquema de la combinación propuesta. Para el caso de una roca fisurada homogéneamente, sus juntas y caras son inyectadas desde cada uno de los barrenos. La distribución indicada corresponde obviamente al eje y plano de la inyección de la pantalla misma.

Como resultado de esta proposición, las presiones máximas indicadas en la figura IV.22, pueden remplazarse con una serie de incrementos de números N de acuerdo con la figura IV.21. Operando de este modo es posible obtener una inyección de pantalla más homogénea a un costo menor y con menos problemas.

De los primeros resultados obtenidos después de aplicar este método se obtuvo como conclusión lo siguiente:

- El método por etapas para una inyección de pantalla puede ser mejorado al incrementar la presión máxima (mejorando el número N) de una serie de barrenos a la siguiente serie de barrenos, y al variar un poco la distancia entre ellos
- Son preferibles las lechadas estables a las inestables
- Se puede prescindir de la bentonita para espesar lechadas delgadas y es mejor reducir el contenido de agua de la mezclas agua-cemento
- Para facilitar la penetración es conveniente usar un fluidificante, el cual no obstante de reducir la resistencia en el fraguado de la lechada, es preferible al uso de bentonita.
- Es posible acelerar el proceso de la inyección con el uso de una presión de inyección variable
- La inyección de una pantalla puede ser mejorada y realizada mucho más económica, cuando un número N de inyección (tiempo de presión x volumen de lechada) es empleada en lugar de un volumen fijo y un límite de presión máxima

V. PRINCIPIO DE INTENSIDAD DE INYECCIÓN, MÉTODO GIN

V.1 Características Del Método GIN

En el capítulo antecedente se expusieron las ideas que permitieron el desarrollo del método que emplea una constante de inyección relacionada con el tiempo, la presión y el volumen de lechada, hasta descubrir que es posible sustituir el sistema tradicional de limitar "a priori" la presión máxima de inyección y el volumen de lechada. Con el empleo de esta constante, las inyecciones no sólo se ejecutan con mayor rapidez, sino que resultan más eficientes, y de paso (objetivos principales de la ingeniería), más económicas y seguras. En lo que sigue, se describirán las consideraciones teóricas para inyectar tanto fisuras finas como fisuras amplias y abiertas, con el Principio de Intensidad de Inyección, complementando lo expuesto en el capítulo anterior y definiendo finalmente dicho principio.

El Método de Intensidad de Inyección en la actualidad, emplea en el tratamiento de macizos rocosos como características principales y únicas lo siguiente

- Una mezcla estable única, para todo el proceso de inyectado (relación por peso de agua/cemento de 0.67 a 0.8/1), con superfluidificante para incrementar la penetrabilidad.
- Una velocidad de baja a media de bombeo estable del motor, que en todo tiempo permite graduar el incremento de presión, conforme la lechada penetre más profundo en las fisuras de las rocas.
- El monitoreo de presión, velocidad del flujo, volumen inyectado y penetrabilidad Vs. Tiempo, graficados mediante el empleo de una computadora PC.
- La terminación de la inyección cuando la trayectoria de inyectado registra sobre el diagrama de presión Vs volumen total (por metro de intervalo inyectado), la

intersección a una de las curvas envolventes, ya sea del volumen límite, presión límite o intensidad de inyectado límite dada por la curva hiperbólica seleccionada de GIN que esta representada por una constante de presión por volumen ($p \cdot V$), y que significa una medida de la energía empleada la inyección.

Por la experiencia obtenida en varios países señala que el método es técnica y económicamente efectivo. Durante esta década en un número importante de proyectos en construcción, el Dr. G. Lombardi y D. U. Deere, han colaborado conjuntamente con diseñadores, ingenieros Geólogos y Geotecnistas así como con ingenieros de Control de Campo en el la investigación de un mejor entendimiento de los procesos de inyección, combinando esta participación con investigaciones teóricas, de laboratorio y de obra.

Por simplicidad, y como se ha venido haciendo a lo largo del desarrollo de este trabajo, se hará referencia a la inyección de cemento en macizos rocosos; no obstante algunas de estas consideraciones que se presentarán pueden ser aplicadas a sueltos granulares, así como a la inyección con el empleo de otros materiales, además de que se ha puesto más énfasis en las pantallas de inyección en presas que a la inyección para la consolidación o de otros trabajos subterráneos a pesar del hecho que el método GIN ya ha sido empleado en estos trabajos.

El comportamiento reológico de diferentes fluidos newtonianos, como por ejemplo el agua y el aceite, puede ser caracterizado solamente por el parámetro de su viscosidad, una lechada "estable", sin embargo, se comporta como un fluido de Bingham, durante su flujo posee tanto viscosidad como cohesión a la vez, en tanto que ambos son parámetros indican su resistencia a fluir. La viscosidad gobierna la velocidad del flujo, por su parte la cohesión gobierna la distancia máxima de penetración (para una determinada presión de inyectado y una abertura determinada de fisura en la roca). Se han desarrollado ecuaciones para calcular la distancia máxima de penetración, volumen máximo de lechada inyectada así como la máxima fuerza total de levantamiento ejercida sobre el área de inyección; sin embargo para los efectos del presente trabajo, será suficiente hacer notar que la distancia máxima de penetración lograda por una lechada de inyección, es directamente proporcional a la aplicación de la presión aplicada y a la abertura de la fisuras, y es inversamente proporcional a la cohesión de la lechada (como ya se vio en los capítulos antecedentes). De este modo, para mejorar la penetración en las finas fisuras de la roca, es necesario incrementar la presión de inyección o reducir la cohesión de la lechada o ambas cosas a la vez.

Posiblemente el valor importante de las ecuaciones para el flujo de Bingham (G. Lombardi), esta en proveer una visión del proceso de la inyección con respecto a los factores que influyen en la penetración de la lechada en una fisura de roca y en la magnitud de la fuerza de rompimiento creada por el proceso de inyección. Mientras que una lechada estable (definida como aquella que exhibe en 2 hr. menos del 5 por ciento de decantación en un cilindro conteniendo agua clara de 1000 ml) puede

aproximar la conducta de un fluido de Bingham, no es razonable aplicar las ecuaciones a lechadas delgadas y acuosas. Tales mezclas o lechadas delgadas son suspensiones inestables de partículas de cemento en agua que, durante el flujo de la lechada a través de las fisuras de la roca, pueden mostrar un comportamiento de sedimentación errática; erosión, re-suspensión y de re-sedimentación. Este comportamiento es imposible de predecir y caracterizar con la ecuación de flujo de Bingham o cualquier otra.

V.2 Selección De La Mezcla Y Diseño De Los Trabajos De Inyección.

Existe de país a país y de continente a continente la controversia acerca del empleo sobre mezclas densas o delgadas, y seguramente continuará por mucho tiempo, sin embargo, para los autores del método GIN desde 1985, han expresado en diversa literatura, su preferencia por mezclas espesas. La práctica de adicionar 1 a 2 por ciento de bentonita para estabilizar la mezcla y reducir la sedimentación, esta siendo remplazada progresivamente por el empleo de mezclas con alto contenido de cemento y aditivo superfluidificante. Estas últimas mezclas son estables, pero poseen menos cohesión y son más penetrantes, y también tienen mayor resistencia después del fraguado.

Adicionalmente los defensores de mezclas más espesas han indicado varias ventajas que exhiben éstas durante el proceso de inyección o durante la vida útil de la masa rocosa inyectada, después que la lechada ha endurecido.

De esta manera, durante el proceso de inyección, una lechada estable moderadamente espesa, muestra las siguientes ventajas comparada con una lechada delgada:

- Menor sedimentación de granos de cemento en condiciones de flujo lento.
- Menor sangrado del agua como resultado de que la mezcla se exprima o filtre en zonas estrechas del recorrido del flujo y por consiguiente, menor bloqueo prematuro.
- Mayor estabilidad en todo tiempo y distancia como un fluido predecible (fluido de Bingham, con cohesión y viscosidad dinámica).
- Menor riesgo de hidrofracturamiento (también denominado partición hidráulica o efecto de gato hidráulico) y levantamiento de los estratos geológicos, porque la fuerte presión se anula conforme se aleja de la perforación de inyección, como resultado de la cohesión de la lechada.
- Mejor relleno de la fractura con un mortero de gran calidad en el supuesto de que dicho hidrofracturamiento ocurra).

Y en la etapa de que mortero ha endurecido dentro de las fisuras de la roca, éste muestra las siguientes ventajas, en comparación con una lechada delgada:

- Menor contracción durante su fraguado y de este modo una mayor liga a lo largo de las paredes de las fisuras en la roca y menor riesgo de reapertura
- Mayor densidad y mayor resistencia mecánica, por el gran contenido de cemento y de este modo una gran resistencia a la erosión por tubificación.
- Menor porosidad, baja permeabilidad y mayor resistencia de liga, de este modo una gran resistencia química contra la lixiviación y una gran durabilidad de la pantalla inyectada durante el tiempo de la vida útil de la presa.

Por otra parte la mezcla estable, por su cohesión, requiere grandes presiones de inyección para alcanzar la misma distancia de penetración, comparada con una lechada delgada. En todo caso con el uso de una pequeña cantidad de superfluidificante, sus parámetros, de cohesión y viscosidad, pueden ser disminuidos drásticamente.

La práctica actual, en los grandes proyectos es emplear una mezcla con una relación de 0.67:1 a 0.8:1 (agua: cemento por peso) para obtener la mayor densidad y resistencia para una lechada ya endurecida y el empleo de un superfluidificante para reducir la cohesión y viscosidad durante la colocación de la mezcla. Con pruebas de laboratorio se determina el flujo, sedimentación, y resistencia de diferentes mezclas de inyección, diferentes cementos y diferentes superfluidificantes.

Los valores de cohesión y viscosidad pueden ser obtenidos en el laboratorio usando un viscosímetro rotatorio con cilindros concéntricos. Sin embargo, puede emplearse el medidor sencillo de placa de cohesión. Esta es una pieza de placa de acero rugosa de 100 mm por 100 mm y 1.5 mm de espesor, que se pesa antes y después de haberla sumergido durante unos pocos segundos en la mezcla de inyección. La diferencia en peso dividida entre el área de ambos lados de la placa, proporciona el parámetro en unidades de resistencia al esfuerzo cortante. Es conveniente dividir la cohesión C entre el peso unitario de la lechada γ , expresando la cohesión relativa $C_r = C/\gamma$, que es la normalmente reportada, se da comúnmente en mm y los típicos valores son de 0.2 a 0.3 mm para lechadas espesas sin aditivo superfluidificante. Con aditivos, la cohesión aparente decae a valores de 0.08 a 0.15 mm, el rango recomendado. Es de interés notar que el valor de C_r es, de hecho, el espesor de la lechada de cemento que se adhiere a cada lado de las paredes de la placa de cohesión. La placa debe ser suficientemente rugosa, con ranuras que se interceptan en su superficie de manera que la adhesión con el acero sea mayor que la que exista entre la capa superficial de la lechada adherida y el resto de ésta; de otra manera, la lechada deslizará de la placa.

Otros valores típicos de laboratorio son: peso específico del mortero, que oscila de 1.59 a 1.67 t/m^3 ; tiempo de flujo en el Cono de Marsh, de 29 a 32 seg. y resistencia a la compresión a los 28 días, de 15 a 20 Mpa.

Otro punto que debe tenerse en mente, es la muy probable pérdida de agua al inyectar roca seca por arriba del nivel de aguas freáticas, en el caso de que se espesara la lechada por esta razón (cambio de la relación A/C), se incrementaría su cohesión (y la fricción interna aumentaría) hasta el punto donde la lechada ya no pudiera inyectarse más. Una medida prudente es inyectar agua por un período de tiempo para obtener una saturación parcial de la masa de roca justo antes de la inyección. Es conveniente también emplear aditivos retenedores de agua en la lechada.

En la inyección de fisuras finas de la roca, deberá tenerse presente que la penetración de la lechada depende más de la medida de los granos de cemento y de la partículas de cemento aglutinadas (floculación) que de la disolución de la mezcla con exceso de agua. De este modo, en lugar de tratar de obtener una alta penetrabilidad diluyendo la lechada, debería usarse un cemento más fino con superfluidificante, junto con presiones de inyectado mayores.

Una vez que se haya determinado una mezcla aceptable, por medio de prueba de laboratorio con sus propiedades mecánicas en los rangos deseables, esa mezcla podría ser usada para toda la inyección en el proyecto, el uso de solamente una mezcla simplifica grandemente el procedimiento de inyección.

