



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería

CONTROL DE LA INYECCIÓN EN PANTALLAS DE
IMPERMEABILIZACIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS Y
DESARROLLO DEL MÉTODO GIN
(NÚMERO DE INTENSIDAD DE INYECCIÓN)

T E S I S

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

P R E S E N T A:

JOSÉ ALEJANDRO VALENCIA QUINTANAR

TUTOR:

M.I. Jorge Efraín Castilla Camacho

2009





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

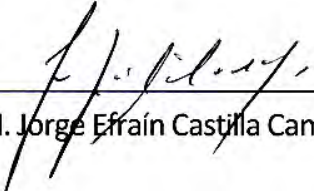
JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Agustín Deméneghi Colina
Secretario: Dr. Salvador Marín Córdova
Vocal: M.I. Jorge Efraín Castilla Camacho
1^{er} Suplente: M.I. Jaime Antonio Martínez Mier
2^{do} Suplente: Dr. Venancio Trueba López

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERÍA - UNAM

TUTOR DE TESIS



M.I. Jorge Efraín Castilla Camacho



Resumen.

La inyección es la introducción a presión de un material fluido en fracturas y cavidades de la roca, terreno o estructuras artificiales, que tiene como objetivo principal la mejora de una cimentación por medio de una superficie de apoyo estable, resistente e impermeable en el subsuelo que garantice la estabilidad y la funcionalidad de cualquier estructura.

Dependiendo de la composición y mezcla del material inyectado, éste reaccionará física y químicamente y, de este modo, estabilizará, reforzará o sellará al terreno o a la estructura en que se introduce.

Es interesante observar que existen dos escuelas diferentes dentro del campo de la inyección: la **escuela de alta presión** – desarrollada principalmente por los franceses para utilizarse en los Alpes, y la **escuela de baja presión** – desarrollada por los americanos para las formaciones sedimentarias de los Estados Unidos, y por los británicos para los yacimientos de carbón.

La idea básica de la inyección de cemento a alta presión es que esa elevada presión de inyección incrementa el volumen de la mezcla o lechada (mezcla de cemento con agua) que pueda introducirse al medio, rompiendo las partes débiles, reforzando a la masa de roca y sellando las discontinuidades u oquedades en ella, con lo que se mejoran los resultados buscados al inyectar y la economía del procedimiento, gracias a la reducción de los costos de perforación.

En contraste con esto, la filosofía americana de baja presión es no utilizar una presión excesiva en el proceso de inyección para evitar que se dañe la estructura del terreno, ampliando las grietas existentes o incluso creando otras nuevas, pero sí inyectar lo necesario para rellenar los huecos en la masa de roca.

Con el propósito de inyectar a alta presión o a baja presión, según fuera más conveniente y posible de acuerdo a la naturaleza de la masa de roca por inyectar, se desarrolló el método GIN, el cual es motivo del presente trabajo. El método GIN (Grout Intensity Number), desarrollado por Lombardi G. y Deere D. (1993), se basa en el uso de gráficas de control “presión vs volumen”, “gasto vs tiempo” y “presión vs tiempo”, a partir de las cuales se determina la suspensión de la inyección cuando se alcanza un valor prefijado del producto de la presión por el volumen inyectado (PxV) constante, o cuando se alcanza la presión o el volumen máximo preestablecido en ambos casos, siendo el consumo de mezcla bajo o nulo. Otra particularidad del método es la del uso de una sola mezcla durante el proceso de inyección.

En este trabajo se presentan las bases teóricas y las investigaciones que se requieren para la ejecución de trabajos de inyección en roca fracturada para una pantalla de impermeabilización mediante el método GIN. El contenido incluye desde las bases teóricas del comportamiento de la mezcla en el proceso de inyección, hasta los resultados mostrados en dos ejemplos de presas en México: la Presa Internacional La Amistad y la Presa Luis Donaldo Colosio (Huites).

La estructura del trabajo es de seis capítulos, de los cuales el primero es la introducción. El segundo presenta algunos aspectos sobre inyección en el macizo rocoso. El tercer capítulo aborda la inyección en la construcción de una pantalla de impermeabilización. En el capítulo cuatro se introducen los principios del control de la inyección usando el método GIN. El quinto capítulo



resume el análisis y las conclusiones del método de evaluación usando el método GIN aplicado a presas en México. El sexto capítulo contiene las conclusiones del trabajo.

El concepto del GIN es uno de los métodos alternativos que se han propuesto para la inyección en rocas; no obstante, el manejo de una mezcla única durante todo el proceso de inyección y la curva límite que se toma como frontera al inyectar, entre otros aspectos, son elementos que pueden ser modificados conforme se realiza la inyección en el macizo rocoso, ya que deben ajustarse a la respuesta que ofrece la masa de roca ante el propio método.

Palabras clave: *inyección, roca fracturada, pantalla de impermeabilización, mezcla, grietas, GIN, macizo rocoso.*



A Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mis estudios, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias.



Agradecimientos.

Esta tesis pudo ser realizada gracias al apoyo de la UNAM que me abrigó en su programa de maestría y doctorado en Ingeniería durante los dos años de duración de la maestría. Asimismo, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que me otorgó una beca para realizar mis estudios.

Mi más amplio agradecimiento para el M.I. Jorge Efraín Castilla Camacho, tutor de tesis, cuya calidad humana e invaluable y generoso apoyo e interés hicieron posibles la realización de este trabajo, así como haberme hecho sentir en todo momento en casa.

Deseo expresar mi reconocimiento al M.I. Agustín Deméneghi Colina, Dr. Salvador Marín Córdova, M.I. Jaime Antonio Martínez Mier y al Dr. Venancio Trueba López, integrantes de mi comité tutorial, por las valiosas aportaciones que hicieron para mejorar el presente trabajo.

Desde luego, llego al final de este trabajo gracias al apoyo que me otorgaron y al cariño que me inspiran mis padres Alejandra y Juan José, mi hermana Brenda, mi tía María de la Luz, mi tío Aarón, mi tío Francisco, Erik y Karina y sus hijos, Sergio y Santiago, Rogelio y Griselda y su hijo.

También tengo siempre presentes a mis maestros, a mis amigos, en especial a Pedro Hernández, Jorge López y Juan Carlos Sánchez por los valiosos consejos y días de trabajo que se vivieron juntos y a quienes siempre me han enseñado algo, quienes por cierto son muchos y no podría enumerar suficientemente.

A todos mi mayor reconocimiento y gratitud.



Contenido general

| <i>Contenido</i> | <i>Página</i> |
|---|---------------|
| Resumen..... | iii |
| Dedicatorias..... | v |
| Agradecimientos..... | vi |
| Contenido general..... | vii |
| Contenido..... | viii |
| Índice de figuras..... | xi |
| Índice de tablas..... | xvii |
| Capítulo 1. Introducción..... | 1 |
| Capítulo 2. Algunos aspectos sobre inyección en el macizo rocoso..... | 11 |
| Capítulo 3. Inyección en la construcción de una pantalla de impermeabilización..... | 63 |
| Capítulo 4. Control de la inyección usando el método GIN..... | 107 |
| Capítulo 5. Análisis y conclusiones del método de evaluación usando el método GIN aplicado a presas en México..... | 133 |
| Capítulo 6. Conclusiones..... | 193 |
| Referencias..... | 197 |



Contenido

| <i>Contenido</i> | <i>Página</i> |
|---|---------------|
| 1. Introducción. | |
| 1.1 Antecedentes..... | 1 |
| 1.2 Objetivo y disposición del trabajo..... | 2 |
| 1.3 Alcances..... | 3 |
| 2. Algunos aspectos sobre inyección en el macizo rocoso. | |
| 2.1 Introducción..... | 11 |
| 2.2 Aspectos generales..... | 11 |
| 2.3 Requisitos..... | 16 |
| 2.4 Algunos procedimientos de inyección empleados hoy en día..... | 19 |
| 2.5 Modelo de la masa de roca FES (macizo rocoso fisurado, elástico, saturado)..... | 34 |
| 2.6 Materiales inyectables..... | 42 |
| 2.7 Mezclas agua – cemento..... | 42 |
| 2.7.1 Definición de la relación agua – cemento..... | 42 |
| 2.7.2 El papel del agua..... | 43 |
| 2.7.3 Mezclas ligeras a pesadas..... | 44 |
| 2.7.4 Mezclas estables e inestables..... | 47 |
| 2.7.5 Propiedades de la mezcla..... | 48 |
| 2.8 Los objetivos de la inyección..... | 52 |
| 2.8.1 Principales aspectos..... | 52 |
| 2.8.2 Limitaciones de la inyección..... | 52 |
| 2.8.3 Deformación de la masa de roca..... | 52 |
| 2.8.4 Durabilidad del tratamiento..... | 54 |
| 2.9 Pruebas de presión de agua..... | 55 |
| 2.10 Distensión e hidrofracturamiento (Hidro-jacking and hidro-fracturing)..... | 56 |
| 2.11 Penetración de la lechada..... | 58 |
| 2.12 Intensidad de inyección, GIN (Grout Intensity Number)..... | 61 |
| 3. Inyección en la construcción de una pantalla de impermeabilización. | |
| 3.1 Introducción..... | 63 |
| 3.2 Características mecánicas del macizo rocoso..... | 63 |
| 3.3 Medición de la eficacia de la inyección..... | 67 |
| 3.4 Teoría de la inyección..... | 71 |
| 3.4.1 Reología de la lechada..... | 71 |
| 3.4.2 Formas de cambiar las propiedades de la lechada..... | 74 |
| 3.4.3 Algunas propuestas..... | 75 |
| 3.5 Inyección en pantallas de impermeabilización..... | 79 |
| 3.5.1 Número de líneas..... | 79 |
| 3.5.2 Profundidad..... | 79 |



| | |
|--|-----|
| 3.5.3 Inclinación del plano de pantalla..... | 80 |
| 3.5.4 Inclinación y dirección de las perforaciones..... | 80 |
| 3.5.5 Separación de barrenos..... | 84 |
| 3.5.6 Etapas de inyección..... | 85 |
| 3.6 Control de la inyección en pantallas de impermeabilización empleando el método GIN – Una breve descripción..... | 86 |
| 3.6.1 Objetivo y alcance del método..... | 86 |
| 3.6.2 Base teórica para reducir al mínimo el riesgo de aplicar una carga hidráulica elevada..... | 87 |
| 3.6.3 Base teórica para la estimación del recorrido de la lechada..... | 88 |
| 3.7 Análisis y desarrollo de teorías de inyección..... | 90 |
| 3.7.1 Análisis del riesgo del desarrollo de carga hidráulica al usar el principio GIN..... | 90 |
| 3.7.2 Distancia estimada a la que una lechada se extiende empleando el concepto del factor de inyectabilidad, K..... | 96 |
| 3.7.3 Procedimiento propuesto para controlar la inyección..... | 98 |
| 3.8 Fórmula y modelo para predecir el proceso en una inyección..... | 99 |
| 3.8.1 Condiciones para análisis de datos..... | 100 |
| 3.9 Predicción de la cantidad y del tiempo de duración en una inyección..... | 101 |
| 4. Control de la inyección usando el método GIN. | |
| 4.1 Introducción..... | 107 |
| 4.2 Introducción al método GIN..... | 107 |
| 4.2.1 Principios del método GIN..... | 108 |
| 4.3 Conceptos teóricos del flujo de lechada y su penetración..... | 108 |
| 4.4 Selección de la mezcla de inyectado..... | 109 |
| 4.5 Desarrollo del método GIN..... | 111 |
| 4.5.1 Inyectado en fisuras amplias y abiertas..... | 111 |
| 4.5.2 Inyectado de fisuras finas..... | 111 |
| 4.5.3 Reducción del espaciamiento de las perforaciones del inyectado por etapas..... | 112 |
| 4.6 El método GIN..... | 113 |
| 4.6.1 Energía específica empleada..... | 113 |
| 4.6.2 Ventajas de mantener un valor GIN constante..... | 113 |
| 4.6.3 Envolventes limitantes compuestas para diferentes intensidades de inyectado..... | 113 |
| 4.6.4 Selección del valor GIN..... | 116 |
| 4.7 Inyectado controlado por computadora..... | 125 |
| 4.7.1 Las curvas GIN y de penetrabilidad – volumen como controles prácticos del inyectado..... | 125 |
| 4.8 Aplicación a pantallas de inyectado..... | 127 |
| 4.8.1 Relación de espaciamiento de los barrenos y del GIN..... | 128 |
| 4.8.2 Criterios para el sellado..... | 128 |
| 4.9 Principales puntos del método GIN..... | 129 |
| 4.9.1 Conceptos básicos..... | 129 |
| 4.9.2 Diseño de la mezcla..... | 129 |



| | |
|--|-----|
| 4.9.3 Arreglo de las perforaciones de inyectado..... | 130 |
| 4.9.4 Control de campo..... | 130 |
| 5. Análisis y conclusiones del método de evaluación usando el método GIN aplicado a presas en México. | |
| 5.1 Introducción..... | 133 |
| 5.2 Presa Internacional “La Amistad”, frontera entre México y los E.U.A..... | 133 |
| 5.2.1 Datos generales..... | 133 |
| 5.2.2 Inyectado bajo el tramo mexicano de cortina..... | 138 |
| 5.2.3 Datos generales de la primera pantalla de impermeabilización..... | 140 |
| 5.2.4 Primer llenado y operación..... | 141 |
| 5.2.5 Desarrollo de nuevos sumideros..... | 146 |
| 5.2.6 Ejecución del re inyectado..... | 149 |
| 5.2.7 Piezometría..... | 156 |
| 5.2.8 Conclusiones..... | 159 |
| 5.3 Presa “Huites”, Estado de Sinaloa, México..... | 161 |
| 5.3.1 Datos generales..... | 161 |
| 5.3.2 Perforaciones de exploración..... | 166 |
| 5.3.3 Tratamientos de impermeabilización..... | 173 |
| 5.3.4 Inyectado de consolidación..... | 173 |
| 5.3.5 Equipo de perforación..... | 176 |
| 5.3.6 Equipo de inyectado..... | 176 |
| 5.3.7 Pantalla de inyecciones..... | 176 |
| 5.3.8 Perforaciones de comprobación..... | 177 |
| 5.3.9 Evaluación estadística de la pantalla..... | 177 |
| 5.3.10 Piezometría..... | 187 |
| 5.3.11 Filtraciones..... | 190 |
| 5.3.12 Conclusiones..... | 191 |

6. Conclusiones.

7. Referencias.



Índice de figuras.

Capítulo 2. Algunos aspectos sobre inyección en el macizo rocoso.

| | |
|---|----|
| Figura 1. Pantalla de impermeabilización de Hoover Dam, USA (Cambefort, 1968)..... | 12 |
| Figura 2. Secuencia de perforación e inyección de barrenos de pantalla (Herrera, 2001)..... | 13 |
| Figura 3. Etapas de inyección de un tapete de consolidación (Herrera, 2001)..... | 14 |
| Figura 4. Inyección de relleno de oquedades grandes (Herrera, 2001)..... | 15 |
| Figura 5. Zona de inyección extendida (I _g) y conductividad hidráulica, (K _g) (Dalmam,2004)..... | 17 |
| Figura 6. Una generalización del método de inyección aplicado en los túneles de acceso en el “Eslabón del Sur” (Dalmam, 2004)..... | 21 |
| Figura 7. Generalización del método de inyección aplicado en los túneles de acceso en el “Eslabón del Sur” (Dalmam, 2004)..... | 23 |
| Figura 8. Una generalización del método de inyección aplicado en “Arlandabanan” (Dalmam, 2004)..... | 25 |
| Figura 9. Una generalización del método de inyección aplicado en el túnel de “Bergshamra” (Dalmam, 2004)..... | 26 |
| Figura 10. Una generalización del método de inyección aplicado en Nordlänken (Dalmam, 2004)..... | 28 |
| Figura 11. Una generalización del método original de inyección aplicado en el túnel de Lunner (Dalmam, 2004)..... | 31 |
| Figura 12. Una generalización del método actualizado de inyección aplicado en el túnel de Lunner (Dalmam, 2004)..... | 32 |
| Figura 13. Conceptos fundamentales del modelo FES (Lombardi, 1994)..... | 34 |
| Figura 14. Modelo FES para una masa rocosa (Lombardi, 1994)..... | 36 |
| Figura 15. Guía para la lectura de la figura 14 (Lombardi, 1994)..... | 37 |
| Figura 16. Inyección de una fisura plana de espesor (e) constante (Lombardi, 1987)..... | 40 |
| Figura 17. Definición de la relación agua - cemento (Lombardi, 2003)..... | 43 |
| Figura 18. Distribución de la velocidad de la lechada en una junta (Lombardi, 2003)..... | 45 |



| | |
|--|----|
| Figura 19. Penetración de una mezcla ligera bajo presión en una junta (Lombardi, 2003)..... | 46 |
| Figura 20. Pruebas de inyección experimental en una grieta de espesor constante (Lombardi, 2003)..... | 47 |
| Figura 21. Reología de una mezcla de cemento contra agua (Lombardi, 2003)..... | 49 |
| Figura 22. Resistencia a los 28 días contra tiempo de flujo en cono Marsh (Lombardi, 2003)..... | 50 |
| Figura 23. Levantamiento inevitable del terreno a causa de la inyección (Lombardi, 2003)..... | 53 |
| Figura 24. Diferencia de penetración de lechada en fisuras gruesas y finas de un mismo macizo rocoso (Lombardi, 2003)..... | 53 |
| Figura 25. Distensión o rompimiento, como un caso “de inestabilidad elástica” (Lombardi, 2003)..... | 56 |
| Figura 26. Distribución de presión y fuerzas en dos sistemas de grietas durante la inyección (Lombardi, 2003)..... | 58 |
| Figura 27. Zonas alrededor de áreas de contacto no inyectadas o pobremente inyectadas debido a que la abertura local es demasiado pequeña en relación al tamaño del grano del cemento usado (Lombardi, 2003)..... | 59 |
| Figura 28. Proceso de inyección (Lombardi, 2003)..... | 61 |
| Capítulo 3. Inyección en la construcción de una pantalla de impermeabilización. | |
| Figura 29. Prueba de permeabilidad Lugeon (Ruiz Vázquez y González Huesca, 2007)..... | 68 |
| Figura 30. Gráficas presión – gasto de absorción de pruebas tipo Lugeon (Herrera, 2001)..... | 69 |
| Figura 31. Algunas fórmulas para la inyección de una junta particular (Lombardi, 1985)..... | 72 |
| Figura 32. Gráfica para determinar la presión de inyección en función de la distancia recorrida por la mezcla en las fracturas y del espesor del fracturamiento (Lombardi, 1985)..... | 73 |
| Figura 33. Tiempo de flujo contra viscosidad y cohesión (Lombardi, 1985)..... | 74 |
| Figura 34. Recorrido de la mezcla de la inyección contra tiempo (Lombardi, 1985)..... | 76 |
| Figura 35. Ejemplo de la regla de inyección. Presión permitida contra consumo de lechada o máximo consumo contra presión (Lombardi, 1985)..... | 77 |
| Figura 36. Detalle en planta de la intersección de las discontinuidades con el plano de pantalla de inyección (Bernal, 1978)..... | 81 |



| | |
|--|-----|
| Figura 37. Detalle en planta de la intersección de fallas localizadas en una galería inferior, con la pantalla de inyección que parte de la galería superior (Bernal, 1978)..... | 82 |
| Figura 38. Detalle en planta del trazo de barrenos de pantalla, utilizando datos de las dos galerías (Bernal, 1978)..... | 82 |
| Figura 39. Detalle en planta de intersección de fallas y fracturas con el plano de la pantalla de drenaje, que parte de una galería inferior (Bernal, 1978)..... | 83 |
| Figura 40. Detalle en planta de la intersección de discontinuidades localizadas en una galería, con el plano de la pantalla de drenaje ascendente, que parte de dicha galería (Bernal, 1978)..... | 84 |
| Figura 41. Criterios de rechazo al aplicar el método GIN (P =constante, V =constante, $P \times V$ =constante) (después Lombardi y Deere, 1993) (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001)..... | 87 |
| Figura 42. Geometría idealizada de una masa de roca sujeta a levantamiento por presión en una de sus caras (l = distancia por recorrer la lechada a partir del barreno de inyección, h = profundidad final de la fisura (con respecto al terreno natural), β = ángulo de la pared de la masa cónica con posibilidad de ser levantada (ángulo de cono) (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001)..... | 90 |
| Figura 43. Simplificación de la geometría de una fractura por medio del ángulo de derrame, α (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001)..... | 93 |
| Figura 44. Relación entre presión y volumen presentando el riesgo para un levantamiento de la masa de roca (ángulo de cono $\beta=45^\circ$) (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001)..... | 95 |
| Figura 45. Relación entre presión y distancia de recorrido normalizada de la lechada identificando el riesgo para un levantamiento hidráulico (ángulo de cono $\beta=45^\circ$) (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001)..... | 96 |
| Figura 46. Cambio de dosificación de la lechada (Satoh H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003)..... | 101 |
| Figura 47. Datos observados y calculados del tiempo de inyección (Satoh H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003)..... | 102 |
| Figura 48. Cantidad de inyección observada y calculada (Satoh H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003)..... | 103 |
| Figura 49. Comparación de datos observados y calculados (Satoh H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003)..... | 105 |
| Figura 50. Comparación de datos observados y calculados con un incremento en el flujo de la lechada (Satoh H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003)..... | 105 |



Capítulo 4. Control de la inyección usando el método GIN.

| | |
|---|-----|
| Figura 51. Ejemplo de trayectorias de inyectado (Lombardi y Deere, 1993)..... | 115 |
| Figura 52. Envoltentes limitantes propuestas para inyectado (Lombardi y Deere, 1993)..... | 115 |
| Figura 53. Zona de pruebas de inyección en margen derecha (Herrera, 1990)..... | 117 |
| Figura 54. Características de espaciamiento entre barrenos de primera a cuarta etapa (Herrera, 1990)..... | 118 |
| Figura 55. Gráfica de control P-V Etapa I (Herrera, 1990)..... | 120 |
| Figura 56. Gráfica de control P-V Etapa II (Herrera, 1990)..... | 121 |
| Figura 57. Gráfica de control P-V Etapa III (Herrera, 1990)..... | 122 |
| Figura 58. Gráfica de control P-V Etapa IV (Herrera, 1990)..... | 123 |
| Figura 59. Proceso de inyectado de una progresión (evolución) (Lombardi y Deere, 1993)..... | 125 |
| Figura 60. Proceso de inyectado de una progresión (control) (Lombardi y Deere, 1993)..... | 126 |
| Figura 61. Ejemplo de resultados del inyectado para una pantalla. Puntos finales de las trayectorias de todas las progresiones de inyectado (típico) (Lombardi y Deere, 1993)..... | 127 |

Capítulo 5. Análisis y conclusiones del método de evaluación usando el método GIN aplicado a presas en México.

| | |
|--|-----|
| Figura 62. Presa “La Amistad”. Plano general de localización (Hungsberg, 2001)..... | 134 |
| Figura 63. Presa “La Amistad”. Vista general de la cortina (Hungsberg, 2001)..... | 135 |
| Figura 64. Presa “La Amistad”. Perfil típico de la cortina de materiales graduados (Hungsberg, 2001)..... | 135 |
| Figura 65. Presa “La Amistad”. Perfil geológico longitudinal esquemático (Hungsberg, 2001)..... | 137 |
| Figura 66. Presa “La Amistad”. Geología superficial (Hungsberg, 2001)..... | 138 |
| Figura 67. Presa “La Amistad”, representación gráfica del consumo de cemento (Hungsberg, 2001)..... | 140 |
| Figura 68. Presa “La Amistad”, plano general de localización de manantiales (Hungsberg, 2001)..... | 142 |



| | |
|---|-----|
| Figura 69. Presa “La Amistad”, variación del manantial Carmina con el tiempo (Hungsberg, 2001)..... | 143 |
| Figura 70. Presa “La Amistad”, sistema de agua subterránea antes del embalse (Hungsberg, 2001)..... | 144 |
| Figura 71. Presa “La Amistad”, sistema de agua subterránea después del cierre de la presa (Hungsberg, 2001)..... | 145 |
| Figura 72. Presa “La Amistad”, correlación de las salidas del arroyo Carmina en el embalse (Hungsberg, 2001)..... | 146 |
| Figura 73. Presa “La Amistad”, sumidero 1, formado en 1994 (Hungsberg, 2001)..... | 147 |
| Figura 74. Presa “La Amistad”, tramo de la pantalla original con el consumo máximo de cemento (Hungsberg, 2001)..... | 148 |
| Figura 75. Presa “La Amistad”, perfil típico de re inyectado (Hungsberg, 2001)..... | 149 |
| Figura 76. Presa “La Amistad”, planta de la distribución de etapas en un perfil esquemático (Hungsberg, 2001)..... | 150 |
| Figura 77. Presa “La Amistad”, ejemplo del registro con computadora durante el inyectado (Hungsberg, 2001)..... | 152 |
| Figura 78. Presa “La Amistad”, gráficas frecuencia – consumo de cemento para diversas progresiones y etapas en barrenos de un tramo de pantalla (Hungsberg, 2001)..... | 153 |
| Figura 79. Presa “La Amistad”, histogramas del consumo de cemento de cada progresión y por etapas (Hungsberg, 2001)..... | 156 |
| Figura 80. Presa “La Amistad”, plano general de localización de perfiles de estaciones piezométricas (Hungsberg, 2001)..... | 157 |
| Figura 81. Presa “La Amistad”, perfil piezométrico en la sección de la estación 7+150 (Hungsberg, 2001)..... | 158 |
| Figura 82. Presa “La Amistad”, corte geológico esquemático que ilustra el delantal impermeable (Hungsberg, 2001)..... | 159 |
| Figura 83. Presa “Huites”, plano general de localización (Hungsberg, 2001)..... | 161 |
| Figura 84. Presa “Huites”, plano general de la presa (Hungsberg, 2001)..... | 162 |
| Figura 85. Presa “Huites”, cortes transversales y vista general de la cortina desde aguas arriba (Hungsberg, 2001)..... | 163 |



| | |
|--|-----|
| Figura 86. Presa “Huites”, vista del sitio desde aguas abajo antes del inicio de la obra (Hungsberg, 2001)..... | 165 |
| Figura 87. Presa “Huites”, perfil de exploraciones y de pruebas de absorción de agua (Hungsberg, 2001)..... | 166 |
| Figura 88. Presa “Huites”, pruebas de absorción de agua en la perforación SPI-06B (Hungsberg, 2001)..... | 167 |
| Figura 89. Presa “Huites”, pruebas de absorción de agua en la perforación I-2A-12 (Hungsberg, 2001)..... | 170 |
| Figura 90. Presa “Huites”, curvas típicas de inyectado con un $GIN = 1,500 \text{ kg/cm}^2 \times l/m$ (Hungsberg, 2001)..... | 174 |
| Figura 91. Presa “Huites”, ejemplo de la salida gráfica de un proceso de inyectado según el método GIN con el programa de computadora del Consultivo Técnico (Hungsberg, 2001)..... | 175 |
| Figura 92. Presa “Huites”, perforaciones de comprobación (Hungsberg, 2001)..... | 177 |
| Figura 93. Presa “Huites”, ladera izquierda (Hungsberg, 2001)..... | 178 |
| Figura 94. Presa “Huites”, fondo del cauce (Hungsberg, 2001)..... | 179 |
| Figura 95. Presa “Huites”, ladera derecha (Hungsberg, 2001)..... | 180 |
| Figura 96. Presa “Huites”, diagramas columnares de los consumos medios de cemento para cada etapa (Hungsberg, 2001)..... | 181 |
| Figura 97. Presa “Huites”, distribución de la frecuencia del consumo de cemento en la ladera izquierda (Hungsberg, 2001)..... | 183 |
| Figura 98. Presa “Huites”, distribución de la subpresión debajo de la cortina de gravedad (Hungsberg, 2001)..... | 188 |
| Figura 99. Presa “Huites”, distribución de la subpresión debajo de la cortina en arco (Hungsberg, 2001)..... | 189 |
| Figura 100. Presa “Huites”, correlación del piezómetro 9-A con el nivel del embalse debajo de la cortina en arco (Hungsberg, 2001)..... | 190 |
| Figura 101. Presa “Huites”, volúmenes de filtraciones en la galería 143 medidas debajo de la cortina gravedad (Hungsberg, 2001)..... | 191 |



Índice de tablas.

Capítulo 2. Algunos aspectos sobre inyección en el macizo rocoso.

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Estructura de requisitos para limitar la entrada de agua en excavaciones subterráneas (Dalmam, 2004)..... | 16 |
| Tabla 2. Datos de proyecto resumidos del proceso de inyección (Dalmam, 2004)..... | 20 |
| Tabla 3. Mezclas de lechadas usadas en Nordlänken (Dalmam, 2004)..... | 29 |
| Tabla 4. Tipos de requisitos del gasto de filtración hacia el túnel de Lunner (Dalmam, 2004).. | 29 |
| Tabla 5. Algunos ejemplos de mezclas pesadas usadas en un número importante de presas y túneles (Lombardi, 2003)..... | 44 |

Capítulo 3. Inyección en la construcción de una pantalla de impermeabilización.

| | |
|--|----|
| Tabla 6. Clasificación del macizo rocoso según el estado de alteración (SOLER, 1999)..... | 64 |
| Tabla 7. Clasificación del macizo rocoso según el espesor de los estratos (SOLER, 1999)..... | 65 |
| Tabla 8. Clasificación del macizo rocoso según el intervalo entre discontinuidades (SOLER, 1999)..... | 65 |
| Tabla 9. Clasificación del macizo rocoso según la resistencia a la compresión simple de la roca intacta (SOLER, 1999)..... | 65 |
| Tabla 10. Clasificación del macizo rocoso según el ángulo de fricción en sus discontinuidades (SOLER, 1999)..... | 66 |
| Tabla 11. Valores del factor K_1 , para diferentes relaciones entre la profundidad (h) y la distancia recorrida específica (l) (ángulo del cono $\beta=45^\circ$) (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001)..... | 93 |
| Tabla 12. Valores del ángulo de derrame, α (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001)..... | 94 |

Capítulo 4. Control de la inyección usando el método GIN.

| | |
|--|-----|
| Tabla 13. Valores típicos de la cohesión relativa en lechadas espesas (Lombardi y Deere, 1993)..... | 110 |
|--|-----|

Capítulo 5. Análisis y conclusiones del método de evaluación usando el método GIN aplicado a presas en México.

| | |
|---|-----|
| Tabla 14. Relación de absorción de agua con respecto a la relación a/c (en peso) en la presa “La Amistad” (Hungsberg, 2001)..... | 139 |
|---|-----|



| | |
|--|-----|
| Tabla 15. Valores característicos de la pantalla de impermeabilización (Hungsberg, 2001)..... | 140 |
| Tabla 16. Valores GIN (Hungsberg, 2001)..... | 150 |
| Tabla 17. Tipos de mezclas (Hungsberg, 2001)..... | 151 |



Capítulo

1

Introducción

1.1 Antecedentes.

En años recientes, el interés de la geotecnia, y en particular de la mecánica de rocas, por encontrar soluciones más adecuadas a las obras de ingeniería, ha sido considerable y en aumento constante. Se ha contemplado que cada vez se requieren y se realizan obras de mayor trascendencia, importancia y magnitud, para satisfacer el inmenso complejo de necesidades que debe atender. En México, prueba de ello, es el gran desarrollo de un elevado número de obras, donde cada vez la mecánica de rocas es de mayor relevancia, no solo en la ingeniería civil, sino también en la minería, la industria energética, la geología y la geofísica.

El primer uso acertado de la inyección fue para mejorar las propiedades de una cimentación en Francia a principios del siglo XIX. Desde entonces la inyección ha sido cada vez más usada por todo el mundo. Una gran variedad de métodos y materiales han sido desarrollados para tratar diferentes casos. A pesar de la experiencia ganada con varios métodos y materiales de inyección, no deja de ser una actividad que se basa en una serie de tanteos.

Si bien es cada vez más acertado el desarrollo de los términos académicos, la inyección aún se encuentra en su infancia en comparación con otras ciencias de la ingeniería.

La inyección en rocas es un tema muy amplio, ya que cubre una serie de aspectos teóricos y prácticos, que en algunas ocasiones es necesaria su limitación.

Un cierto número de conceptos son entendidos de manera diferente por varios autores que tratan esta materia, por lo tanto será necesario puntualizarlos, a fin de evitar algunos mal entendidos habituales. Estas diferencias son debidas a que durante los dos siglos pasados **“las diferentes escuelas de inyección”** se desarrollaron, y a la vez se distanciaron entre ellas, causa generada por motivos históricos.

A pesar de los recientes logros científicos, se requiere aún de aquella investigación, estudios y nuevas mejoras a la teoría y a la práctica, necesarias y deseables para encajar mejor las necesidades de la industria de la construcción en los campos de la cimentación, estabilización de macizos rocosos, construcción de estructuras de retención, túneles, pantallas de inyección, principalmente.



Si bien es cierto que, el objeto principal de la inyección en rocas, es el de rellenar espacios vacíos, se debe tener en mente si una roca es inyectable o no, por lo que hoy en día existen diversos criterios en los que se evalúa la inyectabilidad de una roca a partir de valores que reporten las pruebas de absorción de agua. Por otro lado existe un grupo de especialistas que aplica criterios empíricos, que obtuvieron por sus experiencias en proyectos similares. Entonces se encuentra con frecuencia la opinión “Esto lo hemos hecho siempre y ha funcionado. ¿Por qué hemos de cambiar algo?”.

En principio cualquier roca puede inyectarse, en el supuesto de que se le aplique suficiente presión. Sin embargo, la cantidad inyectada no es todavía ninguna prueba de que el inyectado fue necesario, efectivo y exitoso. Por esa causa, en las últimas dos décadas surgió por parte de D. U. Deere y G. Lombardi el artículo que dio a conocer el principio GIN (Grouting Intensity Number o Número de Intensidad de Inyección) para el diseño y control de la inyección de rocas con lechada de cemento, cambiando las ideas de control de sólo presión o sólo volumen por el número GIN que es un producto de los dos.

Ejemplo de ello es la construcción de una pantalla de inyectado, la cual parte de la suposición de que durante el inyectado se forma teóricamente un volumen de afectación cilíndrico alrededor de la perforación. Cuando se colocan las perforaciones en serie sobre una línea con una distancia constante, de tal forma que se traslapen sus cilindros de influencia, se espera lograr un cuerpo tabular de roca inyectada, que representa la pantalla de inyecciones.

Lamentablemente la información sobre inyecciones en roca es limitada, a veces de uso confidencial y por consiguiente de muy poca circulación, causa por la cual se ha manifestado la necesidad de contar con criterios y habilidades para plantear los problemas y hacer uso de las teorías existentes en el diseño de un tratamiento, con el objetivo de que éstos puedan emplearse en el campo laboral.

1.2 Objetivo y disposición del trabajo.

El objetivo de este estudio es presentar el proceso de inyección, describiendo un sistema para la evaluación de un método en específico.

Para el sistema descrito, el proceso de inyección puede ser optimizado basándose en información tal que permita cambiar las condiciones de la masa de roca, haciendo que el sistema forme parte de un concepto de diseño activo para el sellado del macizo.

Los objetivos son:

1. Conocer los conceptos básicos que permitan describir el proceso de inyección en el macizo rocoso.
2. Estudiar el comportamiento de la inyección en roca, a través de la generación del modelo para un macizo rocoso fisurado, elástico, saturado.
3. Identificar los principales componentes que son considerados en la construcción de una pantalla de impermeabilización.



4. Estudiar el diseño y comportamiento de la mezcla empleada durante el proceso de inyección en una pantalla de impermeabilización.
5. Estudiar el control de la inyección en una pantalla de impermeabilización por medio del método que se basa en el Número de Intensidad de Inyección (GIN).
6. Analizar y conocer el proceso de inyección en roca empleado en dos ejemplos de presas en México.

1.3 Alcances.

La información que se presenta se basa en el comportamiento geotécnico del macizo rocoso durante el proceso de inyección en fisuras, haciendo mención al principal método empleado hoy en día, teniendo como propósito contar con un mejor conocimiento sobre la inyección, así como del comportamiento de la lechada.

Esta tesis sirve como referencia para ampliar el estudio de los efectos de la inyección en el macizo rocoso, haciendo énfasis en la eficiencia del método del Número de Intensidad de Inyección (GIN) aplicable a una pantalla de impermeabilización y ratificándolo con dos ejemplos prácticos que se han ejecutado en México en los últimos años.

Se trata el método del Número de Intensidad de Inyección (GIN), el modelo de la masa de roca FES (macizo rocoso fisurado, elástico, saturado) y las bases teóricas para la estimación del comportamiento de una pantalla de impermeabilización.

El contenido de este trabajo es el siguiente:

En el capítulo dos se estudian los aspectos generales sobre inyección en un macizo rocoso, aplicados a algunos procedimientos de inyección empleados hoy en día, tomando en consideración los detalles que forman parte para su desarrollo, tal como los materiales inyectables, propiedades de la lechada, durabilidad del tratamiento, hidrofracturamiento, intensidad de inyección, entre otros.

En el capítulo tres se estudia la inyección enfocada principalmente a una pantalla de impermeabilización, conociendo cada uno de los elementos que son indispensables para su construcción, así como los métodos aplicables para su correcta ejecución.

En el capítulo cuatro se estudia el método del Número de Intensidad de Inyección (GIN), analizando y comentando los principales puntos que son considerados al llevarlo a cabo, tal como la selección de la mezcla de inyectado, energía específica empleada, criterios para el sellado, arreglo de las perforaciones de inyectado, control de campo, por citar algunos.

En el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos del proceso de inyección en roca aplicable a una pantalla de impermeabilización de dos diferentes proyectos ejecutados en México, llegando a las conclusiones que permitan dar un juicio de la eficiencia del tratamiento de roca así como del método GIN.

Por último se mencionan las conclusiones obtenidas del presente trabajo.