El diseño de una pantalla inyectada incluye la selección de las siguientes características principales: mezcla de mortero, espaciamiento de los barrenos de inyección y su profundidad, secuencia de inyección y su procedimiento (incluyendo volumen y limitación de la presión) y el control de campo. Es necesario también un buen conocimiento de la geología del sitio al seleccionar algunos de estos parámetros, en especial las características físicas de las discontinuidades de la masa de roca a ser inyectadas (tipo, frecuencia, abertura de la fisura, rugosidad, alteración o relleno, y extensión), el estado "in situ" de esfuerzos y la existencia de agua subterránea debe ser también considerado.

En adición del conocimiento extremo de las condiciones geológicas, deberán tenerse en cuenta los cambios inducidos en el estado de esfuerzos del proyecto, así como las presiones hidráulicas y sus variaciones con el tiempo (como las que se presentan durante el llenado y abatimiento del vaso). Finalmente deberá definirse de la mejor manera la meta que deberá lograrse en términos de consolidación o efectos de densificación, como se hace de manera general. Este trabajo no pretende tocar todos los puntos en detalle, sin embargo sí analiza varios de los más importantes.

V.3 Inyectado De Fisuras Con El Método GIN.

La observación y los estudios teóricos indican que las fisuras más amplias en una masa de roca, son aquellas que se inyectan más fácilmente. La penetración de la lechada puede también ser de magnitud considerable (algunas decenas de metros),

por lo tanto existen tanto razones prácticas como económicas, para reducir su penetración y el volumen de ésta. Hay tres maneras de lograr esta reducción: empleando un mortero menos penetrable (espeso con gran cohesión), por limitación de la presión de inyección o, por limitación del volumen de lechada inyectada.

Antes de seleccionar el criterio de limitación, deberá considerarse que también pueden existir fisuras más finas en el intervalo de roca que se está inyectando. Estas son más difíciles de rellenar y probablemente no serán bien inyectadas hasta una etapa posterior, cuando ya se hayan rellenado las fisuras más abiertas. No obstante en la primera etapa de inyección es recomendable ejecutar algunos rellenos de esas finas grietas. De este modo, la mezcla de inyectado no debe ser fuertemente espesada, pero sí debe ser una lechada estable moderadamente espesa con aditivo superfluidificante. La alternativa de limitar la presión tampoco es muy atractiva, ya que esto reduciría el inyectado de las fisuras finas. Por tanto, queda la alternativa de limitar el volumen y parece ser el mejor camino, un ejemplo puede ser inyectar 200 u 400 lts de mortero por metro de perforación en el intervalo que se inyecte o, en términos de peso suponiendo una relación agua-cemento de 0.75 por peso, 185-370 kg de cemento por metro de perforación.

Después de inyectadas las fisuras más abiertas, o si no existieron originalmente en la zona fisuras de abertura amplia, el inyectado de las fisuras finas se convierte en una prioridad. Este inyectado puede hacerse ya sea utilizando una lechada más delgada con baja cohesión o por inyección a altas presiones; pero es más conveniente elevar la presión y mantener la alta calidad de una mezcla moderadamente densa y emplear un superfluidificante. Porque las finas fisuras tendrán una menor penetración de lechada y porque la presión de inyectado disminuye rápidamente conforme se extiende y aleja del barreno de perforación, la fuerza total de levantamiento aún a presiones de inyectado elevadas será como una regla, mucho más baja que el peso de la sobrecarga, el hidrofracturamiento de las juntas y planos de estratificación (hechados) raras veces representa un problema (excepto si están por arriba de 5 a 10 m). Consecuentemente, son aceptadas altas presiones de inyección, aún hasta de 30 a 40 bares (3 a 4 Mpa) calculados en el intervalo de inyectado, en el caso de que la toma de lechada sea pequeña.

Al considerar estos factores, se sugiere un límite superior para la presión de inyección en el rango de 30 a 50 bares, cuando las tomas de lechada son pequeñas, dependiendo de la geología (Intemperismo, estratificación, zonas débiles, estados de esfuerzos "in situ", etc.), la futura presión de agua y la intensidad de inyección deseada.

De esta manera emergen los primeros dos elementos del principio GIN, limitar el volumen donde la mezcla entra fácilmente a baja presión y limitar la presión donde la lechada penetra solamente con dificultad. Sólo falta el enfoque de los rangos intermedios, no obstante antes de continuar con estos rangos, conviene revisar otras consideraciones de la inyección.

V.4 Reducción Del Espaciamiento De Las Perforaciones De Inyección Por Etapas.

En la práctica, es usual que los barrenos primarios, sean los primeros que se inyecten con un espaciamiento bastante abierto, entre 10 a 12 m, de tal manera que la inyección de un barreno primario no interfiere con el del siguiente. A menudo, se especifica que cada tercer o cuarto barreno primario sea inyectado antes que los restantes barrenos primarios, con la finalidad, de servir como perforación "exploratoria". Esas perforaciones pudieran ser, si la ocasión lo amerita, barrenos con recuperación de núcleo y hacer pruebas de presión de agua hasta una profundidad total de 0.75 H (siendo H la altura del futuro vaso). El resto de los barrenos primarios podrán ajustarse en profundidad acorde con estos resultados de exploración.

La siguiente serie de barrenos llamada barrenos secundarios, se inyectan a continuación en una localización intermedia de distancia entre los primarios, comprendidas entre 5 y 6 m de las perforaciones primarias. Estos barrenos encontrarán con frecuencia lechada endurecida en algunas de las fisuras amplias. En general sus "tomas" serán más bajas que las de los barrenos primarios. Frecuentemente se requieren de perforaciones terciarias en un espaciamiento intermedio a los secundarios, entre 2.5 a 3 m, con tomas aún más bajas, eventualmente, se podrán requerir similares barrenos cuaternarios entre los 1.25 a 1.5 m, a partir de los barrenos terciarios, resultando normal que solo acepten una baja absorción de mezcla.

Ya que la roca a conseguido cerrarse en cada etapa de perforación, las fisuras no inyectadas, encontradas en las últimas perforaciones, serán generalmente más finas aún, por lo tanto, presiones más altas serán benéficas y producirán una inyección más eficiente.

De esta manera el tercer ingrediente del procedimiento GIN esta identificado, una presión progresivamente más elevada, conforme se consolida la roca, para inyectar progresivamente fisuras más finas.

Las pruebas de presión de agua (pruebas Lugeon), se han usado frecuentemente en cada intervalo de la inyección para ayudar a seleccionar la mezcla de relleno de cualquier manera, como ya se mencionó la teoría y la experiencia han indicado una pobre correlación de los valores Lugeon con la absorción de mezcla. Sin embargo las pruebas Lugeon u otras similares, pueden usarse en las exploraciones de barrenos primarios, para obtener un panorama general de la permeabilidad en los empotramientos y área principal de la cimentación de la presa. Luego se podrán efectuar comparaciones ya sea con pruebas Lugeon o con barrenos de control, para verificar si se ha logrado una suficiente reducción en la permeabilidad.

V.5 Energía Aplicada en el Método de Intensidad de Inyección.

Inyectar una zona de roca con una mayor intensidad, equivale a aplicar más energía. En un intervalo de inyección dado, la energía empleada es aproximadamente proporcional a el producto de la presión de inyección final p y al volumen de la mezcla inyectada V , representada por el producto $p.V$. Este producto $p.V$ es el llamado Número de Intensidad de Inyección o GIN. El volumen puede normalizarse con la longitud del intervalo de inyección como lts/m (o como el peso de cemento inyectado en kg/m , ya que para mezclas moderadamente espesas los valores numéricos son similares dentro del 5 al 10 por ciento). La presión se utiliza tradicionalmente en bar, resultando que el producto $p.V$ o unidades GIN resulta en $bar-lts/m$, aunque obviamente se pueden utilizar otras unidades haciendo las conversiones apropiadas.

El método GIN requiere que una vez que se haya seleccionado el nivel de intensidad de inyección (por ejemplo una intensidad de 2000 $bar-lts/m$), este valor deberá utilizarse tanto para la inyección de fisuras fácilmente rellenables con grandes volúmenes de absorción a baja presión, como para las fisuras más finas con tomas bajas, pero considerables presiones altas, de esta manera se mantiene un valor constante del GIN. Al mantener este valor constante durante el proceso de inyección para todos los intervalos, se obtiene también una penetración aproximadamente constante de la lechada y se limita, casi automáticamente, el volumen en una fisura de abertura amplia, pero se permite incrementar la presión en zonas más consolidadas con fisuras menos inyectables. Con estas medidas se eliminan las combinaciones de presiones elevadas y grandes volúmenes, una condición de que pudiera conducir a grandes esfuerzos que provoquen hidrofracturamiento o levantamientos. De manera similar, también se eliminan las combinaciones de presiones bajas con tomas bajas, ya que pudieran propiciar inadecuados rellenos de las fisuras finas.

El valor constante GIN, cuando se dibuja en una gráfica de Presión Vs. Volumen, genera una curva hiperbólica, mientras más elevada sea la intensidad de inyectado o el valor del GIN, más grande es la distancia del origen de la curva. De esta manera, la curva GIN, completa el tercer aspecto faltante, junto con los otros dos límites ya expuestos, la línea de límite de volumen y la línea de límite de presión, la combinación de las tres conforma una envolvente de limitación para el inyectado.

V.6 Límites Envolventes Para Diferentes Intensidades De Inyección

En la gráfica de la fig. VI.23, se muestran las trayectorias $p.V$ para tres tipos de fisuras, una fisura con abertura amplia se representa en la curva 1, la cual muestra volumen creciente de lechada inyectada con solo un incremento ligero de presión. La curva 2 representa una fisura promedio donde la presión se incrementa gradualmente conforme el volumen de lechada inyectada aumenta; solamente en el punto a' la

presión se eleva rápidamente conforme la resistencia a la penetración de la lechada se incrementa en una forma desproporcionada. La curva 3 representa una fisura cerrada donde la presión de inyección se eleva rápidamente con solo pequeñas tomas de lechada. Similarmente, la curva 4 representa una fisura extremadamente cerrada con toma de lechada muy pequeña y una presión elevada de rechazo.

Ahora bien en la figura VI.24, se han ilustrado cinco sugerencias de envolvente de limitación para diferentes intensidades de inyección. El valor GIN, el límite de presión y el límite de volumen son en realidad tres parámetros más o menos independientes, que definen la envolvente de limitación para el inyectado. En la definición propuesta, estos están relacionados entre sí, pero no necesariamente deben estarlo. La envolvente superior representa una muy alta intensidad de inyección con un valor GIN de 2500 bar- l/m , una presión límite muy elevada de 50 bar y un volumen límite de 300 l/m . La envolvente más baja representa una muy baja intensidad de inyección con un valor GIN de 500 bar- l/m , una presión máxima de 15 bar y un volumen límite de 100 l/m . Para la mayoría de condiciones es recomendable la envolvente de intensidad moderada con un valor de 1500 bar- l/m , una presión límite de 30 bar y un volumen límite de 200 l/m .

Para áreas geológicamente críticas (cerca de las superficies y sobre taludes escarpados), las curvas con números bajos bien pueden aplicarse, esto es muy comprensible de la combinación de las figuras VI.23 y VI.24, donde los procesos de inyección serán detenidos a diferentes puntos, dependiendo de los valores seleccionados para la envolvente de inyección.

Para la curva No 1 de la figura VI.23, la inyección podría ser determinada en el punto a, correspondiente a una intensidad de inyección baja, debido al volumen límite de 150 l/m , con una presión resultante de 3 bar. En todo caso, si el diseñador ha especificado la envolvente moderada de intensidad, la inyección podría continuar al punto b, el volumen límite de 200 l/m y la presión final existente estaría alrededor de 3 bar; pero si se hubiera seleccionado un inyectado de alta intensidad, la inyección continuaría hasta el punto c, con 250 l/m de volumen límite, y una presión final cerca de los 6 bar. Finalmente, si una muy alta intensidad hubiese sido seleccionada, la inyección continuaría hasta el punto d, y el recorrido no terminaría para el volumen límite, sino más bien por intersección de la curva GIN 2500, en este punto el volumen total inyectado podría ser de 285 l/m y la presión final de inyección de 9 bar. De este modo habría un rango de volumen inyectado de 150 a 285 l/m y un rango de presión final de inyección de 3 a 9 bar. De este modo habría un rango de volumen inyectado de 150 a 285 l/m y un rango de presión final de inyección de 3 a 9 bar, dependiendo del GIN especificado.