NOTACIÓN

Los símbolos son definidos cada vez que se presentan, pero los siguientes son usados comúnmente:

| | |
|----------------------------|--|
| α | Ángulo de cierre o constante basado en el número de grietas. |
| β | Ángulo de la pared de la masa cónica con posibilidad de ser levantada. |
| δ | Densidad. |
| ΔH | Distancia vertical entre galerías. |
| ϵ | Deformación unitaria. |
| η | Viscosidad dinámica. |
| η^1 | Viscosidad aparente. |
| η_B | Viscosidad plástica. |
| μ | Viscosidad de la lechada de cemento / viscosidad del agua. |
| ρ | Densidad de la masa de roca. |
| σ_c | Esfuerzo de contacto. |
| σ_e | Esfuerzo efectivo. |
| σ_T | Esfuerzo total. |
| $\sqrt{\quad}$ | Levantamiento del terreno. |
| τ_o | Punto de fluencia de la lechada. |
| a/c | Relación agua:cemento por peso (siempre dado en peso). |
| $A (\epsilon_o, \sigma_o)$ | Punto total de cierre sin presión de agua. |
| A_1 | Macizo rocoso muy grande (según el ángulo de fricción en las discontinuidades). |
| A_{12} | Macizo rocoso mayor de la media (según el ángulo de fricción en las discontinuidades). |



| | |
|-----------------------|---|
| A₂ | Macizo rocoso grande (según el ángulo de fricción en las discontinuidades). |
| A₃ | Macizo rocoso medio (según el ángulo de fricción en las discontinuidades). |
| A₄ | Macizo rocoso pequeño (según el ángulo de fricción en las discontinuidades). |
| A₄₅ | Macizo rocoso menor que la media (según el ángulo de fricción en las discontinuidades). |
| A₅ | Macizo rocoso muy pequeño (según el ángulo de fricción en las discontinuidades). |
| ASCE | American Society of Civil Engineers. |
| b | Abertura de un plano de fractura. |
| b/a | Relación bentonita:agua en peso. |
| b_c | Abertura constante en un plano de fractura abierta. |
| B | Perforación presurizada. |
| c | Cohesión. |
| Cr | Cohesión relativa. |
| d₉₅ | Diámetro para el cual el 95% de las partículas es menor. |
| D_o | Promedio de la abertura de la grieta en el tiempo t=0. |
| 2e | Espesor del núcleo de la lechada inyectada. |
| E | Energía inyectada. |
| f'c | Resistencia a la compresión del concreto. |
| F, F1, F2 | Fuerzas debidas a la presión de inyección. |
| FES | Modelo de la masa de roca (macizo rocoso fisurado, elástico, saturado). |



| | |
|------------------------|---|
| F_{all} | Fuerza actuante aceptable. |
| g | Fuerza de gravedad. |
| GIN | Grout Intensity Number. |
| h | Profundidad de la fractura. |
| H | Altura del vaso futuro. |
| H₁ | Presión hidráulica determinada por la distancia vertical entre la posición del manómetro y el centro del tramo de prueba. |
| H₂ | Presión que actúa en el exterior del tramo de prueba en caso de existir nivel freático (presión hidráulica debida a la diferencia de elevaciones entre el centro del tramo de prueba y la posición del nivel freático). |
| H_f | Pérdidas hidráulicas al fluir el agua por la tubería entre el manómetro y el centro del tramo de prueba. |
| l | Distancia de recorrido específica. |
| l₁ | Macizo rocoso muy grande (según espesor de los estratos). |
| l₁₂ | Macizo rocoso mayor de la media (según espesor de los estratos). |
| l₂ | Macizo rocoso grande (según espesor de los estratos). |
| l₃ | Macizo rocoso medio (según espesor de los estratos). |
| l₄ | Macizo rocoso pequeño (según espesor de los estratos). |
| l₄₅ | Macizo rocoso menor que la media (según espesor de los estratos). |
| l₅ | Macizo rocoso muy pequeño (según espesor de los estratos). |
| l/c | Relación intraplast:cemento en peso. |



| | |
|------------------------|---|
| lg | Extensión de la zona inyectada. |
| I_n | Distancia de recorrido normalizada de la lechada |
| IMTA | Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. |
| k | Eficiencia del recorrido de la lechada. |
| K | Factor de inyectabilidad. |
| K₁ | Factor que explica la geometría de la masa de roca levantada. |
| K₂ | Factor que considera que la fractura no está completamente sujeta a presión en sus paredes. |
| Kg | Conductividad hidráulica. |
| N | Número de fracturas |
| N.A.F. | Nivel de aguas freáticas. |
| N.A.M.I.N. | Nivel de aguas mínimas. |
| N.A.M.O. | Nivel de aguas máximas ordinarias. |
| NE-SW | Rumbo (en este caso Noreste-Suroeste). |
| NX | Diámetro de barreno de exploración. |
| p | Presión de poro. |
| p_f | Presión final. |
| p_{max} | Presión máxima de inyección. |
| p_n | Presión normalizada. |
| P | Presión de inyección. |
| P_{ef} | Presión efectiva en el tramo de prueba. |
| P_m | Presión que marca el manómetro instalado en la línea de inyección. |
| P_t | Presión efectiva de inyección en el tiempo t. |



| | |
|--|---|
| PxV | Número de intensidad de inyectado. |
| P ($\epsilon, \sigma_r, p, \sigma_e, a$) principales | Deformación general, esfuerzo total, presión neutra, esfuerzo efectivo y radio de cierre en el punto P. |
| q | Flujo o gasto de lechada. |
| q/p | Flujo específico o penetrabilidad. |
| Q_t | Coeficiente de la inyección en el tiempo t. |
| R | Distancia que recorre la lechada al inyectarse o radio de aplicación de la presión. |
| RQD | Rock Quality Designation. |
| S₁ | Macizo rocoso muy alto (según intervalo entre discontinuidades). |
| S₁₂ | Macizo rocoso más alto que la media (según intervalo entre discontinuidades). |
| S₂ | Macizo rocoso alto (según intervalo entre discontinuidades). |
| S₃ | Macizo rocoso medio (según intervalo entre discontinuidades). |
| S₄ | Macizo rocoso bajo (según intervalo entre discontinuidades). |
| S₄₅ | Macizo rocoso más bajo que la media (según intervalo entre discontinuidades). |
| S₅ | Macizo rocoso muy bajo (según intervalo entre discontinuidades). |
| t | Tiempo transcurrido desde el inicio de la inyección. |
| 2t | Abertura de las grietas. |
| T | Tiempo de flujo. |
| UL | Unidad Lugeon. |
| UL₀ | Unidad Lugeon inicial. |
| v | Distribución de la velocidad de la lechada. |



| | |
|-----------|---------------------------------------|
| v_f | Volumen final de lechada. |
| v_n | Volumen normalizado. |
| V_{max} | Volumen máximo de lechada. |
| V | Volumen de lechada. |
| W_1 | Macizo rocoso sano. |
| W_2 | Macizo rocoso ligeramente alterado. |
| W_3 | Macizo rocoso medianamente alterado. |
| W_4 | Macizo rocoso muy alterado. |
| W_5 | Macizo rocoso completamente alterado. |





Capítulo

2

Algunos aspectos sobre inyección en el macizo rocoso

2.1 Introducción.

En este capítulo se presentan las bases teóricas que comprenden el campo de la inyección en el macizo rocoso, así como el modelo que sirve de base para su desarrollo (modelo FES), teniendo como finalidad la aplicación de estos conceptos a la construcción de una pantalla de impermeabilización, cuya base teórica se presentará en el Capítulo 3.

De igual forma se presentan algunos de los procedimientos de inyección que se emplean hoy en día con miras a la construcción de obras subterráneas.

Finalmente se presentan algunos conceptos generales que dan pauta al desarrollo del Número de Intensidad de Inyección GIN (Grout Intensity Number), los cuales se verán con un mayor detenimiento en el Capítulo 4.

2.2 Aspectos generales.

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

Al llevar a cabo el proceso de inyección, el fluido es distribuido al sistema de fisuras y discontinuidades en la masa de roca por varias perforaciones efectuadas a través del medio con una disposición, por ejemplo, de abanico. El fluido más comúnmente usado para la inyección en roca es una mezcla de cemento y agua, que es inyectada, a presión alta, por una bomba. La lechada, para algunas situaciones, puede ser una solución química conveniente.

La inyección ha sido desde hace tiempo considerada como el sistema más rentable para reducir el ingreso de agua en el macizo rocoso.

En las inyecciones en roca generalmente se requiere sólo del relleno de las cavidades y oquedades que están asociadas a planos de fracturas y fallas. Estos representan los principales conductos por los cuales el agua fluye a través del macizo rocoso y, por lo tanto, requieren ser sellados. En contraste, la permeabilidad atribuible a la porosidad de una roca es insignificante por lo que no necesita ser inyectada. Sin embargo, en algunas rocas muy porosas, como las areniscas no cementadas, se puede aplicar este tratamiento con el objeto de reducir el alto costo que implicaría el flujo de agua a través de ella.

Los materiales granulares sueltos tienen mucha más permeabilidad que las rocas de tamaño de grano similar y las inyecciones sirven para llenar los espacios porosos.

El grado de dificultad en cuanto a trabajos de inyección es dependiente, entre otras cosas, de la conductividad hidráulica inicial de la masa de roca y de las demandas o solicitudes de entrada del proyecto. Si la exigencia o solicitud de entrada es semejante a lo que ofrecen las condiciones naturales de la masa de roca, y congruente con las demandas del proyecto, no sería necesario llevar a cabo un tratamiento mediante inyecciones.

Los tratamientos mediante inyecciones pueden ser de tres tipos:

- a) Pantallas de impermeabilización.
- b) Tapetes de consolidación, para mejorar las propiedades de deformabilidad del terreno.
- c) Relleno de grandes oquedades y cavidades.

a) Pantallas de impermeabilización.

Generalmente este tipo de pantallas se utiliza en la construcción de presas, con el fin de formar una zona impermeable a lo largo de la estructura, prolongándose hasta las laderas en las que se apoya la cortina. Sin embargo, también se utilizan cuando se presentan problemas de filtraciones en las excavaciones de una cimentación, en la excavación de lumbreras y en túneles (figura 1).

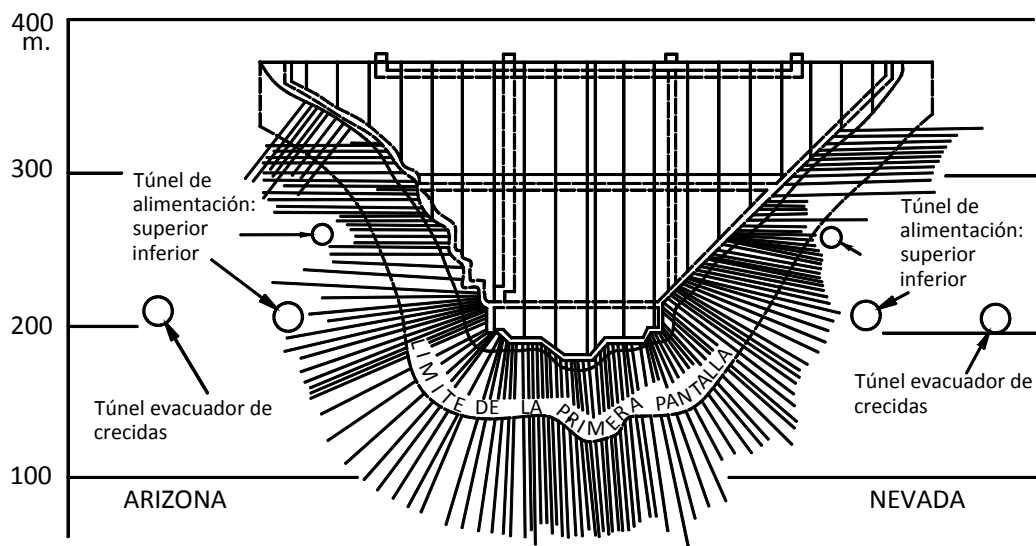


Figura 1. Pantalla de impermeabilización de Hoover Dam, USA (Cambefort, 1968).

Una pantalla puede estar formada por perforaciones inyectadas y estar compuesta de una o varias líneas de barrenos; también puede ser un muro formado con concreto o materiales plásticos y flexibles. En el primer caso, cuando se trata de rocas ya sea con fracturas abiertas, fisuras finas o cársticas, en el que se requiera la ejecución de perforaciones inyectadas localizadas en uno o varios planos verticales o inclinados, generalmente se programa la pantalla por el procedimiento de perforar e inyectar los barrenos por etapas y progresiones, entendiéndose por etapa un grupo de barrenos equidistantes entre sí (primera etapa), a los cuales se les adicionan barrenos intermedios (segunda etapa) y así sucesivamente según se requiera; y por progresión, el tramo de barreno en el que se realiza la inyección propiamente dicha. Las progresiones pueden ser ascendentes o descendentes a lo largo del eje del barreno e incluso realizarse a todo lo largo del mismo.

En la primera etapa o inicial, se perforan e inyectan los barrenos con una equidistancia entre ellos, para lo cual se deben tomar en cuenta las características de la roca, tratando de que cada perforación rellene el máximo de las grietas, juntas y huecos, aplicando la mayor presión de inyectado permisible sin que se presente comunicación de la mezcla con otra perforación adjunta, no inyectada, de la misma etapa. En la práctica es usual que esta primera etapa, cuando se trata de pantallas en presas, sea de 12 m entre barreno y barreno, obteniéndose una zona aceptable de influencia de la mezcla inyectada. Una vez terminado el tratamiento en su primera etapa ya sea en toda la longitud de la pantalla o en una sección considerable, se efectuará la segunda etapa con pozos intermedios a los de la primera, con lo cual el tratamiento se reduce en espaciamiento a la mitad (figura 2).

Tomando en cuenta los consumos de mezcla obtenidos al inyectar la primera y segunda etapas, en caso necesario se programará una tercera etapa que será con barrenos intermedios a los de las etapas anteriores, reduciendo la equidistancia inicial entre barrenos a la cuarta parte. De una manera semejante se procederá con las etapas subsecuentes si el resultado no ha sido satisfactorio.

El procedimiento de programación de las etapas mencionado anteriormente es aplicable a cada una de las líneas de que se componga la pantalla cuando ésta esté formada por varias.

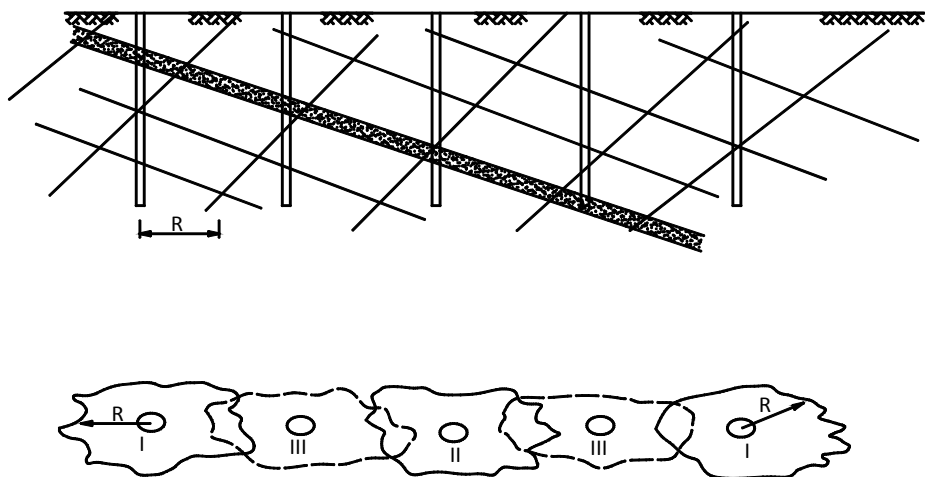


Figura 2. Secuencia de perforación e inyección de barrenos de pantalla (Herrera, 2001).

b) Tapete de consolidación.

Tiene por objeto formar un paquete de roca bajo la cortina o estructura con mejores propiedades mecánicas para reducir las deformaciones de la cimentación, a la vez que la impermeabiliza.

Cuando la roca es masiva y ocasionalmente presenta fracturas aisladas importantes, el tratamiento desde la superficie de los primeros metros de la masa de roca se limita sólo al inyectado de éstas. Cada una se intercepta con barrenos perforados desde ambos lados de la grieta en superficie y se inyectan. Cuando la roca presenta fracturamiento regular en toda un área, se proyecta un tapete de consolidación sistemático formado por perforaciones verticales o inclinadas, hasta 5 o 10 m de profundidad dispuestas en una retícula cuadrangular o en tresbolillo (figura 3).

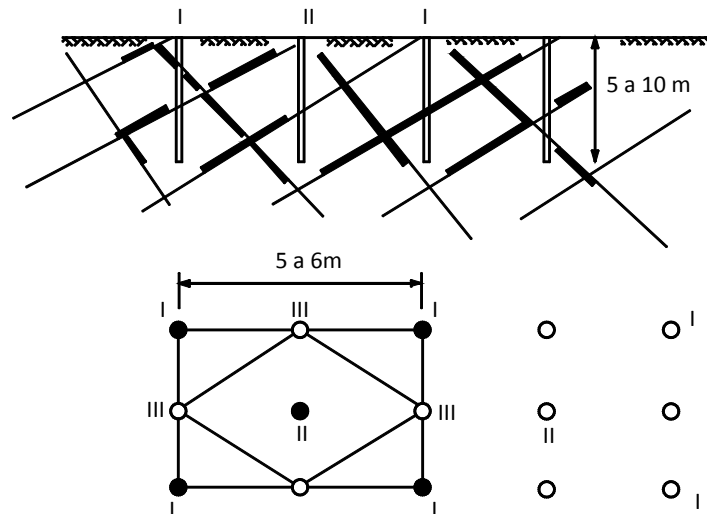


Figura 3. Etapas de inyección de un tapete de consolidación (Herrera, 2001).

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

La inclinación y dirección de las perforaciones dependen de la densidad, rumbo y echado de las discontinuidades. De la misma forma que en el caso de la pantalla, la dirección de las perforaciones se proyecta de tal forma que éstas crucen el mayor número de discontinuidades.

La separación entre las perforaciones también depende de las condiciones geológicas del terreno. En macizos rocosos muy fracturados la separación entre barrenos se reduce a 2 o 3 m, ya que no es posible aplicar presiones de inyección elevadas, mientras que en terrenos menos fracturados la separación final puede ser de 5 a 6 m.

c) Relleno de grandes oquedades y cavidades.

Cuando en el macizo rocoso existen grandes cavidades producidas por disolución o cavernas en rocas ígneas extrusivas, su relleno es indispensable si se quiere construir sobre ellas una estructura hidráulica.

Generalmente después de rellenadas, se realizan inyecciones adicionales para impermeabilizar los contactos y límites de la cavidad. Los rellenos se pueden realizar introduciendo materiales granulares y cementándolos posteriormente con la inyección de lechada, o bien, introduciendo ambos en una sola mezcla. Se usa también concreto pobre fluido, y en otros casos especiales, cuando existe flujo de agua importante en la cavidad, asfalto caliente o productos químicos que se expanden al contacto con el agua.

No existe una metodología específica para realizar el relleno de una cavidad, sino que depende de las características de ésta, tal como tamaño, profundidad y condiciones de flujo de agua en el subsuelo (figura 4).

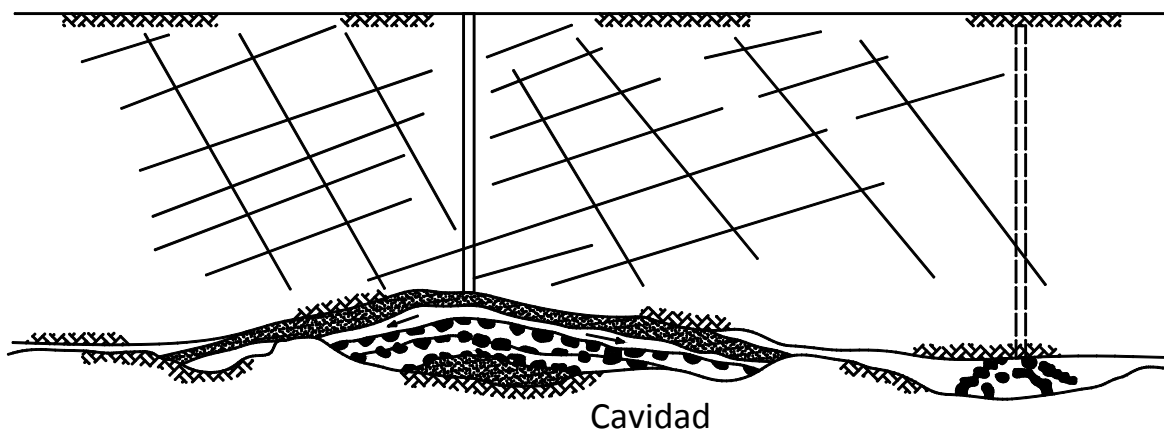


Figura 4. Inyección de relleno de oquedades grandes (Herrera, 2001).



2.3 Requisitos.

Para túneles carreteros o ferroviarios, así como para otras obras subterráneas, normalmente un requisito importante es evitar al máximo el flujo del agua hacia su interior. El requisito principal de entrada es evitar el flujo de agua subterránea, prevenir el daño a instalaciones y garantizar un nivel de seguridad.

La razón de fijar el requisito de evitar al máximo la entrada de agua hacia una excavación subterránea puede obedecer a las condiciones indicadas en la tabla 1.

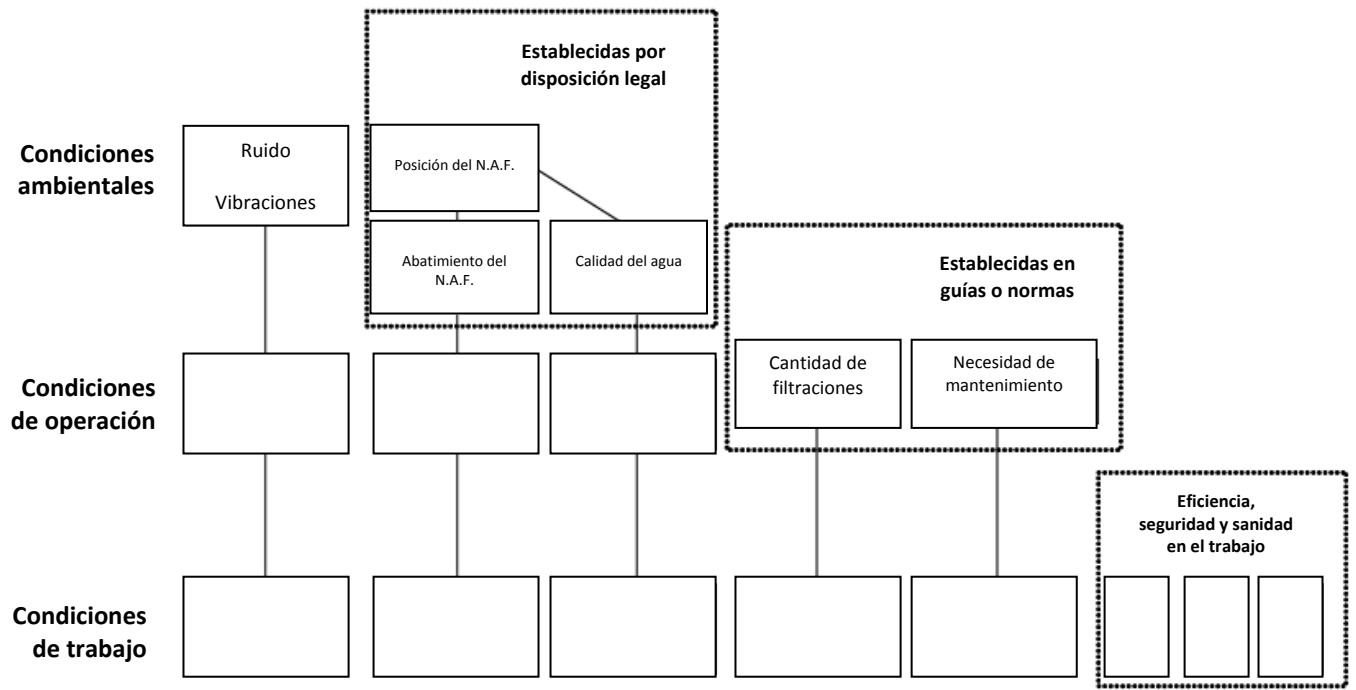


Tabla 1. Estructura de requisitos para limitar la entrada de agua en excavaciones subterráneas (Dalmam, 2004).

Los tres requisitos principales en cuanto a trabajos de inyección asociados a excavaciones subterráneas resumidos por Dalmam (2004), son:

- Evitar el abatimiento del nivel freático y la dispersión de contaminantes en el medio ambiente.
- Satisfacer las demandas de seguridad de los usuarios, asegurar el funcionamiento necesario de los accesorios e instalaciones próximas y cumplir con la capacidad para un mantenimiento racional.



- c) Establecer condiciones en el sitio de trabajo que proporcionen seguridad al personal y al ambiente. Además, establecer mecanismos para modificar los procesos de inyección y controlar el costo del proyecto.

Los requisitos del proyecto están normalmente basados en investigaciones según las condiciones geo-hidrológicas, expresadas como una cantidad máxima permitida de agua, dada en l/s o en /min para una pantalla de impermeabilización.

Uno de los requisitos o límites también puede ser traducido a la conductividad hidráulica, Kg , de la masa de roca o a una extensión de la zona inyectada, Ig (figura 5).

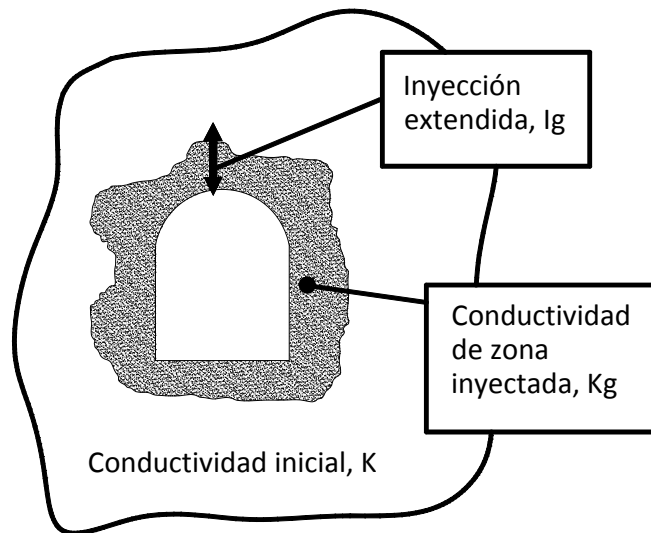


Figura 5. Zona de inyección extendida (Ig), y conductividad hidráulica, (Kg) (Dalmam, 2004).

Los problemas que se pueden presentar en una pantalla de impermeabilización pueden ser manejados durante el proceso de inyección. Las primeras etapas de la inyección en la masa de roca deben ser a base de una lechada de cemento; no obstante, en ocasiones, la inyección de algunas sustancias químicas puede ser necesaria. La mezcla de lechada es adaptada para cada situación presentando propiedades de fluidez apropiadas, una homogeneidad aceptable y resistencia a largo plazo ante medios químicos y físicos. En ocasiones una mezcla de azufre resistente puede ser usada si hay riesgo por el contacto de sulfatos en los alrededores.

El cambio del nivel del agua freática (NAF) depende de la capacidad de almacenamiento del medio y de la magnitud del flujo del agua en él. Generalmente la posición del NAF sólo afecta los alrededores cercanos al proyecto, pero puede ser considerado como un requisito para el proyecto (Dalmam, 2004).

En una etapa preliminar de un proyecto usualmente solo se cuenta con información general como mapas de base o información recibida de proyectos semejantes. Posteriormente se debe realizar una revisión de la información disponible, realizar un modelo geológico y las perforaciones de exploración que mejoren el conocimiento del problema y permitan establecer un procedimiento de inyección eficaz.



La información disponible acerca de la masa de roca y del proceso de inyección de la misma es extensamente mejorada cuando el proyecto comienza y según la inyección va avanzando. Antes del final habrá una base de datos, que puede ser de poco uso para el proyecto, pero de gran ayuda para el siguiente proyecto si se realiza en un área circundante con características y condiciones de la masa de roca similares.

Entre varios métodos de inyección y con la información aun limitada, es viable elegir un método eficaz, pero no es posible elegir un método de inyección óptimo. Usando una filosofía de diseño activa, el método de inyección durante el progreso del proyecto puede ser paso a paso mejorado, permitiendo una optimización del método de inyección que cumpla las exigencias de la mejor forma.



2.4 Algunos procedimientos de inyección empleados hoy en día.

El proceso de inyección puede ser realizado con diferentes procedimientos. En general el propósito es el de sellar una masa de roca asociada a diferentes tipos de proyectos para evitar el flujo de agua a través de ella, lo cual puede ser más o menos complicado, ya que es dependiente de la complejidad del macizo rocoso.

Algunos procedimientos pueden desarrollarse a partir de barrenos de exploración y prueba anticipada para adoptar el tratamiento más apropiado; sin embargo, para otros no se cuenta con información anticipada y se pueden llevar mucho tiempo en el proceso de inyección por no haber investigado adecuadamente la masa de roca. Aunque los procedimientos de inyección pueden ser más o menos semejantes entre sí, siempre existe la necesidad de adaptar el proceso a las condiciones reales del terreno, a partir de los resultados que se van obteniendo durante el trabajo mismo.

En este capítulo se mencionarán algunos procedimientos que recientemente se utilizaron y funcionaron para la impermeabilización de túneles durante su construcción, y aunque los procedimientos fueron en general semejantes, en el proceso debieron hacerse las adaptaciones necesarias según las condiciones del terreno y con base en los resultados que iban obteniéndose, para lograr el propósito buscado.

En la tabla 2 se indican las características de algunos proyectos y de los tratamientos de inyección aplicados en ellos. Los proyectos comentados son los siguientes:

1. Túneles de acceso al “Eslabón del Sur”, Estocolmo, Suecia.
2. Túneles del “Eslabón del Sur”, SL01 y SL02, Estocolmo, Suecia.
3. Túnel en Arlandabanan, Arlanda, Suecia.
4. Túnel de Bergshamra, Solna, Suecia.
5. Túnel en Nordlänken, Trollhättan, Suecia.
6. Túnel de Lunner, Grualia, Noruega.



Universidad Nacional Autónoma de México
Capítulo 2. Algunos aspectos sobre inyección en el macizo rocoso.

Tabla 2. Datos de proyecto resumidos del proceso de inyección (Dalmam, 2004).

| PROPIEDAD/PROYECTO | Acceso SL | SL (01.02) | Arlandabanan | Bergshamra | Nordlänken | Lunner |
|---|---|---|---|----------------------------------|---|--------------------|
| Área de la sección transversal del túnel (m²) | 55 | 75 | 100 | 20 | 110 | 61 |
| Longitud del túnel (m) | 90 | 9,000 | 8,600 | 850 | 5,500 | 1,555 |
| Profundidad promedio del túnel (m) | 5 | 20-30 | 10 | 10 -20 | 20-30 | 130 |
| Exigencia o filtración aceptable (l/min 100m) | 2 | 0.5-2 | 2-5 | 5 | 2.5-3.5 | 10-20 |
| Conductividad inicial de la masa de roca (m/s) | (*) 1.9x10 ⁻⁶ - 5.1x10 ⁻⁸ | 1.9x10 ⁻⁶ - 5.1x10 ⁻⁸ | 1.7x10 ⁻⁶ - 1.7x10 ⁻⁸ | - | 9.4x10 ⁻⁷ - 3.6x10 ⁻⁸ | - |
| Número total de inyecciones (Medidas a partir del sellado de cada progresión) | - | 608+160 (Re) ⁽⁺⁾ | ~ 580 | 60 | 366 | 104 |
| Procedimiento ** | Espesamiento | Espesamiento | 2 Inyecciones | 2 Inyecciones | 3 Inyecciones | Espesamiento |
| Incremento porcentual del número de barrenos al final de la inyección con una presión mayor que la inicial | - | 26% | ~ 5% | 20% | 45% | 6% |
| Número de barrenos por sección transversal al eje del túnel | 22 | 32 | 22 | 4 | 31 | 24 |
| Longitud de los barrenos (m) | 18 | 20 | 20 | 20 | 20 | 24 |
| Traslape del cilindro de influencia de la inyección (m) | - | 5 | 5 | 5 (min 3) | 5 | 4-9 |
| Intensidad de barrenación (barrenos/m²) | 0.4 | 0.42 | 0.22 | 0.2 | 0.28 | 0.39 |
| Inclinación del barreno respecto al eje del túnel (grados) | 12 | 12 | 17.5 | 11.3 | 11.3 | 15 |
| Diámetro del barreno (mm) | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 |
| Tiempo total de inyección mínima y máxima (horas) | 21-29 | 24-97 | 16-20 | 8-16 | 21-39 | 20-29 |
| Presión de sellado (presión máxima) | 2.5 MPa | 2.5 Mpa | 2-4 MPa | 1.5 MPa | 2 MPa | 6-7 MPa |
| Detención del flujo (l/min) | 2 | 2 | 0.2 | 0.2 | no | 2-4 |
| Tipo de inyección (Tubo manguitos) | Primaria/ Múltiple | Primaria | Primaria | Primaria | Múltiple | Primaria |
| Tipos de aditivos empleados | Inj 30 | Inj 30 | UF16 Rheocem 800 | Rheocem 650 Rheocem 800 | UF16 | UF12 Ind. (125) |
| Relación a/c del tipo de lechada principalmente usada | (2.0)-1.0-0.8 | (2.0)-1.0-0.8 | 0.8-0.6 | 0.8-0.6 | 1.0-0.8-0.6 | 2.0-0.55 |
| Tiempo de espera antes de la excavación por sección del túnel (h) | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 |

(⁺)Re = Barrenos de re-inyección. (*) = se asumió la masa de roca similar de los túneles principales.

(**) = espesamiento es el ir usando mezclas cada vez más espesas al ir aplicando el procedimiento de inyección.



1. Túneles de acceso al “Eslabón del Sur”, Estocolmo, Suecia.

El “Eslabón del Sur” es un sistema de tráfico en el sur de Estocolmo. Sus túneles de acceso fueron excavados durante 1998. El área de corte transversal era aproximadamente de 55 m².

La masa de roca dentro del área del Eslabón del Sur es dominada por un gneis. El número de barrenos para la primera inyección varió entre 22 y 29. El proceso de inyección incluyó 10 actividades diferentes, tal y como se observa en la figura 6.

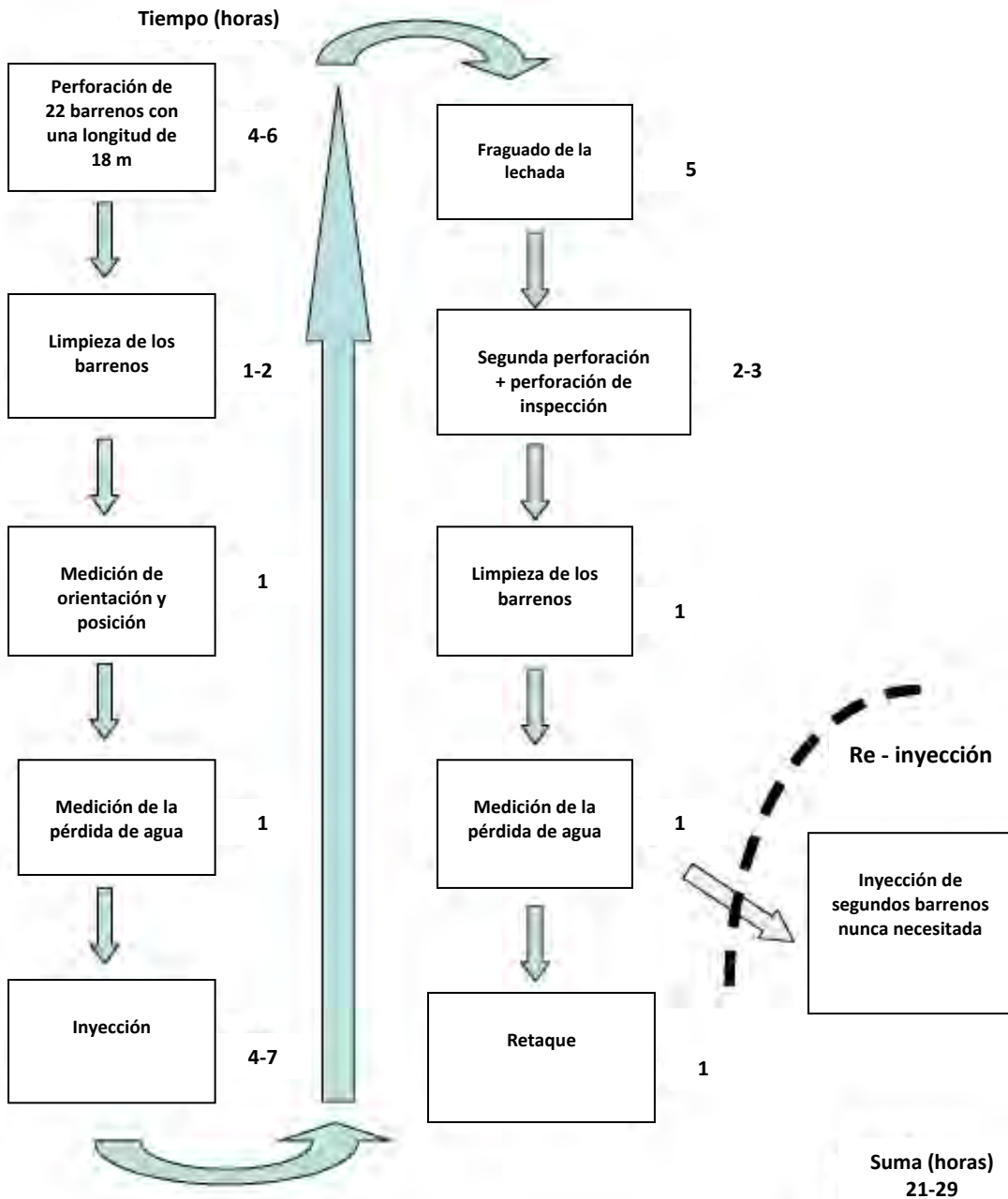


Figura 6. Una generalización del método de inyección aplicado en los túneles de acceso en el “Eslabón del Sur” (Dalmam, 2004).



En la figura 6 se observan las principales actividades que se llevaron a cabo durante el tratamiento de la roca en los túneles de acceso al “Eslabón del Sur”, en Estocolmo, Suecia, las cuales se muestran en una serie de recuadros indicando al lado de éstos el tiempo de duración correspondiente. El proceso de inyección consistió en la perforación de 22 barrenos, con una longitud de 18 m cada uno, por el método de lavado, midiendo su posición, orientación y cantidad de agua perdida durante la perforación, para posteriormente realizar el inyectado y esperar el fraguado de la lechada. Cabe señalar que durante las actividades de inyección fue necesaria una segunda perforación con la finalidad de inspeccionar el sellado del macizo rocoso, para lo cual se reperfirió el barreno, se lavó y se midió nuevamente la pérdida de agua en él. Por último se efectuó el retaque del barreno.

Con base en esa experiencia, se estimó un tiempo de 21 a 29 horas para llevar a cabo los trabajos de inyección, con un tiempo real de 22 a 25 horas (Dalmam, 2004).

2. Túneles del “Eslabón del Sur”, SL01 y SL02, Estocolmo, Suecia.

Con una longitud total de 6 kilómetros, de las cuales 4.5 kilómetros corre en túneles. Los túneles del Eslabón del Sur fueron excavados entre 1999 y 2002.

Los túneles del Eslabón del Sur se realizaron predominantemente por medio del sistema de pre-inyección a base de cemento, ya que presentaba una permeabilidad considerable (1×10^{-7} m/s). El concepto elegido consistió en realizar barrenos de 20 m de longitud, orientados hacia el eje del túnel con el propósito de impermeabilizar la masa de roca.

El número de barrenos varió en función de la sección transversal del túnel. Para una sección de 75 m^2 había 32 barrenos, con una inclinación de 12 grados hacia el centro del túnel. La lechada se fabricó con cemento convencional ($d_{95} = 30 \text{ }\mu\text{m}$), con una relación agua/cemento (a/c) entre 2.0 y 0.8. Cabe señalar que sólo una pequeña cantidad de micro cemento fue usada. La presión de inyección fue establecida en 2.5 MPa con un gasto de 2 l/min, como máximo.

El proceso de inyección consistió en diez actividades diferentes, tal y como se observa en la figura 7.

Basado en la experiencia del proyecto, el tiempo para cada actividad del proceso de inyección fue estimado, dando un tiempo real total de 24 a 97 horas.

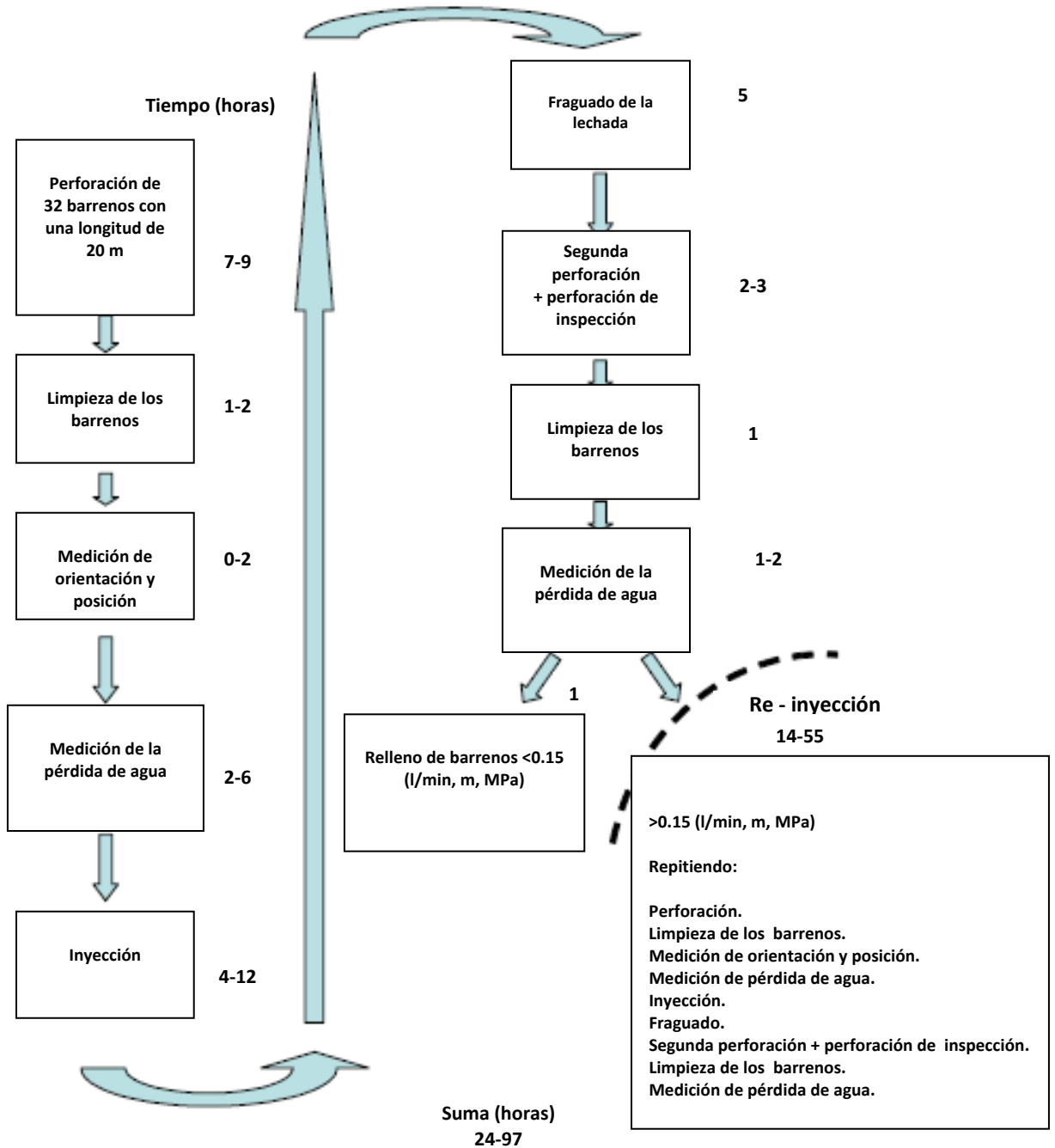


Figura 7. Generalización del método de inyección aplicado en los túneles de acceso en el “Eslabón del Sur” (Dalmam, 2004).



3. Túnel en Arlandabanan, Arlanda, Suecia.

Los Túneles en Arlandabanan son un enlace ferroviario entre el aeropuerto Arlanda y Estocolmo Central, con 8.6 kilómetros de túnel en el área de Arlanda. Los túneles fueron construidos entre 1996 y 1997 con una sección de 100 m².

La masa de roca en Arlanda es dominada por tres regiones geológicas principales. En el área central hay una combinación de esquisto de mica y gneis de mica. Al norte y al sur del aeropuerto hay granodiorita masiva.

Al igual que en los túneles de Eslabón del Sur, Arlandabanan presenta el proceso de pre-inyección a base de lechadas de cemento. El método elegido era con barrenos de 20 metros de longitud, con un traslape del cilindro de influencia de aproximadamente 5 m. Cabe señalar que se decidió dejar fuera los barrenos de inspección, ya que presentaba una conductividad hidráulica elevada (>10 UL), por consiguiente no era posible estimar el grado requerido de inyección a base de barrenos perforados delante de la excavación.

El número de barrenos varió en función de la sección transversal del túnel. Se usaron entre 22, 30 y 34 barrenos, con 22 para la sección de 100 m². En algunas ocasiones, los barrenos suplementarios fueron inyectados en la parte central del frente del túnel; para el túnel piloto más pequeño se usaron 10 barrenos de inyección.

El ángulo de los barrenos varió entre 6 y 20 grados con respecto al eje del túnel, quedando en condiciones normales (orientación correspondiente al mayor número de discontinuidades) a 17.5° en la misma dirección. Las mezclas de lechada estaban basadas en micro cemento con una relación a/c de 0.6 y 0.8.

Según la especificación técnica de inyección, la presión de inyección máxima dependía de la calidad del macizo rocoso, por lo que para áreas con una buena calidad se tenían presiones de hasta 4 MPa, mientras que para áreas de una mala calidad la presión varió entre 0.5 y 1.5 MPa. Durante la construcción, a fin de mejorar el resultado del sellado, se decidió aumentar la presión entre 0.5 y 6 MPa, con un flujo máximo de 0.2 l/min.

La distribución desigual de lechada originó el replanteo de aproximadamente el 80% de los barrenos, teniendo como objetivo abrir las fisuras en la masa de roca con un incremento de presión de 6 MPa para un volumen inicial de inyección de 150 l, logrando con ello un comportamiento predecible, ya que el volumen máximo de lechada disminuyó de 1,200 l a 350 l al reducir la presión a 2 MPa.

El proceso de inyección consistió de cuatro actividades diferentes, como se muestra en la figura 8.

Al igual que en el caso de los Túneles del “Eslabón del Sur”, se estimó el tiempo para cada actividad del proceso de inyección, resultando un tiempo real total entre 16 y 20 horas.

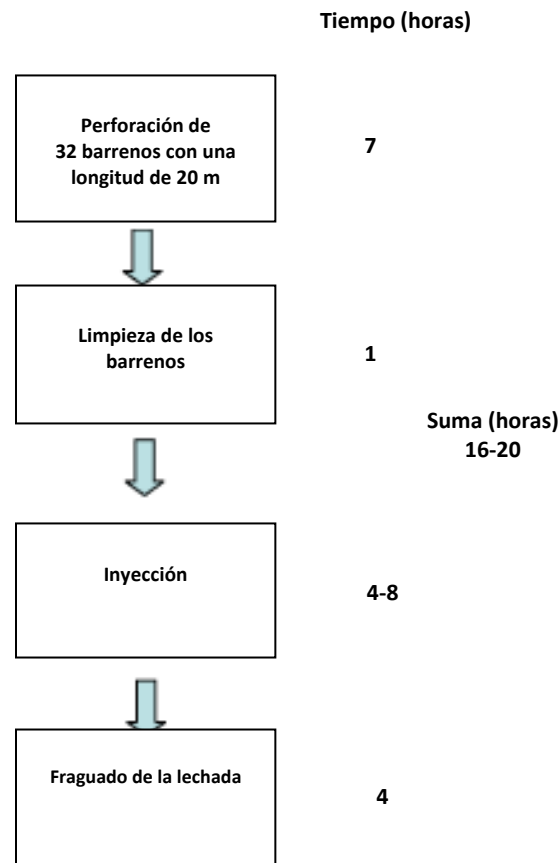


Figura 8. Una generalización del método de inyección aplicado en “Arlandabanan” (Dalmam, 2004).

4. Túnel de Bergshamra, Solna, Suecia.

El túnel de Bergshamra fue construido entre agosto de 1997 y octubre de 1998 en Solna, al norte de Estocolmo.

El túnel tuvo por objetivo dar paso a una línea de transmisión elevada, de alta potencia existente, que cruza un barrio residencial. El túnel fue de 850 m de largo con un área transversal de 20 m².

El concepto de inyección consideró como parte del proceso una pre-inyección, a base de 4 barrenos de prueba teniendo como objetivo principal estimar el grado de inyección requerido. Si los criterios de sellado para la inyección eran cumplidos (1.5 MPa de presión de agua con un flujo de 0.2 l/min o 70 kilogramos inyectados de cemento por metro), no era necesaria la inyección posterior. De otra forma, los nuevos barrenos serían perforados e inyectados al lado de aquellos que presentaban filtraciones.



La lechada tipo I ($a/c = 0.8$) fue usada hasta consumos de 40 l/m. A partir de entonces, la siguiente inyección fue realizada con la lechada tipo II ($a/c = 0.6$) para otros 40 l/m de consumo, y luego la lechada se fue espesando hasta obtener el sellado. Dos tipos de micro cemento fueron usados, Rheocem 650 y Rheocem 800. El proceso de inyección consistió de seis actividades diferentes (ver figura 9), consumiendo un tiempo de 8 a 16 horas.

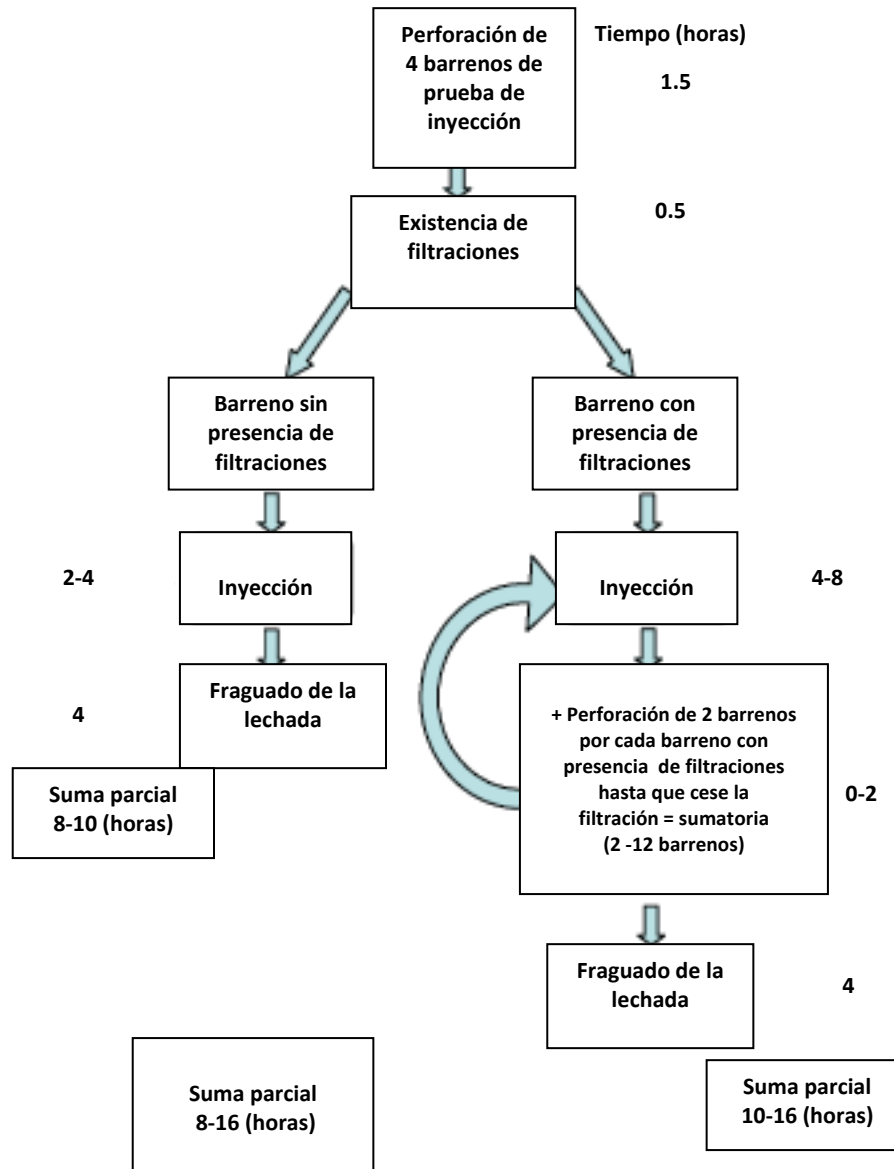


Figura 9. Una generalización del método de inyección aplicado en el túnel de “Bergshamra” (Dalmam, 2004).



5. Túnel de Nordlänken, Trollhättan, Suecia.

El túnel Trollhättan forma parte de la vía férrea Nordlänken, la cual posee una longitud de 3.5 kilómetros con un área de 110 m² de sección transversal. El proyecto es un traslado de una vieja pista de carril con doble vía directa, que se hizo con el fin de mejorar la capacidad del ferrocarril.

La masa de roca en el área es dominada por granito, gneis y granodiorita. Las propiedades hidráulicas de la masa de roca fueron investigadas por la pérdida de agua en 12 barrenos principales desde la superficie del terreno natural. La conductividad hidráulica fue evaluada entre 1.4×10^{-7} y 3.6×10^{-8} m/s.

La sugerencia dada para el proyecto fue la de pre-inyección, iniciando con 25 barrenos. A fin de mejorar el resultado de la inyección y disminuir el número de barrenos en la re-inyección, (al principio el 45% de los abanicos tuvieron que ser re-inyectados), los barrenos de inyección se incrementaron a 31 (Dalmam, 2004). Para estudiar el resultado de la inyección, se realizaron los barrenos de inspección, midiéndose la pérdida de agua en ellos. Al principio, 10 barrenos de inspección fueron perforados, y disminuidos más tarde a 6; esto resultó en un promedio de 6 a 18 barrenos de re-inyección por cada 25 barrenos de inyección original. Por término medio había 9 barrenos de re-inyección para cada abanico. La exigencia del sellado para los barrenos de inspección fue el del flujo permitido hacia el túnel (de 1-3 y 3-7 l/min por cada 100 m de túnel) y fue dividido en dos tipos de sellado.

1. **Clase 1**, (1-3 l/min por cada 100 m de túnel) pérdida permitida de agua < 0.2 l/min por m por Mpa.
2. **Clase 2**, (3-7 l/min por cada 100 m de túnel) pérdida permitida de agua < 0.5 l/min por m por Mpa.

Para tramos del túnel con al menos 15 metros de carga de roca, la presión de sellado fue de 2 MPa sobre el nivel de aguas freáticas (NAF). Mientras que para una carga de roca menor, la presión permitida estaba entre 0.2 y 1.6 MPa sobre el NAF.

El método de inyección incluyó tres tipos de lechadas (ver tabla 3). La inyección comenzó con la lechada tipo I y continuó hasta que el consumo de cemento fuera de 20 kilogramos por metro. A partir de entonces, la lechada tipo II fue usada hasta alcanzar el mismo consumo que la del tipo I, finalmente se empleó la lechada tipo III hasta un consumo de 50 kilogramos por metro. Cabe señalar que si a la presión de sellado se hubiera alcanzado el consumo previamente mencionado de 50 kilogramos por metro, la inyección hubiera sido detenida.

El proceso de inyección consistió en seis actividades diferentes, tal y como se muestra en la figura 10, consumiendo un tiempo de 21 a 39 horas.

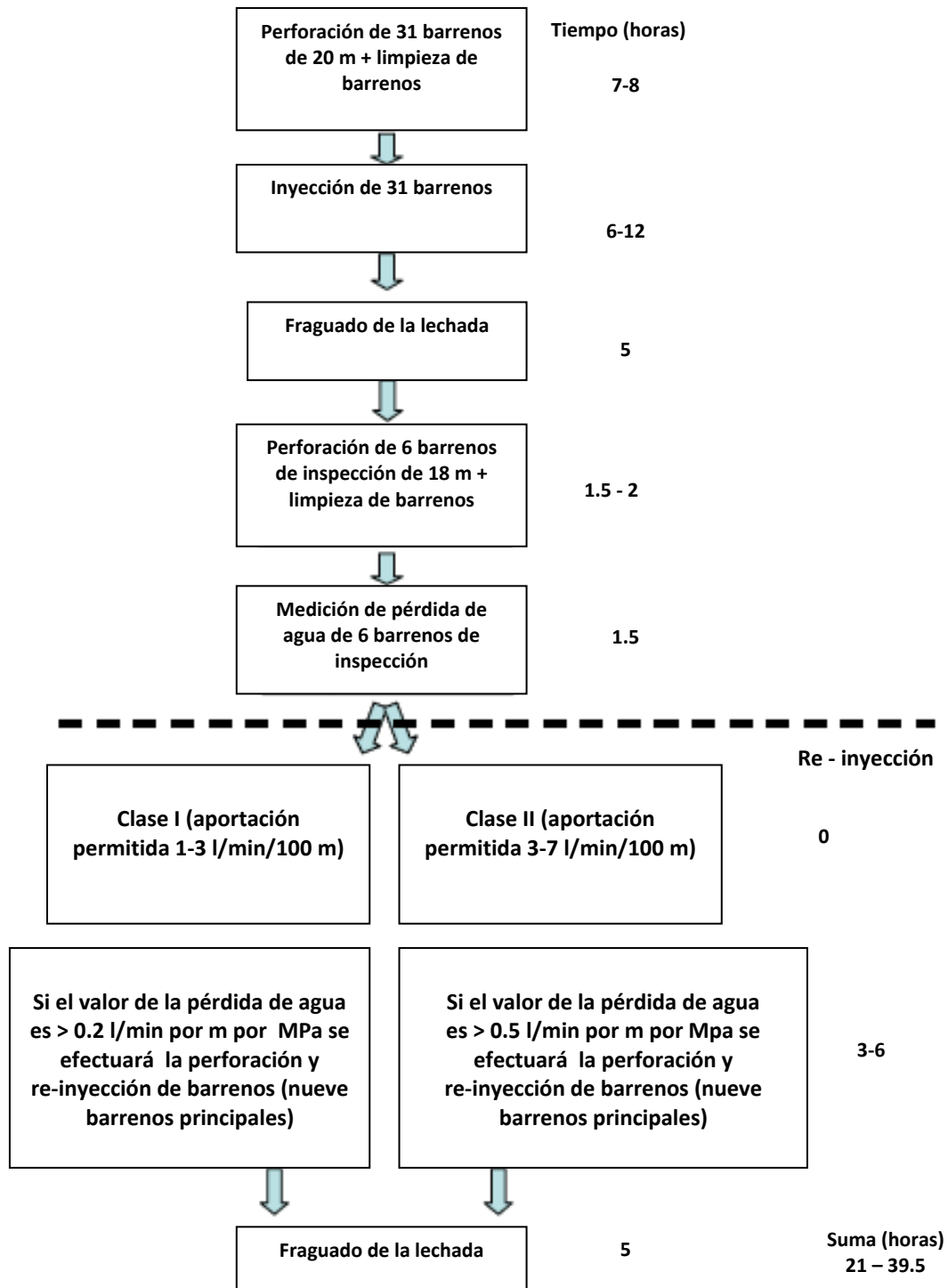


Figura 10. Una generalización del método de inyección aplicado en Nordlänken (Dalmam, 2004).



Tabla 3. Mezclas de lechadas usadas en Nordlänken (Dalmam, 2004).

| Tipo de lechada | Especificación (en informe) |
|-----------------|--|
| I | Micro cemento aplicado para el sellado de fisuras finas < 0.2 μm con una relación de a/c de 0.8 |
| II | Lechada de cemento convencional aplicada para el sellado de fisuras finas > 0.2 μm con una relación de a/c de 0.6 |
| III | Lechada de cemento con acelerante aplicado para el sellado de fisuras abiertas y estructuras, con una relación de a/c de 0.5 |

6. Túnel de Lunner, Grualia, Noruega.

El túnel de Lunner está localizado aproximadamente a 40 km de un túnel del camino este - oeste al norte de Oslo. Fue excavado entre septiembre de 2001 y septiembre de 2002, con un área transversal de 57 m² y longitud total de 3.8 kilómetros.

El lecho de roca en el túnel Lunner pertenece al campo de Oslo y está en el borde entre el sedimento Cámbrico - Silúrico más viejo y el granito más joven.

El flujo antes de la inyección fue estimado aproximadamente a 80 l/min en los primeros 100 m del túnel.

La medición del drenaje fue realizada en los barrenos principales para algunas posiciones. Obteniendo un promedio de 0.53 a 1.69 unidades Lugeon (UL), y un valor máximo de 4.25 UL (Dalmam, 2004). Esto significa que la conductividad hidráulica podría ser estimada entre 9.0×10^{-8} m/s y 2.9×10^{-7} m/s.

En el proyecto de Lunner, había tres requisitos diferentes de sellado, indicados en la tabla 4.

Tabla 4. Tipos de requisitos del gasto de filtración hacia el túnel de Lunner (Dalmam, 2004).

| Clase | Exigencia | |
|-------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 0 | No hay requisito de afluencia | ∞ |
| 1 | Requisitos moderados | 20 l/min/100 m y 10 l/min/20 m |
| 2 | Requisitos altos | 10 l/min/100 m y 5 l/min/20 m |



El proceso de inyección en el túnel Lunner fue realizado principalmente como una pre-inyección a base de lechadas de cemento. El concepto elegido se basaba en 24 barrenos con una longitud de 24 metros cada uno (sólo algunas secciones fueron dejadas sin pre-inyección).

La inclinación de los barrenos fue de 15 grados respecto al eje del túnel, con diámetro de 64 mm. La presión de inyección se estableció entre 4 y 7 MPa con un flujo de cierre entre 2 y 4 l/min.

Inicialmente el método de inyección incluyó de 1 a 4 barrenos de prueba, en los que el gasto fue medido para decidir el tipo de tratamiento. Los barrenos de prueba fueron excluidos; en lugar de ellos, se perforó una pantalla de inyección midiendo nuevamente la absorción (ver figuras 11 y 12). Cabe señalar que si el gasto total era superior a 20 l/min se optaba por el cemento convencional utilizado ($d_{95}=125 \mu\text{m}$), pero si el gasto era menor de 20 l/min se utilizaba micro cemento ($d_{95}=12 \mu\text{m}$).

La inyección se inició con una lechada delgada (fina), con relación a/c de 2.0 y un espesamiento gradual hasta una relación a/c de 0.55.

La pantalla de inyección consistió en 25 barrenos de 24 m de profundidad y una longitud de traslape (cilindro de influencia de la inyección) de 9 m. A fin de mejorar el método de inyección el número de barrenos fue disminuido a 14 así como su traslape, siendo este de 4 m (ver figuras 11 y 12).

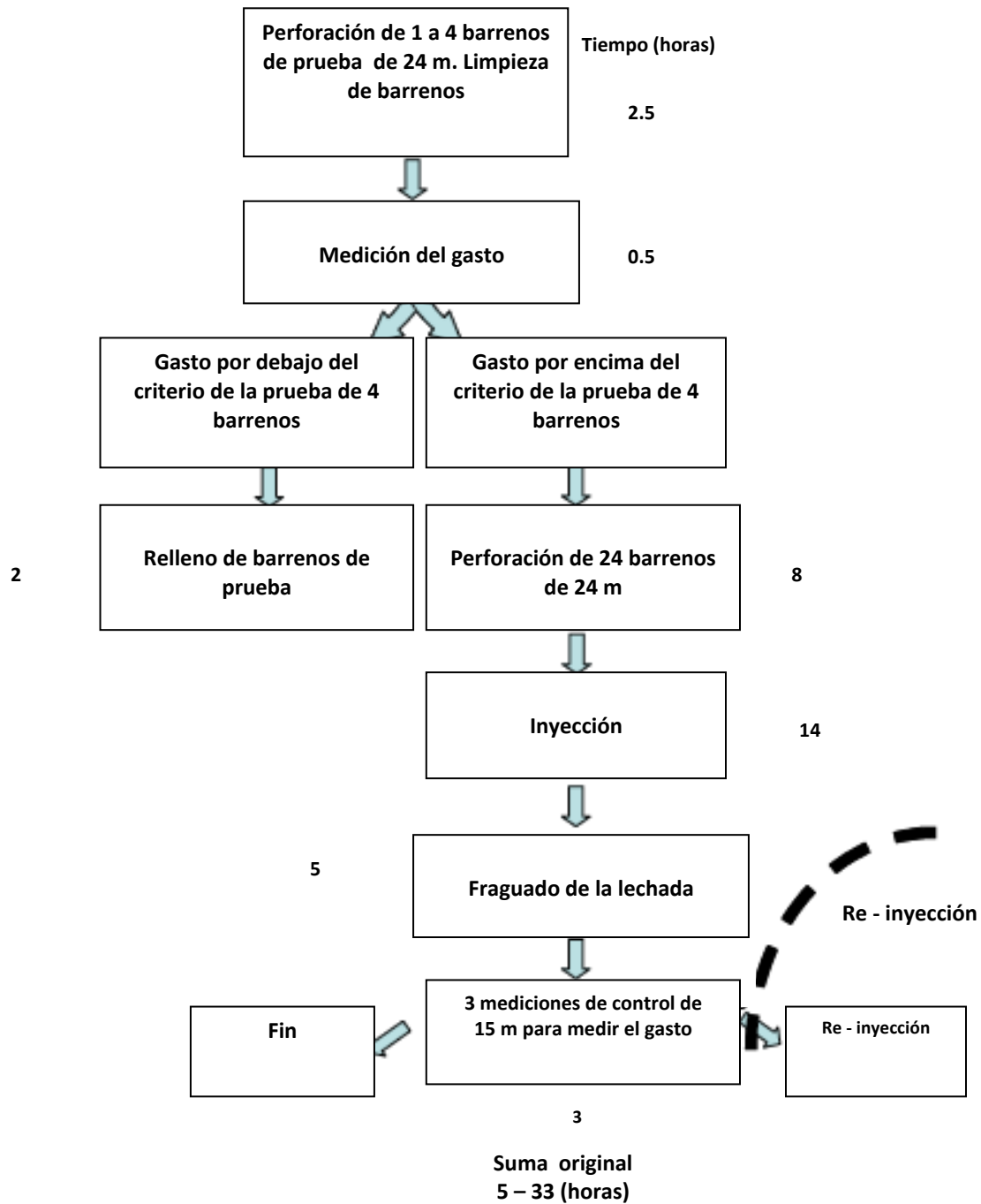


Figura 11. Una generalización del método original de inyección aplicado en el túnel de Lunner (Dalmam, 2004).

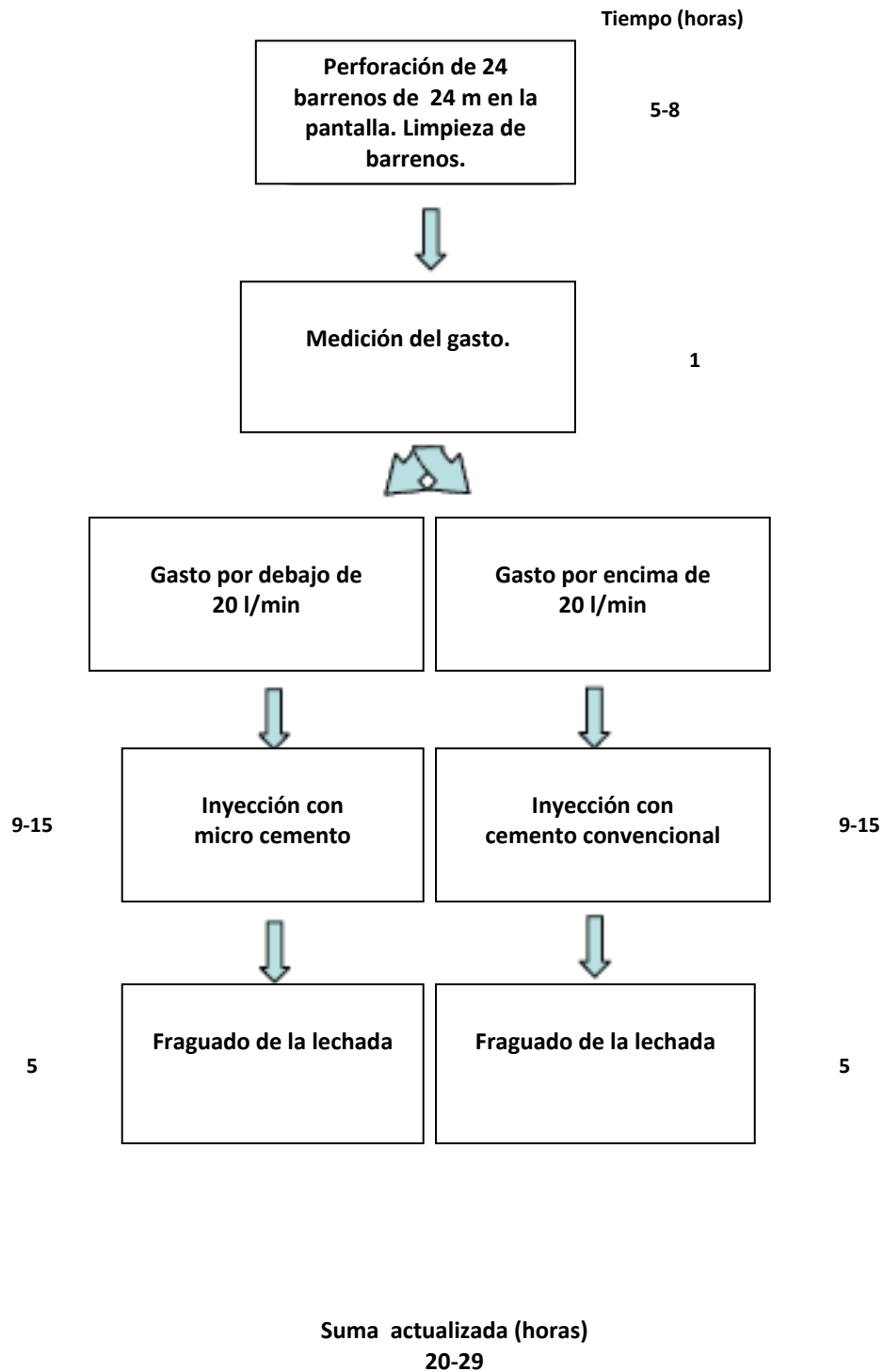


Figura 12. Una generalización del método actualizado de inyección aplicado en el túnel de Lunner (Dalmam, 2004).



- **Resumen de los procedimientos de inyección.**

Se revisaron seis proyectos diferentes en cuanto al procedimiento de inyección para el sellado del macizo rocoso. Todos los procedimientos consistieron en las actividades: perforación, inyección y espera. Algunos procedimientos también incluyeron sondeo/barrenos de inspección y re-inyección. Ninguno incluyó la actividad post-inyección como un procedimiento ordinario de sellar. En realidad, la post-inyección es en ocasiones una actividad cuyo objetivo puede ser considerado como una alternativa para inyección o re-inyección. Basado en los seis proyectos, el procedimiento en general podría estar constituido por cinco actividades principales:

- a) Perforación.
- b) Inyección.
- c) Espera.
- d) Barrenos de prueba/medidas de pérdida de agua.
- e) Re-inyección.

Cada una de estas actividades se ve afectada por componentes tales como el número de barrenos, longitud de barrenos, tiempo de sellado, etc.

Aunque las condiciones de la roca para los seis casos presentados eran semejantes, por estar los proyectos localizados en un mismo ambiente geológico, las diferencias en las obras, su magnitud y las condiciones geohidrológicas presentes en cada una de ellas, determinadas en pruebas de absorción de agua en barrenos perforados en el frente de los túneles o por medición de filtraciones en barrenos perforados previos al tratamiento, la manera de proceder para distribuir los barrenos de inyección en el frente del túnel, las mezclas utilizadas, así como las presiones de inyección aplicadas; tuvieron que ser adaptadas a las circunstancias de cada proyecto para lograr los requisitos propios de cada uno de ellos.

Las actividades para realizar un tratamiento mediante inyecciones de una masa de roca en la que se alojará una obra son prácticamente las mismas. La diferencia en su aplicación específica depende de los factores geohidrológicos, geológicos, geotécnicos y constructivos que se van presentando durante la ejecución de los trabajos.

2.5 Modelo de la masa de roca FES (macizo rocoso fisurado, elástico, saturado).

Generalmente al llevar a cabo el análisis estructural de una presa de concreto, el macizo rocoso es caracterizado de manera de poder estimar su comportamiento, determinando para él un módulo de deformación denominado “módulo de elasticidad”. En el caso particular de la presa Zeuzier, en Suiza, se presentó un comportamiento totalmente inesperado al drenarse la masa de roca en la que se apoyaba la presa por la construcción de un túnel en el entorno de la misma, el cual no fue posible estimar con base a suponer un comportamiento elástico lineal.

Para tratar de explicar el comportamiento observado en el caso antes mencionado, se desarrolló un modelo de comportamiento de la masa de roca que consideró tanto el comportamiento elástico de la roca intacta entre las discontinuidades en la masa, como la presencia de las discontinuidades, de su rugosidad, espaciamiento y cambio de abertura al aplicar presión sobre la masa; también consideró el estado saturado de la masa de roca y la presión intersticial que pudiera desarrollarse en el agua contenida en las discontinuidades. A este modelo se le llamó Modelo FES (de Fissured Elastic Saturated Rock Mass Model), el cual permitió interpretar dicho comportamiento de manera mucho más fina que la usual hipótesis lineal elástica. El modelo FES, además de permitir la interpretación de comportamientos no elásticos lineales de la masa de roca, permite ser aplicado a casos en que el comportamiento de la masa de roca si sea perfectamente elástico al producir cambios a la masa de roca, ya sea por la aplicación de cargas externas, reducción de la presión intersticial al drenarla, o introducir presión en sus discontinuidades al inyectarla con productos tendientes a mejorar sus características de deformabilidad o permeabilidad.

La figura 13 muestra los conceptos fundamentales del modelo FES.

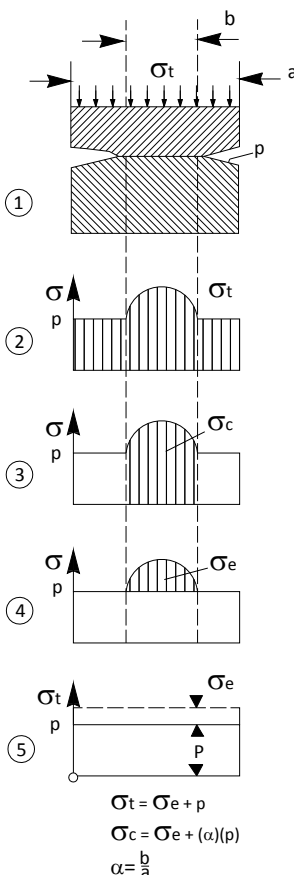


Figura 13. Conceptos fundamentales del modelo FES (Lombardi, 1994).

Nomenclatura:

- (1) Contacto de dos bloques de roca bajo el esfuerzo total σ_t en presencia de un esfuerzo neutro p en el agua contenida en la discontinuidad.
- (2) Repartición del esfuerzo total, σ_t .
- (3) Esfuerzo de contacto roca – roca, σ_c .
- (4) Esfuerzo llamado efectivo, σ_e .
- (5) Valores promedio del esfuerzo neutro (p) y del esfuerzo efectivo (σ_e).

α = Relación de la superficie en contacto a la superficie total.



El principio sobre el cual se basa el modelo consiste en considerar que las superficies, o paredes de una discontinuidad, no son lisas ni planas, sino onduladas en ambos sentidos. Existen entonces puntos de contacto distribuidos de manera más o menos uniforme a lo largo de la discontinuidad. Los esfuerzos que se llaman de contacto se transmiten pasando por estos puntos. Se trata de protuberancias que se aplastan progresivamente al aumentar el esfuerzo de compresión en la superficie de la discontinuidad. Hasta cierto valor del esfuerzo las deformaciones son reversibles; más allá de este valor se producen deformaciones llamadas “plásticas”. En el vacío que en cada momento queda abierto entre las caras que definen a la discontinuidad permanece y circula el agua. Se entiende entonces que porosidad y permeabilidad varían en función de los esfuerzos que actúan y obviamente también de la presión del agua en las discontinuidades.

De acuerdo a la figura 13, se tiene:

- El esfuerzo total, σ_t .
- La presión intersticial o neutra (presión de poro neutra), p .
- El esfuerzo efectivo, σ_e .
- El esfuerzo de contacto, σ_c .
- La superficie relativa de contacto (ángulo de cierre), α .
- La deformación normal a la discontinuidad, ε .

Las figuras 14 y 15 representan el comportamiento y condiciones de una masa de roca afectada por una discontinuidad, rugosa y saturada, sometida a un estado de esfuerzos que le producen deformación. El comportamiento depende obviamente de la abertura de la discontinuidad y del cambio de la misma al aplicar esfuerzo, del esfuerzo total aplicado y del módulo de elasticidad de la roca intacta, lo que condiciona el valor de la presión intersticial, de la presión efectiva y de la presión de contacto roca-roca que se desarrolla en la masa (Lombardi , 1992).

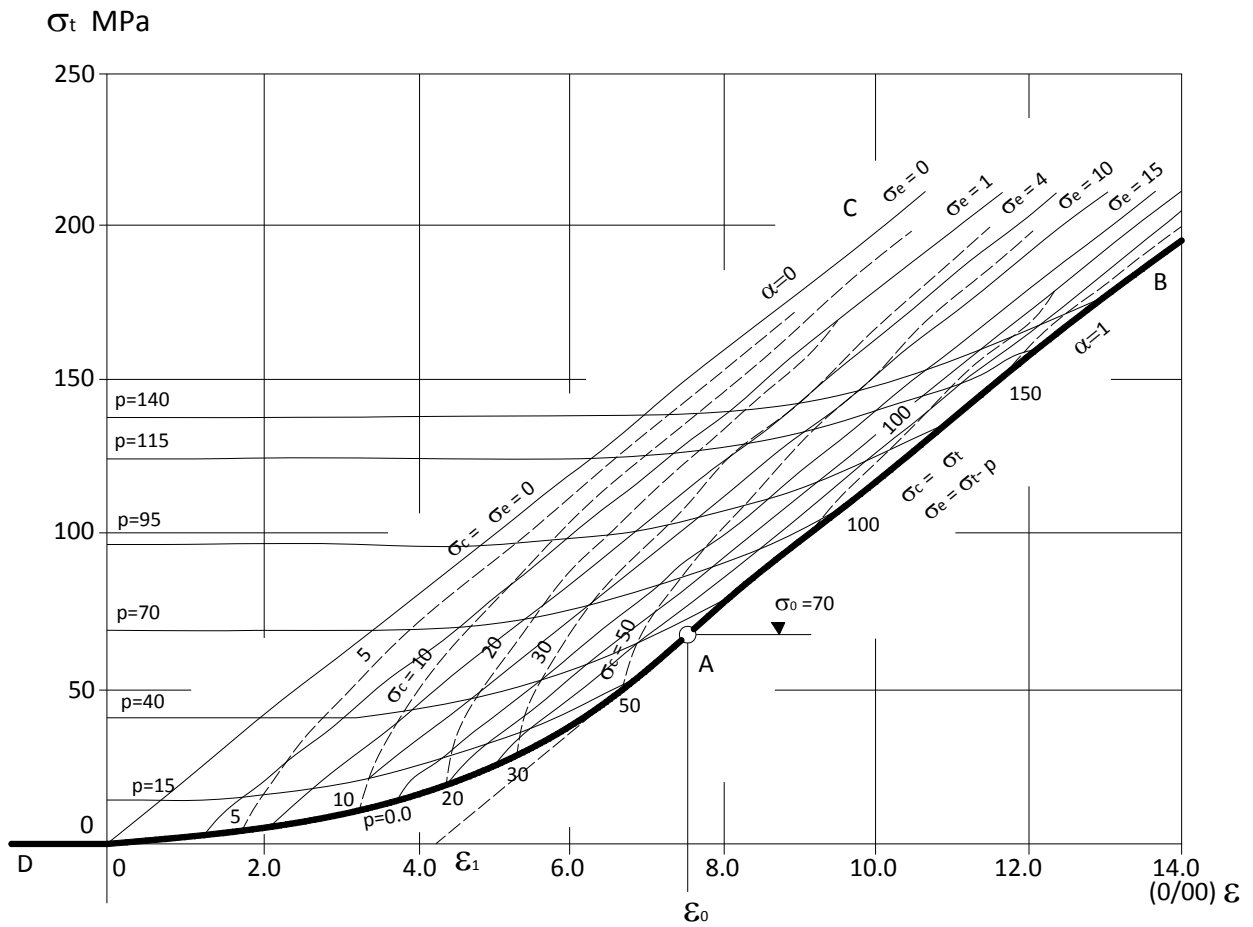


Figura 14. Modelo FES para una masa rocosa (ver figura 15) (Lombardi, 1994).

ϵ = deformación; σ_T = esfuerzo total; p = presión de poro; α = ángulo de cierre ($\alpha = 1$ fisuras completamente cerradas, $\alpha = 0$ fisuras completamente abiertas);
A (ϵ_0, σ_0) = punto total de cierre sin presión de agua; σ_e = esfuerzo efectivo;
 σ_c = esfuerzo de contacto.

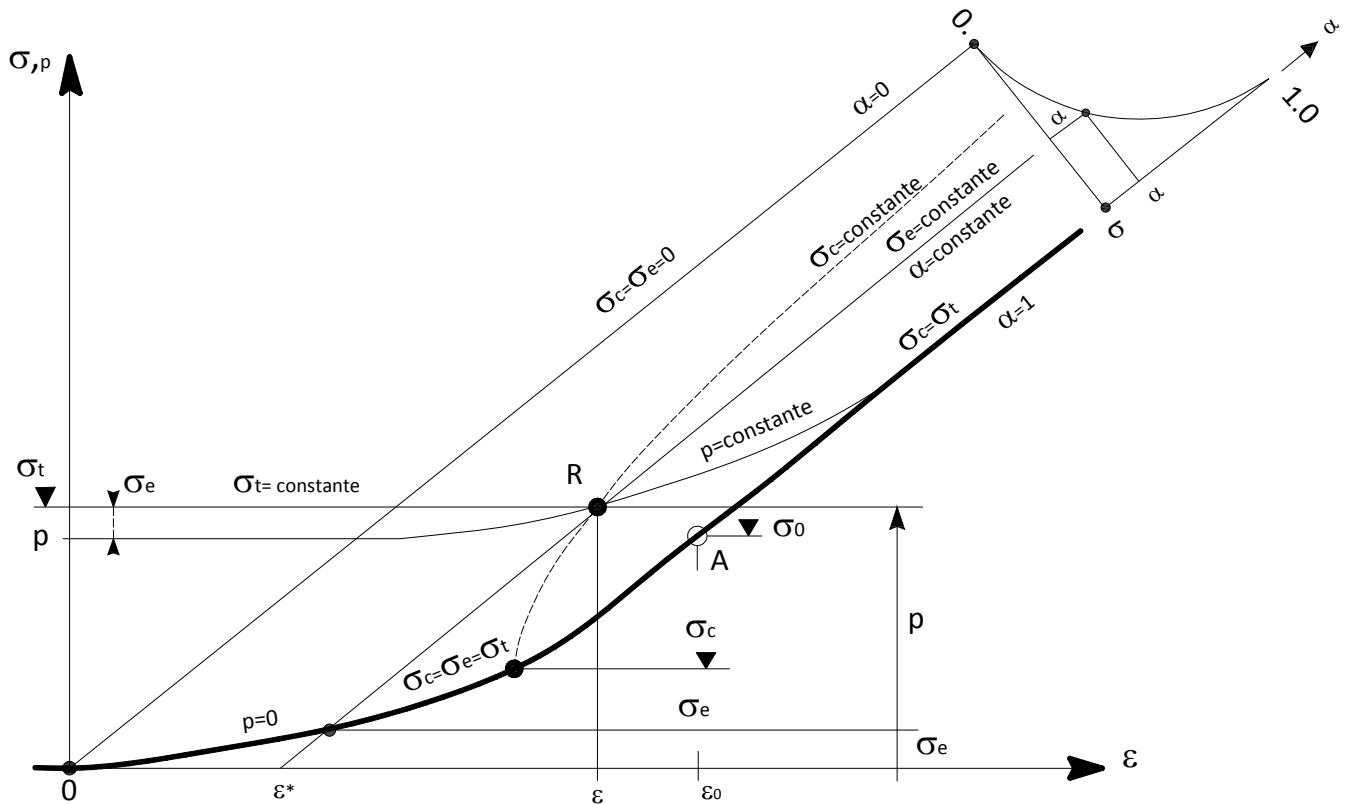


Figura 15. Guía para la lectura de la figura 14 (Lombardi, 1994).
 A cada punto R le corresponden los siguientes valores:

- α = grado de abertura.
- ε = deformación específica.
- σ_T = esfuerzo total.
- p = presión neutra.
- σ_e = esfuerzo efectivo.
- σ_c = esfuerzo de contacto.