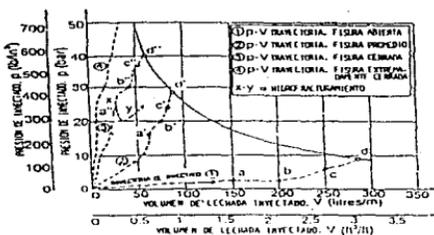


fig. V.23 Ejemplo de curvas de trayectorias de inyectado

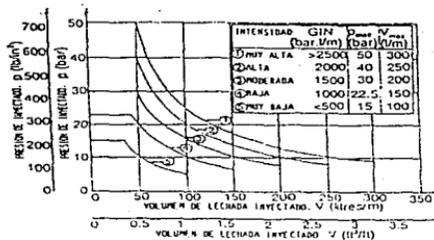


fig. V. 24 Propuestas de envolturas de límite para la inyección

Para la curva 2, el volumen inyectado en el punto a', pudiera ser cerca de 60 l/m y la presión final de inyección de 13 bar. Si ésta inyección continua hasta el punto d', que representa una intensidad muy elevada ($p \cdot v = 2500$), la toma de lechada se hubiera incrementado solamente a 90 l/m, pero la presión pudiera haber alcanzado 28 bar, considerablemente menos que el valor límite de 50 bar. Similarmente, para la curva 3, la inyección puede ser restringida a algún punto entre a" y d" dependiendo de las selecciones previas del criterio GIN y de la limitación de presión. La porción x-y representa un ejemplo de un suceso de hidrofracturamiento o un evento de partición

por presión hidráulica, donde una junta o plano de hechado es de repente forzado a abrirse, dando como resultado una baja de presión y un incremento en la velocidad de absorción y únicamente podrá continuar la inyección a bajas velocidades para tratar de llegar a la curva GIN seleccionada, pero si la presión se incrementara, probablemente otro evento de hidrofracturamiento se desarrollaría aproximadamente a la misma presión o con un pequeño aumento de ésta. Ante tales circunstancias se puede cuestionar, si la inyección debiera continuar o no. sin embargo muchas veces se ha continuado sin ningún problema serio, de cualquier manera, tarde o temprano es alcanzada la curva límite y darse por concluida la inyección.

El proyectista, su grupo geotécnico y de inyección, deberán seleccionar el valor GIN para la pantalla de inyección de la cortina. En tanto es recomendable como un inicio, el valor GIN moderado de 1500 bar-l/m, las condiciones geológicas, el valor de futuros niveles freáticos y el aumento de subpresiones después del llenado del vaso, son puntos a considerar que deberán tomarse en cuenta. Los límites superiores de presión y de volumen, pueden ser modificados por el diseñador y por los ingenieros de control de campo, para casos especiales. Probablemente el mejor procedimiento es llevar a cabo uno o dos tramos de inyección de prueba antes de seleccionar la envolvente limitante de la inyección.

El aumento de presión límite puede ser menor en los empotramientos debido a las diferencias en la carga del embalse. Un valor que vale la pena considerar es un límite de presión de por lo menos el doble la carga del vaso, pero esto puede ser difícil de aplicar sin inducir las indeseables hidrofracturaciones.

V.7 Inyección Controlada Por Computadora.

En la actualidad, con el empleo de las computadoras PC, pueden ser instaladas y fácilmente operadas en el sitio mismo de la inyección, existe entonces la posibilidad de controlar continuamente en tiempo-real el proceso de inyección. Solamente dos valores necesitan ser leídos continuamente por el sistema. la verdadera presión de inyección p y la velocidad del flujo q , de la cual se puede obtener por medio de integración el volumen acumulado V por unidad de longitud. Si se desea puede medirse directamente el volumen v de la lechada inyectada, y la velocidad del flujo obtenerse por derivación.

Empezando por los valores medidos de p y q , un número de gráficas con respecto al tiempo se pueden elaborar y mostrar en la pantalla del monitor (por ejemplo de presión, velocidad de flujo, volumen acumulado y penetrabilidad contra tiempo). En la fig. VI.25 se muestran una serie de gráficas de este tipo. El cuidado y atención esta en dibujar la curva (d), que representa el flujo específico (q/p) o penetrabilidad (la velocidad de flujo respecto a la presión) contra tiempo. esta curva muestra el llenado progresivo de vacíos y fisuras, y el crecimiento de la resistencia a la inyección, causada en primer lugar por el incremento de la fuerza cohesiva total conforme el flujo

de lechada se extiende más lejos a lo largo de las fisuras de la roca. Cuando se presenta un hidrofracturamiento, es con facilidad observado por la presencia de una marcada punta en la gráfica

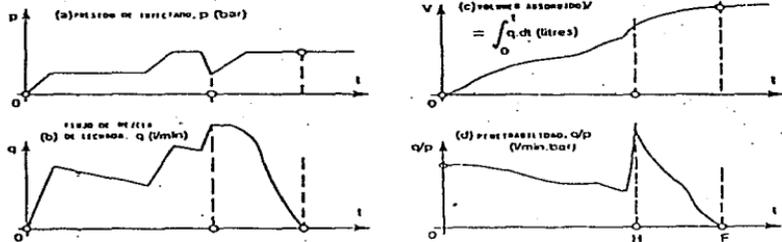


fig. V.25 Inyección en una sola progresión respecto al tiempo.

V.8 Las Curvas GIN Y De Penetrabilidad-Volumen, Como Controles Prácticos De La Inyección.

La figura VI.26, representa las gráficas principales de control que puede presentar la computadora, estas curvas pueden muy bien utilizarse para controlar el proceso de la inyección. La fig. VI.26 (a), muestra las envolventes de limite de inyección que han sido elegidas para un determinado proyecto (o para una zona del proyecto), esta envolvente incluye la limitación de presión p_{max} , el limite de volumen V_{max} por unidad de longitud, y la curva hiperbólica GIN. Esta envolvente puede ingresarse en el programa y mostrarse cada vez que sea necesario. En general estas curvas de envolventes limite, son llamadas simplemente como curvas GIN.

La curva irregular 2, mostrada en la misma figura, representa el recorrido real de la inyección, dibujada en pequeños incrementos de tiempo de la presión instantánea de inyección contra el volumen de lechada acumulado por unidad de longitud. La curva de la trayectoria de inyectado, intercepta la curva GIN en el punto (F) y la inyección es detenida en "cero" velocidad de flujo, con una presión final p_f y una unidad de volumen total acumulado de lechada inyectada V_f .

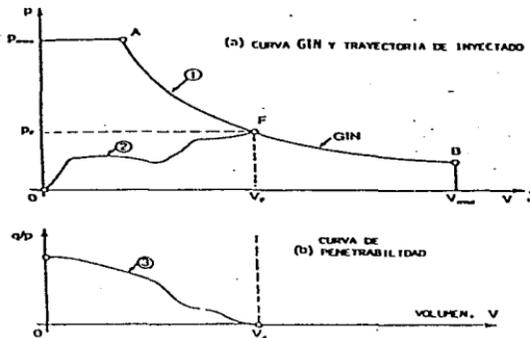


fig. V.26 Inyección en una sola progresión, respecto al volumen de toma.

La fig. VI.26 (b), es también una importante curva de monitoreo en tiempo real. La penetrabilidad q/p se gráfica contra el volumen acumulado de lechada inyectada en lugar de hacerse contra el tiempo, a diferencia de la curva representada en la figura VI.25(d), sin embargo, son curvas de tipo similar. Conforme se desarrolla la curva, se observa normalmente un descenso en la penetrabilidad, lo que indica que la eficiencia de la inyección está decreciendo. De este modo a una presión constante de inyección, la velocidad de flujo disminuye o bien, si se mantiene una velocidad constante de flujo, casi al final, la presión de inyección se incrementará. La decisión de cual de estas combinaciones es aplicable depende del tipo de bomba y de los detalles de operación de inyección (tubería, válvulas, etc).

La declinación de la curva penetrabilidad-volumen indica que el tratamiento de inyección está desarrollándose normalmente. La presión de inyección debe ser monitoreada y controlada para detener el proceso de la inyección sobre la curva GIN.

Como se ha notado en las secciones previas, el recorrido de la inyección llegará a la curva GIN en diferentes puntos, como una función de la abertura de las fisuras de las rocas, fisura ancha cerca del punto B y fisura finas cerca del punto A, de la figura VI.26(a). Conforme avanza la trayectoria de inyectado a la curva GIN, las velocidades de bombeo deberían ser tan bajas como sea posible, mientras todavía se logre una penetración de lechada (por ejemplo 500 lt/hr). La experiencia ha mostrado

que esas diferentes gráficas ayudan a controlar el proceso de inyección en un modo efectivo y continuo

V.9 Aplicación a pantallas Estancas.

El método GIN, tal como se ha presentado, ha tratado principalmente con consideraciones para un solo intervalo de inyección o progresión. El método también es aplicable a todos los intervalos de una perforación y a todas las perforaciones primarias y con espaciamientos intermedios. El procedimiento de reducción de espacios en una pantalla de una línea, es método probado eficiente, con firmes razonamientos teóricos.

En algunas rocas con gran permeabilidad o cavernosas (brechas basálticas, calizas, areniscas fracturadas), se han construido pantallas de tres líneas de inyección. Generalmente se inyecta la línea de aguas abajo, seguida por la línea de aguas arriba y finalmente por la línea central. Se considera que las dos líneas exteriores se comportan como líneas de barrera (confinamiento), y frecuentemente sólo las perforaciones primarias y secundarias son inyectadas con la intención de rellenar la mayoría de las fisuras o cavidades mayores. La línea central puede entonces ser tratada como una pantalla normal de una sola línea, con perforaciones primarias hasta terciarias y aún cuaternarias, si fuera necesario.

En el método de división (reducción) de espacios, los barrenos primarios rellenarán parcial o completamente únicamente las fisuras más anchas de la roca. La siguiente serie de barrenos secundarios, nuevamente obtendrán solamente las fisuras anchas que no fueron rellenadas en la primera serie, y así sucesivamente. En la fig. V.27, se han graficado los puntos finales probables de los barrenos primarios, secundarios, terciarios y adicionales (cuaternarios o barrenos de prueba) sobre la curva GIN. En término medio el volumen absorbido de lechada disminuirá de una serie a la siguiente, mientras que, obviamente, la presión final de inyección se incrementará de una manera correspondiente de una serie a la siguiente. Esto sucede automáticamente cuando el procedimiento GIN es seguido.

Con una barrenación primaria de 10 a 12 m, es probable que se requieran series de secundarios y terciarios. Los barrenos terciarios estarían a una distancia de 2.5 a 3 m a partir del barreno adyacente más cercano, estos barrenos podrían ser más cortos dependiendo de la geología y resultados de las perforaciones secundarias.

Barrenos cuaternarios pueden ser necesarios o no, pero por lo menos se requerirán algunos para efectos de comprobación y llevar a cabo en ellos pruebas Lugeon y ver si ha sido alcanzada un buen grado de impermeabilidad de la roca, o por lo menos un aceptable grado de permeabilidad de la roca. Para una cortina impermeable muy "cerrada" los requerimientos pueden ser tan rigurosos como que el 90 por ciento para

todas las pruebas deben estar cerca o por abajo de un Lugeon ($1 \times 10^6 \text{ cm/s}$), con ningún valor no mayor de 3 Lugeon.

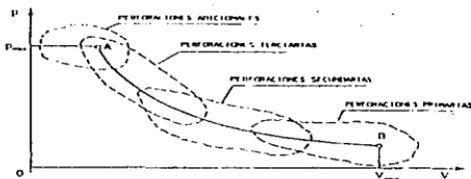


fig V.27 Puntos finales de las trayectorias de las progresiones de inyección.
(ejemplos)

Es obvio que debe existir una relación entre el espaciamiento de las perforaciones y el GIN requerido. Por ejemplo, Si el primer espacio seleccionado es muy amplio y el GIN seleccionado es muy bajo, no significará ningún decremento significativo de las tomas de lechada entre la serie primaria a la secundaria, o aún hasta la terciaria. En estas circunstancias, no existe ninguna garantía para una pantalla realmente exitosa, aunque se hayan efectuado gastos considerables de barrenos e inyección.

Si el primer espaciamiento es muy cerrado o el GIN muy elevado, las tomas de lechada serán muy bajas después de las primeras dos series, y los barrenos terciarios podrán ser esencialmente un desperdicio. Por lo tanto el GIN también se relaciona con la distancia que la mezcla recorre y en consecuencia, con el espesor de la pantalla que se construye en el interior de la roca o "muro".