Un aspecto que se debe de tomar en cuenta es el esfuerzo de contacto, ya que frecuentemente es confundido con el esfuerzo efectivo. Ante ello es importante puntualizar la figura 13, en donde se verifica que el esfuerzo efectivo es el exceso de compresión por encima de la presión neutra (punto 4 de la figura 13), mientras que el esfuerzo de contacto es el que pasa de roca a roca y no a través de una capa de agua. De hecho el esfuerzo de contacto es siempre superior al esfuerzo efectivo, siendo la diferencia de éstos dos últimos el producto de la presión de poro por el ángulo de cierre ($\sigma_c - \sigma_e = \alpha \cdot p$). Esto significa que la subpresión en un macizo rocoso no se aplica a la totalidad de la superficie sino solamente a una parte de la misma (donde la discontinuidad está abierta).

En las figuras 14 y 15 se observa que el esfuerzo total es variable de punto a punto, siendo dependiente del comportamiento y del estado de carga de la obra.



Es importante tener en cuenta que para el equilibrio del macizo rocoso en el apoyo de una presa, la resistencia al corte es más o menos proporcional al esfuerzo de contacto y no al esfuerzo efectivo, como generalmente se supone.

Antes, de manera arbitraria, se consideraba que la subpresión actuaba solamente sobre el 80% de la superficie de una cimentación. Es necesario apuntar que este fenómeno tiene mucha importancia cuando se consideran las condiciones de equilibrio de una cuña de roca en los estribos, aguas abajo de una presa.

Por otro lado, es evidente, que la inyección de un macizo rocoso modifica sus características y entonces su modelo FES. De hecho este es justamente el objetivo de los tratamientos de consolidación; es decir, que los mismos consisten en modificar los parámetros de deformabilidad, de resistencia y de permeabilidad del macizo rocoso.

El modelo FES es una aproximación a las condiciones reales de la masa de roca; por ello, como cualquier herramienta matemática, es dependiente de la calidad con la cual haya sido formulado el caso en estudio.

El modelo FES trata de representar el comportamiento de una masa de roca fisurada, elástica y saturada bajo un estado de esfuerzos de compresión; sin embargo, este modelo presenta limitaciones. Una de ellas es cuando las fisuras del macizo rocoso se encuentran sometidas a esfuerzos de corte elevados que pudieran ocasionar movimiento o desprendimiento de bloques, o cuando las fisuras del macizo se encuentran rellenas de material arcilloso; ante ciertas condiciones, es preferible utilizar otros modelos matemáticos.

A pesar de las condiciones planteadas previamente, una vía que tiene éxito y promete tenerlo aún más, consiste en “construir las propiedades” del macizo como cuerpo discontinuo a partir de sus elementos constitutivos, es decir de los bloques de roca y del agua.

De hecho el proceso consiste en construir un cuerpo reológico matemáticamente continuo y no en buscar solamente elementos y modelos reológicos ya existentes tratando de escoger los parámetros más adecuados para simular el comportamiento del cuerpo discontinuo. Concretamente se puede hablar de modelos sintéticos. De esta forma se consigue un cuerpo continuo artificial cuyo comportamiento corresponde al del macizo rocoso.

El modelo FES para la roca “fisurada, elástica, saturada” presenta un firme interés, ya que permite definir las características de deformación, porosidad, permeabilidad e inyectabilidad del macizo utilizando solamente pocos datos, muchos de los cuales, son meramente de naturaleza geométrica (Lombardi, 1987).

El modelo se aplica muy bien a la simulación de las deformaciones del macizo bajo un estado de esfuerzos inferiores al límite que produce la falla por esfuerzos de corte.

Considerando una matriz rocosa elástica y la existencia de superficies de discontinuidad que nunca son perfectamente lisas, la presión necesaria para cerrar la abertura de las discontinuidades depende del ancho máximo de cada discontinuidad, de la forma de las rugosidades, del posible material de relleno de la fisura y del módulo de deformación o de elasticidad de la matriz rocosa.



Una fisura no es completamente abierta sin ningún contacto entre sus paredes, ni tampoco una superficie continua con contacto perfecto de los dos labios; más bien es una serie de zonas en contacto y de otras zonas abiertas.

Un tipo de relleno frecuente en las discontinuidades es el agua. Si los vacíos están totalmente llenos de agua se habla de roca saturada. En caso contrario, se dice que la roca está parcialmente seca. Si las fisuras comienzan a rellenarse por la acción de la presión de inyección, el agua rellenará la totalidad de los vacíos; a partir de este momento, la masa seguirá las leyes del cuerpo saturado. En este modelo, la influencia de la presión intersticial del agua es muy importante y claramente visible en los resultados. La resistencia del macizo rocoso será función de la presión total, de sus desviadores y de la presión intersticial.

Existe un estado en el que la fisura presenta un equilibrio entre la presión neutra, la efectiva y la total. Implícitamente se hace la hipótesis de que la porosidad y la permeabilidad de la roca son inferiores a las de las fisuras, de forma que la presión neutra en la roca puede despreciarse.

Considerando las diferentes aberturas de las fisuras que afectan a una masa de roca, con el modelo FES puede obtenerse una relación gráfica para un caso particular, en donde se ven las variaciones de la presión total, de la presión efectiva y de la deformación unitaria que ocurren en un momento dado en las fisuras del macizo rocoso. La aplicación del modelo es normalizada, pero sus resultados son obviamente distintos según la roca y el tipo de fisuración.

El modelo permite observar la deformación rápida de la roca no drenada y de la presión intersticial constante, el efecto de drenaje del macizo, de las variaciones de la presión intersticial y de la carga exterior sobre las dilataciones, así como cualquier combinación de estas variables.

Se puede investigar la influencia de la intensidad de fracturación sobre la compresibilidad del macizo.

Utilizando la misma base física puede simularse la porosidad, la filtración del agua (permeabilidad) y los productos o mezclas de inyección a lo largo de las superficies de discontinuidad mencionadas. Para este propósito es necesario esquematizar la topología de la fisura.

Desarrollando los cálculos hidráulicos necesarios puede determinarse el flujo de agua en función de un gradiente dado, es decir, obtener la permeabilidad del macizo para cada valor del grado de cierre de la fisura. Este hecho explica que a grandes profundidades las fisuras son generalmente cerradas y la permeabilidad muy limitada. Por otro lado, se entiende que existe un gradiente hidráulico débil alrededor de las galerías drenantes en donde la roca es descomprimida aún en caso de grandes profundidades importantes bajo el nivel freático.

El problema de la inyección de la roca fisurada usando mezclas de cemento es de suma importancia en la ingeniería civil, ya que tiene por objeto impermeabilizar o bien consolidar la masa de roca, debiéndose tomar en cuenta que la mezcla es un cuerpo Binghamiano con viscosidad y cohesión.

El caudal de mezcla inyectada a través de una fisura varía debido al grado de cierre de la misma y al gradiente ocasionado por la presión de inyección. La variación del caudal puede ser muy amplia, incluso ser nulo, debido a que por la naturaleza cohesiva de la mezcla, existe un valor límite del

gradiente que la hace fluir. En el caso de inyectar agua, dada su naturaleza de cuerpo Newtoniano, el flujo nunca se detiene. Este hecho permite afirmar que el ensayo de presión de agua (prueba Lugeon) permite una evaluación de la permeabilidad de la roca antes y después de la inyección, pero nunca puede ser un indicador aceptable de la cantidad de mezcla por utilizar.

Con los principios del modelo FES, considerando fisuras de diferente espesor en las que se inyecta una mezcla con propiedades específicas como cohesión y viscosidad a una determinada presión, puede determinarse, el volumen de mezcla posible de inyectar y por tanto la distancia hasta la cual se inyectara a partir de un punto en la masa de roca, hasta lograr un flujo nulo de la mezcla. La figura 16 muestra los resultados que se obtendrán si las fisuras fueran planas y de espesor constante. En una masa de roca con fisuras éstas tendrían espesores y rugosidades con una variabilidad amplia, por lo que curvas en la figura que representan un recorrido de la mezcla igual independientemente del espesor de la discontinuidad que es inyectada ($R=\text{constante}$) representan la aplicación de un procedimiento de inyección uniforme en la masa de roca en que se realice. Curvas de este tipo ayudan a regular y controlar los procesos de inyección según el Método GIN como se verá más adelante.

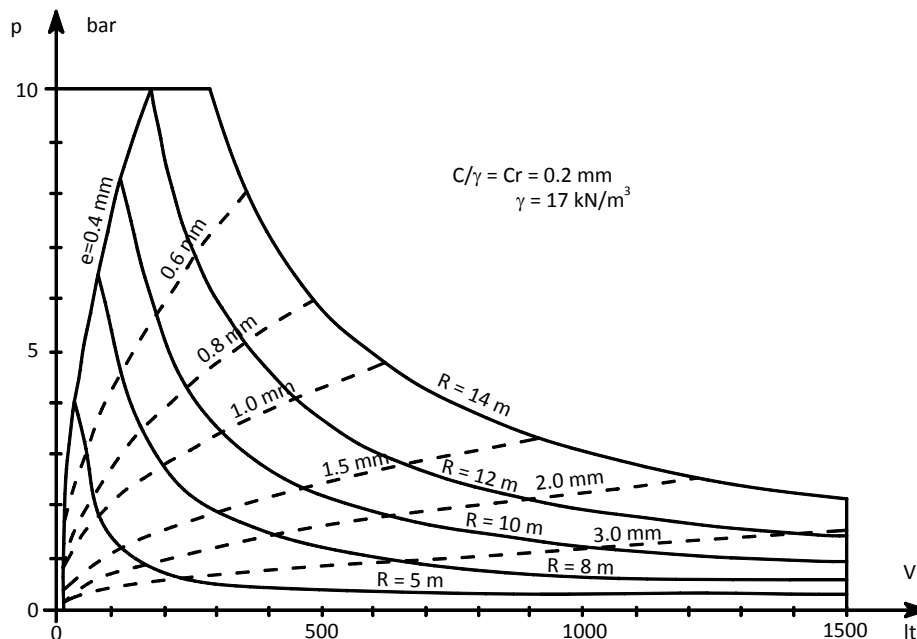


Figura 16. Inyección de una fisura plana de espesor (e) constante (Lombardi, 1987).
 p = presión, V = volumen, R = distancia máxima inyectada al detenerse el flujo

Actualmente se dispone de una base seria para investigar y diseñar la inyección de un macizo rocoso, ya sea para consolidarlo o para impermeabilizarlo.

Es fácil apreciar como el modelo FES puede tomar en cuenta la existencia de distintos sistemas de discontinuidades, cada uno con sus propias características y parámetros.



Si bien el presente modelo permite un gran número de aplicaciones de interés para la ingeniería, no cabe duda que podrá ser completado y ampliado en un futuro para tomar en cuenta otros efectos, por ejemplo las deformaciones que no sean meramente elásticas. Está claro que este modelo, como cualquier otro, queda limitado a un cierto tipo de rocas y a ciertas condiciones; en particular se limita a un estado de esfuerzos inferior al límite de falla en un macizo rocoso elástico.



2.6 Materiales inyectables.

La inyección de macizos de roca se realiza principalmente para impermeabilizarlos, reduciendo la posibilidad del paso de agua a través de los conductos que esta pudiera tener, o para “consolidarlos”, proporcionando rigidez a la masa mediante el relleno de sus espacios vacíos.

Para lograr lo anterior, pueden utilizarse diferentes materiales o mezclas de ellos como: cemento, con o sin aditivos químicos o cenizas, bentonita o arcillas o polvo de sílice, resinas, silicatos y otros productos químicos.

Las mezclas más utilizadas en la inyección son de agua con cemento mas algunos aditivos que le proporcionan principalmente fluidez, para lograr una penetración aceptable en las fisuras de los macizos rocosos.

En el presente trabajo se considera la utilización de mezclas agua-cemento con superfluidificantes como aditivo químico, particularmente las mezclas llamadas estables. Se comentará sobre otros tipos de mezclas utilizadas en el pasado con el propósito de evidenciar los beneficios de uso de las mezclas estables.

El aspecto más importante del cemento utilizado en las mezclas es su finura, procurándose recurrir a los más finos para lograr mejor penetración en las fisuras (finura Blaine $> 4500 \text{ cm}^2/\text{gr}$). El agua debe de ser limpia, sin grasas, aceites, materia orgánica o sulfatos. El aditivo superfluidizante debe proporcionar fluidez y viscosidad adecuada a la mezcla para su manejo e inyección en las fisuras de la masa de roca.

2.7 Mezclas agua - cemento.

2.7.1 Definición de la relación agua - cemento.

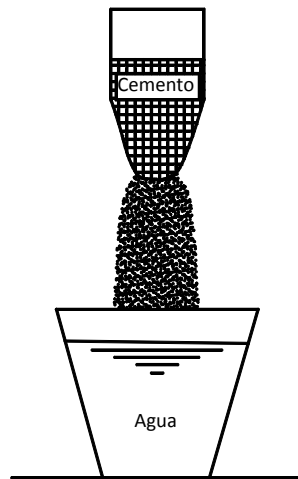
Esencialmente la lechada o mezcla de cemento, es la unión de cemento y agua.

Es una regla bien establecida en tecnología del concreto la manera de definir la relación o proporción agua cemento (a/c), la cual es "agua para cementar" por el peso del cemento (por ejemplo $a/c=0.5$ corresponde a 0.5 kilogramos de agua añadidos a 1.0 kilogramo de cemento). En el campo de las inyecciones los hábitos son erráticos; a veces se refieren a esta proporción, a veces a su inverso, a veces la relación se establece en peso y a veces en volumen. Este presente trabajo siempre se referirá a la relación agua:cemento en peso.

Cabe señalar que llegan a existir confusiones dentro de la tecnología del concreto, por lo que algunos piensan en evitar desórdenes adicionales. Ante ello, es preferible el manejo de la proporción a/c tal y como se muestra en la figura 17 (Lombardi, 2003).

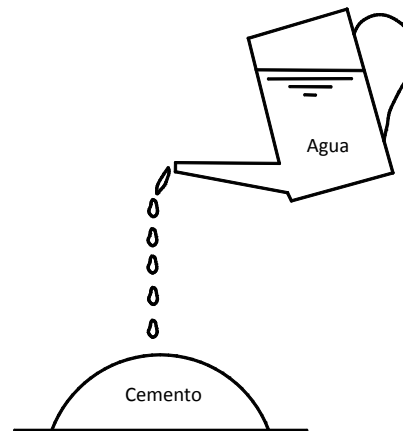


Ocasionalmente empleado en la inyección



c/a = Cemento sobre agua

En tecnología del concreto



a/c = Agua sobre cemento

Figura 17. Definición de la relación agua - cemento (Lombardi, 2003).

2.7.2 El papel del agua.

El agua cumple diversas funciones en la mezcla agua-cemento.

- a) Una primera función es permitir la hidratación del cemento para lograr una buena reacción química del mismo; para ello se requerirá una $a/c=0.3$ o 0.4 .
- b) Una segunda función del agua es proporcionar a la mezcla una cohesión y viscosidad reducidas, con el propósito de que penetre a través de las fisuras en la masa de roca. Esta función puede lograrse, al menos parcialmente, usando productos químicos como plastificantes; para ello requiere adicionar una mayor cantidad de agua, equivalente a una relación a/c de 0.3 , aunque esto depende sobre todo de la finura Blaine del cemento (relación entre la suma de áreas superficiales de los granos contenidos en un gramo de cemento).
- c) La tercera función del agua es compensar la pérdida de ella durante la inyección, por ejemplo, al inyectar una roca seca. Esta cantidad adicional de agua es muy difícil de estimar; sin embargo, si se está bajo el NAF, en roca saturada, esto no ocurre y cuando se encuentra arriba del NAF puede evitarse saturando la masa de roca previamente a la inyección.
- d) Un papel adicional atribuible al agua es el de operar como un “abridor de juntas”, al actuar como una cuña ante el empuje de la mezcla que se está inyectando. Sin embargo, este papel puede ser realizado por el agua existente en el medio que se inyecta o por la de saturación, y que es presionada por la misma lechada sin que para ello haya necesidad de incluir agua adicional.



Cuando se usa un cemento Portland normal la relación agua - cemento total sería del orden de 0.6 a 0.7, el cual sería un valor mínimo, pero también un valor adecuado en la gran mayoría de los casos (ver tabla 5). Para cementos micro finos se requeriría una proporción a/c más alta, por ejemplo de 1.0 o 1.2 (Lombardi, 2003).

Tabla 5. Algunos ejemplos de mezclas pesadas usadas en un número importante de presas y túneles (Lombardi, 2003).

| Presas | a/c | Fluidificante (*) |
|---------------------------------------|-----------|---|
| Paute (Ecuador) parte más alta | 0.6 | Intraplast 1.4% |
| Alicurá (Argentina) | 0.67 | Intraplast 1.2% |
| El Cajón (Honduras) | 0.7 | Bentonita 0.2% |
| Presas Clyde (Nueva Zelanda) 2a parte | 0.6 | Intraplast 1% |
| El Chocón (Argentina) reparaciones | 1 | Bentonita 0.5% |
| Sir (Turquía) | 0.7 o 1.0 | Cemento puzolánico, Mistra 1% Bentonita 1.2% |
| Katze (Lesotho) | 0.59 | Cemento + Ceniza Complast 1.5% |
| Pichi Picún Luefu (Argentina) | 0.7 | Varios |
| Potrerrillos (Argentina) | 0.7 | Rheobuild/Viscocreto 0.7 - 0.8% |
| Ait Hamou (Marruecos) | 1 | Bentonita 2% |
| Túnel de acceso Casecnan (Filipinas) | 0.63 | Intraplast 1% |

(*) El porcentaje de fluidificante está expresado como porcentaje en peso del cemento.

2.7.3 Mezclas ligeras a pesadas.

La discusión sobre el tipo de mezcla por usar: "ligera o pesada", es completamente vieja (Deere, Lombardi 1985).

La calificación de si una mezcla es ligera o pesada depende de la relación a/c con que está fabricada.

Históricamente se desarrolló la receta de inyectar espesando las mezclas de lechada en pasos progresivos dependiendo de un cierto consumo logrado a cierta presión. Se fueron desarrollando varias reglas completamente personales, del tipo: "usted inyecta 200 l de agua teñida con colorante del tipo a/c = 20, después 200 l de agua de colores del tipo a/c = 10, posteriormente inyecta otra vez 200 l de un agua sucia con una proporción a/c = 5, etcétera, hasta que usted posiblemente alcance, por casualidad, una verdadera mezcla de lechada del orden pedido de más o menos a/c = 1".

La idea básica era la de tratar de comenzar la inyección con un líquido similar al agua, que presentara una resistencia baja a la inyección, e ir aumentando su cohesión paso a paso, usando líquidos que permitieran reducir la viscosidad poco a poco, con la finalidad de que fuera posible inyectar la mezcla pesada en las fisuras. Como ingrediente de estas mezclas se incluía un material que las aligerara y permitiera su introducción en las fisuras más pequeñas (bentonita).



La principal dificultad de este procedimiento se debía a que no era posible anticipar la terminación del proceso o cual sería la última mezcla a utilizar, y por consiguiente la calidad de los trabajos realizados. De hecho las etapas eran inyectadas con una mezcla de calidad diferente.

De este modo, podía observarse, que el tramo inyectado de un socavón, la parte inferior de las fisuras verticales estaban llenas de una "harina" blanca, formada por granos sueltos de cemento hidratado, mientras que la parte superior de las fisuras estaban vacías. "El agua de colores" solo había penetrado a la masa de roca.

Como se ha verificado en muchas ocasiones, la resistencia mecánica final y la resistencia química (durabilidad) de la mezcla, aumentan al disminuir el espesor de las fisuras por reducción brusca del contenido de agua en la mezcla, la cual constituía un exceso al ser introducida en la masa de roca (Lombardi, 2003).

También se ha probado que la mezcla pesada no quita o desplaza a las mezclas ligeras y las sustituye.

Como se muestra en la figura 18, la velocidad de penetración de la lechada en una junta no es uniforme; es más alta en el centro de la junta y menor cerca de las paredes de la misma. Por consiguiente, al final de la inyección, las paredes de las juntas estarán cubiertas por material débil, similar a las mezclas delgadas, mientras que el corazón estará lleno por un cuerpo de cemento menos débil, resultante del endurecimiento de una mezcla más pesada.

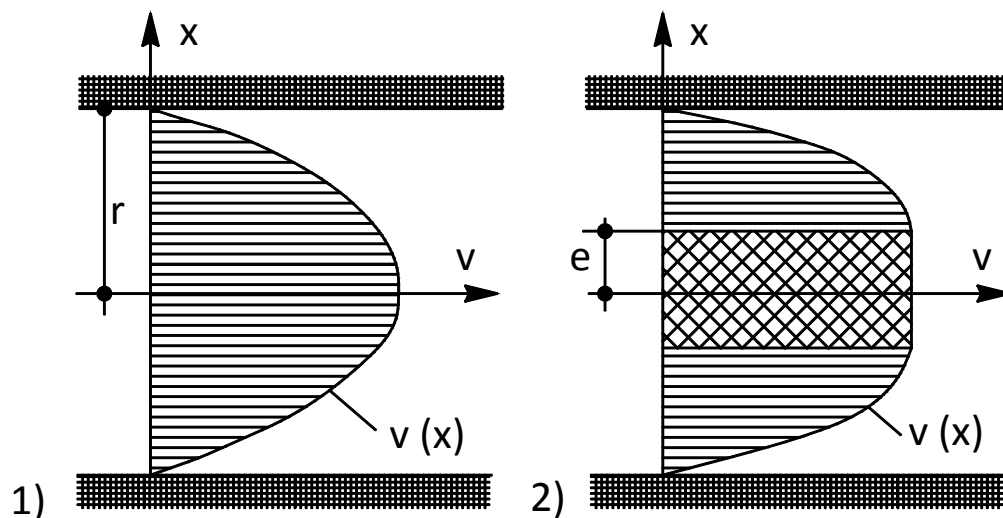


Figura 18. Distribución de la velocidad de la lechada en una junta. (Lombardi, 2003).

- 1) Fluido Newtoniano (e.g. agua).
- 2) Cuerpo Binghamiano (e.g. lechada de cemento). $2e$ = espesor del núcleo de la lechada inyectada. La distribución no uniforme de velocidad hace que la lechada se adhiera a las paredes y que continúe fluyendo en el centro de la junta.

Esta condición de la lechada a menudo puede observarse en corazones de perforaciones obtenidos en una masa de roca inyectada.

Lamentablemente las propiedades mecánicas y químicas de este "emparedado" son dictadas por las capas externas más débiles, correspondientes a la mezcla más ligera usada; incluso, la presencia de agua subterránea o agua de saturación puede producir una capa de lechada débil o "deslavada" respecto a las características de la mezcla inyectada.

Con relación a la penetración de la lechada en juntas finas, en la figura 19 se observa que es ilusorio creer que las mezclas ligeras penetran mejor que las gruesas. El diámetro de los granos o grumos que se pueden formar con relación a la abertura de las juntas es el determinante de la distancia de penetración, y no la cantidad del agua que tendrá que fluir alrededor de los granos y seguir su camino a lo largo de las juntas.

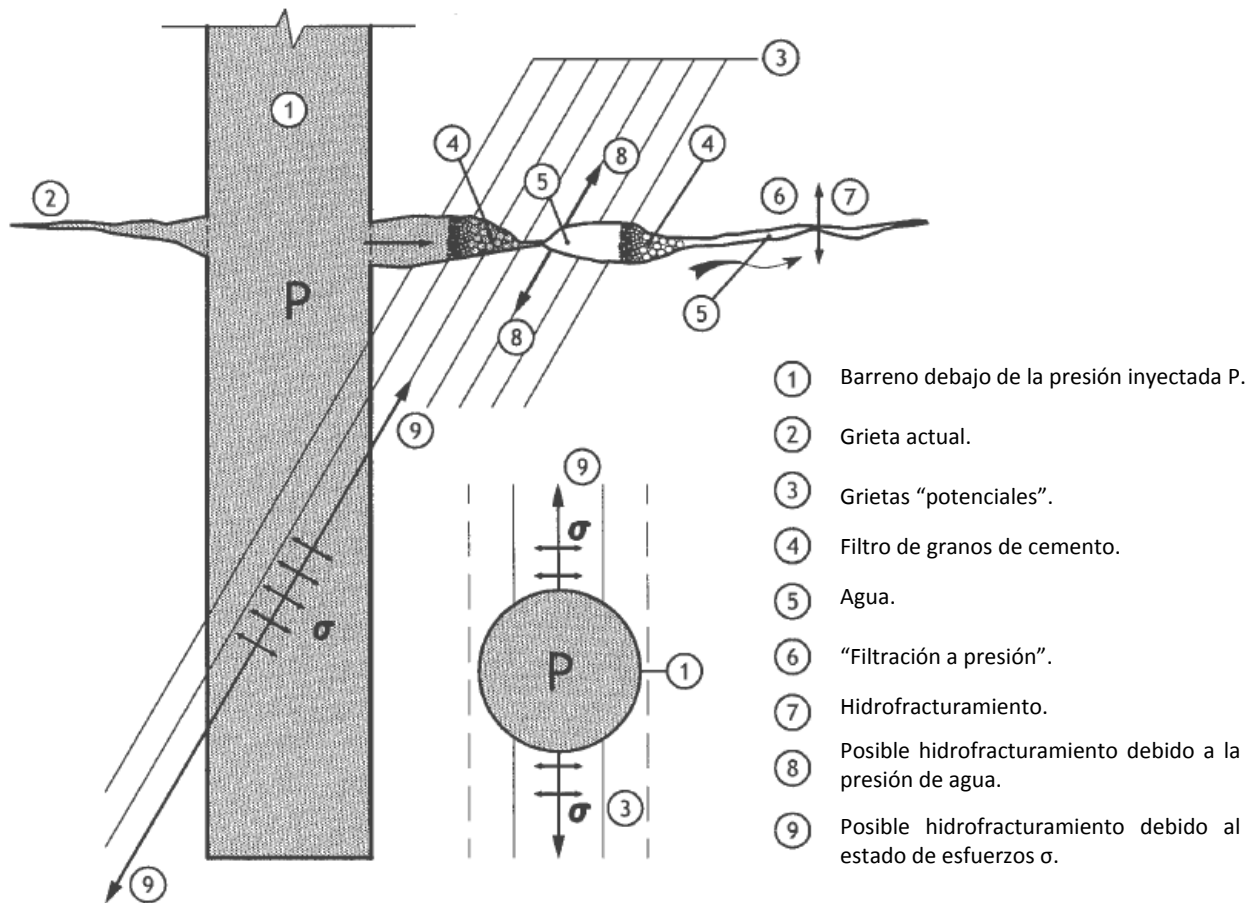


Figura 19. Penetración de una mezcla ligera bajo presión en una junta (Lombardi, 2003).

La teoría "filtración a presión", desarrollada hace décadas para explicar este proceso y que asume que a mayor presión mayor relleno de fisuras, es considerada inadecuada.

Para facilitar la penetración de la lechada de la perforación a las juntas existen varias posibilidades:

- Adicionar un plastificante en la lechada para evitar la formación de grumos de cemento ocasionados por fuerzas eléctricas.
- Utilizar un cemento más fino.
- Manejar una mayor presión de inyección.
- Contar al menos con agua presurizada delante de una mezcla pesada para abrir las uniones y así, el camino a los granos de cemento.

En conclusión, existen buenas razones para abandonar la técnica clásica "de la serie de mezclas ligeras a mezclas pesadas" y utilizar técnicas modernas de inyección.

Uno de los inconvenientes principales con mezclas ligeras es que no son estables. Su progresión en las juntas es imprevisible (ver figura 20). Por ser inestables, se contraerán más que las mezclas pesadas y al final del proceso el ajuste o retaque de barrenos será mayor.

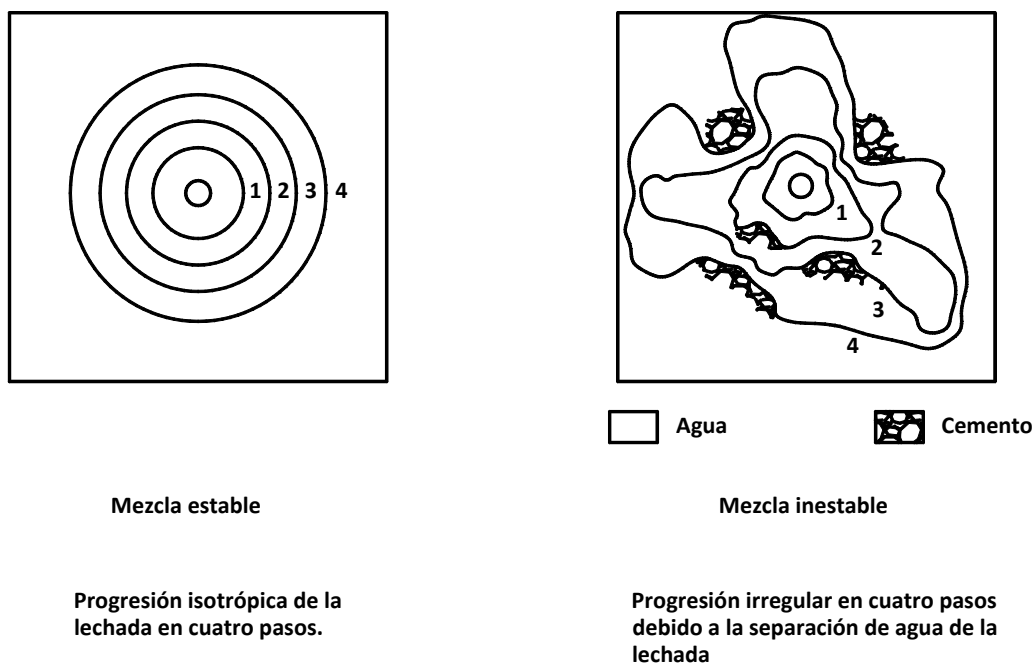


Figura 20. Pruebas de inyección experimental en una grieta de espesor constante (Lombardi, 2003).

2.7.4 Mezclas estables e inestables.

Los motivos para usar mezclas pesadas, también llamadas "mezclas estables", que presentan una sedimentación en bureta dejando al menos 5% de agua libre en un periodo de 2 horas son numerosos, y se encuentran relacionados con sus propiedades finales después de inyectada en las grietas de roca.



Las principales ventajas de las mezclas estables sobre las mezclas ligeras o inestables son:

- a) Relleno completo de vacíos y juntas por cemento, evitando burbujas debido a un exceso de agua.
- b) Alta resistencia mecánica.
- c) Reducido potencial de contracción, el cual trata de evitar, o al menos limitar, la formación de micro grietas que se generarían al endurecerse la mezcla.
- d) Mejor liga con las superficies de roca (atribuible a las altas presiones de inyección requeridas).
- e) Alta resistencia contra sustancias químicas (Lombardi, 2003).

Debido a los buenos resultados obtenidos en muchas presas, se ha optado por el empleo de mezclas estables o pesadas para rellenar grietas.

2.7.5 Propiedades de la mezcla.

Para juzgar una mezcla deben ser considerados dos grupos de propiedades, dependientes uno del otro.

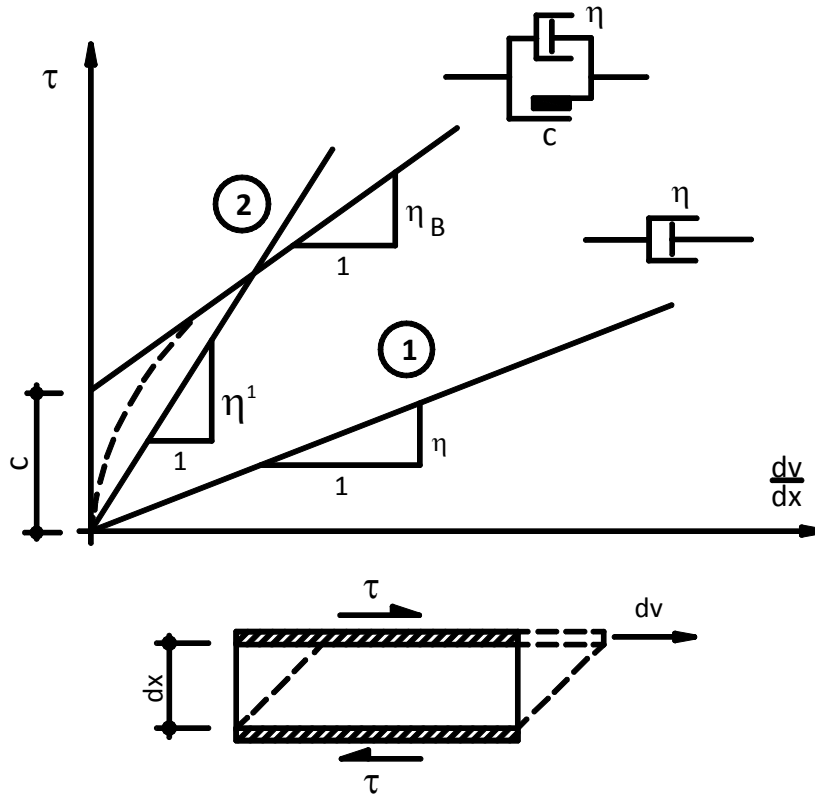
El primer grupo se refiere a la mezcla fresca, que es "una suspensión" de granos en el agua y tiende a seguir la ley de cuerpo Binghamiano, mientras que el agua es un cuerpo Newtoniano (ver figura 21).

El primer grupo incluye principalmente:

- a) Densidad.
- b) Exudación.
- c) Viscosidad.
- d) Cohesión.
- e) Tiempo de fraguado.

El segundo grupo de propiedades concierne esencialmente a la mezcla endurecida, consistiendo en:

- a) Resistencia mecánica.
- b) Resistencia a los agentes químicos.
- c) Permeabilidad.



τ = Esfuerzo cortante $\frac{dv}{dx}$ = Velocidad al corte

① Cuerpo Newtoniano (solo viscosidad) : (agua)

$$\tau = \eta * \frac{dv}{dx}$$

② Cuerpo Binghamiano (cohesión y viscosidad):

(aproximación para una mezcla)

$$\tau = c + \eta_B * \frac{dv}{dx}$$

----- Mezcla real estable c = Cohesión

η = Viscosidad dinámica η_B = Viscosidad plástica η^1 = Viscosidad aparente

Figura 21. Reología de una mezcla de cemento contra agua (Lombardi, 2003).

Las propiedades reológicas de la mezcla son de gran interés en la inyección, ya que su manejo puede ser decisivo durante el proceso. Cabe señalar que esas propiedades pueden ser modificadas con la utilización de varias adiciones disponibles en el mercado.

En la figura 22 se muestra la influencia que presenta en una mezcla la adición de agua, de bentonita o de algún producto químico plastificante (como el Intraplast), en la resistencia mecánica a los 28 días de edad y en la viscosidad de la mezcla, medida como tiempo en el cono Marsh.



Comenzando con una proporción a/c de 0.67 (punto A, figura 22) la adición de un plastificante Intraplast en la lechada causa una disminución del tiempo de flujo y de su resistencia mecánica.

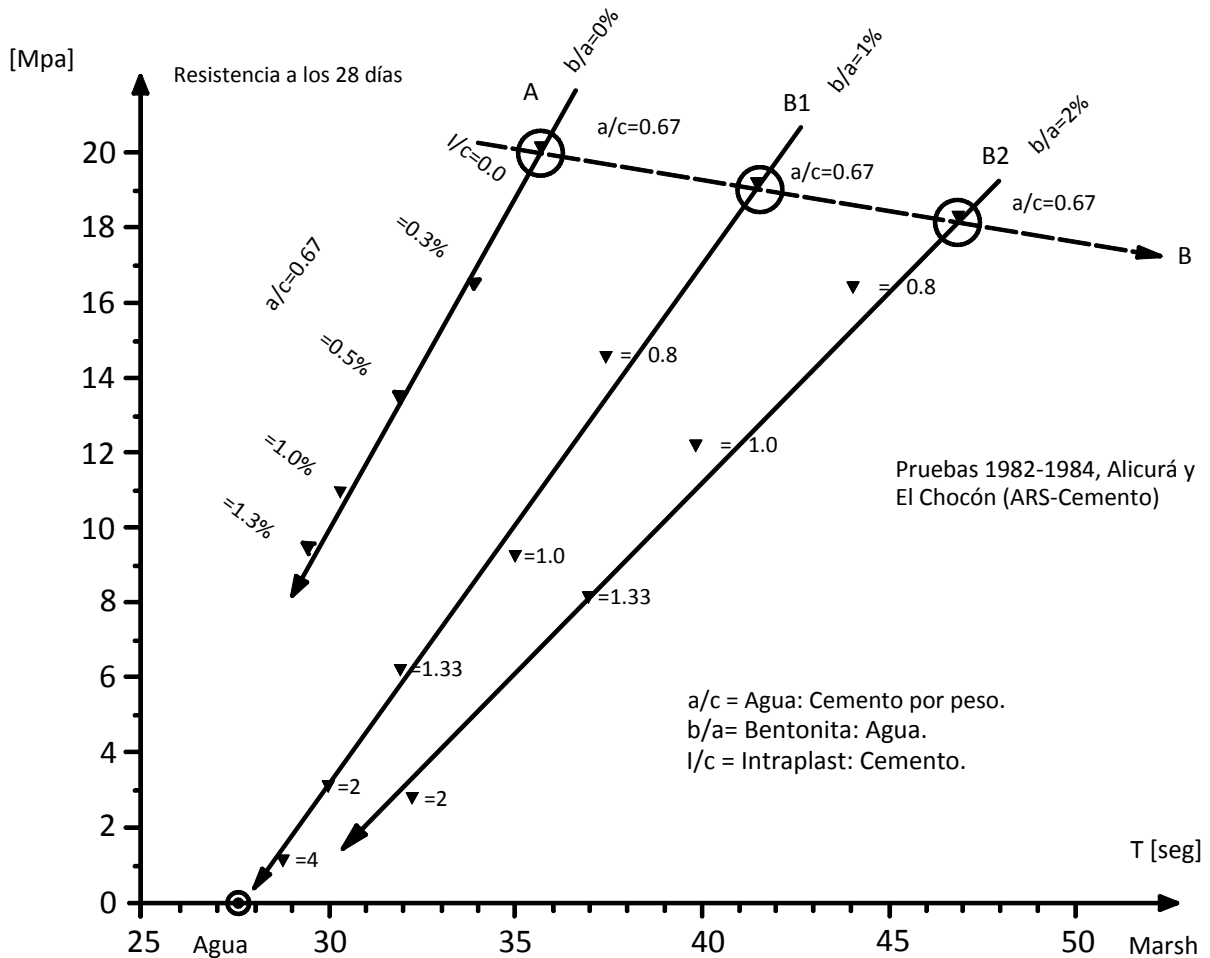


Figura 22. Resistencia a los 28 días contra tiempo de flujo en cono Marsh (Lombardi, 2003).

Usando bentonita (% de $b/a = 1$), iniciando con una proporción a/c de 0.67 (punto B1), el aumento de esta proporción causa un efecto similar al anterior, hasta llegar a las propiedades de viscosidad y resistencia del agua pura, la cual es nula.

Si se usa una proporción de b/a del 2 %, la reducción de la resistencia también puede ser total pero el tiempo de flujo en el cono Marsh resulta más alto; por consiguiente, el efecto de la bentonita añadida genera un proceso inverso al de lubricación (Lombardi, 2003). La adición de bentonita a una mezcla de agua/cemento es un modo indirecto de lograr el exceso de agua buscado de la mezcla* (ver figura 22).

Para una resistencia final requerida en la mezcla endurecida, se obtiene una disminución de la viscosidad mayor al agregar un plastificante adecuado que al agregar bentonita.

*La intención es conseguir una mezcla barata, apropiada para llenar los vacíos de la masa de roca, siempre y cuando no sea lo más importante lograr una mezcla mecánica y químicamente resistente (Lombardi, 2003).



Para concluir, las propiedades requeridas de la mezcla tienen por objetivo permitir una penetración fácil, así como el presentar una cohesión, viscosidad y flujo que pueden obtenerse con aditivos adecuados sin poner en peligro las propiedades finales de la mezcla y la calidad de los trabajos de inyección, tal y como sucede cuando la proporción a/c es aumentada.

Obviamente, siempre se requiere que un contenido de agua mínimo de la mezcla evite el desarrollo de fricción interna en ella, por lo que se pretende obtener un equilibrio óptimo entre los dos grupos de propiedades.



2.8 Los objetivos de la inyección.

2.8.1 Principales aspectos.

El objetivo de la inyección es llenar los vacíos abiertos que existan en una masa de roca por medio de presión, a través de barrenos, apoyándose de una cierta cantidad "líquida", de suspensión que se endurecerá más tarde. Las propiedades del inyectado pueden ser modificadas según las necesidades que se requieran.

Se pretende que en la inyección se corrija lo siguiente:

- a) Reducir la permeabilidad de la masa de roca.
- b) Reducir su deformabilidad.
- c) Aumentar su resistencia ante las fuerzas de corte.

La importancia relativa de estos tres objetivos en los trabajos de inyección depende obviamente del material inyectable.

Además, existen otros aspectos que deben considerarse:

- a) La viabilidad de realizar la inyección;
- b) La deformación de la masa de roca producida por el proceso de inyección;
- c) La durabilidad de los efectos del beneficio esperados;
- d) La economía del tratamiento, o sea el costo y el tiempo requerido para realizarlo.

2.8.2 Limitaciones de la inyección.

Hay varias condiciones y circunstancias que pueden limitar un proceso de inyección. Algunas de ellas serían las siguientes:

- a) El exceso de agua puede obligar al uso de aditivos no solubles.
- b) Las temperaturas demasiado bajas pueden provocar daño por congelamiento.
- c) Se puede correr riesgo de dañar estructuras existentes; por ejemplo, en un sistema de desagüe no es aconsejable un trabajo de inyección.
- d) Las consideraciones ecológicas pueden impedir el uso de ciertos tipos de mezclas.

2.8.3 Deformación de la masa de roca.

Un aspecto de la inyección que en algunas ocasiones es ignorado, es la deformación que inevitablemente sufre cualquier masa de roca cuando es inyectada, debido a la presión que tiende a abrir las grietas o fisuras. Esta deformación puede producir levantamiento del terreno, que a menudo es limitado por alguna especificación, y que debe ser un requisito previo en cualquier proyecto de inyección (ver figura 23).



Figura 23. Levantamiento inevitable del terreno a causa de la inyección (Lombardi, 2003).

Este aspecto no es tomado generalmente en consideración, ya que pocas veces se ha presentado; sin embargo, la condición puede presentarse en zonas muy fracturadas de roca (ver figura 24). Una zona de roca altamente fracturada puede presentarse entre dos bloques masivos.

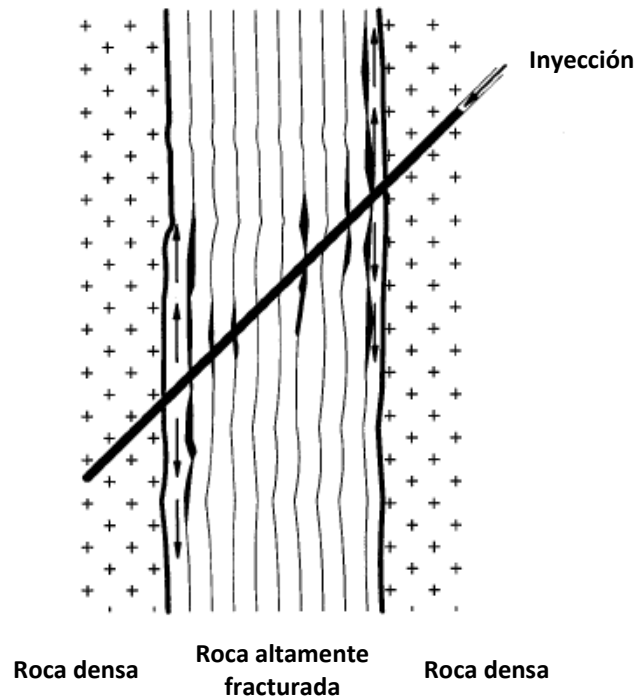


Figura 24. Diferencia de penetración de lechada en fisuras gruesas y finas de un mismo macizo rocoso (Lombardi, 2003).

Suponiendo una frecuencia de 10 grietas finas por metro y utilizando un cemento convencional, cada una de las grietas deben abrirse 0.3 mm para ser inyectadas y rellenadas correctamente de cemento. Esto causaría una deformación de la masa de roca de 3/1000 en la dirección correspondiente. Si el módulo de deformabilidad de la masa de roca es de 20 GPa, la inyección produciría un esfuerzo compresivo transversal en la masa de roca de 60 MPa, lográndose una abertura uniforme de todas las grietas, así como una más alta presión de inyección.



Como una presión de inyección tan alta no es factible, sólo algunas de las juntas pueden ser abiertas y rellenadas. Si se usara una presión de inyección tan alta como 6 MPa, sólo una de las 10 juntas sería inyectada.

La verdadera situación es aún peor porque las grietas no son idénticas; entonces, una de ellas se abriría primero, mientras que las demás tenderían a cerrarse y posiblemente no serían inyectadas (Lombardi, 2003).

Por consiguiente, los objetivos del proceso de inyección no se alcanzarán debido a una limitación real.

Para solucionar el problema, debe usarse un cemento más fino o productos químicos en vez del cemento normal.

2.8.4 Durabilidad del tratamiento.

Se ha observado que algunas pantallas de impermeabilización empleadas en cortinas para presas prácticamente desaparecieron después de varias décadas (Lombardi, 2003), debido a que se usaron mezclas con alto contenido agua/cemento y éstas fueron lavadas por el agua al circular por las grietas del macizo rocoso.

Para que una mezcla de cemento fraguada sea dañada se requieren dos condiciones:

- a) que la mezcla fraguada sea débil y esté débilmente unida a las paredes de las juntas y,
- b) la posibilidad de que el agua circule en las juntas.

Ésta última condición ocurre cuando las presiones de inyección están por debajo de la presión de agua final a que estará sometida la masa de roca cuando la mezcla puede contraerse y dejar un camino al agua a lo largo de las juntas, o bien cuando existen huecos dejados por el agua extruida de la mezcla.

Obviamente, la durabilidad de la inyección no es importante siempre, ya que en ocasiones sólo se requiere una impermeabilización temporal durante la construcción de estructuras permanentes. Sin embargo, en muchos casos, la necesidad de repetir los trabajos de inyección después de varios años puede tener severas consecuencias para la economía del proyecto.

Estos aspectos deben ser considerados por el proyectista en los trabajos de inyección, ya que se reconoce que el problema no es fácil para ser cuantificado, y que en ocasiones sólo un juicio de ingeniería y la experiencia ayudan a solucionarlo.



2.9 Pruebas de presión de agua.

Desde hace casi un siglo se acostumbra usar pruebas de presión de agua para evaluar la permeabilidad de una masa de roca antes y después de su tratamiento por inyección. Entre ellas está la prueba Lugeon (Lombardi, 2003), la cual aunque solo proporciona algunos criterios burdos es simple y útil.

Algunas interpretaciones de estas pruebas son muy simplistas y algunos hábitos en la práctica de las inyecciones justifican el escepticismo respecto a sus resultados. Por ejemplo, existía una regla básica en el sentido de que una cortina de inyecciones era necesaria cuando el valor Lugeon presentaba un cierto límite sin tomar en cuenta el tipo de presa, su altura y tipo de cimentación.

Otra interpretación errónea es la relación estadística entre los valores de la prueba Lugeon y el volumen esperado para la inyección.

En efecto, la absorción del agua es correlacionada con el volumen de lechada que pretende inyectarse, lo cual no es válido, ya que la primera es un cuerpo Newtoniano y la mezcla de cemento es una suspensión de granos de un cierto tamaño que sigue, al menos aproximadamente, las leyes de un cuerpo Binghamiano.

Una frecuencia alta de grietas finas podría dar el mismo valor Lugeon que una grieta amplia única. En este último caso el consumo de lechada sería muy alto, mientras que en el primer caso pudiera ser que ningún cemento sellara las grietas finas. En ejercicios teóricos tales como las correlaciones estadísticas, las verdaderas condiciones del proceso de inyección son ignoradas.

De hecho, la experiencia muestra que las pruebas de presión de agua pueden dar, en el mejor de los casos, una indicación aproximada de la reducción de permeabilidad obtenida por un trabajo de inyección, pero son prácticamente inútiles para definir el consumo de lechada esperada, así como la indicación correcta de la inyectabilidad de la masa de roca.

El grado de inyectabilidad sólo puede definirse por pruebas de inyección. Por ello es que las pruebas de agua realizadas en cada etapa de inyección representan un desperdicio de dinero, sin ningún efecto benéfico en el proceso de inyección. Incluso puede tenerse un efecto desfavorable, ya que las pruebas Lugeon podrían causar daño al reabrir grietas ya inyectadas.

2.10 Distensión e hidrofracturamiento (Hidro - jacking and hidro - fracturing).

Dos conceptos que a menudo son vagamente entendidos, son "distensión" e "hidrofracturamiento". Esta confusión puede conducir a decisiones incorrectas en el momento de la inyección.

Se llama distensión a la abertura por penetración de la lechada en juntas preexistentes en la masa de roca, mientras que el hidrofracturamiento describe la formación de nuevas grietas debido a un aumento de presión del agua o de la mezcla.

El hidrofracturamiento es un acontecimiento que rara vez ocurre durante los trabajos de inyección en la ingeniería civil. No todos los casos observados en que cae la presión durante la inyección pueden ser interpretados como un hidrofracturamiento. Las juntas preexistentes también pueden abrirse de repente por una especie de inestabilidad elástica como muestra la figura 25.

En la práctica el verdadero hidrofracturamiento está relacionado con las juntas potenciales ya mencionadas como los planos de estratificación débiles. La abertura de tales planos se debe a los esfuerzos de tensión inducidos en la roca compacta por la presión cercana de la mezcla o del agua.

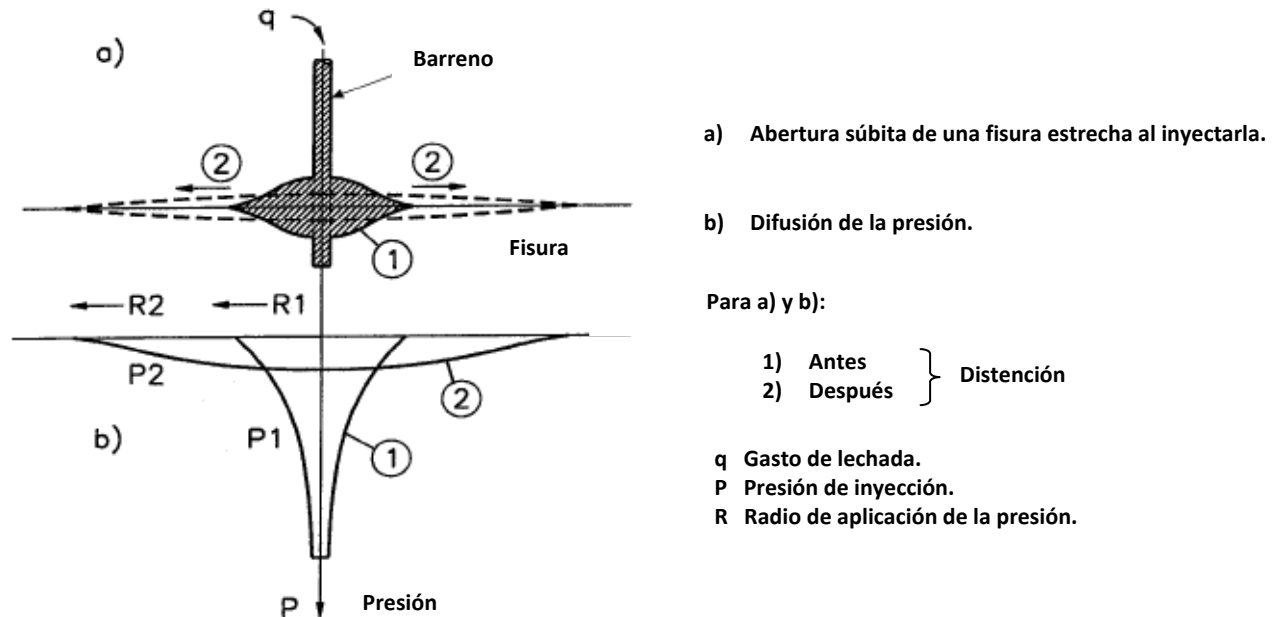


Figura 25. Distensión o rompimiento, como un caso "de inestabilidad elástica" (Lombardi, 2003).

El hidrofracturamiento sucede con más frecuencia cuando la perforación es paralela a los planos de debilidad, mientras que la distensión ocurre independientemente del ángulo que formen la perforación y las grietas (ver figura 19).



Como se aprecia en la figura 19, es posible la combinación de hidrofracturamiento y distensión. Sin embargo, el riesgo es más alto cuando el agua o una mezcla ligera son presionadas en las juntas "potenciales" finas en las que a una mezcla pesada le cuesta penetrar.

La pregunta principal es si una hidrofractura es siempre dañina o no, mientras que la distensión es fundamentalmente la expresión de la inyección eficaz que llena, sin ninguna presión, los vacíos en la masa de roca.

Si se usa una mezcla con buenas propiedades de liga con la roca y se presenta una hidrofractura, esta no es dañina desde el punto de vista técnico, excepto si se produce una penetración poco profunda de mezcla.

El término francés a menudo usado de "claquage" puede aplicarse a ambos casos y se refiere principalmente a la abertura repentina de un nuevo camino para la lechada, que se concentrará a lo largo de ciertas superficies tal y como se interpreta en la figura 25.

La distensión y el hidrofracturamiento están relacionados con las fuerzas de separación de las juntas consideradas. Estas fuerzas son obviamente la suma de las presiones que actúan en cualquier elemento de la superficie de la junta. Son función de la presión aplicada en el barreno y también de la extensión de la superficie sometida a presión. Puede suponerse, como aproximación aceptable, que dicha superficie esta de algún modo relacionada con el volumen de la lechada inyectada antes de que esta fragüe.

2.11 Penetración de la lechada.

El proceso de penetración de lechada bajo la presión en las juntas de roca depende de varios factores. El primero es la geometría de las grietas, que significa su forma y variaciones en su abertura, su extensión y las interconexiones entre ellas.

Hay casos muy complicados que fueron analizados desde un punto de vista teórico; sin embargo, los aspectos más importantes del proceso de inyección pueden ser estudiados de un modo simple pero confiable sobre la base de modelos muy sencillos, como juntas abiertas de grosor constante. La figura 26 (Lombardi, 1985) muestra el modelo teórico que proporciona la relación entre la presión de inyección, la abertura de las uniones, la cohesión (o punto de fluencia) de la mezcla y el alcance máximo de la lechada.

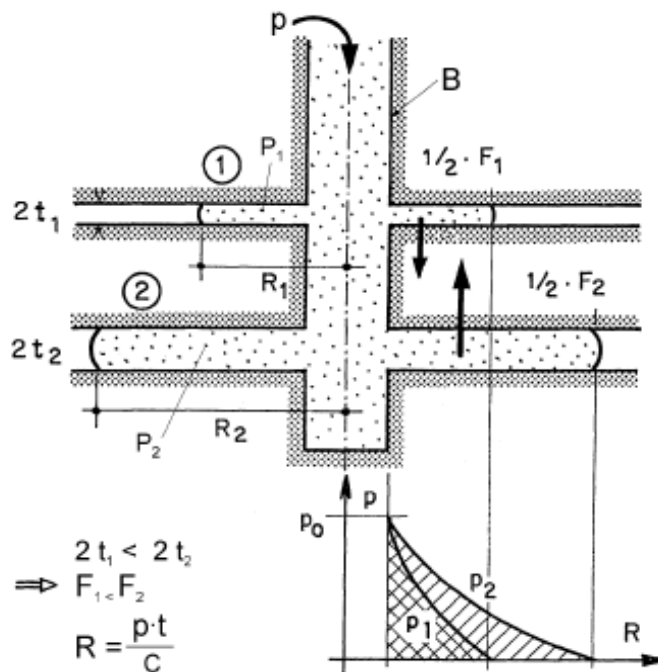


Figura 26. Distribución de presión y fuerzas en dos sistemas de grietas durante la inyección (Lombardi, 2003).

- B = Perforación presurizada.**
- 1. Juntas cerradas; 2. Juntas abiertas;**
- p = Presión de la inyección;**
- c = Cohesión; 2t = Abertura de las grietas;**
- R = Distancia que recorre la lechada al inyectarse;**
- F1, F2 = Fuerzas debidas a la presión de inyección.**



En consecuencia, la más alta presión, la junta más abierta y la cohesión más baja, propiciarán obviamente un recorrido mayor de la mezcla. Los modelos geométricos más refinados pueden representar la realidad, pero no pueden cambiar esta relación. Además, la realidad siempre será diferente a la de cualquier modelo elegido y será también diferente entre un punto a otro de la misma masa de roca.

La abertura de cualquier junta es diferente, de modo que la lechada penetra más fácilmente en algunas de ellas y con mayor dificultad en otras.

Desde un punto de vista práctico, esto significa que en cualquier etapa de inyección se llenarán mejor y hasta distancias mayores las juntas principales y más amplias que no hayan sido inyectadas, mientras que las más delgadas tendrán que ser inyectadas con posterioridad. Esto conduce a procedimientos de inyección clásicos en varios pasos con una serie sucesiva de perforaciones equidistantes y posiblemente con incrementos de presión de serie en serie.

El posible cierre de las grietas delgadas se debe a la deformación de las juntas principales. También la relación entre tamaño de grano y abertura tiene que ser tomada otra vez en cuenta. Debido a este hecho, debe hacerse una diferencia no sólo entre juntas más amplias y más finas, sino también entre puntos diferentes de la misma junta, que obviamente no muestra una abertura constante que se abre a lo largo de su superficie. En la parte mas delgada de la junta sólo el agua entrará, mientras la pasta de cemento se quedará en los puntos más amplios, y seguirá en "canales" preferentes, a lo largo de la junta (ver figura 27).

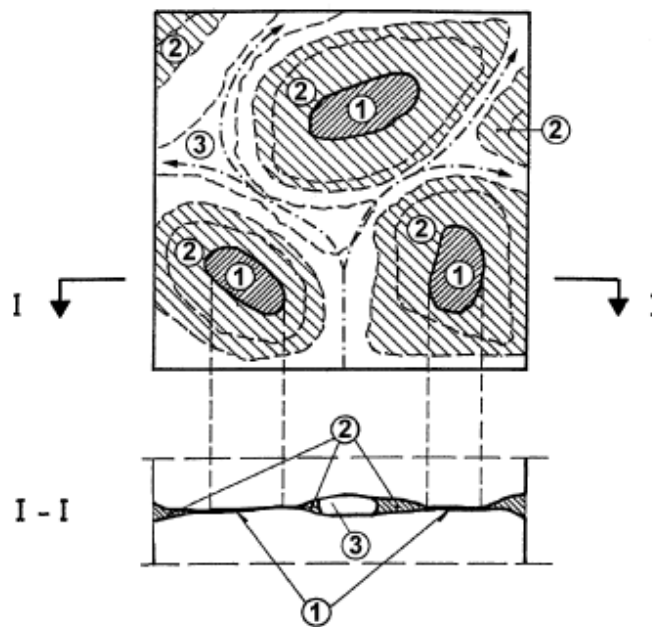


Figura 27. Zonas alrededor de áreas de contacto no inyectadas o pobremente inyectadas debido a que la abertura local es demasiado pequeña en relación al tamaño del grano del cemento usado (Lombardi, 2003).

- 1. Áreas de contacto.
- 2. Zonas no inyectadas o pobremente inyectadas.
- 3. Zonas bien inyectadas.
- Principales líneas de flujo de la inyección.



El efecto benéfico de la distensión es el de que la junta se abrirá y el cemento podrá entrar entonces en cualquier punto de la junta, aumentando así la proporción de la superficie que será realmente inyectada.

La relación mencionada entre abertura de la junta, cohesión de la mezcla, presión de inyección y alcance se aplica sólo a mezclas estables, donde no existe agua en exceso que pueda separarse del cemento.

Como se mostró en la figura 26, la presión de la lechada disminuye conforme aumenta la distancia al barreno, de modo que la deformación de la superficie presurizada será limitada y la presión promedio actuante en ella podrá estimarse como un tercio de la presión aplicada.

El temor de levantar la superficie de roca es fuertemente reducido respecto a la formulación habitual, la cual limita la presión de inyección por el simple peso del volumen de roca despreciando el rápido decrecimiento de la presión con la distancia desde la perforación. Esta caída de presión será más fuerte y por lo tanto la distancia que recorra la mezcla será menor, entre más alta sea la cohesión de la mezcla. Por consiguiente, a poca profundidad deben aplicarse presiones más altas como normalmente se aplican.

La necesidad de limitar el levantamiento del terreno, reduciendo la presión e incrementando la cohesión, es contradictoria a la necesidad de una buena penetración, es decir, al uso de presiones altas y mezclas de baja viscosidad y cohesión; por lo tanto estos límites deben ser colocados tan altos como sea posible.



2.12 Intensidad de inyección, GIN (Grout Intensity Number).

Las presiones de inyección deben ser tan altas como sea posible, con la finalidad de aumentar la distancia de recorrido de la mezcla, pero bastante bajas para evitar el hidrofracturamiento.

Para salir de este dilema se adopta el concepto de "intensidad de inyección". Es conocido que limitando sólo la presión de inyección puede reducirse e incluso evitarse el riesgo de distensión y el hidrofracturamiento.

La presa "El Chocón" en Argentina requirió trabajos de rehabilitación importantes debido a la erosión interna del corazón de arcilla que había ocurrido (Lombardi, 2003). Era necesario consolidar la roca abajo y lateralmente al corazón, así como la superficie de contacto entre roca y corazón, y por consiguiente el corazón mismo.

Los trabajos tuvieron que realizarse con el embalse casi lleno, ya que el descenso del nivel no era posible. Los riesgos implicados con estos trabajos eran altos; ya que un hidrofracturamiento de la roca cerca de la cimentación de la presa o del corazón tenía que ser evitado.

El concepto de "intensidad de inyección" se introdujo hace aproximadamente veinte años con la finalidad de solucionar dicho problema. El concepto continuó desarrollándose en los años siguientes. Este parámetro es simplemente el producto de la presión de inyección por el volumen inyectado en cualquier momento en que el proceso de inyección sea detenido y el gasto de la mezcla sea nulo.

En la figura 28 puede observarse este fenómeno. La intensidad representa aproximadamente la energía aplicada a la masa de roca. Si los procesos fueran absolutamente elásticos (lineales), la intensidad puede ser el doble de la energía elástica aportada por las bombas y teóricamente acumulada en la masa de roca; siempre y cuando, se desprecien las pérdidas de energía internas debidas a la viscosidad de la mezcla, al escurrimiento de ésta a lo largo de las paredes de las juntas y se desprecien las deformaciones inelásticas de la masa de roca.

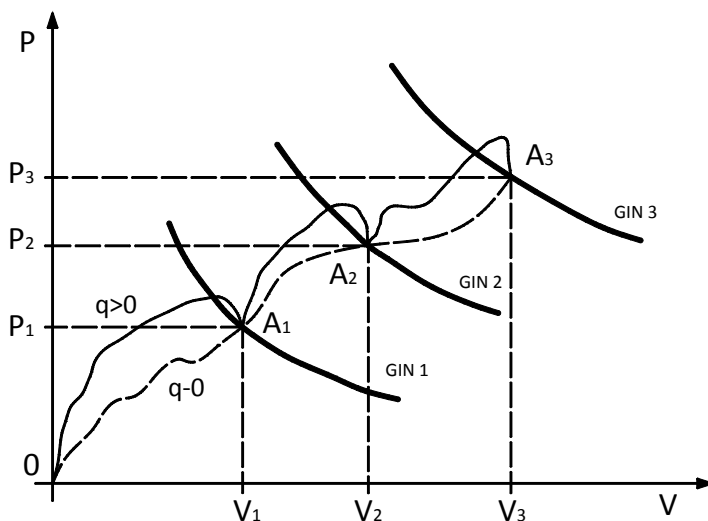


Figura 28. Proceso de inyección (Lombardi, 2003). El proceso de inyección puede ser detenido en cualquier momento, a cualquier presión o al alcanzar cualquier valor del GIN (no existe el concepto de "presión de rechazo" al inyectar). Los valores sucesivos de GIN, representados por los rectángulos, $OP_1A_1V_1O$ son una aproximación de la energía inyectada

$$E = \int_0^V p * dv$$

- Trayectoria del proceso de inyección.
- - - - Puntos sucesivos de equilibrio a flujo de mezcla q nulo.



En el verdadero proceso de inyección las condiciones son más complejas; sin embargo, la intensidad, como antes se definió, resultó ser un instrumento muy útil para manejar el proceso de inyección.

El valor de GIN es evaluado cuando las bombas están paradas, es decir, cuando el flujo de mezcla es nulo. Durante el proceso de inyección, las pérdidas principales tienen que ser contrarrestadas, de modo que la presión manométrica sea más alta que la final definida por la regla del GIN. Esta sobrepresión puede ser de 10 al 20 % de la final.



Inyección en la construcción de una pantalla de impermeabilización

3.1 Introducción.

En este capítulo se presenta información relacionada al proceso de inyección en la construcción de una pantalla de impermeabilización. Se mencionan primero las características mecánicas del macizo rocoso y la relación que guarda con respecto a la mezcla empleada. Luego se describen los elementos que intervienen en la realización de dicho proceso, un procedimiento de diseño (Bernal, 1978) y el control que debe efectuarse durante el tratamiento. Finalmente se presenta un modelo matemático para predecir la cantidad y tiempo de duración de la inyección (Sato *et al.*, 2003).

Los conceptos que se tratan permiten conocer la aplicación y alcance del método GIN expuesto en el Capítulo 4.

3.2 Características mecánicas del macizo rocoso.

Entre mayor información del macizo rocoso se tenga, mejor se podrá realizar la inyección. Por tanto, es importante determinar todas las fisuras que interceptan un barreno, tanto en su forma como en su espesor, así como del relleno que tienen. Debido a que lo anterior no es totalmente posible, al menos con la técnica actual, es importante conocer los parámetros más relevantes del macizo rocoso.

a) **RQD** (*Rock Quality Designation o Índice de Calidad de la Roca*).

Corresponde a un índice de fracturación de la roca y se calcula como la suma de los trozos mayores de 10 cm de longitud de los corazones obtenidos en cada muestra del barreno, dividida entre la longitud de cada tramo muestreado, expresándolo en %. Deere, propone la siguiente clasificación:

| RQD | Calidad de roca |
|--------------|------------------------|
| Menor de 25% | Muy fracturada |
| 25 a 50% | Bastante fracturada |
| 50 a 75% | Fracturada |
| 75 a 90% | Poco fracturada |
| 90 a 100% | Casi nada fracturada |



b) Características de la masa de roca.

Se determinan con apoyo de la Geología, cuando se han analizado corazones de un barreno. Algunas de las más importantes son:

1. Estado de alteración.
2. Espesor de los estratos.
3. Intervalo entre discontinuidades o fisuras.
4. Resistencia a la compresión simple de la roca intacta.
5. Ángulo de fricción en las discontinuidades.

Estos cinco parámetros son tratados a continuación, según la clasificación propuesta en 1980 por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), con la finalidad de contar con una única referencia y puedan hacerse comparaciones de distintas obras y lugares, transmitiendo correctamente la información.

Tabla 6. Clasificación del macizo rocoso según el estado de alteración (SOLER, 1999).

| Tipo | Descripción | Símbolo |
|------------------------|--|---------|
| Sano | Ningún signo visible de alteración de la roca, o decoloraciones muy ligeras limitadas a las superficies de discontinuidad principales. | W_1 |
| Ligeramente alterado | Las decoloraciones indican una alteración de la roca y de las superficies de discontinuidades. El macizo rocoso puede presentar cualidades más débiles que en estado sano. | W_2 |
| Medianamente alterado | Menos de la mitad de la roca está descompuesta y/o transformada en suelo. La roca sana o decolorada se presenta en forma de una estructura discontinua o de bloques. | W_3 |
| Muy alterado | Más de la mitad de la roca está descompuesta y/o convertida en suelo. La roca sana o decolorada se presenta en forma de una estructura discontinua o de bloques. | W_4 |
| Completamente alterado | Toda la roca está descompuesta y/o convertida en suelo. La estructura original del macizo rocoso se mantiene todavía en gran parte. | W_5 |



Tabla 7. Clasificación del macizo rocoso según el espesor de los estratos (SOLER, 1999).

| Espesor (cm) | Símbolo | Tipo | |
|--------------|-----------------|-------------|--------------------|
| > 200 | I ₁ | Muy grande | Mayor de la media |
| | I ₁₂ | | |
| 60-200 | I ₂ | Grande | Medio |
| 20-60 | I ₃ | Medio | |
| 6-20 | I ₄ | Pequeño | |
| | I ₄₅ | | Menor que la media |
| < 6 | I ₅ | Muy pequeño | |

Tabla 8. Clasificación del macizo rocoso según el intervalo entre discontinuidades (SOLER, 1999).

| Intervalo (cm) | Símbolo | Tipo | |
|----------------|-----------------|-------------|--------------------|
| > 200 | S ₁ | Muy grande | Mayor de la media |
| | S ₁₂ | | |
| 60-200 | S ₂ | Grande | Mediano |
| 20-60 | S ₃ | Mediano | |
| 6-20 | S ₄ | Pequeño | |
| | S ₄₅ | | Menor que la media |
| < 6 | S ₅ | Muy pequeño | |

Tabla 9. Clasificación del macizo rocoso según la resistencia a la compresión simple de la roca intacta (SOLER, 1999).

| Resistencia, Rc (MPa) | Símbolo | Tipo | |
|-----------------------|-----------------|----------|-----------------------|
| > 200 | S ₁ | Muy alta | Más alta que la media |
| | S ₁₂ | | |
| 60-200 | S ₂ | Alta | Media |
| 20-60 | S ₃ | Media | |
| 6-20 | S ₄ | Baja | |
| | S ₄₅ | | Más baja que la media |
| < 6 | S ₅ | Muy baja | |



Tabla 10. Clasificación del macizo rocoso según el ángulo de fricción en sus discontinuidades (SOLER, 1999).

| Ángulo (°) | Símbolo | Tipo |
|------------|-----------------|--------------------|
| > 45 | A ₁ | Muy grande |
| | A ₁₂ | Mayor que la media |
| 35-45 | A ₂ | Grande |
| 25-35 | A ₃ | Medio |
| 15-25 | A ₄ | Bajo |
| | A ₄₅ | Menor que la media |
| < 15 | A ₅ | Muy bajo |



3.3 Medición de la eficacia de la inyección.

Para efectos de la inyección, interesa conocer que tan grandes y abiertas son las fisuras de la roca y que tan rellenas quedan después de la inyección. Esto puede conocerse a través de pruebas de presión de agua. La prueba más conocida y aplicada es la “**Lugeon**” (en honor al francés del mismo nombre que la puso en práctica), la cual mide la cantidad de agua absorbida por metro lineal de barreno a una presión constante de 10 Kg/cm^2 , durante 10 minutos. Al valor así obtenido se le conoce como unidad “Lugeon”.

$$\text{Lugeon} = (\text{agua absorbida, en l/min/m al inyectarla bajo una presión de } 10 \text{ Kg/cm}^2 \text{ durante 10 minutos})$$

Esta prueba no mide la verdadera permeabilidad de la roca, ni siquiera proporciona la cantidad de lechada a inyectar, debido a que la teoría y la práctica demuestran una correlación muy pobre entre los valores Lugeon y la absorción de lechada por la roca. No obstante, es útil para tener un juicio eficaz de la inyección al comparar sus valores antes y después de la inyección.

a) Prueba tipo Lugeon.

La prueba se realiza en perforaciones, generalmente de diámetro NQ (3”, 7.62 cm). Los tramos de prueba usualmente son de 5 m de longitud (no indispensable). Las pruebas pueden hacerse alternadamente con la perforación al avanzar ésta, o bien al término de la misma, para lo cual se usan dos obturadores que aíslan el tramo de prueba. De los dos procedimientos el primero es más recomendable. En el primer caso el tramo de prueba se establece entre el fondo del barreno y el obturador, el cual puede ser mecánico o neumático; en el segundo caso se establece entre dos obturadores.

Para la prueba se inyecta agua a presión en cada tramo, a través de una tubería, registrando la presión de inyección y el gasto inyectado. Se registra también la profundidad del nivel freático (en caso de existir), la altura a la que se encuentra el manómetro instalado en la línea respecto al brocal de la perforación, y la profundidad y longitud del tramo de prueba.

La inyección se realiza por etapas, incrementando la presión hasta un valor ligeramente mayor a 10 kg/cm^2 , y luego disminuyéndola hasta cero. Las etapas se realizan generalmente a 2, 4, 6, 8, 10 kg/cm^2 y las mismas presiones en descenso, midiendo el gasto inyectado después de 10 minutos de alcanzada la presión, con la intención de tener un flujo establecido hacia el terreno bajo esa presión, momento en el cual el gasto será constante.

Es importante mencionar que la presión referida es la efectiva en el tramo de prueba (P_{ef}), es decir, la que indica el manómetro instalado en la línea de inyección (P_m), más la presión hidráulica determinada por la distancia vertical entre la posición del manómetro y el centro del tramo de prueba (H_1), menos la presión que actúa en el exterior del tramo en caso de nivel freático (presión hidráulica debida a la diferencia de elevaciones entre el centro del tramo de prueba y la posición del nivel freático, H_2), menos las pérdidas hidráulicas al fluir el agua por la tubería entre el manómetro y el centro del tramo de prueba (H_f). Ver figura 29.



Para determinar la presión efectiva que se debe aplicar en cada tramo ensayado se usan las siguientes fórmulas:

a) Arriba del nivel freático:

$$P_{ef} = P_m + \frac{H_1}{10} - \frac{H_2}{10} - \frac{H_f}{10}$$

b) Abajo del nivel freático:

$$P_{ef} = P_m + \frac{H_1}{10} - \frac{H_f}{10}$$

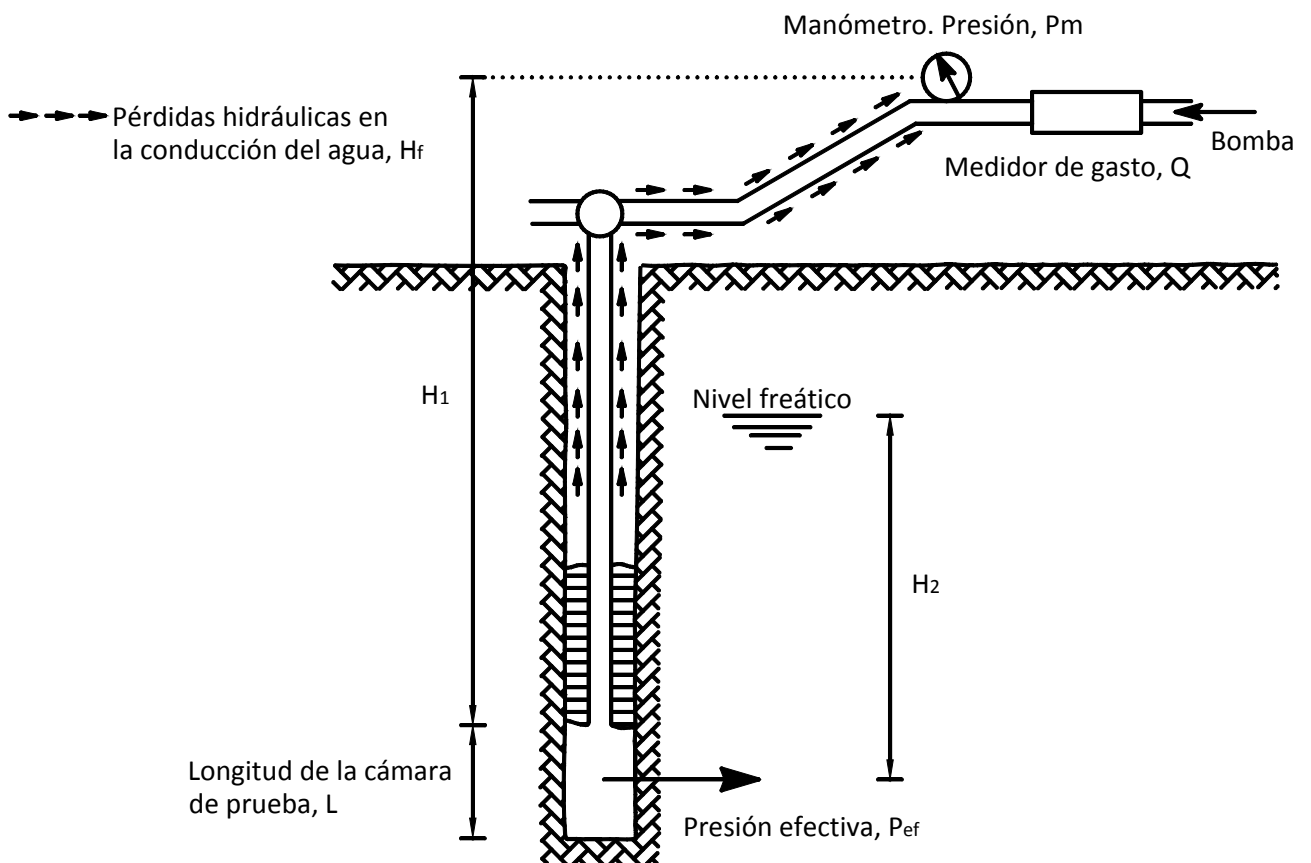


Figura 29. Prueba de permeabilidad Lugeon (Ruiz Vázquez y González Huesca, 2007).

Los resultados se muestran en gráficas “presión (P , Kg/cm^2) – gasto (Q , $\text{l}/\text{m}/\text{min}$)”, las cuales varían de acuerdo al comportamiento del terreno durante la prueba (ver figura 30).

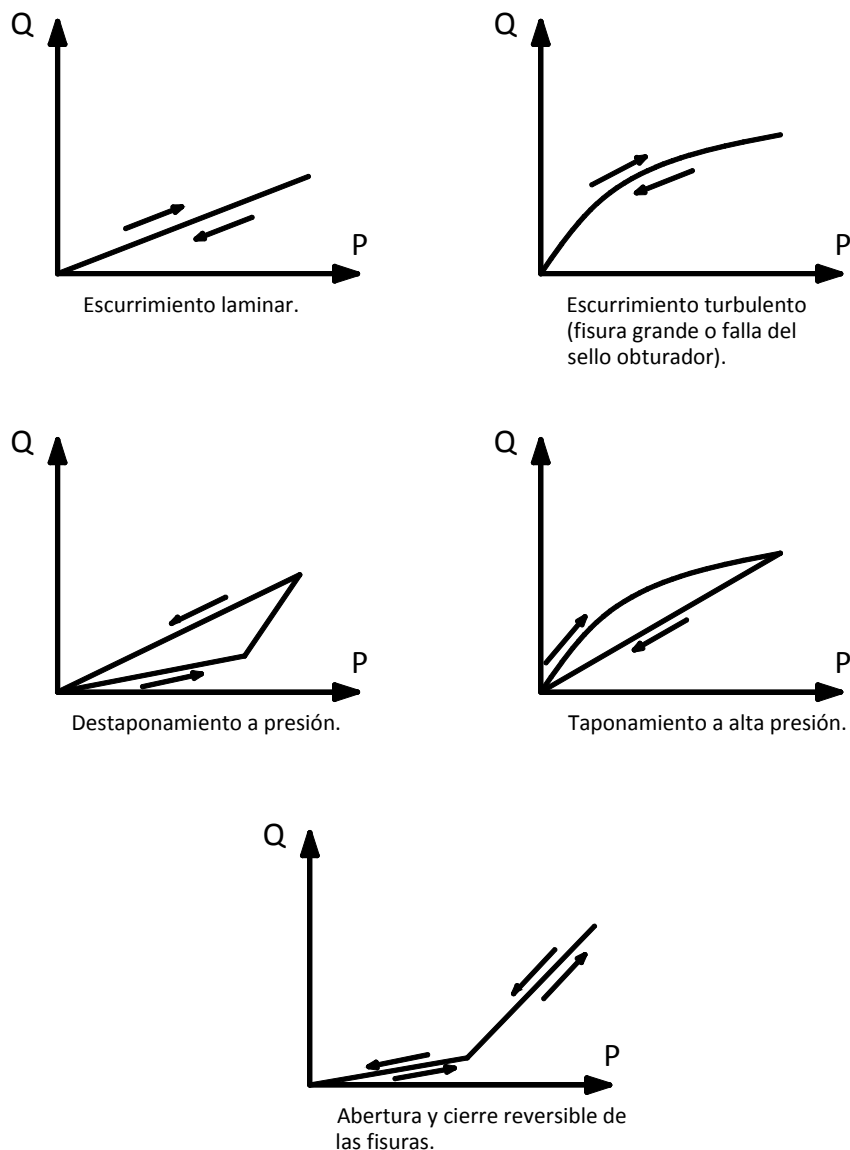


Figura 30. Gráficas presión – gasto de absorción de pruebas tipo Lugeon (Herrera, 2001).