Una regla empírica, aunque funciona muy bien, es el seleccionar los valores del GIN y de los espaciamientos, de manera tal que el volumen de mezcla inyectada por metro de etapa inyectada, se reduce de una serie de perforaciones a otra, alrededor del 50 % en promedio (realmente entre el rango del 25 al 75 %). Tal comportamiento daría confianza que un cierre progresivo en la pantalla realmente esta ocurriendo. Sin embargo se podrán usar uno o más tramos de inyección como pruebas, durante la fase de diseño o en la primera etapa del inicio de los trabajos de inyección a fin de definir mejor el espaciamiento de los barrenos primarios y el valor del GIN.

Si el recorrido de la mezcla para los barrenos de la última serie en una pantalla estanca o impermeable, supongamos la serie tercera, no llega a la línea de la presión

límite superior del GIN seleccionado (y máxime si es por la mitad izquierda de esa línea), se deberán inyectar perforaciones adicionales en ambos lados de esos barrenos que no cumplan estos criterios. De este modo, todas las series de la pantalla estanca o impermeable (aunque no todos los barrenos primarios, secundarios, y terciarios), se habrán inyectado a la presión límite de inyección máxime con absorciones de lechada razonablemente bajas (menores que 25 kg/m. por ejemplo).

Si una selección no óptima de los espacios de los barrenos ha sido seleccionada, el método propuesto de inyección, es al menos, hasta cierto punto, un procedimiento que se regula por sí sólo. Este resultado se debe a la técnica de división de espacios, la curva GIN, y los requerimientos para las últimas series de barrenos para alcanzar la presión límite con mínimas unidades de toma.

En conclusión, es muy probable que si se siguen los conceptos o reglas presentadas, se puede lograr una distribución bastante óptima del volumen total de inyección a lo largo de la pantalla. El procedimiento, toma en cuenta, casi automáticamente, las irregularidades reales de las condiciones geológicas en la masa de la roca. Haciendo que la relación beneficio-coste de la cortina inyectada sea la máxime.

VI. EJEMPLO DE APLICACIÓN A LA CONSTRUCCIÓN DE LA PANTALLA ESTANCA DE LA PRESA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ZIMAPÁN.

VI.1 Breve Descripción Del Proyecto.

Dentro de la política de diversificación de fuentes de energía establecido por la Comisión Federal de Electricidad para garantizar el suministro eléctrico confiable, en calidad y cantidad, a la planta productiva de país y a la población en general, así como para satisfacer la demanda actual y futura del de energía, se decidió la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán, aprovechando el gran potencial del río Moctezuma el cual forma parte del Sistema Hidrológico del Río Pánuco.

Este sistema es uno de los 27 sistemas en los que se ha dividido el país para propósitos de estudios, planeación y aprovechamiento hidroeléctrico. El Sistema del Río Pánuco ofrece un potencial de 7, 621 Gwh, distribuidos en 37 proyectos; ocupa el tercer lugar a nivel regional (Región Golfo) y el octavo a nivel nacional, representando el 4.8% del potencial total de la nación.

El P. H. Zimapán al aprovechar los escurrimientos de los ríos Tula y San Juan, se alimenta principalmente de las aguas residuales de la capital de la república y su área conurbada, donde habitan alrededor de 18 millones de personas, por su tendencia de crecimiento poblacional se prevé también un aumento en la dotación de agua potable

cuyos desajolos son vertidos hacia la cuenca del río Tula, principal aportador del proyecto, se considera que el volumen afluente máximo se establece en el año 2.026 de acuerdo con las tendencias y proyecciones analizadas

Lo anterior es de gran importancia debido a que durante la vida útil de la central, el factor de planta puede incrementarse al tener una aportación de agua superior en el futuro.

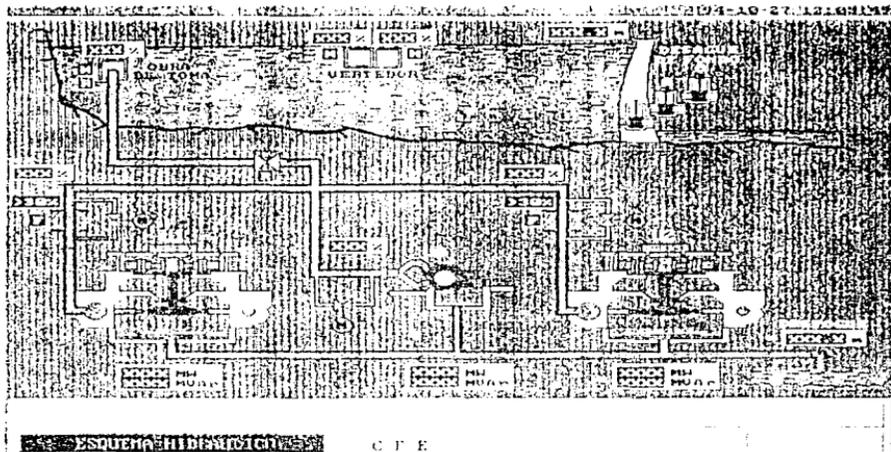


Figura VI. 28 Esquema Hidráulico de la Central Hidroeléctrica.

Lo anterior es de gran importancia debido a que durante la vida útil de la central, el factor de planta puede incrementarse al tener una aportación de agua superior en el futuro. Actualmente el factor de planta del P.H. Zimapán es de 0.53, lo que significa que puede generar 12 horas del día, esto representa una eficiencia muy alta en el aprovechamiento del recurso agua, considerando que el promedio nacional de dicho factor de planta es de 0.32, donde los sistemas hidrológicos cuentan con los ríos más caudalosos.

Debido a lo disperso de las diferentes estructuras, la construcción, montaje e instalación de las diversas estructuras se llevó a cabo en tres sectores de obra principalmente, denominadas Zona Boquilla, Túnel de Conducción y Zona de Casa de Máquinas

En la Zona de Boquilla se fundaron las obras para el control del agua de los ríos Tula y San Juan. El primero marca el límite entre los estados de Hidalgo y Querétaro y el segundo recibe su nombre de la población San Juan del Río del estado de Querétaro; ambos ríos al confluir e internarse en el cañón denominado "El Infiernillo", forman el río Moctezuma que desemboca al Golfo de México. Sobre éste río a 466 m aguas abajo de la confluencia de los ríos Tula y San Juan, se encuentra construida la cortina, es de concreto del tipo arco-bóveda con 203 m. de altura. Ocupa el segundo lugar por su altura a nivel nacional y el primero en cortinas de su tipo, esta constituida por un volumen de concreto de 215,000 m³, su base es de 20 metros de espesor y se encuentra desplazada en la cota 1369 msnm, y 4 m en la corona a la cota 1565 msnm con una longitud de 130 m.

En la margen izquierda del río Moctezuma se localizan el vertedor de demasías y el túnel de desvío, el primero lo constituyen dos túneles de sección portal de 9.9 m de ancho y altura promedio de 12 metros cuyas longitudes son de 550 m aproximadamente. Mientras que el túnel de Desvío, también en sección portal sus dimensiones son de 9.4 por 9.4 m. y longitud de 556.0 m.

En la margen derecha, se encuentra la Obra de Toma, consta de un túnel con secciones de transición hidráulica portal-herradura-cuadrada-herradura donde la sección cuadrada es la de control (aloja las compuertas de apertura y cierre), operadas a través de una lumbrera de 65 m de profundidad. La continuación de esta estructura lo constituye el túnel de fuerza que lleva el agua a la Casa de Máquinas distante a 21 km, la sección del túnel de conducción es de herradura con diámetro de 5.10 m. excavado totalmente en roca.

En la zona de Casa de Máquinas se encuentran las estructuras de la Tubería de Presión Pozo de Oscilación, Galería de Válvula de Mariposa, la Casa de Máquinas propiamente, y el desfogeo.

La Tubería de Presión fue diseñada con una inclinación de 60 y cuenta con un desnivel de 500 m, para conducir un gasto de diseño de 59 m³/seg. su diámetro con la camisa metálica de acero varía desde su conexión con el Túnel de Conducción de 3.5 m a 1.8 m a su llegada al conjunto turbina-generador dentro de la Casa de Máquinas. El Pozo de Oscilación lo constituye una lumbrera de 15 m de diámetro y 132 m de altura, que interconecta con la Tubería de Presión, fue excavado mediante una contrapocera y ampliada su sección con banquetes, su revestimiento final es de concreto armado de 30 cm de espesor. La Galería de Válvula aloja una válvula una válvula de mariposa de 3.5 m de diámetro para apertura y cierre del flujo de agua ha-

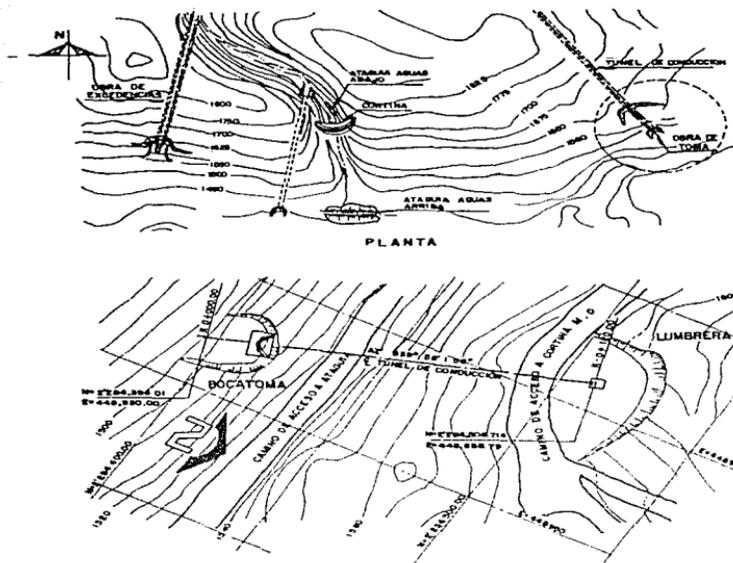


figura VI.29 Disposición de obras en zona Boquilla y Casa de Máquinas

cia la Casa de Máquinas en caso de una emergencia o mantenimiento de ésta. La Casa de Máquinas es subterránea también consta de una Caverna de 70 m de largo, 22 m de ancho y 38 m de altura donde se alojan dos turbinas tipo Pelton de 143 Mw de potencia dispuestas en forma vertical, con las que se producen 1,350 Gwh. de generación media Anual, su rotor gira a 300 rpm. Estas turbinas son del tipo flujo parcial ya que toda la energía del agua la convierten en energía cinética antes de que ésta incida a la rueda Pelton a través de los hidroyectores.

Aledaña a la Casa de Máquinas se encuentra la Galería de Transformadores, cuya función es cambiar el voltaje de 16,000 volts y la corriente de 3,437.5 amperes, entregadas por las unidades de generación, elevándola a 230,000 volts con 414.2 amperes, conservando la potencia y frecuencia constantes de 55 KVA con 60 Hz respectivamente. Finalmente en el exterior de la Casa de Máquinas se encuentra el edificio que aloja las subestaciones para el manejo y control de la electricidad que se interconecta a la Red Eléctrica Nacional, estas subestaciones son compactas de 230 y 115 KV denominadas subestaciones de Switcheo eléctrico y están constituidas por componentes modulares para alojar las barras de tensión y los interruptores de potencia aislados en gas SF₆ (hexafluoruro de azufre), lo que les permite tener una geometría compacta y no ocupar los espacios tan grandes de una subestación convencional, por lo que pueden ser alojadas en el interior de un edificio.

Finalmente, una vez que el agua ha cumplido su función generadora es restituida al río a través de los túneles de desfogue.

VI.2 Geología de la Boquilla.

Se efectuaron estudios previos en la zona de la boquilla, estos consistieron en exploraciones subterráneas que incluyeron 4 socavones 100 m de longitud localizados dos en cada margen a las elevaciones 1,383 y 1,526 msnm, en los cuales se hicieron observaciones geológicas y se obtuvo el espesor de la zona decomprimida, la calidad de la roca y el comportamiento del fracturamiento. Posteriormente estos socavones se emplearon para la realización de estudios geofísicos (eléctrica y sísmica), procediéndose a efectuar 10 sondeos con recuperación de muestras, a fin de definir la secuencia estratigráfica de las formaciones rocosas, el fracturamiento del macizo rocoso, la calidad de la roca "in situ" y particularmente para efectuar pruebas de permeabilidad tipo Lugeon, así como para llevar a cabo la medición de niveles freáticos. De estos sondeos ocho fueron verticales a diferentes profundidades y dos inclinados a 45°, obteniendo la calidad de roca y comprobando que el sistema de fracturamiento se encuentra cerrado con permeabilidades muy bajas.