Para la ejecución de la prueba deben de tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

- a) El agua debe ser limpia, sin grasas ni sedimentos.
- b) Los obturadores deben ser suficientemente largos (50 cm, cuando menos) para sellar el tramo de prueba y evitar que el agua fluya, entre esta y la pared de la perforación. En terrenos muy fracturados o deleznales debe vigilarse esta condición sondeando el nivel del agua en la perforación y en caso de presentarse, recolocar el obturador un poco arriba o abajo de la posición inicial.



- c) La bomba para inyección de agua debe evitar el “golpeteo” para tener un flujo regular hacia el tramo de prueba, preferentemente debe tener varios pistones, ser de gusano o tratarse de una centrífuga de alta presión. En todos los casos, las bombas deben ser capaces de aportar un gasto suficiente para la prueba.

- d) La medición del gasto debe hacerse con un medidor de gasto tipo venturi. Si se utilizan medidores de volumen y cronómetro, implicaría errores del orden de 10% en la medición, además de que en general el medidor no trabaja adecuadamente bajo presiones variables y debe calibrarse periódicamente.

- e) Se debe contar con manómetros de la capacidad adecuada y con la mejor precisión, protegidos por un amortiguador contra variaciones de presión provocados por el bombeo del agua. El manómetro debe colocarse en la línea después del medidor de volumen para evitar la corrección por pérdidas ocasionadas por este último.



3.4 Teoría de la inyección.

En abril de 1985 Deere y Lombardi publicaron el artículo *“Grout Slurries - Thick or Thin?”*, en el que se describen los principales conceptos que intervienen en la inyección de rocas, así como la determinación del tipo de lechada por utilizar y el tipo de tratamiento empleado actualmente en grandes presas.

3.4.1 Reología de la lechada.

El agua es un cuerpo Newtoniano ya que sólo tiene viscosidad. Bajo condiciones normales, una lechada estable, en la que el agua no se separa de la mezcla agua/cemento, es un cuerpo Binghamiano que tiene cohesión y viscosidad (ver figura 21). En una lechada inestable se separará en agua y cemento, presentando un comportamiento impredecible, ya que puede manifestarse como un cuerpo Newtoniano o Binghamiano.

Investigaciones teóricas muestran que en cuanto aparece la fricción interna en la lechada, ya no es posible llevar a cabo la inyección. Existe un límite inferior en la relación agua/cemento por debajo del cual los granos de cemento entran en contacto unos con otros, produciéndose una fricción interna en la mezcla. El mismo fenómeno aparece durante la inyección, debido a que parte del agua es absorbida por la roca o escapa por fisuras muy delgadas, teniéndose en ese momento una mezcla más espesa.

Se define entonces:

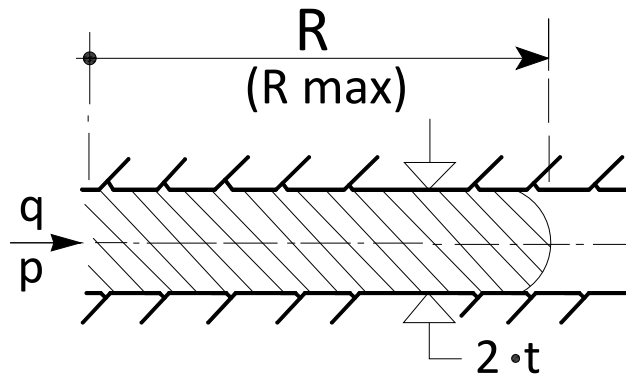
- a) Un límite inferior en la relación agua/cemento, a partir del cual se produce fricción en el interior de la mezcla y cesa la inyección.
- b) Un límite superior por arriba del cual la lechada ya no es estable y se genera un comportamiento imprevisible de la mezcla.

Generalmente es posible situar estos límites en una relación a/c entre 0.4 y 1.

Otras investigaciones teóricas del proceso de inyección de lechadas estables siguen la ley de un cuerpo Binghamiano presentando los siguientes resultados:

- a) Al inyectar una fisura aislada, la distancia máxima recorrida por la lechada está en función de la presión final aplicada, el espesor de la fisura y la cohesión de la lechada. El principal efecto de la cohesión es limitar la extensión de la zona inyectada y evitar en lo posible consumos altos de lechada innecesarios (ver figura 31).
- b) La relación entre la presión de inyección, el espesor de la fisura y la distancia efectiva recorrida por la lechada, se muestra en la figura 32 para un caso determinado.
- c) La distancia efectiva se deduce de la distancia teórica máxima aplicándole un factor k de eficiencia igual a 0.2. Este factor toma en consideración los siguientes hechos: la fisura nunca es plana ni abierta; el espesor de la fisura no es constante; tampoco está siempre limpia y la inyección acaba antes de su terminación teórica. Este factor debe ser verificado en campo en cada caso.

Inyectando una junta



$$R_{\max} = \frac{P_{\max} * t}{C} = h * \frac{t}{Cr}$$

Donde:

$$h = \frac{P}{\delta}$$

$$Cr = \frac{C}{\delta}$$

$$P_{\text{necesaria}} = \frac{R * C}{t} = \frac{2 * C}{2 * t_{\min}} * R$$

$$V_{\max} = \frac{2\pi * P_{\max}^2 * t^3}{C^2} = 2\pi * h^2 * \frac{t^3}{Cr^2}$$

$$F_{\max} = \frac{V_{\max} * P_{\max}}{6 * t_{\min}} = \frac{V_{\max}^{2/3} * P_{\max}^{5/3}}{C^{2/3}}$$

$$C \rightarrow 0; F \rightarrow \infty$$

$$R_{\text{eff}} = R_{\max} * k$$

Donde:

- p** = Presión de inyección.
- q** = Flujo o gasto de lechada.
- R** = Distancia que recorre la lechada al inyectarse.
- 2t** = Abertura de las grietas.
- C** = Cohesión.
- δ** = Densidad.
- V** = Volumen de lechada.
- F** = Fuerza debida a la presión de inyección.
- k** = Eficiencia del recorrido de la lechada.

Figura 31. Algunas fórmulas para la inyección de una junta particular (Lombardi, 1985).

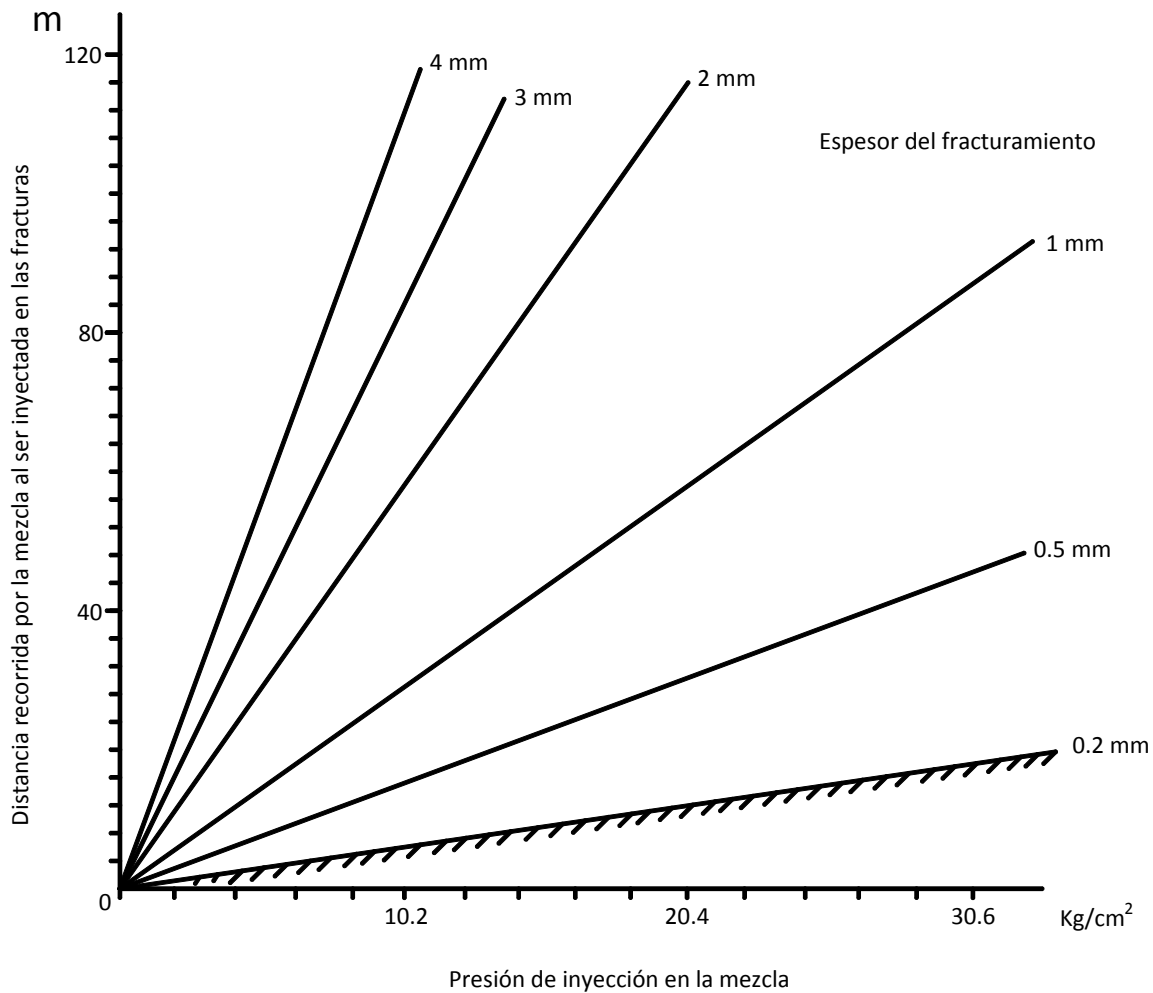


Figura 32. Gráfica para determinar la presión de inyección en función de la distancia recorrida por la mezcla en las fracturas y del espesor del fracturamiento (Lombardi, 1985).

Existe un límite inferior para usar la figura 32, ya que los granos de cemento normal no pueden penetrar en fisuras menores de 0.2 mm.

Mientras que la cohesión limita la distancia recorrida y el volumen de lechada inyectada a presión constante, el tiempo no tiene límite. Esto significa que se produce un proceso asintótico; por lo tanto, al emplear una presión constante, el proceso de inyección nunca se terminará.

La figura 31 muestra que la fuerza aplicada está limitada por la cohesión de la lechada. Si se inyectara agua (o una lechada inestable), la fuerza aplicada puede alcanzar cualquier valor.

La cohesión, también determina la presión mínima necesaria para poner en movimiento y mantener cierta cantidad de lechada ya introducida en la fisura.

La viscosidad afectará el volumen de lechada para una presión dada y determinará el tiempo necesario para completar el proceso de inyección.



Para evaluar la inyección es necesario conocer tanto la viscosidad como la cohesión de la lechada. Con el cono Marsh se puede obtener el valor del “tiempo de flujo”. La figura 33 relaciona este tiempo con la viscosidad y la cohesión teniendo en cuenta la densidad de la lechada.

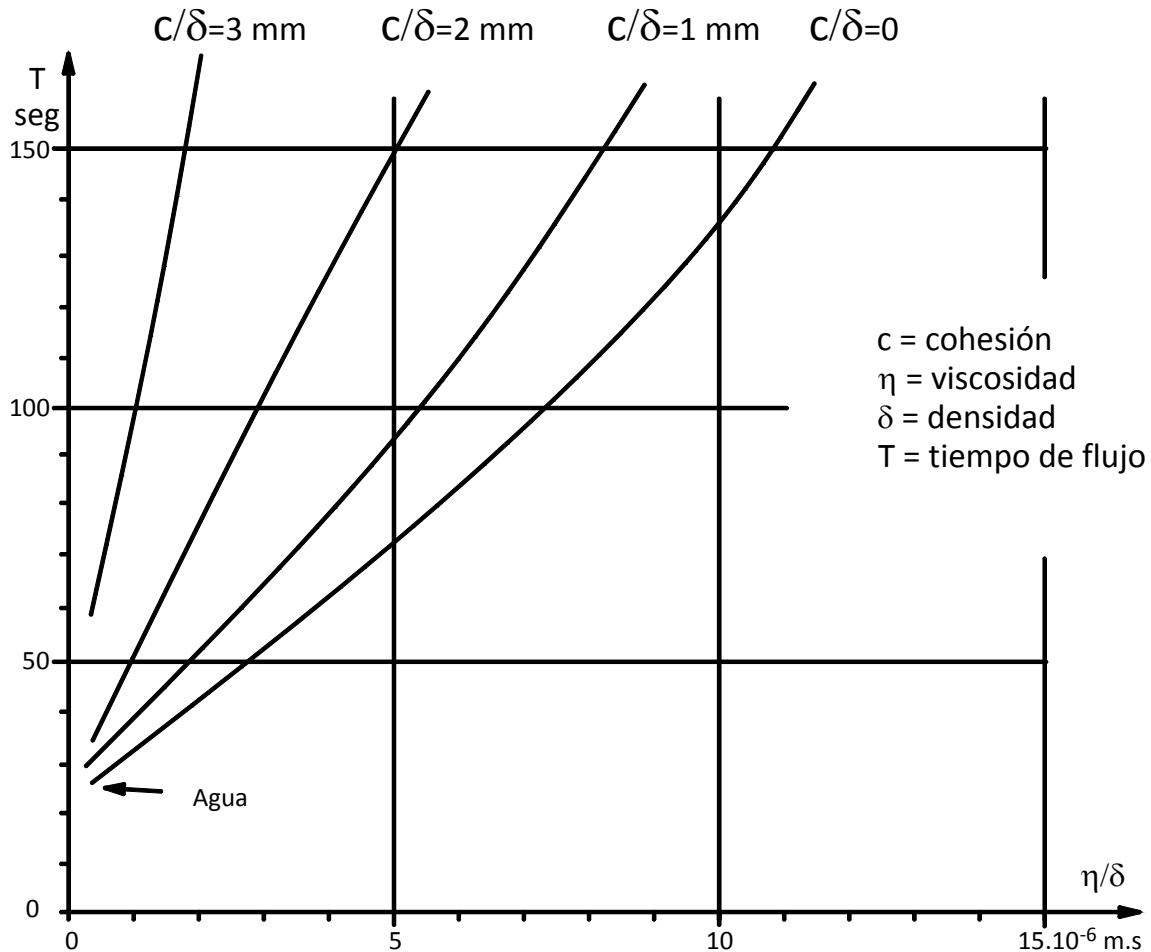


Figura 33. Tiempo de flujo contra viscosidad y cohesión (Lombardi, 1985).

3.4.2 Formas de cambiar las propiedades de la lechada.

Las propiedades de la lechada de cemento pueden ser modificadas de varias maneras. Por ejemplo, con el uso de bentonita para reducir la decantación (o sedimentación) de la mezcla. Estas propiedades también se pueden cambiar con el uso de fluidificantes.

Como norma general se puede notar que, empezando con una relación agua/cemento dada se tiene:

- Añadiendo agua se reducirá tanto la viscosidad como la cohesión (y también la densidad) de la lechada.
- Añadiendo bentonita se incrementará fuertemente la cohesión y también, en menor porcentaje, la viscosidad.
- Los fluidificantes reducirán claramente la viscosidad y, probablemente también la cohesión, aunque en menor grado.



Estos aditivos influyen en la resistencia de la lechada fraguada. Experimentos de laboratorio han demostrado que los fluidificantes reducen la viscosidad sacrificando la resistencia, la cual es menor cuando se usa bentonita. Estos hechos demuestran que la razón principal para usar bentonita es incrementar la cohesión de la lechada y limitar la distancia recorrida por la misma, justo lo contrario de lo que se suponía que era su efecto lubricante.

Sin embargo, hay que observar que la misma limitación de la distancia puede obtenerse reduciendo la presión de inyección. El fluidificante permite, al contrario, incrementar la penetración de la lechada incluso reduciendo la presión.

El uso principal de la bentonita es intentar estabilizar las lechadas inestables para limitar su decantación. De hecho, las lechadas estables son las únicas que garantizan el llenado de los huecos después del fraguado ya que el exceso de agua no se separa y no será la causa de futuros huecos o canales.

Comparando las lechadas estables con las inestables, los resultados de estudios y experiencias recientes indican que las estables:

- a) Limitarán la distancia recorrida por la lechada, evitando consumos altos e innecesarios.
- b) Reducirán fuertemente el riesgo de hidrofracturamiento de la masa rocosa, incluso si se usan altas presiones de inyección.
- c) Se comportarán de manera más o menos previsible.

Una lechada inestable a la que se le agrega bentonita con el propósito de darle estabilidad, pierde parcial o totalmente las siguientes propiedades:

- a) Resistencia mecánica.
- b) Adherencia a la roca.
- c) Baja permeabilidad como consecuencia de la pérdida de las propiedades anteriores.

Como conclusión, las lechadas estables serán preferidas a las inestables y que la bentonita se usará sólo en casos muy especiales para intentar estabilizar lechadas inestables o para reducir el exceso de agua de la mezcla.

3.4.3 Algunas propuestas.

Las investigaciones mencionadas, así como experiencias recientes, conducen a proponer en la práctica de la inyección de rocas, lo siguiente:

- a) **Inyectado rápido.**

Normalmente se supone que la inyección se realiza a presión constante hasta que se termina. Esto se cumple teóricamente solo con un tiempo infinito.

Como norma se elige arbitrariamente, como índice, un valor del volumen de inyección por metro lineal de barreno y se suspende la inyección tan pronto se alcanza este índice.



La figura 34 muestra la distancia alcanzada por la lechada en función del tiempo y de la presión de inyección. Puede verse que una distancia determinada se alcanza más rápido con una alta presión que con una baja; por tanto puede proponerse una inyección rápida.

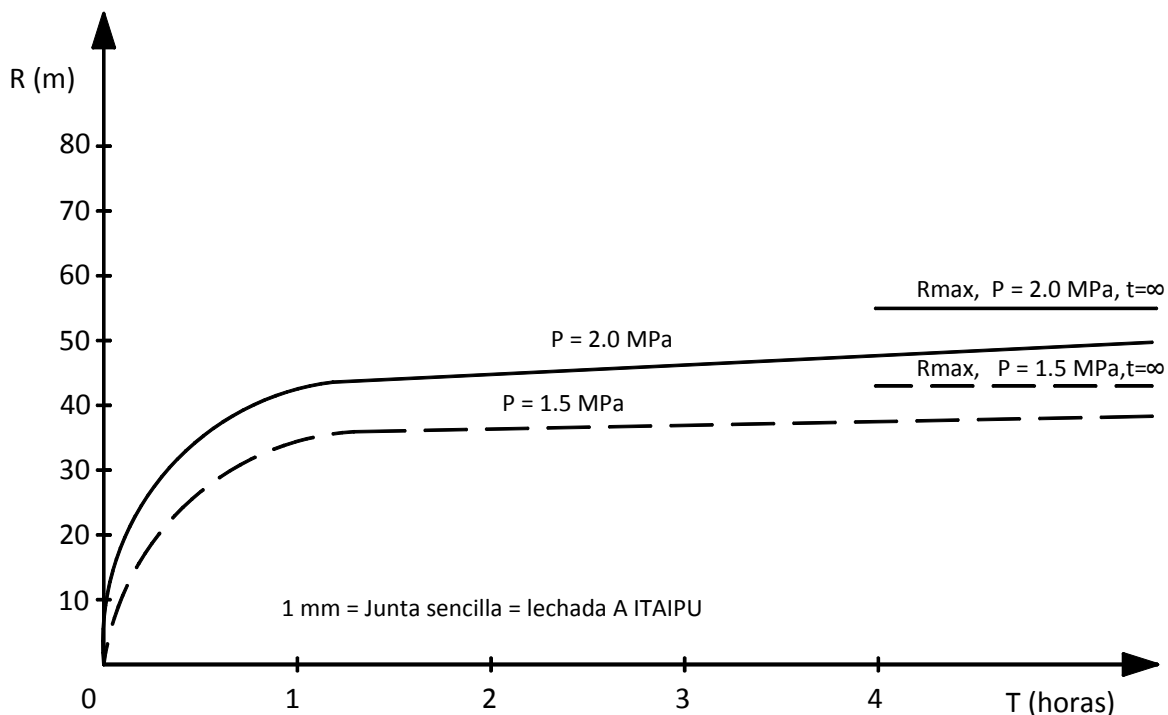


Figura 34. Recorrido de la mezcla de la inyección contra tiempo (Lombardi, 1985).

Debe permitirse que se sobrepase la presión final prescrita en algún porcentaje para acelerar la inyección. Después de un rato, la presión se reduce a la teórica y debe probarse que ya no hay toma de lechada por las fisuras. En este caso se obtendrá una inyección completa.

Es posible imaginar un aparato automático que monitoree el proceso de la inyección y que compruebe, de tiempo en tiempo, si a la presión final dada se produce todavía alguna toma de lechada, y si ya no es así, se detenga la inyección.

b) Máxima toma de lechada permitida.

Un criterio usual es limitar la toma de un barreno (volumen de lechada/metro lineal de barreno) por una cantidad arbitraria dada, sin importar la presión que se alcance, pero teniendo en cuenta la presión máxima posible.

En la figura 35 se propone un esquema diferente de inyección. La toma de lechada deberá ser limitada por una cantidad relacionada con la presión alcanzada. La línea continua de la figura 35, es una función hiperbólica que da la relación presión – volumen constante como límite del recorrido de la lechada, independientemente del espesor de las fisuras a rellenar, el cual se desconoce.

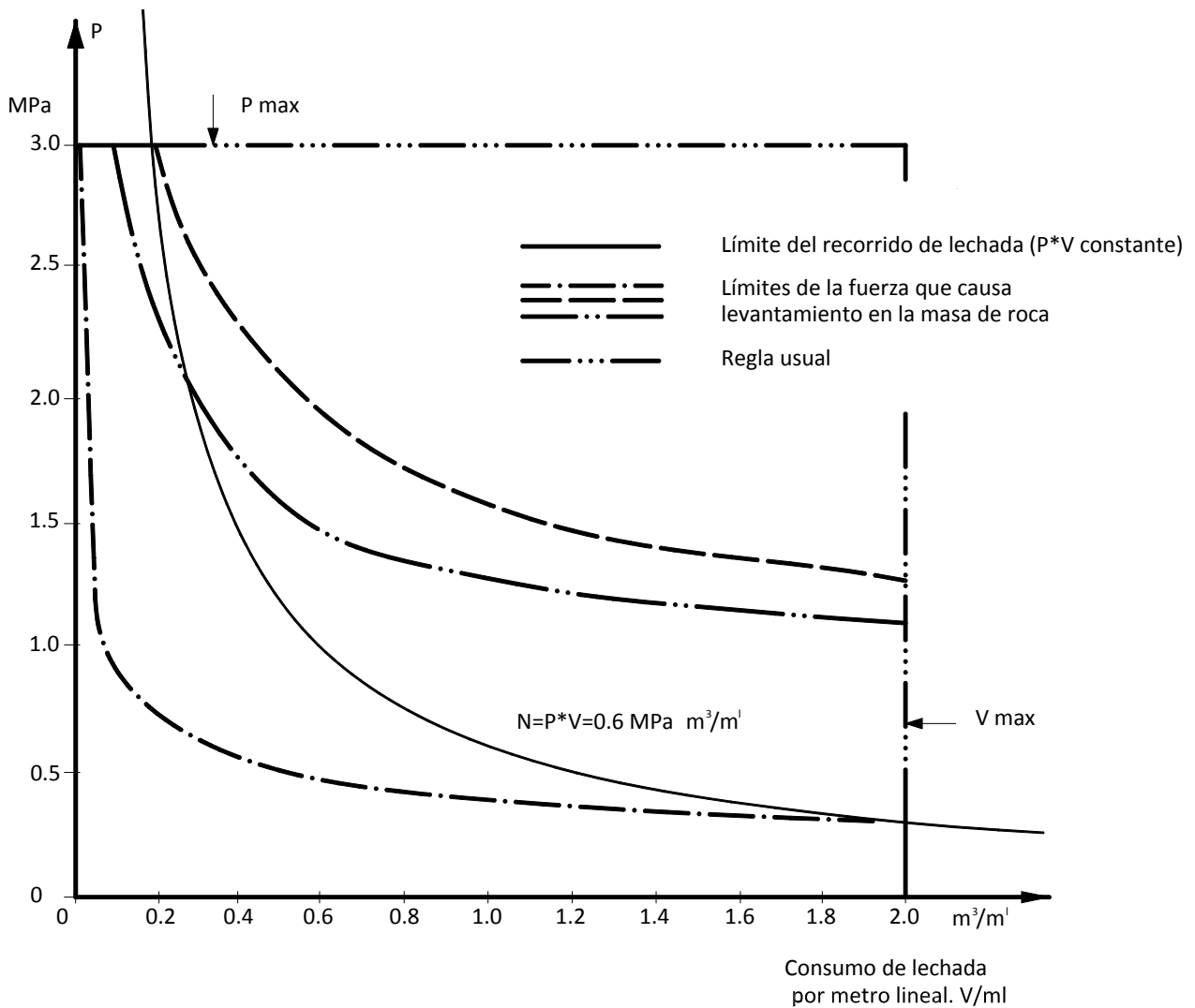


Figura 35. Ejemplo de la regla de inyección. Presión permitida contra consumo de lechada o máximo consumo contra presión (Lombardi, 1985).

El valor de la inyección será entonces definido por un número N , que es el producto de la presión por la toma de lechada por metro lineal de barreno.

En caso de existir riesgo de levantamiento en el macizo rocoso al aplicar la presión de inyección, el límite de la misma estaría definido por la línea punteada correspondiente de la figura 35, la cual debería utilizarse en combinación con la línea continua para controlar el proceso de inyección.

El término “constante” se debe entender como “del mismo orden de magnitud”, ya que el macizo rocoso es una estructura compleja.

En todo caso, un valor de la inyección (N) de este tipo tenderá a resolver muchos de los problemas encontrados durante la inyección, evitando al mismo tiempo altos y consumos innecesarios. También se entiende que en condiciones especiales, por ejemplo en roca cársica, se deben hacer prescripciones especiales.



c) Secuencias incrementadas.

Considerando, como se aprecia en la figura 32, que la distancia de recorrido de una mezcla es mayor en fisuras anchas sujetas a alta presión que en fisuras delgadas sujetas a baja presión, pueden hacerse las siguientes propuestas para realizar de mejor forma una pantalla de inyecciones:

- Realizar barrenos intermedios según etapas consecutivas, incrementando la presión de inyección de una serie de barrenos a la siguiente.
- La distancia entre dos barrenos adyacentes no debe ser constante, sino debe cambiar, de manera que la distancia entre ellos se incrementara proporcionalmente a la suma de la presión usada en ambos. Combinando la propuesta del inciso b) con ésta, la presión máxima de inyección sería reemplazada por una serie de números N como el definido en la figura 35.
- Actuando de esta manera, será posible obtener una pantalla de inyección más homogénea, de bajo costo y en un tiempo reducido.



3.5 Inyección en pantallas de impermeabilización.

Una pantalla de impermeabilización puede ejecutarse desde la superficie del terreno natural o desde galerías excavadas en el interior del terreno en el cual se van a realizar las inyecciones.

Tiene por objeto reducir las filtraciones a través de discontinuidades del macizo rocoso. Está formada por la inyección de una serie de perforaciones dispuestas en una o más líneas paralelas. La pantalla se extiende bajo el cuerpo de una cortina, desde el fondo del cauce hasta la parte alta en las laderas.

El éxito en el tratamiento de inyección para reducir las filtraciones a través de un medio discontinuo en donde la permeabilidad matricial no tiene relevancia en comparación con la que se presenta en vías preferenciales (fallas, fracturas, planos de estratificación), dependerá de la orientación que se fije a los barrenos, para lograr el mayor número de intersecciones con las vías conductoras de agua.

En barrenos destinados a drenar la masa rocosa en sitios donde interese abatir o evitar presiones hidrostáticas, una buena orientación es indispensable, ya que en muchas ocasiones el agua no llegará al dren a menos que éste intercepte directamente la vía en donde se concentra el flujo.

La geometría de la pantalla depende de los siguientes factores:

1. Topografía de la boquilla y de las márgenes.
2. Ubicación de las estructuras que deban protegerse contra altas presiones hidrostáticas.
3. Niveles freáticos en el subsuelo.
4. Variación de la permeabilidad con la profundidad y con la distancia al cauce.

El tamaño de las galerías de inyección y drenaje, así como su separación vertical, se definirán de acuerdo a las características del equipo de que se dispone.

No deben olvidarse las ventajas que en cuanto a conocimiento geológico y control de las operaciones de inyección se logra con una separación moderada entre galerías, pero estos puntos pueden variar de una formación específica a otra, por lo que se requiere de la revisión y participación de geólogos, de especialistas en mecánica de rocas y del constructor.

3.5.1 Número de líneas.

El número de líneas que formará una pantalla de impermeabilización dependerá de las condiciones de fracturamiento y permeabilidad del terreno. Cuando sea difícil aplicar altas presiones para realizar la inyección (como es el caso de un terreno débil), se proyectan dos o más líneas paralelas.

3.5.2 Profundidad.

La profundidad de la pantalla depende generalmente de las condiciones geológicas del terreno y de la carga de agua.



Se acepta que la profundidad de la pantalla sea del orden de la mitad de la carga hidráulica, a menos que existan condiciones geológicas muy desfavorables que involucren zonas más profundas con alta permeabilidad. Para definir esta característica resultan imprescindibles las perforaciones exploratorias con ensayos de permeabilidad.

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

3.5.3 Inclinación del plano de pantalla.

El plano hipotético que forma el conjunto de las perforaciones de inyección se denomina plano de pantalla. Dentro de este plano las perforaciones pueden mantener una inclinación distinta a la del propio plano.

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

3.5.4 Inclinación y dirección de las perforaciones.

Una vez definida la geometría general de la pantalla (extensión horizontal y vertical, separación del plano de pantalla respecto a la galería inmediata inferior, separación del plano de drenaje de la galería inmediata superior), debe definirse la orientación más eficiente de los barrenos contenidos en el plano de pantalla.

Estas características de la pantalla dependen de la densidad, rumbo y echado de las discontinuidades, que para lograrlas eficientemente, requiere de:

- a) Contar con planos geológicos del área, de los socavones de exploración y de otras excavaciones y, muy especialmente, de las galerías de inyección y de drenaje que se encuentren excavadas. La información debe ser muy detallada, indicando fallas, fracturas, planos de estratificación, zonas de carsticidad, zonas con presencia de agua, abertura de las fallas o fracturas, tipo de relleno, a fin de precisar cual sistema o familia de discontinuidades rige al flujo de agua en la masa rocosa.
- b) Establecer un orden de importancia de las familias presentes, considerando no solo la abundancia sino especialmente las condiciones que puedan favorecer el flujo del agua a través de las discontinuidades. Esta jerarquización permitirá fijar la dirección básica de los barrenos, tanto para inyección como para drenaje. Los otros sistemas deben ser auscultados con barrenación que teniendo la dirección apropiada sea menos densa que la básica.

Para determinar la dirección más favorable de una pantalla a partir de una galería se propone el siguiente procedimiento:



- a) En una planta de la galería de inyección con la información geológica detallada se traza, para cada falla, fractura o discontinuidad, la línea de intersección entre el plano de pantalla y la discontinuidad. Esto se hace marcando la línea de fondo de los barrenos de inyección y bajando hasta dicha cota la traza de la discontinuidad, de acuerdo al valor del echado. Se localiza el punto de intersección de dicha traza con la línea de fondo y se une el punto encontrado con el cruce de la falla o discontinuidad, localizado a la elevación de la galería, con la línea de brocales de los barrenos, como se observa en la figura 36.

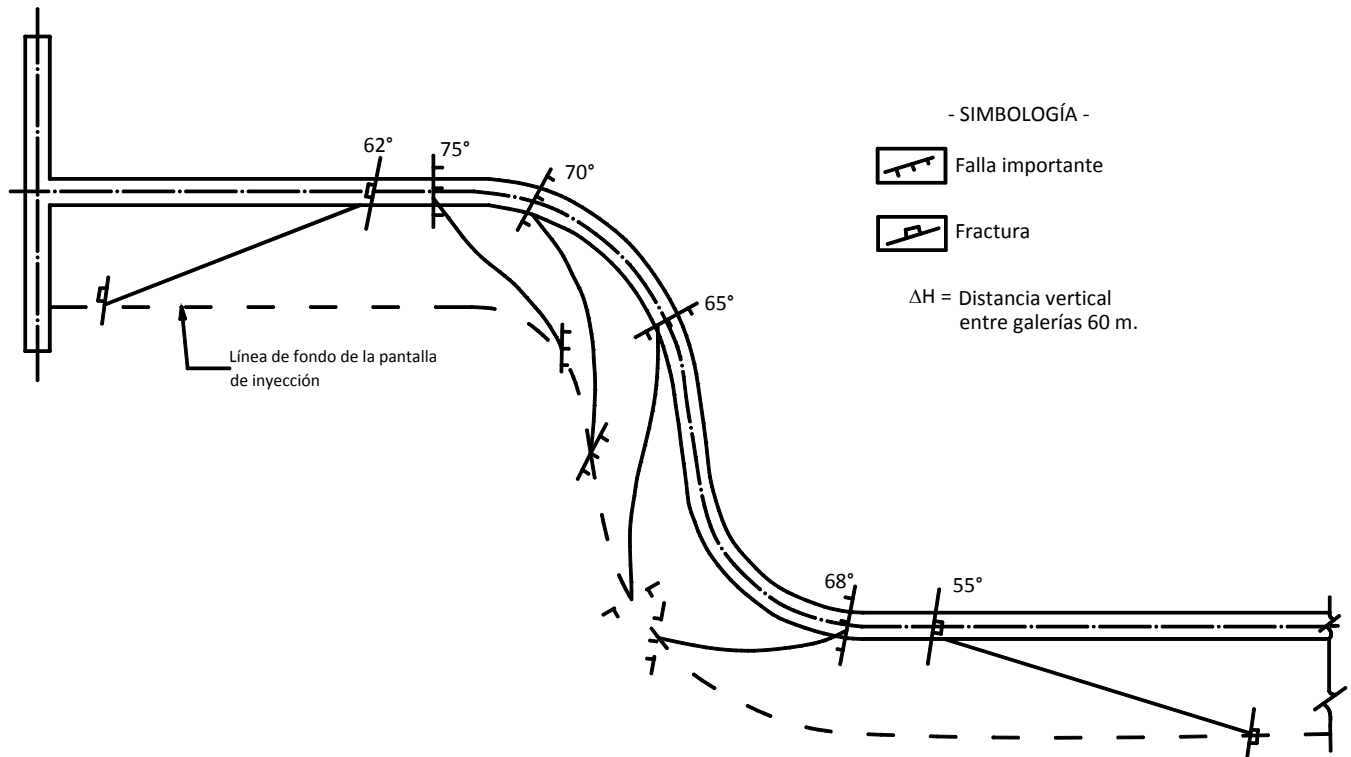


Figura 36. Detalle en planta de la intersección de las discontinuidades con el plano de pantalla de inyección (Bernal, 1978).

- b) Si a la elevación del fondo de los barrenos se cuenta con otra galería, y por tanto con información geológica adicional, se procede a determinar la intersección de las discontinuidades ahí encontradas con el plano de pantalla que viene de la galería superior (o de superficie).

Un punto de dicha intersección se obtiene prolongando la traza de la discontinuidad hasta la línea de fondo. El otro punto se obtiene llevando la traza hipotética a la elevación de la galería superior (conocido el valor del echado), prolongándola hasta cruzar la línea de brocales. La línea que une los dos puntos es la intersección buscada (ver figura 37).

- c) Una vez terminado el trazo para todas las fallas y fracturas de las dos galerías se puede proceder a seleccionar direcciones básicas, ya sea para toda la galería o por tramos, según convenga. Todo cruce en el trazo de un barreno de inyección y una línea de intersección representa físicamente que el plano de la falla o fractura ha sido atravesado, siendo además conocida la elevación y demás coordenadas del punto de impacto (ver figura 38).

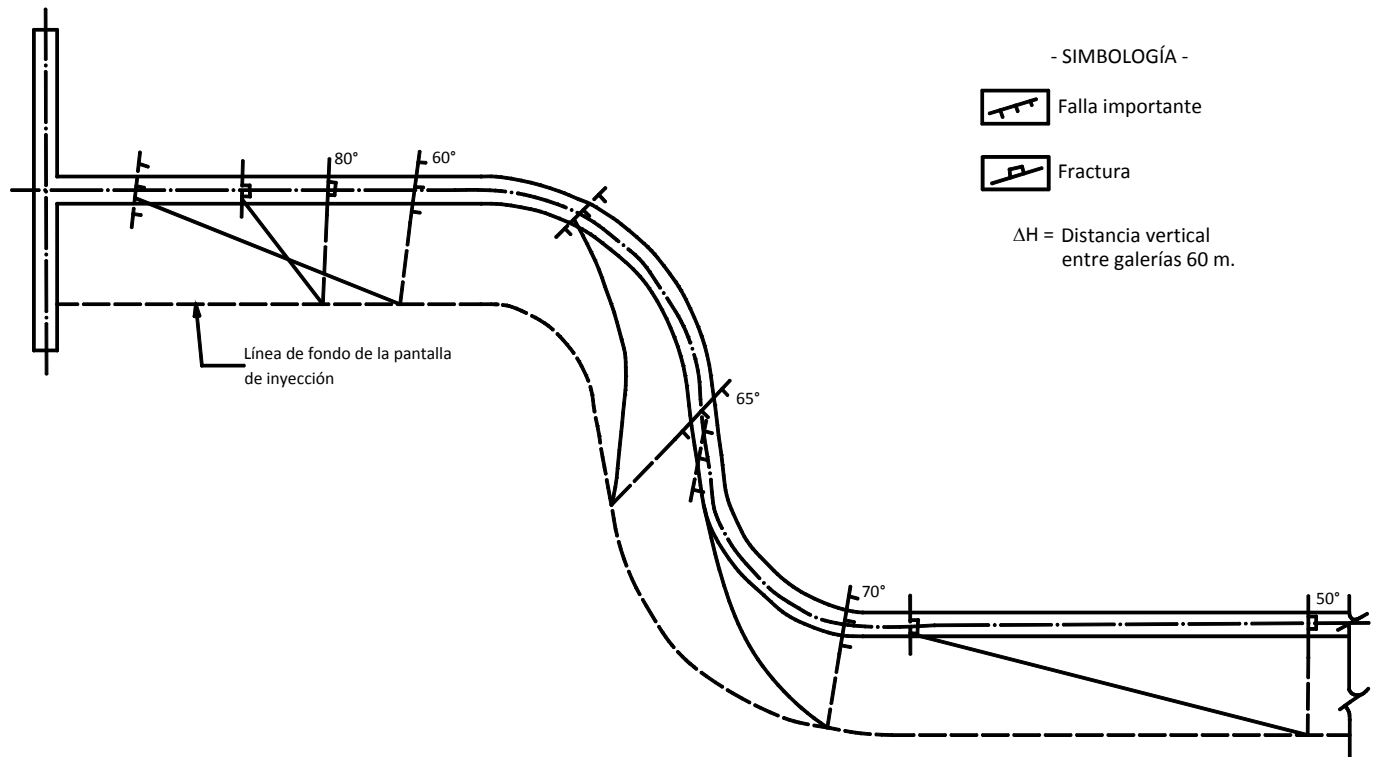


Figura 37. Detalle en planta de la intersección de fallas localizadas en una galería inferior, con la pantalla de inyección que parte de la galería superior (Bernal, 1978).