En lo que respecta a las mediciones de Petite Sismique se efectuaron dos tendidos en socavones cuyos resultados arrojaron las siguientes características relevantes:

1. Frecuencia igual a $F_s = 863$ Hz lo que permitió calcular en 1.21 la razón entre el modulo de la roca y el modulo estático de un hormigón de referencia de Rc característica = 320 kg/cm², cuya fórmula es; $E_{roca} / E_{norm.ref} = 1.86X 10^{-3} F_s - 0.393$
2. Tiempo total 28 ms, con lo cual la roca de Zimapan encabeza la lista de sitios de presa de arcos conocidos con mejor roca, solo la segunda mejor roca es el basalto muy compacto de KATSE (Lesoto) con 32 ms.

El cañón del Ifiemillo, se encuentra labrado en rocas calizas sobreyaciendo a lutitas y areniscas calcáreas, alternadas con calizas arcillosas, se localiza en un homoclinal de 10° de inclinación buzante de la margen derecha hacia la izquierda y hacia aguas abajo. El macizo rocoso se encuentra orientado E-W, estando limitado hacia el S por falla normal Tula

La boquilla tiene un perfil asimétrico, con altura en margen izquierda menor que en margen derecha, ambas paredes del cañón son casi verticales y en partes con pendiente contraria, con una amplitud de 9 m en el cauce y 270 de separación en su parte más alta. El origen del cañón es producto de efectos erosivos del río, que empezaron un poco más arriba de su nivel actual, al abrirse paso a través de las zonas más débiles afectadas por el fracturamiento mayor de orientación N-S y conjugados por las fallas Tula y el Cajón de orientación E-W. Las rocas de ambas márgenes se presentan con una homogeneidad litológica, morfológica, y estructural.

Las rocas que afloran en esta área son carbonatadas de la fm El Doctor, con estratificación gruesa, mayor de 1.5 m de espesor de rumbo general N60°E y con 10° a 12° de inclinación hacia el NW (margen izquierda), característica que fue tomada en cuenta para la correlación de ambas laderas.

En los empotramientos afloran rocas carbonatadas de la Fm El Doctor, consistentes en una secuencia de calizas dolomíticas y dolomias de color gris claro a gris oscuro entre las cotas 1,565 y 1,500 msnm aproximadamente. La segunda de la cota 1,500 hacia abajo presenta casi exclusivamente dolomias de color gris oscuro y textura granular cristalina con aspecto sacaroide.

Ambas laderas están conformadas por estos bancos de caliza muy sana y resistente más o menos horizontales, las características litológicas y estructurales del macizo guarda una estrecha relación con la génesis y desarrollo de carsticidad. Los esfuerzos compresivos que afectaron a estas rocas originaron una serie de paquetes estratigráficos empujados por medio de sobrecorrimientos, siendo el mayor de estos y de carácter regional, el contacto tectónico de la Fm. Doctor sobreyaciendo la Fm. Soyatal detectado mediante barrenos de exploración a una profundidad de 35 m. respecto a la cimentación de la cortina.

A nivel local estos sobrecorrimientos aprovecharon en la mayoría de las ocasiones los planos de estratificación o bien cruzaron de un estrato a otro. La fricción producida por el deslizamiento entre los estratos desarrollo horizontes arcillosos (milonitas), con cristales de dolomias cementados por calcita amorfa y algo de cuarzo, atribuyendo al origen de las calizas y dolomias a un medio sedimentario químico, siendo afectadas posteriormente por metamorfismo cataclástico. Sobresalen una falla inversa ubicada arriba de la cortina a la elevación 1,580 con un horizonte milonítico de aproximadamente 70 cm. de espesor, así como los sobrecorrimientos de las cotas 1485, 1455 y 1418, cuyos espesores varían de 5 a 10 cm.

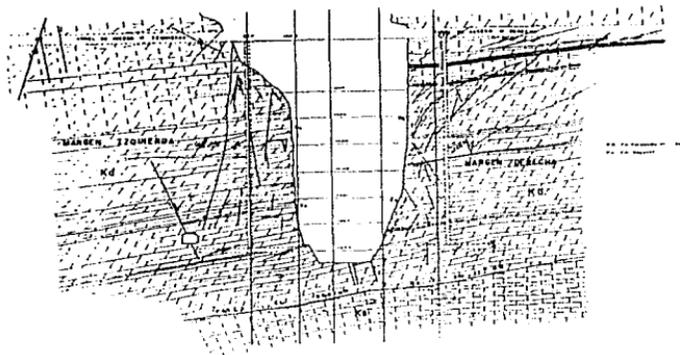


figura VI.30 Sección geológica desarrollada por la pantalla de impermeabilización.

VI. 3 Fracturamiento y Carsticidad.

Las discontinuidades que afectan el macizo rocoso son predominantemente subverticales; el registro de éstas obtenidos en las galerías para inyección, pozos plomada de instrumentación y excavación en los empotramientos de ambas laderas permitieron clasificarlas, conforme a su orientación en cuatro familias estructurales:

Tabla No VI.5 Predominancia de las discontinuidades en la Boquilla

alfa	N 22.5°- 67.5°E	promedio	N45°E
beta	N22.5°-67.5° W	promedio	N45°W
gama	NO 22.5°W, NO 22.5° E	promedio	N-S
delta	N 67.5°-90° y N 67.5°-90° W	promedio	E-W

para las excavaciones subterráneas se entiende que las discontinuidades son todas aquellas fracturas subverticales, fallas y juntas de estratificación visibles en el perímetro completo de la excavación.

La sección de la boquilla para efectos de la pantalla de inyección, se dividió en intervalos de 24 m de tal forma que cada intervalo incluyera una galería, en cada uno de estos tramos se contabilizó el total de discontinuidades por familia, lo mismo se hizo para los desarrollos cársticos, el resultado de la estadística por niveles se muestra en las tablas Nos VI.6 y VI.7, la cantidad de estructuras geológicas cartificadas de ambas márgenes se muestra en la tabla No VI.8. En los frentes de excavación se observó que los sobrecorrimientos importantes limitan la continuidad de las estructuras, definiendo dominios estructurales a diferentes niveles, cuyos límites coinciden con los horizontes arcillosos más importantes.

Respecto a la carsticidad se observó que estos son notablemente mayor, tanto en número y magnitud, en la margen izquierda (291 oquedades) que en la margen derecha (152 oquedades). Entre las cotas 1553 y 1535 se presentaron una proporción alta de oquedades, en este intervalo afloran caliza dolomíticas las cuales son más susceptibles a la disolución que las dolomías. De la cota 1370 hacia abajo, no se detectaron carst, en general los niveles inferiores de la boquilla tienen poca cartificación, debido a que es el nivel freático más reciente (hablando en términos geológicos).

En la margen izquierda se encontraron las oquedades de mayores dimensiones (12mX3m X 2m) aproximadamente, con una continuación hacia el interior del macizo

Tabla No VI.6 Estadística de Fracturas y Fracturas con Carst en margen izquierda de la boquilla

N I V E L		alfa		beta		gamma		delta		total	
		f	f-c	f	f-c	f	f-c	f	f-c	f	f-c
		1565-1529	No	55	9	80	7	64	5	35	5
	%	24	10	34	9	27	8	15	14	100	11
1529-1505	No	26	3	88	7	45	3	29	2	187	15
	%	14	12	47	8	24	7	15	7	100	8
1505-1481	No	9	2	47	3	14	-	12	4	82	9
	%	11	23	57	6	17	-	15	33	100	11
1481-1457	No	21	-	74	13	36	3	17	-	148	16
	%	14	-	50	9	24	2	12	-	100	11
1457-1433	No	18	2	45	14	20	1	28	5	111	20
	%	16	11	41	31	18	6	25	11	100	18
1433-1409	No	71	7	55	6	51	3	37	6	214	23
	%	33	10	26	11	24	6	17	16	100	11
1409-1385	No	34	7	10	2	26	3	16	3	86	15
	%	39	21	12	20	30	12	19	19	100	17
1385-1362	No	57	3	19	-	12	1	27	-	115	4
	%	50	5	17	-	10	8	23	-	100	3

Tabla No VI.7 Estadística de Fracturas y Fracturas con Carst en margen derecha de la boquilla

N I V E L	alfa		beta		gamma		delta		total		
	f	f-c	f	f-c	f	f-c	f	f-c	f	f-c	
1565-1529	No	19	-	58	4	47	4	28	2	152	10
	%	13	-	38	7	31	8	19	7	100	7
1529-1505	No	27	-	71	10	29	1	17	2	144	13
	%	19	-	49	14	20	3	12	12	100	9
1505-1481	No	9	-	25	4	20	1	14	-	68	5
	%	13	-	37	16	29	5	21	-	100	7
1481-1457	No	10	1	52	9	19	-	13	1	103	11
	%	18	5	50	17	18	-	14	8	100	11
1457-1433	No	24	-	41	5	13	-	19	3	97	8
	%	25	-	42	12	13	-	20	16	100	8
1433-1409	No	35	3	37	-	32	-	37	4	141	7
	%	25	9	26	-	23	-	26	11	100	5
1409-1385	No	25	-	17	-	17	1	23	-	82	1
	%	30	-	21	-	21	6	28	-	100	1
1385-1362	No	60	3	28	1	23	1	31	2	142	7
	%	42	5	20	4	18	4	22	6	100	5

Tabla No VI.8 Grado de Carstificación del Fracturamiento

	NIVELES	1	2	3
1	1565-1529	386	36	9 %
2	1529-1505	331	28	8 %
3	1505-1481	150	14	9 %
4	1481-1457	251	27	11 %
5	1457-1433	208	28	13 %
6	1433-1409	355	30	8 %
7	1409-1385	168	16	9 %
8	1385-1362	257	12	4 %
	TOTAL	2108	190	9 %

que enlaza otra caverna de dimensiones similares, esta se desarrolló en una falla normal y que muy probablemente esta relacionada con importante falla de rumbo N25°W, encontrada en la estructura del vertedor, siendo este la estructura de mayor carsticidad.

En la margen derecha la carsticidad es muy escasa (no se observó entre las cotas 1493-1385 del empotramiento de la cortina) y de dimensiones pequeñas con excepción de la galería 1469 donde se encontró una oquedad grande con relleno granulares.

En la zona superficial de las laderas (prácticamente verticales e incluso la de la margen derecha en voladizo), se observan fisuras finas más o menos paralelas a la superficie rocosa debido a efectos de descompresión de roca y a efectos térmicos; sin embargo, estas no interesaron a las inyecciones ya que serían eliminados por las excavaciones para la cimentación de la presa. Más importantes fueron los sistemas de fisuración que causan discontinuidades en ambas laderas. La conjunción de estas discontinuidades formaron cuñas y diedros más o menos verticales bajo los apoyos de la cortina y aún más, aguas abajo provocando situaciones de riesgo para la estabilidad de dichas cuñas, fuertemente ligada a la presión de agua que pueda generarse a lo largo de estos planos de discontinuidad. Debido a estas situaciones uno de los objetivos principales de las inyecciones, en combinación con el sistema de drenaje, fue evitar o por lo menos reducir las presiones de agua en dicha discontinuidades.

El mayor desarrollo de carst en margen izquierda puede ser debido a la topografía suave entre las cotas 1565 y 1520 que funciona como un receptor de las aguas pluviales, lo que favorece la infiltración a través del fracturamiento subvertical facilitando de esta manera la erosión y disolución de la roca. Otro factor que hay que tomar en cuenta respecto a la mayor predominancia de carsticidad en una margen, es la disposición de la estratificación cuyo buzamiento hacia el interior de la margen izquierda (NW) ejerce un cierto control sobre las filtraciones (fig. VI.31)

Por la naturaleza de la roca, (calizas y dolomías) los fenómenos cársticos en el macizo, como ya lo vimos, se desarrollaron, ya que estas rocas carbonatadas se caracterizan por una mineralogía de fácil solubilidad, condición que las hace susceptibles de ser atacadas por el agua rica en bióxido de carbono, no obstante este desarrollo no fue de gran intensidad, sobre todo a determinados niveles, debido principalmente a que el río se profundizó muy rápidamente y a que las características climáticas de la región son poco favorables. Para los carst de zonas profundas del macizo, la época de esfuerzos tensionales fuertes, fallamiento normal y vulcanismo, parecen ser los que favorecieron un poco más su desarrollo.