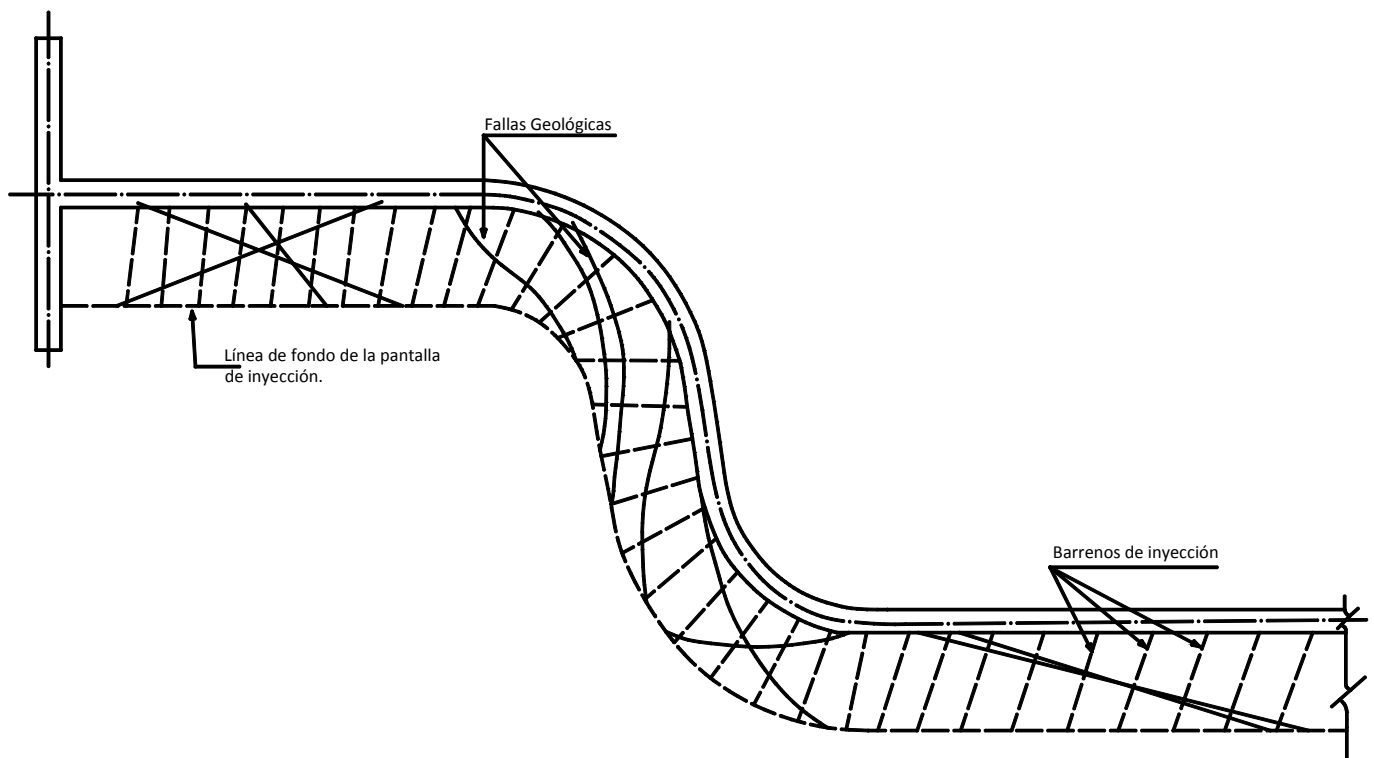


Figura 38. Detalle en planta del trazo de barrenos de pantalla, utilizando datos de las dos galerías (Bernal, 1978).



Con base en las figuras mostradas previamente, se deduce que la dirección óptima no tiene relación con el rumbo de las fallas o fracturas, sino con la dirección de la línea de intersección entre el plano de pantalla y cada una de las discontinuidades.

Se puede aplicar la estadística para determinar la dirección más ventajosa, graficando una roseta que considere la dirección (en planta) de las líneas de intersección entre la pantalla y las discontinuidades.

De acuerdo a lo expuesto en párrafos anteriores, deberá tomarse en cuenta no sólo la abundancia de fracturas o fallas de una familia en particular, sino que, especialmente, las características relacionadas con la permeabilidad que presenten los diferentes sistemas.

Manejando los datos geológicos en forma similar, una vez conocida la intersección entre la pantalla de drenaje y cada una de las discontinuidades, se obtienen las direcciones óptimas para la barrenación de drenaje, como se aprecia en las figuras 39 y 40.

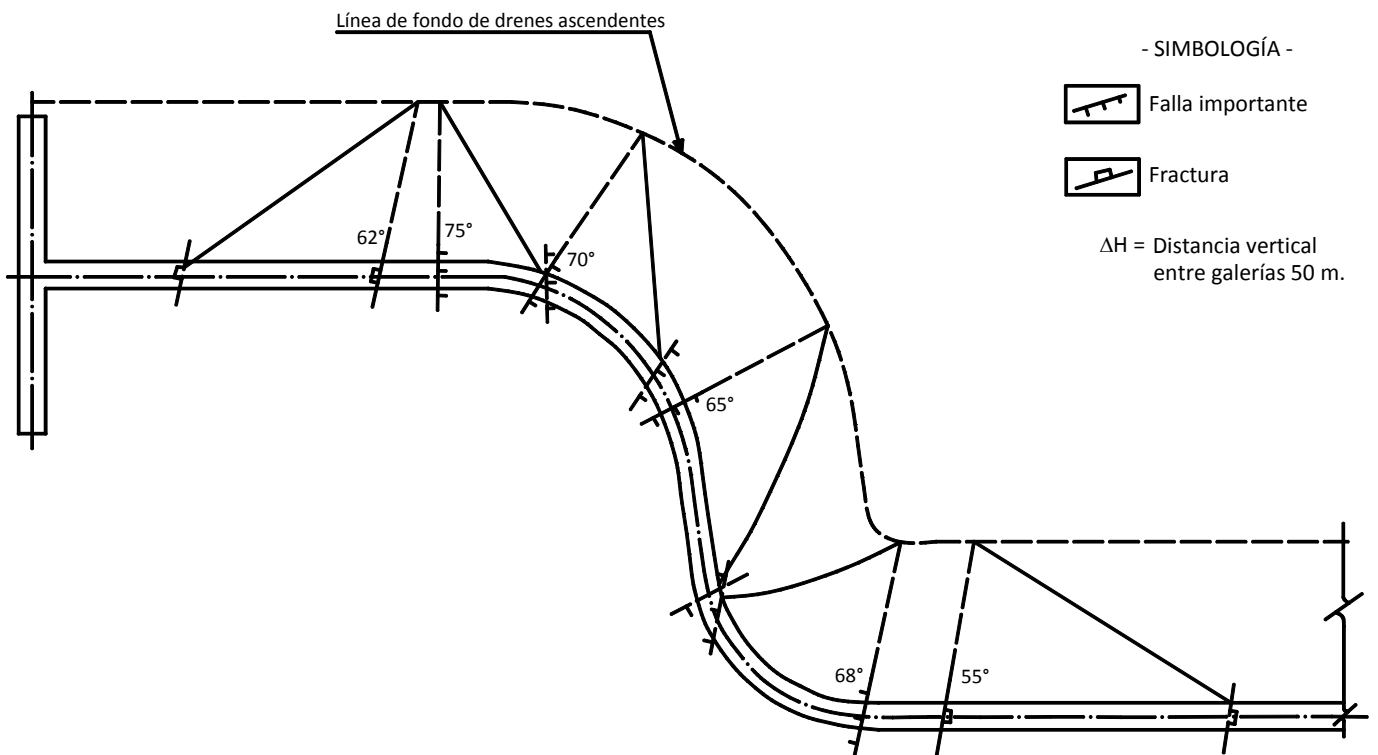


Figura 39. Detalle en planta de intersección de fallas y fracturas con el plano de la pantalla de drenaje, que parte de una galería inferior (Bernal, 1978).

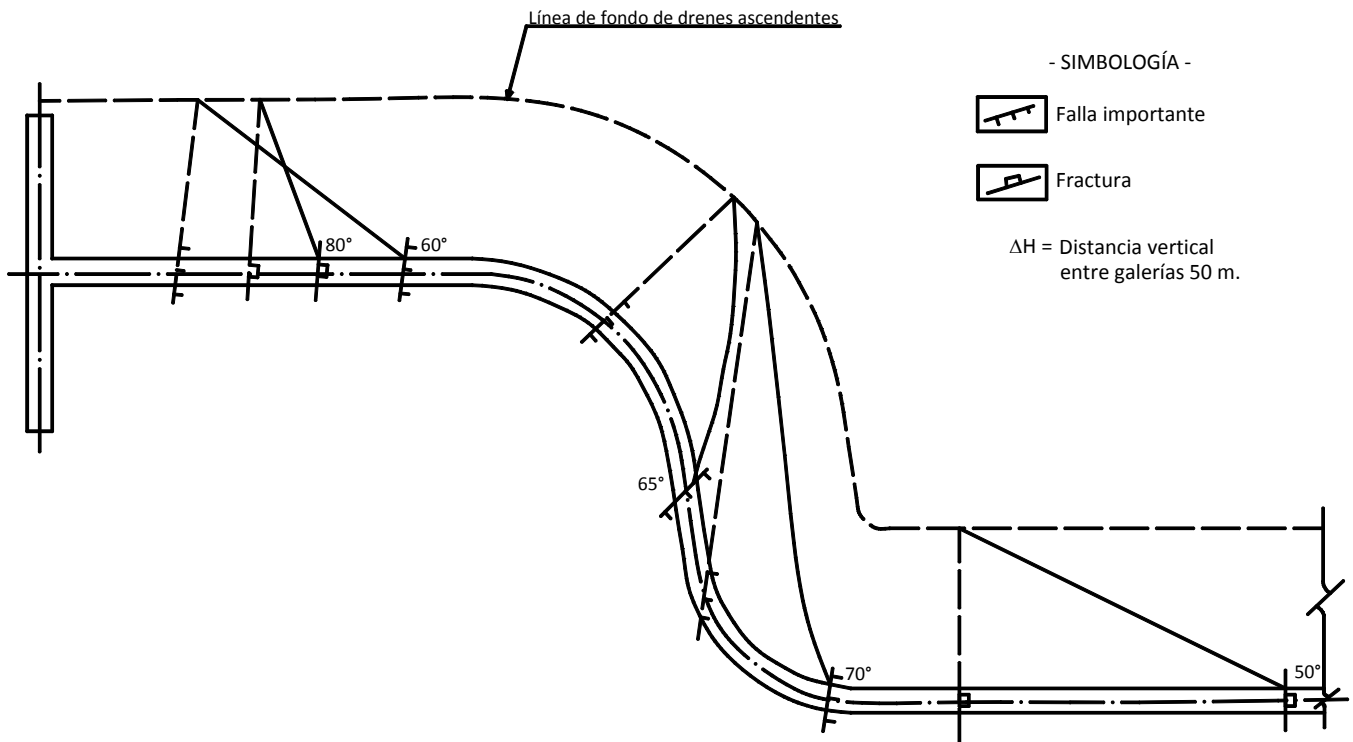


Figura 40. Detalle en planta de la intersección de discontinuidades localizadas en una galería, con el plano de la pantalla de drenaje ascendente, que parte de dicha galería (Bernal, 1978).

Se concluye de esta manera que la dirección de las perforaciones deben proyectarse de forma que éstas crucen el mayor número de discontinuidades y en la forma más apropiada para que el producto inyectado penetre con facilidad. Lo ideal será que las perforaciones atraviesen los planos en forma normal, lo cual es poco factible de lograr, pero ángulos hasta de 60° entre el plano inyectado y el barreno, son aceptables.

3.5.5 Separación de barrenos.

La separación entre las perforaciones también depende de las condiciones geológicas del terreno. En macizos rocosos muy fracturados la separación entre los barrenos se reduce, ya que no es posible aplicar presiones de inyección elevadas. Valores típicos son de 2.5 a 3 m de separación final entre barrenos en terrenos con fracturamiento regular.

Durante la construcción, el consumo de la mezcla inyectada al terreno en cada etapa permite establecer la densidad de barrenos y la separación entre ellos que garantiza el sellado de las fracturas (ver figura 2).



3.5.6 Etapas de inyección.

La perforación e inyección de los barrenos se realiza por etapas para lograr un cierre progresivo en las fracturas.

En la primera etapa la separación es de 10 a 12 m. Los barrenos se inyectan en toda su longitud, en tramos de 5 m. En la segunda etapa se perforan e inyectan barrenos situados al centro de los de primera etapa, a 5 o 6 m de separación. La tercera etapa de barrenos se realiza colocándolos al centro de los de la segunda etapa, a 2.5 o 3 m.

Por lo general, en la última etapa en forma sistemática, se perforan e inyectan barrenos adicionales en aquellas zonas donde los consumos de mezcla fueron altos en la tercera etapa.



3.6 Control de la inyección en pantallas de impermeabilización empleando el método GIN – Una breve descripción.

Existen diferentes métodos para elegir una técnica de inyección (como mezcla de lechada y presión), así como para controlar su proceso. Algunos métodos están basados en una razón teórica, mientras que otros son más empíricos. Un método basado en una razón teórica es el “**Método GIN**”, desarrollado por Lombardi G. y Deere D. (1993). A continuación se hace una breve descripción de los puntos principales del método GIN dados por Lombardi - Deere (1993) y Brantberger *et al.* (2001).

3.6.1 Objetivo y alcance del método.

El método GIN es usado para controlar operaciones de inyección durante la construcción de una pantalla de inyecciones en una presa u otro tipo de proyecto. El objetivo del método es ejecutar la inyección de un modo eficaz y económico, que es conseguido por:

1. Un reducido riesgo al hidrofracturamiento, y
2. Una extensión de lechada uniforme.

Se debe notar que el término de hidrofracturamiento en este caso es adjudicado al riesgo de la aplicación de una carga hidráulica elevada y no a la fractura local y a su deformación.

El método GIN se caracteriza por:

1. Una lechada única (mezcla estable).
2. Un método de inyección basado en el procedimiento de una pantalla mediante la ejecución de barrenos intermedios en cada etapa, a los realizados en una etapa anterior.
3. Ninguna medición de absorción de agua mediante pruebas, excepto en la comprobación del resultado de la inyección.
4. Tres criterios de rechazo o paro de la inyección: una presión máxima (p_{max}), un volumen máximo (V_{max}) y un valor máximo constante del producto de la presión por el volumen, denotado como el valor GIN (Número de Intensidad de Inyección), ver figura 41.
5. La posibilidad de una grabación automatizada de la secuencia de inyección.

La ecuación para el valor GIN es:

$$GIN = P \times V$$

Donde:

- P** = Presión de inyección con flujo de lechada cero, y
V = Volumen de lechada con flujo de lechada cero.

La presión máxima (p_{max}) y el volumen máximo (v_{max}) son condiciones técnicas y económicas específicas en el proyecto, independientemente de la opción del valor GIN.

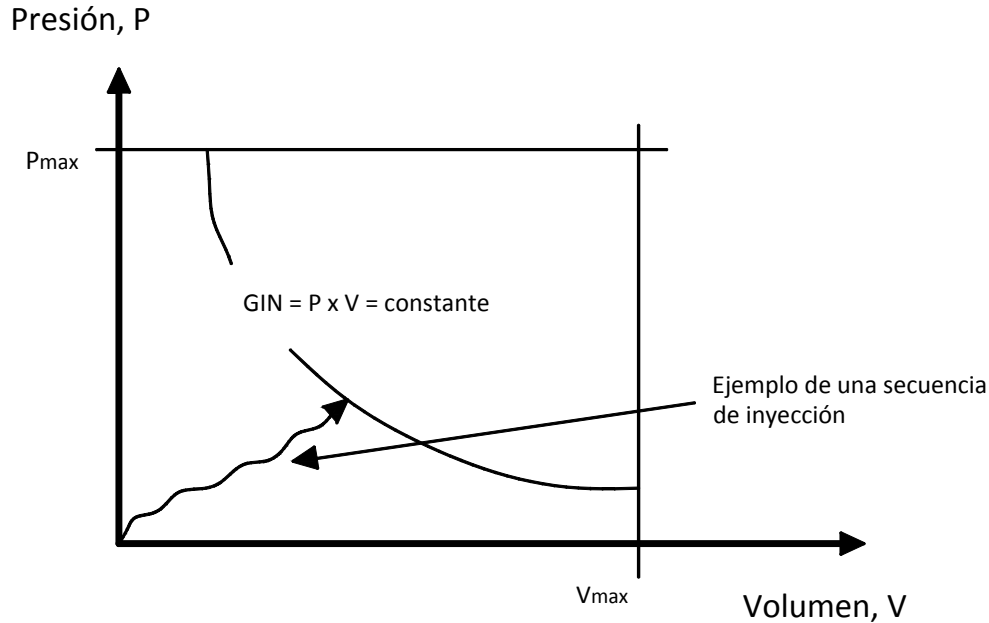


Figura 41. Criterios de rechazo al aplicar el método GIN (P=constante, V=constante, PxV=constante) (después Lombardi y Deere, 1993) (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001).

3.6.2 Base teórica para reducir al mínimo el riesgo de aplicar una carga hidráulica elevada.

Según Lombardi y Deere (1993), controlando el flujo de lechada, el riesgo de la aplicación de una carga hidráulica elevada, debe ser considerablemente pequeño. El fondo teórico se basa en las ecuaciones 1 y 2 (Lombardi, 1985), que representan la fuerza que genera la presión de inyección sobre la cara de una discontinuidad (fuerza actuante) y el volumen máximo de lechada en una fractura rellena y sin flujo (volumen de relleno). Las ecuaciones están basadas en suposiciones de una caída de presión lineal a lo largo de la distancia recorrida por la lechada y en un plano de fractura circular.

$$F = \frac{\pi * l^2 * p}{3} \quad (1)$$

$$V = \pi * l^2 * b_c \quad (2)$$

De las ecuaciones (1) y (2), se obtiene la siguiente ecuación:

$$F = \frac{V * p}{3 * b_c} = \frac{GIN}{3 * b_c} \quad (3)$$



De la ecuación (3) sigue que:

$$F = \frac{GIN}{3 * b_c} < F_{all} \quad (4)$$

Donde:

- F** = Fuerza actuante.
- F_{all}** = Fuerza actuante aceptable.
- I** = Distancia de recorrido específica.
- V** = Volumen de lechada de relleno.
- P** = Presión de inyección.
- b_c** = Abertura constante en un plano de fractura abierta.
- GIN** = Valor del GIN.

Una valoración de la fuerza actuante aceptable (F_{all}) puede ser hecha según Brantberger *et al.* (2001), quien describe una cimentación de una presa en Canadá donde se utilizó el método GIN. La fuerza actuante aceptable (F_{all}) en aquel proyecto fue calculada mediante el peso de la presa y la capacidad de carga de las anclas bajo la presa. La abertura (b_c) se eligió como la más pequeña posible para inyectar una lechada (Lombardi, 1985).

3.6.3 Base teórica para la estimación del recorrido de la lechada.

La relación entre el valor del GIN y del recorrido de la lechada puede obtenerse de las siguientes ecuaciones:

$$p \propto \frac{I * \tau_o}{b} \quad (5)$$

$$V \propto I^2 * b \quad (6)$$

Las cuales conducen a la ecuación:

$$GIN = p * V \propto I^3 * \tau_o \quad (7)$$

Donde:

- p** = Presión de la inyección con flujo de lechada cero.
- V** = Volumen de lechada con flujo de lechada cero
- b** = Abertura de un plano de fractura.
- I** = Distancia de recorrido específica.
- τ_o** = Punto de fluencia de la lechada.

La ecuación 7 establece que para un valor de GIN dado, el volumen de lechada y su distancia de recorrido (I) son aproximadamente constantes, independientemente de la abertura (b). Para una valoración más correcta del recorrido de la lechada, deben considerarse aspectos geológicos. Para ello, Brantberger *et al.* (2001) introduce el factor de inyectabilidad (K) el cual depende de:



- a) El número de juntas por metro de barreno;
- b) la rugosidad de las fracturas; y
- c) las variaciones en la geometría de la fractura.

Introduciendo el factor de inyectabilidad (K), las ecuaciones siguientes pueden ser formuladas según Brantberger *et al.* (2001) de la siguiente manera:

$$GIN = p * v = \frac{l^3 * \tau_o}{K^3} \quad (8)$$

$$l = K * \sqrt[3]{\frac{GIN}{\tau_o}} \quad (9)$$

3.7 Análisis y desarrollo de teorías de inyección.

Para reducir al mínimo el riesgo del desarrollo de una carga hidráulica elevada, se debe de elegir el valor del GIN según la ecuación 10:

$$p * v = GIN < F_{all} * 3 * b_c \quad (10)$$

Cuando las demandas en la lechada se extienden a una distancia l_{min} e l_{max} , el valor del GIN también puede ser elegido según la ecuación 11:

$$\frac{l_{max}^3 * \tau_o}{K^3} > p * v = GIN > \frac{l_{min}^3 * \tau_o}{K^3} \quad (11)$$

El valor del GIN para una situación de inyección específica debe reflejar el riesgo de levantamiento hidráulico que se extiende a una distancia en específico. A fin de cumplir con las condiciones declaradas en las ecuaciones anteriores, debe ajustarse la técnica de inyección. El ajuste en la técnica puede ser: cambio de la mezcla, de la presión o del espaciamiento de los barrenos.

3.7.1 Análisis del riesgo del desarrollo de carga hidráulica al usar el principio GIN.

Cuando se efectúa el proceso de inyección en la pantalla es razonable relacionar la fuerza actuante aceptable (F_{all}) con el peso de la masa de roca. Una de las consideraciones cuando la inyección presenta una fractura horizontal, es que la masa de roca está sujeta al levantamiento por la lechada que se extiende a una distancia l (ver figura 42).

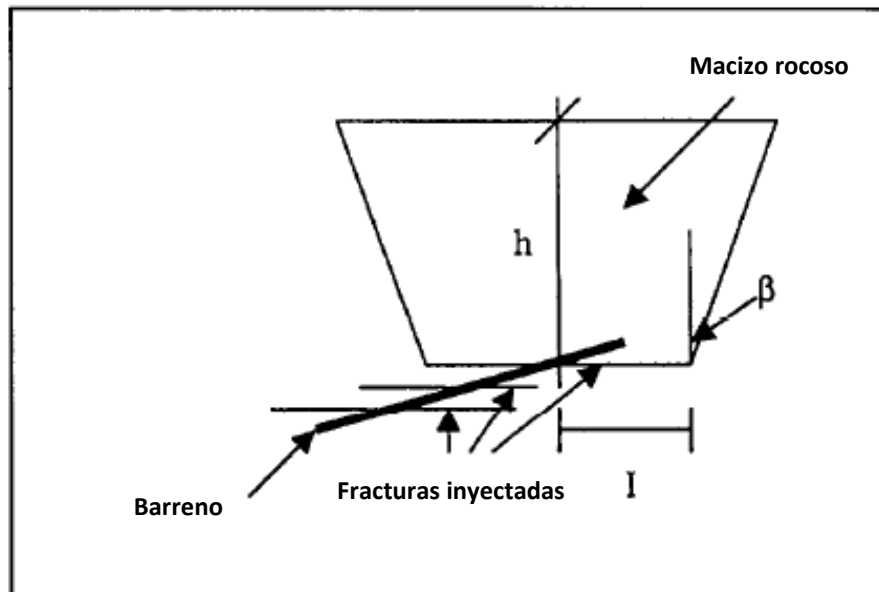


Figura 42. Geometría idealizada de una masa de roca sujeta a levantamiento por presión en una de sus caras (l = distancia por recorrer la lechada a partir del barreno de inyección, h = profundidad final de la fisura (con respecto al terreno natural), β = ángulo de la pared de la masa cónica con posibilidad de ser levantada (ángulo de cono)) (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001).



Con la consideración geométrica de la masa de roca posible de levantar según la figura 42, y sin ninguna aplicación del esfuerzo cortante, la fuerza actuante que tiende a provocar el levantamiento puede ser estimada con la ecuación 12:

$$F_{all} = K_1 * \rho * g * h * l^2 * \pi \quad (12)$$

Donde:

- F_{all} = Fuerza actuante aceptable.
- K_1 = Factor que explica la geometría de la masa de roca levantada.
- ρ = Densidad de la masa de roca.
- g = Fuerza de gravedad.
- h = Profundidad de la fractura.
- l = Distancia de recorrido específica.

En la ecuación 12, el factor K_1 es igual a 1 si el ángulo de cono β es cero, significando que la masa de roca levantada tiene la forma de un cilindro.

La fuerza actuante F en una fractura, según la ecuación 1, debería ser compensada por el hecho de que la fractura no está completamente sujeta al flujo de la lechada y, por tanto, a la aplicación de presión en sus paredes, lo que modifica la ecuación 1 a la 13.

$$F = \frac{K_2 * \pi * l^2 * \rho}{3} \quad (13)$$

Donde:

K_2 = Factor que considera que la fractura no está completamente sujeta a presión en sus paredes.

El factor K_2 considera el área de contacto entre paredes de la fractura, así como la separación de las paredes debido a la penetración de la lechada.

Como se ha mencionado anteriormente, la ecuación siguiente debe satisfacer la prevención del desarrollo de carga hidráulica excesiva:

$$F < F_{all} \quad (14)$$

Cuando se combinan las ecuaciones 12 y 13 resulta la ecuación:

$$F < \frac{3 * K_1 * \rho * g * h}{K_2} \quad (15)$$



Hasta ahora, los factores K_1 y K_2 han sido descritos desde un punto de vista general.

Suponiendo que la masa de roca está sujeta a un levantamiento y tiene la forma de un cono según la figura 42, el valor del factor K_1 depende del ángulo de cono (β). Para un ángulo de cono dado, el factor K puede ser expresado en términos de la profundidad (h) y de la distancia recorrida específica (l). Considerando un ángulo de cono de 45° (basado en Brantberger *et al.*, 2001), la ecuación sería:

$$p < \frac{3 * \rho * g * h}{k_w} * \left(1 + \frac{h}{l} + \frac{1}{3} * \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right) \quad (16)$$

Donde:

$$K_1 = \left(1 + \frac{h}{l} + \frac{1}{3} * \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right) \quad (17)$$

En la tabla 11 se incluyen valores del factor K_1 calculados para diferentes relaciones de profundidad (h) y de distancia recorrida específica (l).

Se puede concluir que el factor K_1 alcanza 1.0 cuando el ángulo de cono (β) es cero o cuando la distancia recorrida específica (l) es muy grande comparada con la profundidad (h).

El factor K_2 es más pequeño a medida que mayor sea el área de contacto entre paredes de la fractura. Esto se explica por el hecho de que, para una misma distancia recorrida específica (l), el área sujeta a presión por la lechada disminuye si la parte abierta de la fractura se reduce. El factor K_2 puede ser estimado introduciendo el concepto del ángulo de derrame (α) (según Brantberger *et al.*, 2001). El ángulo α puede verse como una especie de dimensión de flujo. La descripción geométrica de α se ilustra en la figura 43 considerando que la lechada fluye en canales en un sistema de fracturas, cuya geometría se simplifica considerando un sector abierto en un plano de fractura circular con una abertura constante (b).

Según Brantberger *et al.* (2001), el ángulo α puede ser evaluado a partir de una clasificación de la masa de roca (ver tabla 12). Los valores de α son provisionales y están basados en estudios recientes por Brantberger *et al.* (2001).

La disminución en el ángulo α cuando la calidad de la roca disminuye, puede explicarse por el hecho de que existen menos fracturas abiertas y sin relleno que en una masa de roca de mejor calidad (Brantberger *et al.*, 2001).

El ángulo α puede determinarse a partir de mediciones en una secuencia de inyección (Brantberger *et al.*, 2001).

Tabla 11. Valores del factor K_1 , para diferentes relaciones entre la profundidad (h) y la distancia recorrida específica (l) (ángulo del cono $\beta= 45^\circ$) (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001).

| Relación de profundidad (h)/ distancia recorrida específica (l) | Factor, K_1 |
|--|---------------|
| 0.5 | 1.6 |
| 1 | 2.3 |
| 2 | 4.3 |

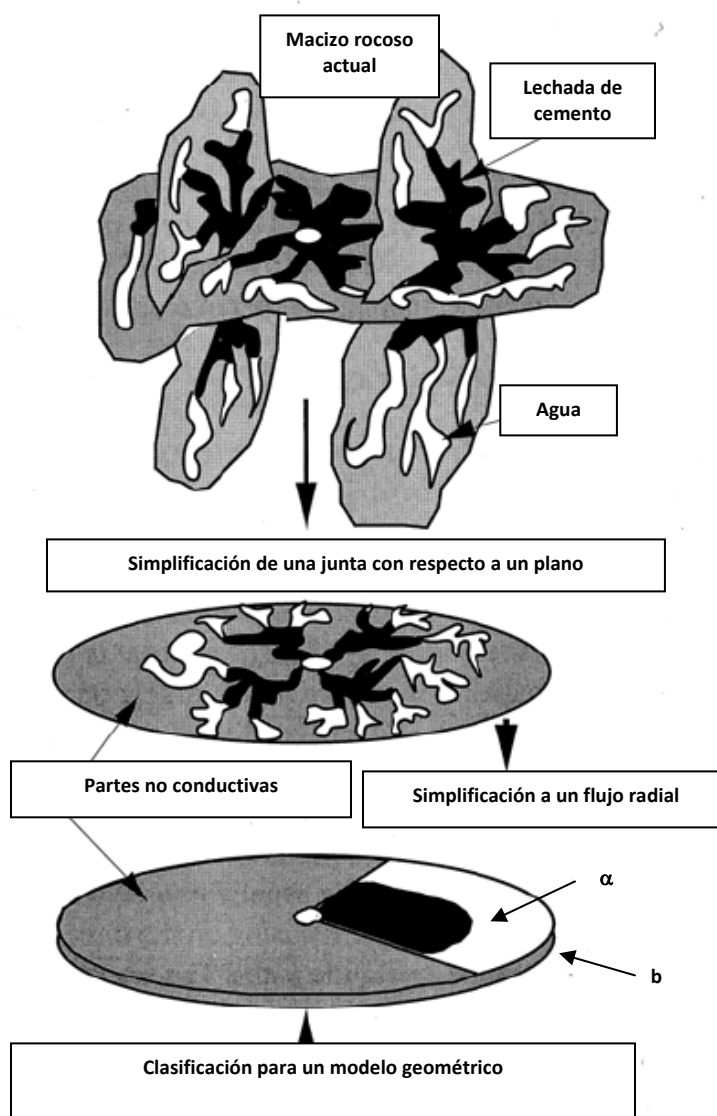


Figura 43. Simplificación de la geometría de una fractura por medio del ángulo de derrame, α (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001).



Tabla 12. Valores del ángulo de derrame, α (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001).

| Clasificación RMR | Valores del ángulo de derrame (α) (radianes) |
|-------------------|--|
| Muy buena | 2.4 |
| Buena | 0.8 |
| Regular | 0.4 |
| Pobre | 0.2 |

El volumen de lechada puede ser expresado por medio de la ecuación 18 (Brantberger *et al.*, 2001).

$$V = l^2 * b * \frac{\alpha}{2} * N \quad (18)$$

En la ecuación 18, N representa el número de fracturas, expresadas por el factor K_2 , el volumen está dado por:

$$V = l^2 * b * \pi * k_2 * N \quad (19)$$

Donde:

$$k_2 = \frac{\alpha}{2\pi} \quad (20)$$

Introduciendo la notación de presión normalizada (p_n) y volumen normalizado (V_n) se pueden escribir las ecuaciones 21 y 22:

$$p_n = \frac{p * k_2}{3 * \rho * g * h} \quad (21)$$

$$V_n = \frac{V}{h^2 * \pi * k_2 * N} \quad (22)$$

Entonces las ecuaciones 16 y 19 proporcionan la siguiente relación para la determinación del riesgo de carga hidráulica elevada.

$$p_n < 1 + \sqrt{\frac{b}{V_n}} + \frac{1}{3} * \frac{b}{V_n} \quad (23)$$

En la figura 44 se muestra la relación entre la presión normalizada (p_n) y el volumen normalizado (V_n) para diferentes aberturas (b).

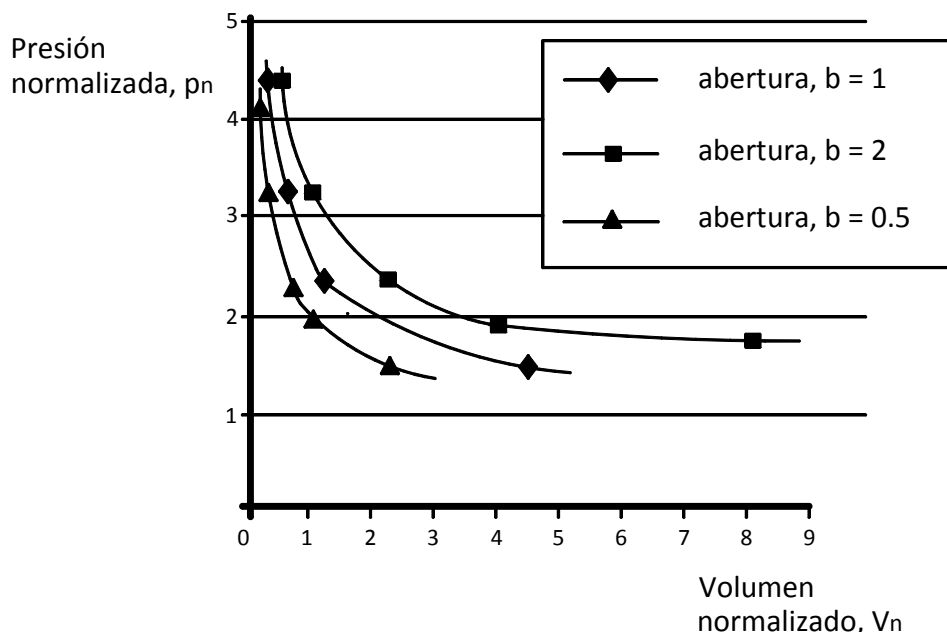


Figura 44. Relación entre presión y volumen presentando el riesgo para un levantamiento de la masa de roca (ángulo de cono $\beta=45^\circ$) (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001).

Para una abertura específica, el área superior a las curvas representa levantamiento de la masa de roca. Esto puede ser visto en la ecuación 23 y en la figura 45 en la que se muestra el riesgo de levantamiento, en las que el producto entre la presión (p) y volumen (V), no es una constante, como es el caso para un valor del GIN (es factible compararlo con la ecuación 10). Según la opción del valor del GIN, el riesgo para el levantamiento hidráulico será diferente para cada situación específica. Otra conclusión de los análisis es que, con las consideraciones hechas, una presión de al menos tres veces el esfuerzo vertical puede ser usada sin cualquier riesgo de levantamiento hidráulico. Esta conclusión puede hacerse a partir del factor K_1 , que es mayor o igual a 1 y el factor K_2 que es menor o igual a 1 (ver la ecuación 16).

Si el volumen normalizado (V_n) se divide entre el ancho de la abertura (b), se obtiene una expresión para la distancia normalizada a la que se extiende una lechada (l).

$$l_n = \frac{l}{h} = \sqrt{\frac{V_n}{b}} \quad (24)$$

La ecuación 23 se transforma entonces a:

$$p_n < 1 + \frac{1}{l_n} + \frac{1}{3 * l_n^2} \quad (25)$$



La relación entre la presión (p_n) y la distancia de recorrido normalizada de la lechada (l_n) se muestra en la figura 45.

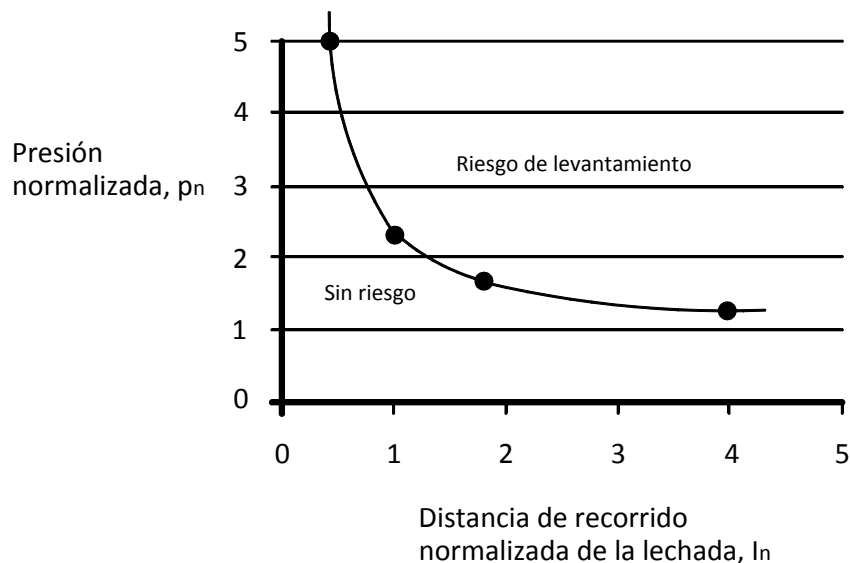


Figura 45. Relación entre presión y distancia de recorrido normalizada de la lechada identificando el riesgo para un levantamiento hidráulico (ángulo de cono $\beta=45^\circ$) (Brantberger M., Stille H. y Eriksson M., 2001).

El área que se localiza en la parte superior de la línea de la figura 45 representa el levantamiento de la masa de roca.

Normalizando la presión y el volumen es posible controlar simultáneamente la distancia de recorrido de la lechada y el riesgo del levantamiento; sin embargo, es difícil determinar la distancia de recorrido normalizada de la lechada (l_n). Como se ha descrito antes, el ángulo de derrame (α) puede estimarse a partir de clasificaciones de la masa de roca o de pruebas de inyectabilidad, y la abertura (b) puede evaluarse a partir de pruebas hidráulicas o bien de pruebas de inyectabilidad (ver Brantberger *et al.*, 2001).

En el análisis anterior se supuso que el levantamiento hidráulico ocurre debido a la inyección de una fractura horizontal, siendo esta la situación más crítica y, por tanto, se está en el lado seguro; sin embargo, es posible inyectar una fractura vertical cerca de la superficie, al menos desde un punto de vista teórico, pudiendo presentarse un movimiento de cuñas de roca debido a una falla pasiva por empuje hidráulico.

3.7.2 Distancia estimada a la que una lechada se extiende empleando el concepto del factor de inyectabilidad, K .

Se sabe que si la abertura (b) y el ángulo de derrame (α) son conocidos, la distancia de recorrido de la lechada (l) y el riesgo del levantamiento hidráulico pueden ser controlados.



Otro modo de estimar el recorrido de la lechada es mediante el concepto del factor de inyectabilidad (K), usando la definición del valor del GIN como el producto del volumen (V) por la presión (p) en el momento de flujo cero, tal y como se muestra en la ecuación 26.

$$I = K * \sqrt[3]{\frac{p * V}{\tau_0}} \quad (26)$$

Con el concepto de factor de inyectabilidad, no es necesario el valor de la abertura para determinar la distancia de recorrido de la lechada (I), ya que puede ser usado para calcular la distancia de recorrido normalizado de la lechada (I_n). En cambio, el valor de punto de fluencia de la lechada (τ_0) debe ser conocido. La presión y el volumen en el momento de flujo cero son medidos durante la operación de inyección.

De acuerdo a Brantberger *et al.* (2001), existen tres modos principales para determinar el factor inyectabilidad (K).

1. Por clasificación de la roca simulando el proceso de inyección.
2. Experimentalmente, midiendo el recorrido de la lechada para diferentes valores del GIN y del punto de fluencia de la misma.
3. Actualizando el valor del GIN por medio de observaciones durante la operación de inyección.

A través del modelo de cálculo anterior es posible estimar el consumo de lechada dado por Brantberger *et al.* (2001), así como expresar el factor de inyectabilidad (K) por medio del ángulo de derrame (α) y del número de fracturas (N).

Según Brantberger *et al.* (2001), el volumen y la distancia de recorrido de la lechada pueden calcularse con las ecuaciones 27 y 28.

$$V = I^2 * b * N \frac{\alpha}{2} \quad (27)$$

$$I = \frac{p * b}{2 * \tau_0} \quad (28)$$

Donde:

- p = Presión de inyección con flujo de lechada cero.
- V = Volumen de inyección con flujo de lechada cero.
- b = Abertura de la fractura.
- I = Distancia de recorrido de la lechada.
- τ_0 = Punto de fluencia de la lechada.
- N = Número de fracturas.
- α = Ángulo de derrame.



Combinando las ecuaciones 27 y 28, y considerando la presencia del producto de la presión (p) y del volumen (V), además de comparar con la ecuación 26, se obtiene la ecuación 29, la cual puede usarse para determinar el factor de inyectabilidad (K).

$$K = \sqrt[3]{\frac{1}{N^* \alpha}} \quad (29)$$

Como se mencionó antes, con el concepto de factor de inyectabilidad se conoce el valor del punto de fluencia para determinar el valor del recorrido de la lechada. Con sólo usar una bacha de lechada al momento de rechazo (cero flujo) se conocerá el punto de fluencia adecuado. Sin embargo, en la práctica, el uso de varias bachas es común y éstas se preparan continuamente, por lo que no resulta clara la elección del punto de fluencia de la lechada utilizada al final del proceso (Brantberger *et al.*, 2001).

3.7.3 Procedimiento propuesto para controlar la inyección.

Basado en los análisis presentados, se propone el siguiente procedimiento para la inyección en un solo barreno.

- a) Elegir valores de ángulos de derrame (α) y aberturas (b) basados en una clasificación de masa de roca, mediante simulaciones numéricas de inyección.
- b) Medir continuamente la presión de lechada (p) y el volumen (V) durante la inyección.
- c) En intervalos específicos, ajustar la presión para alcanzar el flujo cero a fin de hacer un control de la distancia recorrida por la lechada y de la posible elevación del terreno.
- d) Calcular la presión normalizada (p) y la distancia de recorrido normalizada de la lechada (l).
- e) Comprobar el riesgo del levantamiento hidráulico y si la extensión de lechada está en el intervalo aceptable l_{\min} a l_{\max} .