Figura VI.31 Esquema de la dirección de filtraciones en fracturas y estratificación

Considerando que la capacidad hidráulica de un ducto cárstico, aun de tamaño modesto puede ser mucho más importante que la de un sistema extenso de fisuras finas, el objetivo principal de la inyección es entonces, la de taponar eficazmente los posibles ductos de este tipo. Por otro parte estos ductos cársticos, aguas abajo de la cortina, pueden contribuir a drenar el macizo rocoso, aunque el número de oquedades encontradas fue de regular cantidad, sin embargo sus dimensiones no son considerables, lo cual indica que el suministro de agua no fue muy abundante, pero ante las nuevas condiciones de niveles de agua, por el llenado del vaso, es necesario que las filtraciones sean las menores posibles.

En la práctica es difícil y a veces imposible encontrar ductos cársticos simplemente por medio de la perforación, mientras que es mucho más probable interceptar por lo menos algunos de ellos mediante la construcción de galerías, razón por la que se efectuó un diseño de pantalla de inyección basado en un número elevado de galerías horizontales a fin de tratar de interceptar estos fenómenos cársticos, ya que se encuentran concentrados o ligados a las discontinuidades verticales, razón por la que se efectuó un levantamiento geológico detallado de las galerías excavadas.

Para el tratamiento de estos carst en las excavaciones de las galerías se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Levantamiento geológico de todos los fenómenos cársticos encontrados en cada galería.
- Limpieza cuidadosa (mecánica y con chorro de agua a alta presión) del ducto , eliminando hasta la máxima profundidad posible todo material suelto (arcilla u otros) que pudiera contener.
- Colocación de mangueras de inyección en los ductos cársticos en número suficiente y en profundidad la más grande posible.
- Sellado de la boca del carst con mortero.
- Colocación del revestimiento de concreto de la galería.
- Inyección de contacto (sellado) entre el revestimiento y roca en la bóveda de las galerías.
- Llenado por inyección de los ductos cársticos a través de las mangueras colocadas.

En lo que respecta a la existencia de carst por debajo de la elevación 1370 (nivel freático) no se prevé su existencia puesto que esa elevación corresponde al actual nivel base del carst. De estos levantamientos se pudo determinar que la mayor parte de las oquedades cársticas de la boquilla no tienen rellenos y que los que cuentan con rellenos arcillosos o granulares se encuentran en dos niveles: El primero entre las cotas 1505-1457, representando un antiguo nivel freático temporalmente estable que fue abandonado por un descenso drástico del mismo (carst fósil o muerto). Y el segundo entre las cotas 1433 -1385, principalmente en los niveles inferiores a la elevación 1421; indican un levantamiento regional gradual que

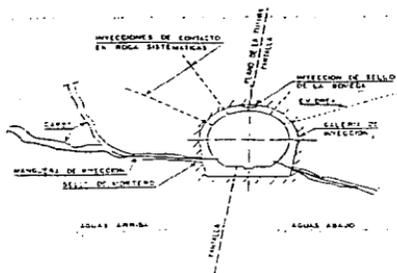


Figura VI.32 Tratamiento del carst en galerías

ha influido en la misma forma en la variación del nivel freático, en esta zona la permeabilidad debida a la carsticidad se puede ver ligeramente disminuida ya que algunos de los conductos se encontraron obstruidos.

En resumen se determinaron dos niveles de carst bien separados, tanto por el levantamiento tectónico regional (discontinuidad en los planos de disolución) como por la presencia de importantes capas arcillosas pseudohorizontales. El llenado del vaso induce a un gradiente hidráulico artificial que difícilmente reactivará el carst fósil y menos lo conectará con un carst inferior por tener gradientes independientes.

VI.4 Disposición de la Pantalla Impermeable.

El planteamiento de la inyección se efectuó conforme al método de subdivisión de espacios (space-splitting method), con barrenos de la serie primaria a una distancia entre sí de 12 m en la figura VII.33, se muestra en esquema de la geometría del trazo en planta y alzado de las galerías para la inyección de pantalla. Las galerías de inyección corresponden a las de las elevaciones 1373,1421,1469 y 1517 de ambas márgenes. Las galerías intermedias 1397, 1445 y 1493 corresponde a las galerías de inspección ambos tipos de galerías se conectan con un pozo el cual durante la etapa de construcción sirvieron para el desalojo de la rezaga producto de la excavación de las propias galerías y el otro como acceso para los trabajadores. En la actualidad estos pozos sirven de acceso a cada galería para la revisión de las lecturas de la instrumentación de la cortina así como para revisión de su comportamiento y el del macizo rocoso.

Algunas de las galerías de inyección se integraron al sistema de auscultación de la cortina, ya que en ellas se instalaron pilas geodésicas, piezómetros etc. La distancia entre galerías de inyección es de 48 m, lo que permitió la posibilidad de realizar perforaciones de solamente 24 m de longitud, con estas perforaciones tan cortas es posible garantizar una buena precisión en la dirección de las barrenaciones. Además, teniéndose galerías horizontales y taladros subverticales, todo plano de debilidad que tenga una extensión mínima en cualquier dirección será cruzado y tratado por la inyección.

La pantalla de inyección tiene dirección hacia aguas arriba de cada lado del cañón, de manera que el empuje del agua sea dirigido hacia el interior de la montaña y por la misma razón en la parte inferior la pantalla, el buzamiento es hacia aguas arriba. Los pozos y las galerías que solo sirven de acceso, así como las zonas de las galerías de inyección donde se efectuaron las perforaciones para el sistema de drenaje, no se revistieron de concreto a fin de que funcionen como drenes adicionales. Los revestimientos de las galerías de inyección fueron diseñados para resistir la presión hidrostática exterior total, lo que automáticamente permite resistir una presión de inyección del doble.

VI. 5 Mezcla de Inyección.

Los objetivos principales de la inyección para el caso una pantalla estanca los podemos resumir en los siguientes puntos, considerando el emplazamiento de la cortina de Zimapán:

1. Limitar las fugas de agua.
2. Limitar las presiones intersticiales que genera el agua bajo la cortina y especialmente aguas abajo de ésta.
3. Contribuir a la estabilidad de las paredes del cañón ya que el riesgo de erosión pondría en serio peligro la estabilidad de las laderas donde se funda la cortina, y por último . . .
4. Tener una posibilidad de controlar los cambios que se pueden producir en los apoyos a lo largo de los años.

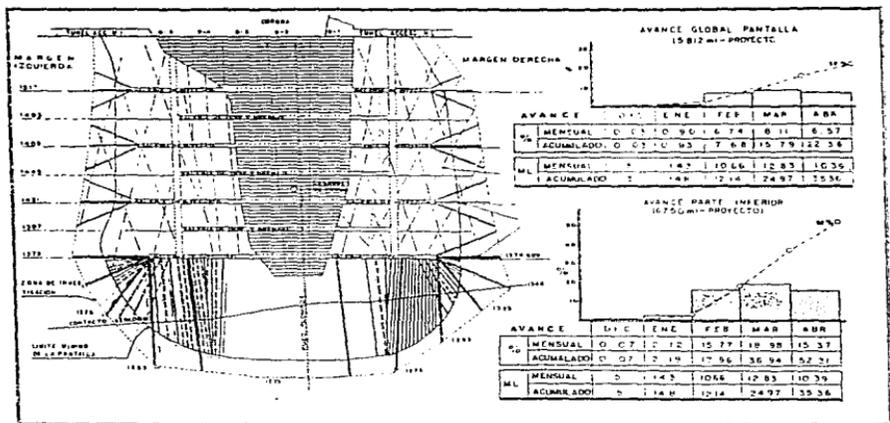


Figura VI.33 Pantalla de Inyección

Para lograr lo anterior se empleó una sota mezcla de inyección estable a base de cemento exclusivamente, después de efectuar pruebas con diferentes proporciones. Los parámetros principales establecidos son los siguientes:

Mezcla de inyección

Agua/Cemento
Fluidificante
Decantación en tres horas

Mortero de inyección para carst

Arena/Cemento
agua/Cemento

Saturación con agua:

Antes de la inyección

A/C = 0.8 en peso
F/C = 0.4 % en peso (Sikament I-17, N-Z)
inferior a 5 %

Ar/C = 0.8 en peso
A/C = 0.5 en peso

T = 2-3 horas, a 2 bar.

Perforaciones para inyección

Diámetro
 Tramos de inyección
 Distancia entre primarios

O = 50 mm
 L = 5 m ascendente
 d = 12 m.

Perforaciones de drenaje

Diámetro

O = 100 mm

Presiones de inyección:

En los carst
 En el fondo del cañón
 En corona de cortina
 Para inyecciones de contacto
 Intensidad de inyección
 Volumen límite práctico
 Volumen máximo

$P_{max} = 10-20$ bar
 $P_{max} = 50$ bar
 $P_{max} = 30$ bar
 $P_{max} = 15-25$ bar
 $II = 2000$ bar-l/m después de inyectar carst
 $V_{min} p = 20$ lt/m (100 lt /tramo)
 $V_{max} = 200$ lt/m (1000 lt/tramo)

En el laboratorio se probaron los siguientes cementos:

MARCA	APASCO T-II	CRUZ AZUL TII -P	VERACRUZ PORTLAND T-II
FECHA MUESTREO	7/05/92	15/06/92	15/05/92
TIEMPO DE FRAGUADO			
inicial	3 00 hrs	2 30 hrs	2.00 hrs
final	5 10 hrs	4 35 hrs	3 30 hrs
FINURA			
Pasa malla 200	98 1 %	98 7 %	99 3 %
Pasa malla 325	88 3 %	94 4 %	84 9 %
SUP. ESPECÍFICA BLAINE (cm ² / gr.)	3664	3682	3427
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg / cm ²)			
a 3 días	175	222	192
a 7 días	248	---	---
a 28 días	---	---	---
CONT. DE PUZOLANA	20%	20,6 %	---

El agua que se empleó para la mezcla se tomó del río San Juan ya que los resultados del laboratorio mostró que no contenía agentes nocivos. La arena para el caso de los morteros de inyección en los carst fue producida en el lugar, esta se hizo pasar por la malla 16 para ajustar la granulometría requerida en la inyección de morteros.

Los ensayos para determinar las propiedades reológicas de las mezclas fueron

FLUIDEZ: En esta prueba se midió el tiempo de paso a través de un cono Marsh, (Especificación API, American Petroleum Institute) de 15 cm de diámetro en la parte superior y 35 cm de alto, la boquilla de descarga es de 4 76 mm de diámetro interior. En la parte superior del cono se tiene una malla No 8, a efecto de retener de la mezcla cualquier grumo. El llenado inicial de la mezcla es de 1,500 ml, esta prueba se realiza tres veces para cada muestra.

SEDIMENTACIÓN: Esta prueba representa el porcentaje de sólidos precipitados una vez estabilizada la muestra. Se hacen mediciones con probetas cilíndricas de vidrio de 200 cm³ y 35 mm de diámetro; el punto de referencia para la medición es de 200 cm³, tomándose seis lecturas cuando menos. Una vez terminada la prueba se obtienen los siguientes datos: tiempo de estabilización, porcentaje de sólidos y porcentaje de reducción o decantación.

DENSIDAD: Esta prueba se efectuó mediante una balanza de lodos. El equilibrio se realiza al llenar el dispositivo de 150 ml que se encuentra adherido a ella, leyéndose directamente el peso volumétrico correspondiente lb / pie³ o gr / cm³.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE: Este ensayo consiste en llevar a la falla muestras cilíndricas de 5 cm de diámetro y altura de 10 cm, (tomadas en campo) o muestras cúbicas de 5 cm de arista (tomadas en laboratorio).

Los moldes son descimbrados en 25 horas después de haber sido llenados con la mezcla, depositándolas en el cuarto de curado sumergidas en recipientes con agua y cal.

TEMPERATURA: Se controló por medio de termómetros de mercurio con rango de -20 a 100° C.

EXPRIMIDO: En este ensayo se determinó la cantidad de agua que pierden las mezclas al someterlas a presiones de 2, 5 y 7 kg/cm² por medio de un filtro-prensa, para determinar la resistencia que alcanzan las mezclas al perder agua o ser exprimidas (disociación agua - cemento). Con esta prueba es posible comparar el comportamiento cuando se utilizan productos químicos en diversas proporciones a fin de lograr mayor penetrabilidad.

COHESIÓN: Se obtuvo mediante la placa de cohesión, las dimensiones de esta placa son de 10X10 cm, con espesor de 0,4 mm rayada en ambas caras y direcciones

a cada 0.5 cm la prueba consiste en lo siguiente. se introduce por unos instantes la placa en la lechada hasta impregnarla se retira y deja escurrir para pesarla nuevamente. Se obtiene la diferencia de pesos y se divide entre el área de la placa, obteniéndose así la cohesión que debe ser menor de o igual a 0.3 gr/cm²

TIEMPO DE FRAGUADO Se determinó el tiempo en el que la mezcla dio inicio a su cambio de fase para transformarse a un sólido (tiempo de fraguado inicial) y el tiempo en que ha alcanzado su fase sólida (tiempo de fraguado final). Esta prueba se realiza con el denominado aparato de Vicat, el cual consta de una aguja de 1 mm de diámetro fija a un vástago que por peso propio se introduce en la probeta de 7 cm de diámetro por 3 cm de espesor

Para elaborar las mezclas y figurar las condiciones de los procedimientos empleados en obra se utilizó una licuadora de altas revoluciones tipo Waring, mientras que la reactivación de las mismas se realizó en una de bajas revoluciones tipo Hobart

La inyección del macizo pretende llenar los vacíos (es decir las fisuras y ductos cársticos) con una materia que sea mecánicamente resistente, que tenga la menor contracción posible y resistir el deslave por el agua de percolación, ya que una contracción de la mezcla durante el fraguado deja abierta una fina holgura a lo largo de toda la fisura por donde el flujo de agua se establece muy fácilmente (debido a la muy grande superficie de contacto) generando disolución del cemento y haciendo inefectiva la inyección a un plazo de tiempo más o menos largo. Por todas estas razones se debe evitar cualquier exceso de agua en la mezcla, lo que constituye una regla fundamental bien conocida en la confección de concretos de calidad

VI.6 Intensidad de Inyección.

Se aplicó el método de intensidad de inyección, definido como el producto del volumen de mezcla tomada (o bien del peso de cemento) por la presión de inyección final. La Intensidad (I.I. = $V \times P$) asumida para la pantalla estanca de la cortina de Zimapán fue de fue de 2,000

En la figura V.I.34 se indica gráficamente lo expuesto, la intensidad de inyección corresponde, obviamente, al producto de la presión máxima por el volumen límite teórico (por ejemplo $p_{max} = 50$ bar, $V_{lm} = 40$ l/m, corresponde a I.I. = $50 \times 40 = 2,000$ bar· l/m). Por razones de seguridad en la inyección, se utilizó un volumen límite práctico, inferior al valor teórico de la figura VI.34.

El volumen máximo establecido tiene la finalidad de evitar desperdicios inútiles de cemento que llegarían a distancias exageradas o saldrían por alguna ladera o cualquier galería ya excavada.

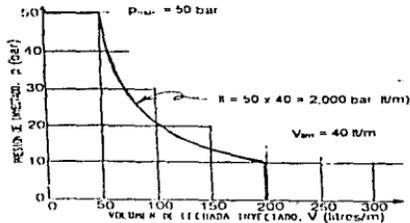


Figura VI.34 Curva de Intensidad de Inyección para la pantalla del P.H. Zimapán.

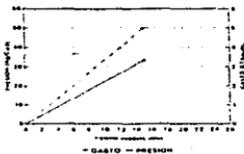
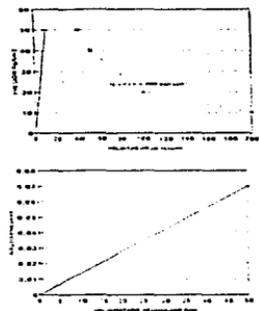
Este valor se fijó sobre la base de experiencias obtenidos en condiciones similares a otros proyectos y consideraciones ingenieriles. La inyección se efectuó por tramos de 3 - 4 conforme el procedimiento usual empezando desde el fondo del barreno hasta su embocadura, para evitar la pérdida de agua por efecto de la absorción de la matriz rocosa o bien por efecto de las microfisuras, en las cuales los granos pueden entrar pero no los granos de cemento. Se efectuó la saturación del macizo antes de inyectarlo durante 2 - 3 horas, a una presión reducida del orden de 2 a 3 horas, para evitar el hidrofracturamiento de la roca, inmediatamente antes de inyectarlo.

Este trabajo de saturación de la matriz rocosa no necesariamente fue obligado, ya que en las zonas donde la roca se encuentra saturada de manera natural, por ejemplo bajo el nivel del río no se efectuó trabajo de éste tipo.

La inyección de cada tramo se efectuó como es costumbre hasta conseguir el rechazo, con la condición que la presión de rechazo no es fija sino función del volumen inyectado y con la limitante máxima ya indicada. En algunas circunstancias, por ejemplo cerca de las laderas de empotramiento de la cortina, al conseguir el volumen máximo se paró la inyección y se reanudó después de un determinado tiempo de fraguado (normalmente de 24 horas), ya que es posible tener una fuga de lechada al exterior.

VI.7 Resultados.

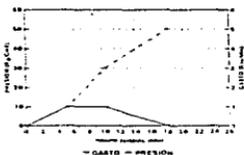
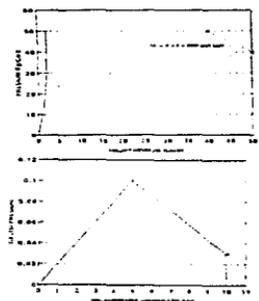
Una vez iniciada la inyección de pantalla en la parte inferior de la cortina, conforme a lo esperado las tomas fueron muy reducidas a excepción de pocos tramos donde se encontraron estructuras geológicas débiles, donde las tomas de lechada fueron de



BARRENO I-373-01 90 - 95

TIEMPO	14 25 - 14 25
PRESION	90
VOL. PARCIAL DE INYECCION	16
TIEMPO PARCIAL	18
VOL. INYECCION ACUMULADO	70
VOL. INYECCION ACUM. METRO	10
GASTO	323
GASTO/PRESION	367

Figura VI.36 Gráficas de monitoreo en la inyección del tramo 95-90 m. para el barreno No I-373-I-01



BARRENO I-373-01 85 - 90

TIEMPO	10 10 - 10 19
PRESION	10
VOL. PARCIAL DE INYECCION	9
TIEMPO PARCIAL	7
VOL. INYECCION ACUMULADO	10
VOL. INYECCION ACUM. METRO	2
GASTO	9
GASTO/PRESION	9

Figura VI.37 Gráficas de monitoreo en la inyección del tramo 90-85 m. para el barreno No I-373-I-01

numeración de las perforaciones corresponde al aplicado en los planos, como ejemplo de esto se muestra en la figura VI.35 el esquema de la definición.

La primera letra corresponde a la ubicación de la galería, I para la Margen Izquierda y la letra D para la margen derecha. Las siguientes tres cifras corresponden al nivel (galería) de referencia, a la cual se le ha omitido la cifra de los 1,000. El siguiente número corresponde al tipo de barreno, I para los de investigación, 1 para los primarios, 2 para los secundarios, 3 para los terciarios, 4 para las inyecciones cuaternarias, C para las de contacto, V para las de control y D para las de drenaje. Finalmente las últimas dos cifras se refieren al número de orden, del 01 al 49 la inyección dirigida hacia la montaña o interiores y del 50 al 99 hacia la cortina o exteriores. Para el barreno de nuestro ejemplo se trata de una inyección en la margen izquierda efectuada a través de la galería 1565 y que corresponde a un barreno de investigación dirigido hacia el interior de la montaña (hacia abajo de la cimentación).

Prosiguiendo con nuestro ejemplo, mostramos los resultados de las curvas de monitoreo GIN, para el valor de I.I. = 2,000 bar -lt/m, así como las gráficas de presión y gasto Vs. tiempo y la curva de penetrabilidad (q/p) Vs. volumen inyectado acumulado, para el tramo perforado de 90 a 95 m y para el de 85 a 90 m.

Obviamente la inyección se efectuó en forma ascendente desde el fondo del barreno hacia su embocadura, en tramos de 5 m. Conviene aclarar que las perforaciones para la totalidad de la pantalla impermeable se efectuó con perforadoras de rotación de alta velocidad con barrenos de 2 1/4" de diámetro (5 715 cm) y en el caso de los barrenos de investigación la recuperación de las muestras se obtuvo en toda su longitud, con la indicación de RT, RQD, fracturamiento y resultados de pruebas de permeabilidad.

En esta última tabla se puede notar como la eficiencia de la inyección disminuye, hasta llegar a cero, la inyección es entonces detenida, garantizándose la aplicación máxima de la inyección (que para este caso es de 50 bar) cuando ya no se presenta más toma de lechada en el macizo rocoso. La evolución de la presión y el gasto se registra respecto del tiempo, la curva de gasto/presión contra volumen así como la curva de gasto contra tiempo tienen características muy similares como se denotan en las figuras VI. 36 y 37.

Una diferencia sustancial se dio en el proceso de inyección de toda la pantalla en general, con lo expuesto en el presente trabajo: esta fue que el registro, mejor dicho, el monitoreo de la inyección mediante las curvas de control no se dio en tiempo real, es decir, no se llevó a cabo en el momento de la ejecución de la inyección, contrario a lo que los implementadores del método recomiendan. Una de las causas por lo que no se pudo llevar a cabo esto fue que en el sitio de la obra no existieron las condiciones de lugar para la instalación de las computadoras, además de lo limitado

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 PROYECTO HIDROELECTRICO ZAPAPAN
 PANTALLA PRINCIPAL (INYECCION DE BARROPOS)

CANTON	BOQUETE	PROFUNDIDAD	TIEMPO	VOL. INYECTADO		VOL. INYECTADO		GASTO	PRESION	
				PREVISTA	ACTUAL	PREVISTA	ACTUAL			
CM ³	M ³	M	MIN.	M ³	M ³	M ³	M ³	PSI	PSI	
BB 1 20	09:30 PM	09:35 PM	50	15	30	50	10:00	3.33	6.91	
	CEMENTO INYECTADO								48	kg
	10:30 AM	10:35 AM	10	5	5	5	1:00	1:00	0:10	
	10:35 AM	10:40 AM	30	5	5	10	2:00	1:00	0:03	
BB 1 20	10:40 AM	10:45 AM	50	5	0	10	2:00	0:00	0:00	
	CEMENTO INYECTADO								10	kg
	10:50 AM	11:05 AM	30	7	12	12	2:40	1:11	0:06	
	11:00 AM	11:12 AM	35	7	10	22	4:40	1:43	0:04	
BB 1 20	11:12 AM	11:20 AM	50	6	0	22	4:40	0:00	0:00	
	CEMENTO INYECTADO								21	kg
	11:30 AM	11:36 AM	20	5	5	5	1:00	1:00	0:05	
	11:36 AM	11:46 AM	35	6	0	5	1:00	0:00	0:00	
BB 1 20	11:46 AM	11:50 AM	50	5	0	5	1:00	0:00	0:00	
	CEMENTO INYECTADO								7	kg
	12:05 PM	12:05 PM	30	5	5	5	1:00	1:00	0:03	
	12:05 PM	12:17 PM	35	7	5	10	2:00	0:11	0:02	
BB 1 20	12:12 PM	12:20 PM	50	6	0	10	2:00	0:00	0:00	
	CEMENTO INYECTADO								10	kg
	12:30 PM	12:35 PM	25	5	5	5	1:00	1:00	0:04	
	12:36 PM	12:40 PM	40	5	0	5	1:00	0:00	0:00	
BB 1 20	12:40 PM	12:45 PM	30	5	0	5	1:00	0:00	0:00	
	CEMENTO INYECTADO								5	kg
	12:53 PM	01:00 PM	20	5	5	5	1:00	1:00	0:05	
	01:00 PM	01:01 PM	40	5	0	5	1:00	0:00	0:00	
BB 1 20	01:05 PM	01:10 PM	30	5	0	5	1:00	0:00	0:00	
	CEMENTO INYECTADO								5	kg

Figura VI.38 Tabla de monitoreo, incluye el comportamiento de gasto/presión Vs. Volumen inyectado.

del tiempo del programa de construcción. A manera de ejemplo se menciona que el cierre del túnel de desvío se llevó a cabo 10 meses antes de tener terminada la colocación de concreto en cortina, no solo hacia falta concluir con el colado en sí, sino que paralelamente a este trabajo era necesario esperar a que el concreto colocado tuviese una temperatura de 32 ° C para poder efectuar inyecciones de

contacto entre los bloques de la cortina y entre la cortina y la roca (sutura) donde se empotró; así como las inyecciones en galerías de estabilización con sus correspondientes etc., mientras el agua subía de nivel en el vaso de almacenamiento.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con lo expuesto en los capítulos anteriores, relativos a los requerimientos de para emplear el Método de Intensidad de inyección de podemos concluir lo siguiente: Con las mezclas estables, es decir, con cantidad mínima de agua, las presiones de inyección deben ser, obviamente, más altas que al utilizar mezclas más fluidas y por tanto inestables, lo que propicia que el agua se separe de la mezcla y escape a lo largo de las fisuras aún con bajas presiones. Frecuentemente se encuentra un miedo irracional frente a presiones de inyección elevadas; la razón es simplemente histórica y tiene sus raíces en el período en el cual se usaban frecuentemente mezclas inestables (época no muy lejana). Frecuentemente en estos casos el agua se separa de la mezcla y produce fenómenos de hidrofracturamiento.

Este riesgo es más reducido cuando se utilizan mezclas estables, como la teoría lo demuestra. Además al producirse una fisura por efecto de la inyección, la misma sería automáticamente rellenada de mezcla de óptima calidad y por tanto perfectamente sellada.

Por otro lado sería absurdo pensar que se puede inyectar una fisura sin abrirla, ya que la inyección presupone la aplicación de una presión para hacer penetrar la mezcla (lo contrario de un ducto cástico de gran sección que puede ser rellenado utilizando presiones sumamente reducidas).

Si se pretende que una pantalla inyectada sea impermeable (o poco permeable), se debe, entonces utilizar una presión de inyección que sea en todos los puntos de la fisura por lo menos igual a la futura presión del agua en los mismos puntos. Esto quiere decir que debe aplicarse una presión efectiva de inyección notablemente más alta. Una regla empírica consiste en fijar esta presión de 2 a 3 veces la presión del agua.

Para el caso de la pantalla de inyección de la presa de Zimapán, siendo la altura de la cortina de 203 m, se emplearon presiones en la parte inferior de la cortina de 50 bar, que fueron reducidas en la parte superior a 30 bar. Y en este caso por la geometría de la cortina fue posible que en la zona de contacto con la cimentación de los arcos las presiones fueran más reducidas, ya que con el aumento del empuje del agua (al llenado del vaso) que tiende a abrir las fisuras, el empuje que transmite el arco al macizo rocoso aumenta también, teniendo como consecuencia un efecto contrario, cerrándolas. Además que la concentración de las perforaciones en esta zona es más alta, ya que se tienen tanto inyecciones de contacto entre el concreto de

la cortina y la roca de cimentación (inyección de sutura), como las mismas inyecciones de la pantalla estanca

Respecto a la costumbre clásica de inyección, consistente en fijar una presión máxima y un volumen máximo de toma, conduce a soluciones arbitrarias que son inefectivas e inútilmente costosas la mayoría de las veces. Por esta razón el reemplazo de esta práctica, con notable éxito, por el Método de Intensidad de Inyección o GIN, expuesto en el presente trabajo, nos permite considerar las conclusiones siguientes al respecto:

- No existe, ni puede existir una relación entre el volumen de toma a inyectar y los resultados de Pruebas Lugeón o de pruebas de permeabilidad de cualquier otro tipo.
- La inyección se transforma en un proceso autorregulable en función de las características variables de la roca, sin necesidad de los Ensayos Lugeón u otros.
- Con cada etapa de inyección se sellan únicamente las discontinuidades que son las más importantes y las más abiertas con aplicación de presiones de intensidad justamente necesaria para hacer la inyección eficiente, ya sea en la roca original (inyección primaria), o bien en la roca ya inyectada en etapas anteriores (inyecciones secundarias o terciarias, según sea el caso).
- En fisuras muy abiertas la mezcla penetra a grandes distancias y se produce un desperdicio que puede ser importante. El método permite entonces reducir la presión; es decir emplear presiones bajas si las tomas son altas. Contrariamente si las fisuras son finas la mezcla tiene dificultad para penetrar y resulta lógico aumentar la presión de la inyección.
- Con el empleo de las gráficas se garantiza la eficiente inyección en cada etapa, de acuerdo con las características variables de la roca que influyen en las tomas de lechada y en la aplicación de la presión, aún en un mismo tramo perforado de inyección.

Con la aplicación de este método se limita automáticamente el riesgo de hidrofracturamiento y se logra también de manera automática, lo siguiente:

- Que las inyecciones primarias sellen las fisuras más abiertas hasta grandes distancias con presiones bajas.
- Y que las inyecciones secundarias sellen solamente las fisuras más importantes que quedan después de la inyección primaria. Las tomas por consecuencia y generalmente son menores y las presiones, naturalmente más altas.
- Por último, que las inyecciones terciarias sellen las fisuras que persisten después de las anteriores inyecciones.

Entonces, la presión final de inyección queda automáticamente regulada por el criterio intensidad de inyección ($I.I. = p \cdot v$), y el procedimiento sigue de esta manera hasta que se haya alcanzado la presión máxima de inyección en cada tramo de la

serie anterior. Es decir, que se perforen los barrenos de la serie siguiente solamente en las zonas y tramos donde la toma de mezcla haya sobrepasado el valor límite práctico indicado en la curva GIN

Para el empleo del método GIN o de Intensidad de Inyección es necesario asumir los conceptos básicos siguientes, resumidos bajo los siguientes cuatro títulos.

1. - Conceptos básicos.

Empleo de únicamente mezclas estables de relleno, moderadamente espesas

- para reducir sedimentación y prematuros bloqueos y ..
- para obtener una lechada endurecida, densa y resistente

Usar, tanto como sea posible, una mezcla sencilla para la totalidad de los trabajos de inyección

- para proporcionar un solo fluido Binghamiano con propiedades conocidas y ..
- para simplificar el procedimiento de inyección por este medio mejorando la eficiencia y reduciendo errores

Uso de la curva GIN en el monitoreo de la presión

- para permitir que altas presiones se apliquen donde sea necesario y ..
- para eludir altas presiones donde esto pudiera causar daño o ser un desperdicio, y por tanto, antieconómico

Control del proceso de inyección por computadora en la obra

- para seguir en tiempo real la presión y la velocidad del flujo y dibujar el recorrido de inyección pV sobre la curva GIN seleccionada y
- para indicar la completa finalización o terminación de la inyección usando el recorrido de la inyección pV y la curva penetrabilidad-volumen.

2.- Diseño de la mezcla.

Uso de aditivos para obtener las deseables características de la lechada:

- para hacer más fluida la mezcla y reducir su cohesión y viscosidad, de manera que se incremente la penetrabilidad de la lechada y
- posiblemente adicionar también un agente retenedor de agua para reducir la pérdida de ésta durante la compresión, donde la lechada se exprime.

Efectuar pruebas de laboratorio amplias y anticipadas para varias mezclas de lechada con una relación agua-cemento (por peso) variando de 0 7: 1 a 1: 1 Esto es para

- probar diferentes cementos disponibles de varias finuras y probar diferentes aditivos en diferentes porcentajes, y
- obtener valores de prueba de peso unitario de la lechada, viscosidad aparente en el cono de Marsh, sedimentación a las dos horas, cohesión, tiempo inicial y final de fraguado, prueba de compresión a los 7 y 28 días, y pérdidas de agua en pruebas de compresión (exprimido)

3.- Distribución de los barrenos de inyección.

Adoptar el método normal de división-espacios desde los barrenos primarios hasta terciarios o cuaternarios

- para proveer una cobertura mínima y uniforme en todo y...
- para permitir cerrar los espacios de los barrenos donde las condiciones geológicas y los resultados de la inyección así lo indiquen

Llevar a cabo pruebas de inyección de campo, ya sea durante la fase final de diseño de la presa o durante la primera etapa de construcción:

- para probar diferentes zonas del sitio que tengan diferentes condiciones geológicas y topográficas, por ejemplo en el fondo del valle y en cada uno de los paramentos o empotramientos de la presa y
- seleccionar óptimos espaciamientos de barrenos primarios, de manera tal que posteriores perforaciones, secundarias o terciarias, muestren o exciban un decrecimiento continuo de 25 a 75 % por serie (considerar un espaciamiento preliminar para barrenos primarios de 10-12 m) y .
- para permitir que diferentes curvas GIN sean probadas, por ejemplo, graficando el recorrido de inyección p-v para cada etapa ascendente de inyección, hasta la intensidad de inyección prevista o para el primero o segundo evento de hidrofracturamiento

4.- Control de campo.

Definir lo elementos de control de la curva GIN a partir de los resultados del programa de pruebas de inyección, así como cualquier especificación especial ingenieril, de mecánica de rocas o geológica :

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

- para garantizar que los límites de volumen y presión sean razonables para las características geológicas existentes y ...
- para evaluar la necesidad de valores diferentes de GIN en diferentes zonas de la obra

Rellenar primero cada cuarto barreno primario, como barreno exploratorio de inyección, excepto en áreas donde se hayan ejecutado previamente pruebas de inyección

- para permitir una mejor definición por áreas de las condiciones geológicas y geohidrológicas, por medio de perforación rotatoria con recuperación de núcleos
- con pruebas de presión de agua Lugeon hasta una profundidad igual a la futura altura del embalse permitir la selección final de la profundidad de la perforación para los restantes barrenos primarios (probablemente un rango de profundidad de 0.5 a 0.8 la altura del embalse y asegurar que la curva seleccionada GIN es la apropiada.

Control de los procesos de inyección por una computadora de campo usando la curva GIN y la curva de penetrabilidad:

- para permitir el monitoreo en tiempo real del recorrido de la inyección y.
- permitir que la terminación de la inyección sea anticipada, a partir de la declinación de la curva de penetrabilidad, y del acercamiento de la trayectoria de p contra v hacia a la curva GIN controladora (incluyendo el volumen límite y las porciones de presión límite de la curva)

La práctica de preinyectar agua, antes de la inyección de lechada, por arriba del nivel de agua subterránea, para saturar parcialmente la roca, permite reducir el riesgo de pérdida de agua de la mezcla lo que también reduce bloqueos prematuros. Esta inyección debe hacerse a presiones bajas para evitar la aparición de hidrofracturamientos e inmediatamente antes de la inyección

Es conveniente que las pruebas de presión de agua Lugeon, se empleen solamente en los barrenos primarios de exploración y en las perforaciones de verificación, para poder comparar la permeabilidad inicial y final de la masa rocosa.

El resumir los resultados de inyección por medio de métodos estadísticos gráficos, asegura un cierre progresivo de las fisuras de la roca y por consecuencia una permeabilidad residual resultante, aceptablemente baja, motivo principal de los trabajos de inyección.

Bibliografía

- 1. Inyección de Suelos.** Henry Cambefort, Ediciones Omega, S.A., Barcelona 1968
- 2. CORTINA (Notas Técnicas)**
LOMBARDI, S A ING CONSULTORES, Locarno Suiza, Febrero de 1992.

Inyección y Drenos	704.8-R-3
Estabilidad de Laderas	704.8-R-9
Sistema de Enfriamiento	704.8-R-7
Sistema de Auscultación	704.8-R-8
Diseño Definitivo de la Bóveda	704.8-R-4
Definición Geométrica de Arcos a cada 3 m.	704.8-R-6

Reporte de Mezclas de Concreto
- 3. Carsticidad en la Boquilla del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán.**
Vicente Paéz J., Carlos González Cruz. Gerencia de Ingeniería Civil
Reporte G-31, C.F.E., Septiembre de 1993, Inédito
- 4. Sistema de Auscultación del P.H. Zimapán.**
Gerencia de Ingeniería Experimental y Control, C.F.E., 1993 Inédito.
- 5. Inyección de Rocas poco Fisuradas.**
G. Lombardi, Don U. Deere, Water Power & Dam Construction, Junio 1993
- 6. Propuesta para Inyectar Rocas poco Fisuradas.**
Giovanni Lombardi, ASCE Denver, Abril de 1985
- 7. Montaje de los Equipos y Sistemas Principales para Generación de Energía Eléctrica en 230 y 115 kv. de la Central Hidroeléctrica Zimapán.**
Edmundo Munguía García, C.F.E., 1995, Inédito
- 8. Memoria Descriptiva de Obra Civil del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán.**
Edmundo Munguía García, C.F.E., 1994 Inédito.
- 9. Diseño e Inyección de Mezclas.**
Leopoldo Espinosa Graham., C.F.E., Inédito.
- 10. Las Inyecciones y los Drenajes de Cimentación de Presas en Roca poco Permeables.**
F. Sabarly, Publicado por el Instituto de Ingeniería Civil. Great Gorge Street., London, S W 1, Junio do 1958.

11. Informe de Consultoría.

Francis Sabarly, C F E , Junio de 1978 Inédito.

12. Geología del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán.

Residencia del P H. Zimapán Hgo , Septiembre de 1989 Inédito

13. Informe del Grupo de Consultores del P. H. Zimapán.

Don U. Deere, Giovanni Lombardi, Jorge Acelas y Oscar Aguelles, C.F.E.,
Inéditos

14. Reportes de Inyección de Pantalla.

DIRAC, S.A de C.V., C.F.E., Octubre de 1994 Inédito.