3.8 Fórmula y modelo numérico para predecir el proceso en una inyección.

Con el propósito de predecir el tiempo y el volumen de lechada para realizar la inyección de terrenos fisurados, se han desarrollado modelos matemáticos que tratan de representar las características físicas del medio en el cual se realiza la inyección y de la lechada que se inyecta. Estos modelos se han tratado de representar experimentalmente en laboratorio. Para calibrarlos, se han utilizado resultados reales que permiten ajustar coeficientes que intervienen en la modelación, y aplicarlos a casos con situaciones semejantes a aquellas en las que previamente se realizaron inyecciones, mediciones y calificación de los resultados.

El modelo numérico que se presenta a continuación permite predecir el proceso, la cantidad y el tiempo de duración de la inyección en un macizo rocoso, siempre y cuando se tengan definidos los parámetros que intervienen. Tales parámetros son el área seccional de las juntas, el tipo de lechada por emplear y la presión efectiva al inyectar.

Mutoh *et al.* (1999) desarrollaron un modelo de inyección con énfasis en el cambio de área seccional de las juntas. Las predicciones generadas por este modelo se compararon con los resultados de pruebas de inyección usando un aparato experimental construido con tubos transparentes.

H. Satoh, Y. Yamaguchi y T. Abe (2003) propusieron un modelo simplificado para el proceso de inyección en roca, con la intención de predecir el tiempo y el volumen de mezcla a utilizar en un proceso de inyección. El modelo toma en cuenta la abertura inicial de la grieta y el rendimiento de la inyección, y está expresado por:

$$\frac{Q_t}{P_t} = \alpha * (D_0 - \beta * t)^3 * \frac{1}{\mu} \quad (30)$$

Donde:

Q_t = Gasto de lechada inyectada en el tiempo t (l/min/m).

P_t = Presión efectiva de inyección en el tiempo t (MPa).

α = Constante basada en el número de grietas (l/min/m⁴/0.98MPa).

D_0 = Promedio de la abertura de la grieta en el tiempo $t=0$ (m).

β = Constante basada en la velocidad de llenado de la grieta (m/min).

t = Tiempo transcurrido desde el inicio de la inyección (min).

μ = Viscosidad de la lechada de cemento/viscosidad del agua.

La ecuación 30 describe el proceso mediante el cual: 1) el ancho de la fisura decrece con el tiempo al rellenarse ésta por la mezcla inyectada y; 2) la cantidad de mezcla inyectada va disminuyendo conforme decrece el ancho de la fisura. El término $(D_0 - \beta * t)$ en la ecuación (30) representa el estrechamiento de la fisura con el tiempo conforme ésta se va rellenando de lechada. Se asume en la ecuación que el flujo de la lechada es laminar.

El coeficiente α está relacionado con el número de grietas a lo largo del barreno de inyección. El valor de α es alto si el número de grietas es alto en el barreno. El coeficiente β está relacionado con la velocidad de llenado de la abertura por la lechada y es gobernado por factores como la proporción a/c de la mezcla y el rendimiento de la inyección. Un valor alto de β significa que las grietas se llenan rápidamente.



Si hay linealidad entre la presión de inyección y el gasto de inyección, en el modelo se considera que $0.98Q_t\mu/P_t$ es equivalente a una unidad "Lugeon" (la unidad Lugeon convencional fue definida para calificar el gasto de agua por metro lineal de barreno que ocurre a 0.98 MPa de presión al ejecutar una prueba de absorción). Si se considera la definición de la unidad "Lugeon", se sustituye en la ecuación 30 el valor de Q_t/P_t , derivado de esa definición, y se considera el momento de inicio de la inyección ($t=0$), se llega a que la unidad "Lugeon" puede expresarse también como:

$$UL_0 = 0.98\alpha D_o^3 \quad (31)$$

Conociendo el valor de la unidad "Lugeon" a partir de la ecuación 31, es posible determinar α o D_o . Sustituyendo α de la ecuación 31 en la ecuación 30, se obtiene la ecuación 32, la cual permite predecir el proceso de una inyección.

$$\frac{Q_t}{P_t} = \frac{UL_0}{0.98} \left(1 - \frac{\beta}{D_o} t\right)^3 \frac{1}{\mu} \quad (32)$$

3.8.1 Condiciones para análisis de datos.

Las siguientes condiciones se basan en datos de una inyección real, las cuales se han analizado con la finalidad de examinar el comportamiento del modelo de la ecuación 30.

1. El valor de la unidad "Lugeon" inicial (UL_0) se calcula a partir de los datos de la presión de inyección, del flujo de lechada y de la dosificación de la mezcla (a través de su viscosidad), antes de que el gasto de inyección o la presión hayan alcanzado los valores especificados.
2. La viscosidad de la lechada se ve afectada por cambios de temperatura y por el esfuerzo cortante que se produce con la velocidad de la lechada al introducirse en las grietas (Sato *et al.*, 2003). Sin embargo, por simplicidad, el modelo asume que la viscosidad es afectada sólo por la dosificación de la mezcla, y no por la temperatura, ni por el esfuerzo cortante.
3. Los resultados del proceso de inyección, obtenidos mediante medición con instrumentos electrónicos, manifiestan cambios repentinos en la dosificación de las mezclas inyectadas durante el tratamiento. Sin embargo, durante la inyección real, el cambio entre una lechada y otra con dosificación diferente, se produce gradualmente. El modelo considera que el cambio se genera de una manera lineal entre una dosificación y otra, como se muestra en la figura 46.

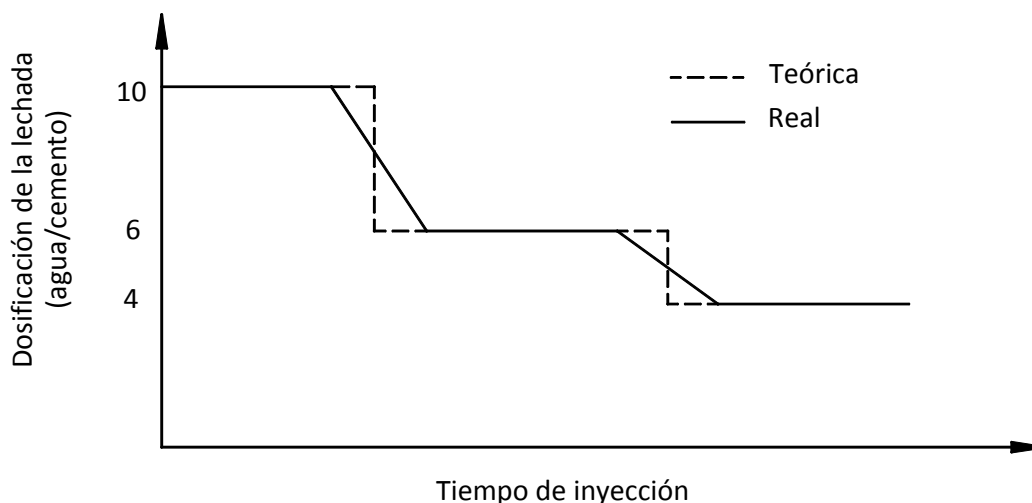


Figura 46. Cambio de dosificación de la lechada (Satoh H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003).

3.9 Predicción de la cantidad y del tiempo de duración en una inyección.

De acuerdo con el modelo, la cantidad de lechada y el tiempo para realizar la inyección pueden predecirse. Sin embargo, hay que considerar que los valores de las pruebas “Lugeon” de los cuales se parte y que son determinados en pruebas de inyectabilidad, dependen de las características (número, espaciamiento, abertura) de las fisuras en el sitio específico en el cual se realizan las pruebas y de las condiciones (temperatura, viscosidad) de la lechada que se inyecta. Como cualquier modelo, el que se presenta es orientativo y aproximado.

Como ejemplo de aplicación del modelo propuesto por H. Satoh, Y. Yamaguchi y T. Abe se presentan y comentan los resultados de una inyección con base en parámetros obtenidos en pruebas previas para diferentes tiempos de inyección (11, 21 y 31 minutos), y las predicciones realizadas por los autores para un caso real a partir del propio modelo.

Para simplificar el proceso de predicción, el valor de β/D_0 se determinó a partir de datos de uno de los tiempos anteriores, mientras que el valor de UL_0 se calculó a partir del gasto, de la presión de inyección y de la viscosidad de la lechada obtenidos o utilizados en los primeros trabajos de inyección (pruebas de inyectabilidad). A partir de la fórmula 32 se calculó β/D_0 aplicando técnicas de mínimos cuadrados a los parámetros mencionados anteriormente, obtenidos en las mismas pruebas previas; con esta misma fórmula se obtuvo Q_t/P_t para cualquier tiempo.

Los valores predichos a partir del modelo se compararon con los valores observados y medidos. Las figuras 47 y 48 muestran, respectivamente, la comparación entre los tiempos de inyección calculados y observados y la cantidad de inyección calculada y observada determinadas a partir de datos obtenidos en pruebas previas para 11, 21 y 31 minutos de inyección.

Las curvas de la figura 49 muestran consistencia entre los valores observados y los calculados del flujo con el tiempo, pero en la figura 50 se observa una discrepancia entre el flujo de la lechada calculado y observado al aumentar el tiempo.



En general, hay una diferencia considerable en el tiempo de duración de la inyección entre los valores observados y los calculados. Las diferencias entre los resultados observados y los calculados correspondientes a 11 minutos tienden a ser mayores que en 21 y 31 minutos, lo que manifiesta una regularización del proceso de inyección al prolongarse el tiempo del mismo, aparentemente por la uniformización de las condiciones del medio conforme avanza el proceso.

Las cantidades de inyección calculadas muestran la mayor dispersión en 11 minutos, lo que puede ser atribuido a la inestabilidad del proceso al principio del mismo, y que parece indicar la necesidad de un cierto tiempo para lograr la estabilización del proceso de inyección.

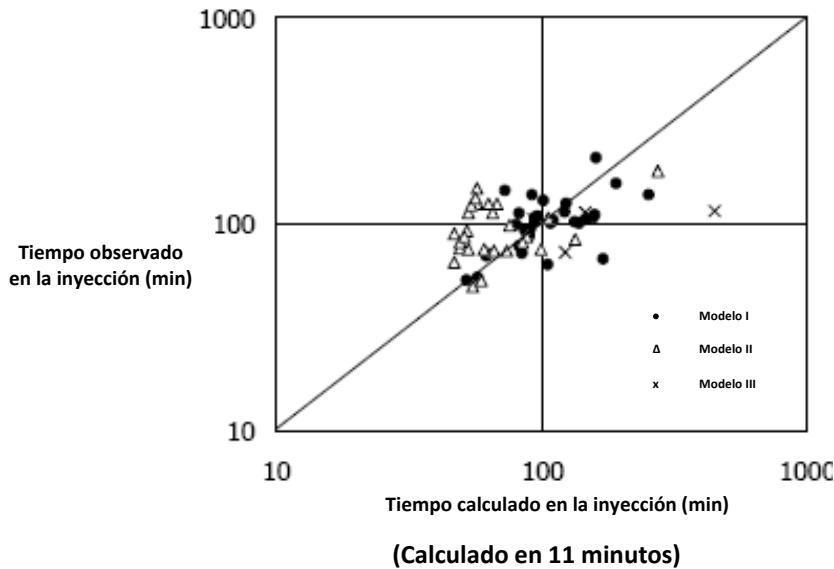


Figura 47 a). Datos observados y calculados del tiempo de inyección (Sato H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003).

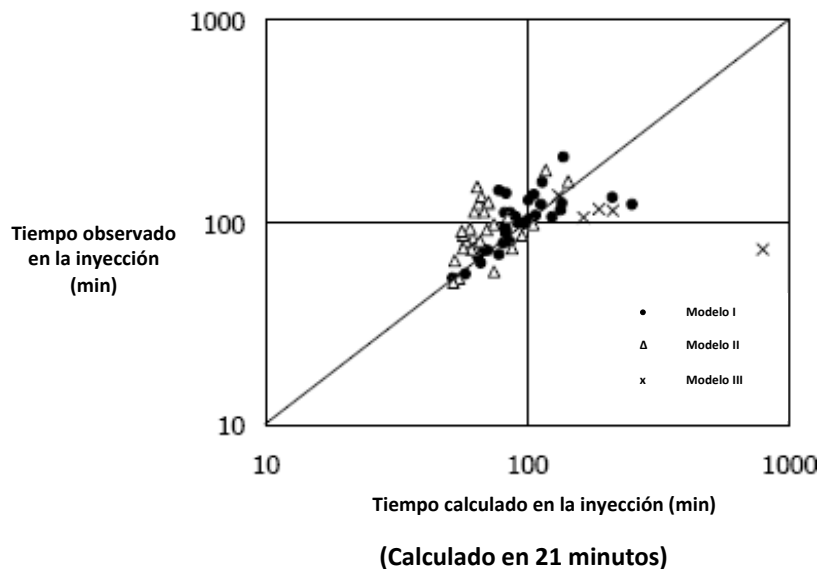


Figura 47 b). Datos observados y calculados del tiempo de inyección (Sato H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003).

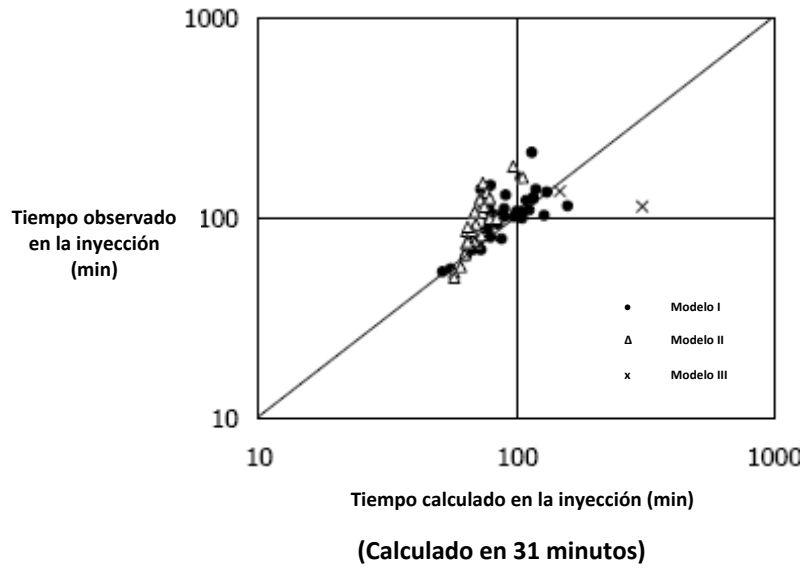


Figura 47 c). Datos observados y calculados del tiempo de inyección (Sato H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003).

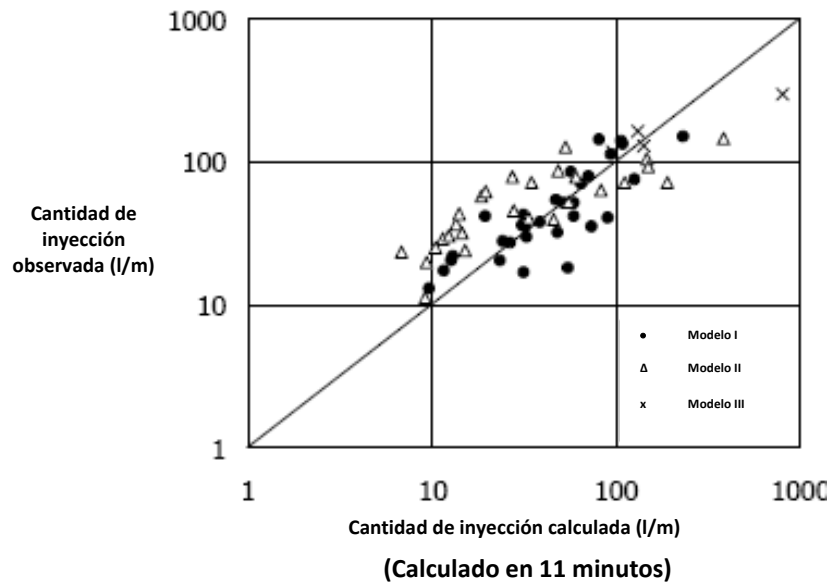


Figura 48 a). Cantidad de inyección observada y calculada (Sato H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003).

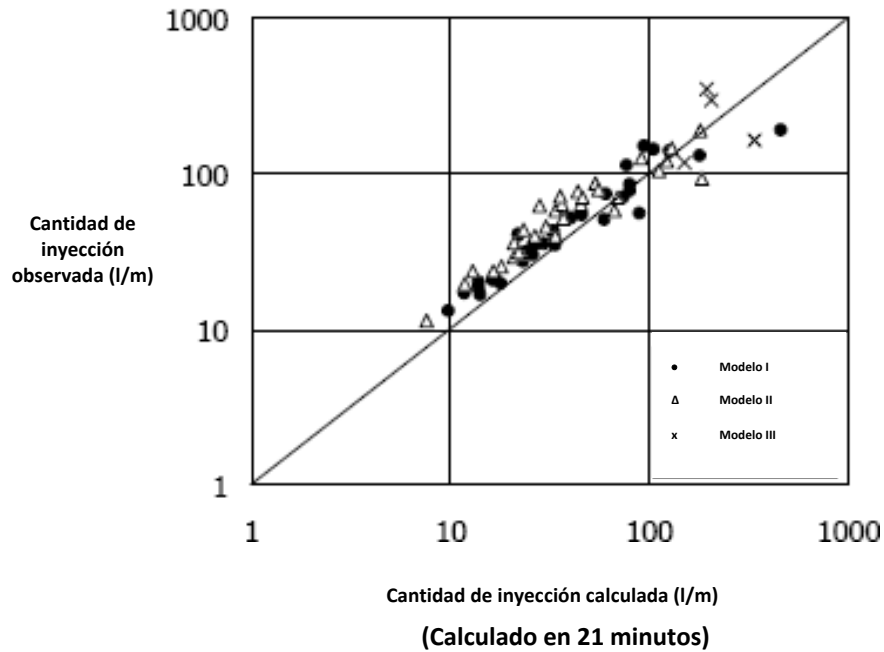


Figura 48 b). Cantidad de inyección observada y calculada (Sato H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003).

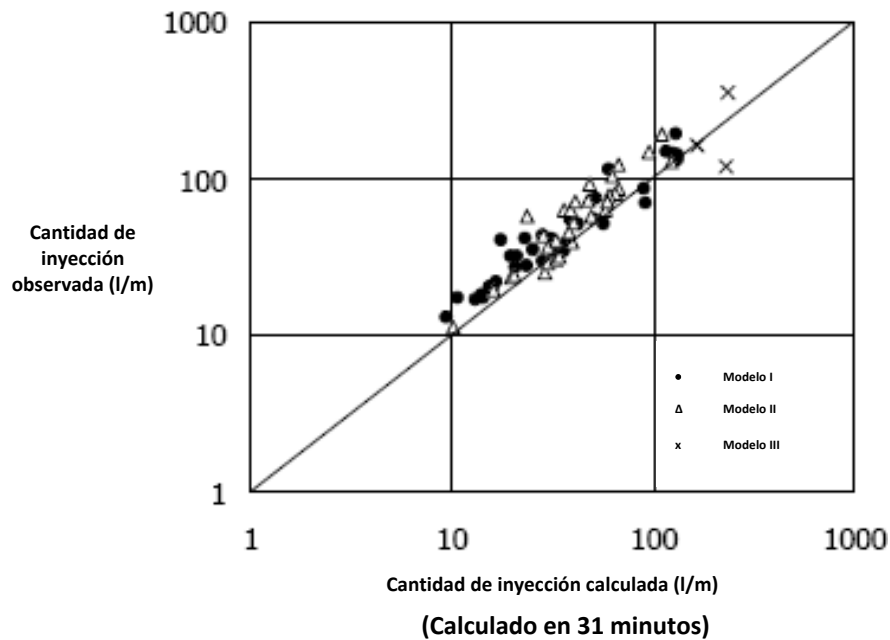


Figura 48 c). Cantidad de inyección observada y calculada (Sato H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003).

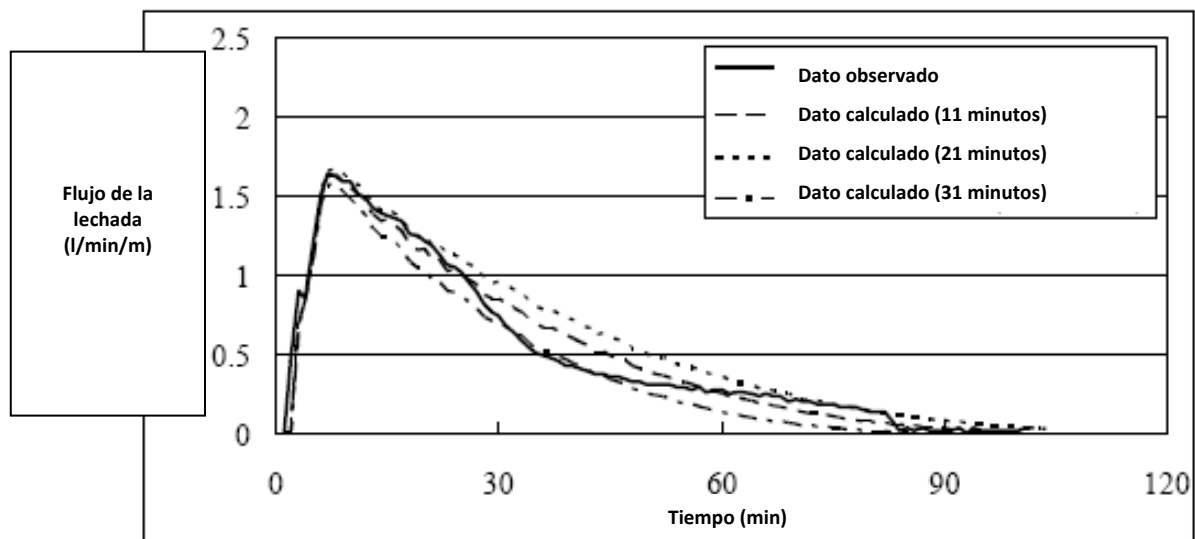


Figura 49. Comparación de datos observados y calculados (Satoh H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003).

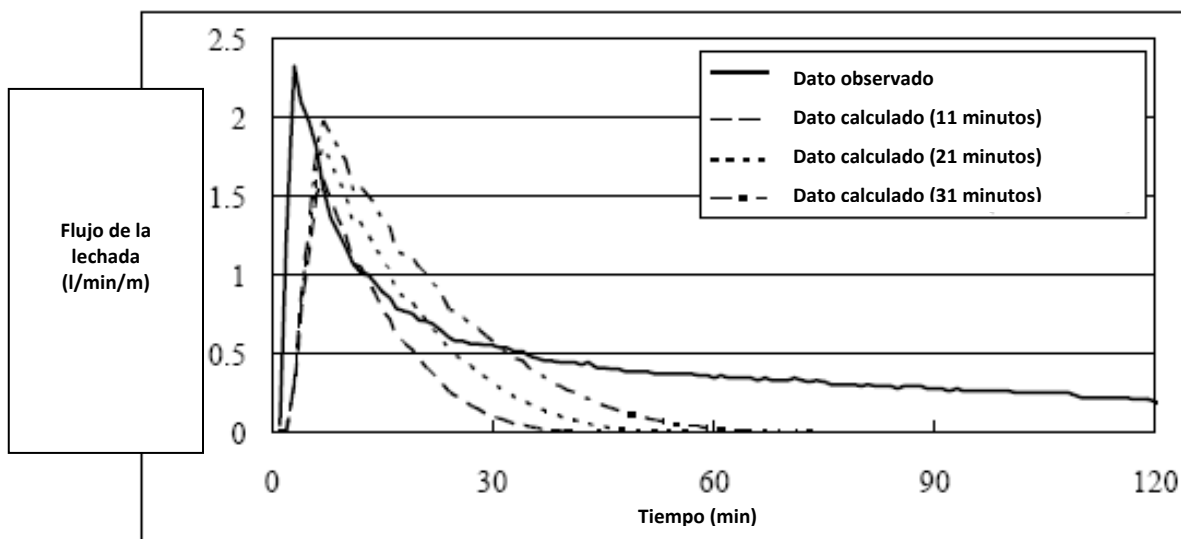


Figura 50. Comparación de datos observados y calculados con un incremento en el flujo de la lechada (Satoh H., Yamaguchi Y. y Abe T., 2003).





Capítulo

4

Control de la inyección usando el método GIN.

4.1 Introducción.

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos del método GIN (Grout Intensity Number). Estos conceptos fueron agrupados en este capítulo ya que en los Capítulos 2 y 3 se describió el proceso de inyección, desde sus conceptos básicos hasta la aplicación en una pantalla de impermeabilización. Por tanto, en este capítulo primero se menciona la selección de la mezcla usada en el inyectado así como el estudio del GIN en el macizo rocoso. Posteriormente se describe la aplicación a pantallas de inyectado y los diferentes criterios que se emplean para dar por finalizada la inyección durante el tratamiento. Finalmente se mencionan los principales puntos del método GIN.

Los resultados que se muestran a lo largo de este capítulo servirán de base para tener una mejor interpretación de la información que se presenta en el Capítulo 5.

4.2 Introducción al método GIN.

El inyectado de lechada de cemento en masas de roca tiene por objetivo mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas. Lamentablemente se han presentado una serie de técnicas basadas en reglas empíricas y experiencias personales que llevan a una creencia dogmática. Por ello, con ayuda de información, tal como la resistencia a la fluencia (cohesión) y la viscosidad dinámica de diferentes mezclas de inyectado, de estudios teóricos de flujo y penetración de lechada, así como del monitoreo en campo de presiones de inyectado y absorciones, se originó el concepto del **Número de Intensidad de Inyectado (GIN)**.

El GIN se define como el método que tiene por objeto el inyectar en el macizo rocoso una mezcla de cemento con las siguientes características:

1. Mezcla estable durante todo el proceso de inyección con una dosificación de agua:cemento por peso de 0.67 a 0.8:1, con un aditivo superplastificante para incrementar su penetrabilidad.
2. Velocidad de bombeo de la lechada baja a media, con incremento de presión durante el proceso, para que la mezcla penetre a mayor profundidad en las fracturas de la roca.



3. Control de la inyección mediante monitoreo de la presión, velocidad de flujo, volumen inyectado y penetrabilidad (gasto inyectado entre presión de inyección) contra el tiempo. Lo anterior puede realizarse con apoyo de un equipo de cómputo para obtener gráficas y analizarlas en tiempo real.
4. La inyección se considera terminada cuando se alcance la presión máxima o el volumen máximo establecidos previamente o, cuando el producto de la presión por el volumen inyectado (PV) llegue a un cierto valor definido también previamente. A este valor de PV se le denomina GIN. Además de cumplir las tres condiciones anteriores, debe tenerse una condición de flujo nulo de lechada.

4.2.1 Principios del método GIN.

1. Establece el alcance de los trabajos de inyección a partir de la definición de la presión y del volumen de inyección más conveniente determinada en pruebas de inyectabilidad.
2. Diseña, no especifica, el proceso de inyección.
3. Selecciona la "mejor mezcla" para el proyecto a partir de resultados de pruebas de laboratorio desde el punto de vista técnico y económico.
4. Simplifica el proceso de inyección debido al empleo de una sola mezcla, "la mejor posible", para todas las etapas de inyección, asegurando la calidad de los resultados.
5. Define los parámetros de la curva GIN a partir de pruebas de inyectabilidad, tomando en cuenta las condiciones geológicas y los parámetros de mecánica de rocas, así como el alcance de los trabajos y la economía relacionada con el proyecto.
6. Confirma los resultados de las pruebas de inyectabilidad durante su aplicación práctica y comprueba los trabajos realizados mediante pruebas adicionales de inyección.
7. Permite ampliar los alcances del programa de inyección con base en los resultados que se obtengan progresivamente.

4.3 Conceptos teóricos del flujo de lechada y su penetración.

La lechada "estable" es un fluido Binghamiano, ya que presenta un comportamiento viscoso y cohesivo. Estos dos elementos son muy importantes durante el proceso de inyección debido a que gobiernan la velocidad y la distancia máxima de penetración de la lechada.

La distancia máxima de penetración que se llega a obtener durante una inyección está en función de la presión aplicada, de la abertura de las fisuras y de la cohesión de la lechada; por ello es importante obtener una presión de inyectado alta reduciendo la cohesión.

Uno de los aspectos importantes en las ecuaciones de flujo Binghamiano es proporcionar una visión del proceso de inyección en función de los factores que intervienen en la penetración de la lechada en una fisura de roca, lo que determina la magnitud de las fuerzas de empuje producidas durante la inyección.



Una lechada presenta comportamiento estable si al someterla a un proceso de decantación en una probeta de 1,000 ml, durante 2 horas, presenta 5% de agua libre en su superficie. De no ocurrir así, la mezcla será inestable y estará sujeta a un comportamiento difícil de predecir, cómo podría ser una sedimentación errática, erosión, re-suspensión y re-sedimentación.

4.4 Selección de la mezcla de inyectado.

El uso de mezclas “ligeras o delgadas” (inestables) y “pesadas o espesas” (estables) ha venido decayendo desde 1985, ya que el manejo de mezclas estables ha tenido mayor preferencia.

La proporción de bentonita (1 a 2%) en la mezcla se ha reemplazado poco a poco por contenidos de cemento más elevados, pero con aditivos superplastificantes, dando origen a mezclas estables con propiedades tales que permiten menor cohesión y mayor penetración y resistencia después del fraguado.

El manejo de mezclas estables sobre las inestables presenta algunas ventajas en el proceso de inyección, tales como:

- a) Menor sedimentación de los granos de cemento durante condiciones de flujo lento.
- b) Menor cantidad de agua de sangrado en zonas estrechas en las trayectorias de flujo, con menor bloqueo prematuro.
- c) Mayor estabilidad en el tiempo y distancia como un fluido predecible.
- d) Menor riesgo de hidrofracturamiento y levantamiento de los estratos geológicos, ocasionados por una caída de presión rápida, al alejarse de la perforación de inyectado, como resultado de la baja cohesión de la lechada.

Una vez que la lechada ha endurecido en las fisuras de la roca, la lechada estable presenta las siguientes ventajas sobre la inestable.

- a) Menor contracción durante el fraguado, ocasionando mayor adherencia a las paredes de la fisura y por consiguiente menor riesgo de una re-abertura.
- b) Mayor densidad y resistencia mecánica ocasionado por el contenido de cemento, implicando mayor resistencia a la erosión y a la tubificación.
- c) Menor porosidad, permeabilidad y mayor resistencia de liga, lo que provoca mayor resistencia química contra la lixiviación y, por consiguiente, mayor durabilidad de la pantalla de inyectado durante la vida útil de la presa.

Cabe señalar que las lechadas estables requieren presiones de inyectado mayores que las inestables para alcanzar la misma penetración dentro del macizo rocoso. No obstante, con el manejo de los aditivos superplastificantes es posible reducir su cohesión y viscosidad.



La relación agua:cemento en peso de mezclas estables empleada es de 0.67 a 0.8:1 con el fin de que presenten mayor densidad y resistencia. El control en este tipo de mezclas se realiza por medio de pruebas de laboratorio en que se determinan las propiedades de flujo, sedimentación, fraguado y resistencia.

Los valores de cohesión y viscosidad se obtienen por medio de un viscosímetro rotatorio con cilindros concéntricos. También puede emplearse una “placa de cohesión”, la cual consiste en una placa cuadrada de acero, rugosa, de 100 mm por lado, con un espesor de 1.5 mm. El procedimiento para determinar la cohesión consiste en pesar la placa antes y después de ser sumergida unos segundos en la mezcla; la diferencia en peso dividida entre el área de ambos lados de la placa proporciona el parámetro de la cohesión en unidades de resistencia al esfuerzo cortante. Es conveniente dividir la cohesión C entre el peso unitario de la lechada g , expresando la cohesión relativa C_r en mm, tal y como se observa en la ecuación (1).

$$C_r = \frac{C}{g} \quad (1)$$

Valores típicos de la cohesión relativa aparecen en la tabla 13.

Tabla 13. Valores típicos de la cohesión relativa en lechadas espesas (Lombardi y Deere 1993).

| Cohesión relativa, C_r (mm) | Tipo de lechada |
|-------------------------------|---|
| 0.2 a 0.35 | Estable, sin aditivo superplastificante |
| 0.08 a 0.15 | Estable, con aditivo superplastificante |

Con base a la tabla 13, se entiende que la cohesión relativa es el espesor de lechada de cemento que se adhiere a cada lado de la placa de cohesión, la cual debe ser suficientemente rugosa, con pequeñas ranuras sobre ambas caras, en dos direcciones ortogonales, de manera que la adhesión entre la superficie del acero sea mayor que la cohesión entre la capa superficial de la lechada adherida y el resto de la lechada.

Otras propiedades de la lechada que se obtienen en laboratorio son su peso específico, el cual presenta valores de 1.59 y 1.67 ton/m³ (99.2 a 104.2 lb/ft³), el tiempo de flujo en el cono Marsh, que varía de 29 a 32 s; y la resistencia a la compresión simple a los 28 días con valores de 15 a 20 MPa (2,250 a 3,000 lb/in²).

Al realizar la inyección, la lechada presenta pérdida potencial de agua en su estructura, lo cual ocurre cuando se inyecta en roca seca. Por ello, es conveniente inyectar agua por un periodo de tiempo previo a la inyección y tener una saturación parcial de la roca, o bien emplear aditivos retenedores de agua en la lechada.

Uno de los elementos que se debe de tomar en consideración en la lechada es el tamaño de los granos de cemento y de las partículas de cemento aglutinadas que se presentan en la dilución de



la mezcla con agua, ya que el tratar de inyectar en fisuras finas y provocar una mayor penetración, estará en función del cemento más fino con un aditivo superplastificante y su respectiva presión.

A partir de las propiedades que se han mencionado previamente, el método GIN empleará la mezcla obtenida para todo el inyectado en el proyecto, ya que una sola mezcla simplifica considerablemente el proceso.

4.5 Desarrollo del método GIN.

4.5.1 Inyectado de fisuras amplias abiertas.

Durante el proceso de inyección se ha llegado a la conclusión que es más sencillo inyectar fisuras abiertas que fisuras finas; no obstante, existen parámetros que deben ser evaluados al llevar a cabo la inyección. Ejemplo de ello es la penetración de la lechada, ya que no es económicamente factible inyectar grandes volúmenes de lechada; por ello existen formas para poder abatir este tipo de situaciones.

Algunas de las formas para abatir altos consumos en una inyección con fisuras abiertas son:

- a) Emplear una lechada menos penetrante (más espesa, con mayor cohesión).
- b) Limitar la presión de inyección.
- c) Limitar el volumen de lechada inyectado.

Durante el proceso de inyección existen tanto fisuras abiertas como cerradas; estas últimas deben de tomarse en consideración en caso de elegir alguna de las tres alternativas mencionadas previamente, ya que lo más recomendable es continuar con el proceso de inyección en fisuras abiertas y que éstas sean llenadas de lechada mientras que las fisuras finas queden parcialmente llenas hasta una segunda etapa de inyección en donde serán llenadas totalmente. Por lo tanto, es recomendable no espesar la mezcla de inyección, pero sí mantener una lechada moderadamente espesa con un aditivo superplastificante. Por otro lado, limitar la presión de inyección limitaría el inyectado a las fisuras finas, por lo que se puede concluir que de las tres alternativas propuestas, la limitación del volumen de lechada es la más viable.

4.5.2 Inyectado de fisuras finas.

Dentro del proceso de inyección las fisuras finas juegan un papel importante, por lo que es necesario utilizar una mezcla moderadamente espesa, de alta calidad, con un aditivo superplastificante. Tomando en consideración que la presión aplicada a lo largo de las fisuras irá disminuyendo debido a la lejanía respecto a la perforación, la fuerza total de levantamiento ejercida será más baja, debiendo conservarse menor que el peso de la sobrecarga. Si dentro de los primeros metros inyectados (de 5 a 10) no se presenta hidrofRACTURAMIENTO en las juntas y planos de estratificación, es posible aplicar presiones elevadas (de 30 a 40 bar, es decir de 3 a 4 MPa), aunque la toma de lechada sea pequeña.

Cuando las tomas de lechada son pequeñas, algunos de los factores que deben de tomarse en consideración son obviamente la presión de inyectado, que en este caso se fija con un límite superior de 30 a 50 bar, así como la geología (intemperización, estratificación, zonas débiles, estado de esfuerzos in situ) y la presión de agua futura.



Por lo tanto, el proceso de inyección de fisuras finas tendrá como limitante la presión de inyección, ya que la lechada penetra con dificultad, a diferencia de las fisuras abiertas, donde la limitante es el volumen inyectado a bajas presiones.

4.5.3 Reducción del espaciamiento de las perforaciones del inyectado por etapas.

Las perforaciones del inyectado por etapas consisten en perforaciones primarias, con un espaciamiento de 10 a 12 m, que sirven como “exploratorias”, y que serán probadas mediante una presión de agua a una profundidad de $0.75 \times H$, en la que H es la altura del vaso futuro en el punto en cuestión.

Una vez inyectadas las perforaciones primarias o de primera etapa, se efectúa la segunda etapa, con barrenos que se perforan en los puntos intermedios, momento en el cual la lechada introducida en los barrenos de la primera etapa ya debe encontrarse endurecida y por tanto los recorridos de la lechada introducida en los de segunda etapa se verá limitada y el consumo será menor. De ser necesario, se procede a etapas subsecuentes perforando barrenos intermedios a los de cada etapa anterior. Es de esperar que en cada etapa el consumo de lechada inyectado sea menor.

En el proceso de inyección por etapas, se van rellenando más las fisuras finas sin que necesariamente se llegue a un llenado completo de las mismas, para lo cual es recomendable aumentar la presión conforme se avanza en las etapas de inyección a fin de lograr el mayor número y longitud de fisuras finas rellenas.



4.6 El método GIN.

4.6.1 Energía específica empleada.

En el método GIN la energía aplicada en el macizo rocoso es directamente proporcional a la calidad de éste. La energía empleada se define como el producto de la presión final de inyectado P y del volumen inyectado V , expresado por longitud unitaria del barreno inyectado, obteniéndose el parámetro PV , denominado “Número de Intensidad de Inyectado o GIN (*Grout Intensity Number*)”. La normalización del volumen inyectado se hace en relación a la longitud del intervalo inyectado, l/m; o bien, por peso de cemento inyectado en relación a la misma longitud, kg/m. Para mezclas moderadamente espesas, los valores expresados en l/m o en kg/m son semejantes, con diferencias de entre 5 y 10%.

4.6.2 Ventajas de mantener un valor GIN constante.

Una de las características que presenta el método GIN durante su aplicación es la del manejo de un valor constante de intensidad de inyectado, el cual se usa para todo tipo de fisuras que se encuentren durante el proceso de inyección, es decir, tanto para fisuras fácilmente inyectables con grandes volúmenes de absorción, como en fisuras más finas con un bajo consumo y desarrollo de presiones elevadas al inyectarlas.

Cabe señalar que con este tipo de criterios es posible controlar la inyección de una fisura abierta controlando el volumen de lechada consumida, así como el permitir el manejo de presiones elevadas en zonas con fisuras cerradas. Otra ventaja que presenta el método es la eliminación de presiones altas con altos consumos, con lo que se evitan grandes esfuerzos en la masa de roca que pudieran provocar hidrofracturamiento, además de eliminar presiones bajas con pequeños consumos, que provocarían una mala inyección en las fisuras finas.

El comportamiento del valor GIN es posible graficarlo mediante la presión y volumen normalizado. Estos dos factores generan una curva hiperbólica que permite controlar el volumen inyectado y la presión de inyección mediante dos líneas limitantes. Mientras más elevada sea la intensidad de inyectado o valor GIN, más grande es la distancia del origen a la curva PV (ver figura 41).

4.6.3 Envoltentes limitantes compuestas para diferentes intensidades de inyectado.

El comportamiento que presenta la lechada durante su proceso de inyección, debido a la interacción con las fisuras, abiertas o cerradas, puede verse claramente en la figura 51. En ella se muestra una curva PV con cuatro posibles trayectorias que estarían definidas por la combinación presión – volumen normalizado al inyectar la lechada en las fisuras existentes.

La trayectoria 1 corresponde a la inyección de una fisura abierta en la que el consumo de lechada es elevado (280 l/m) con una presión pequeña (9 bar), mientras que la trayectoria 2 denota un fisuramiento promedio, en donde la presión y volumen se incrementan gradualmente hasta llegar al sellado del barreno. La trayectoria 3 se trata de una fisura cerrada, en la que se incrementa la presión con pequeños consumos de lechada. Por último, en la trayectoria 4 se representa el comportamiento de la inyección de una fisura aún más cerrada que la de la trayectoria 3. La diferencia principal entre estas dos últimas trayectorias es la presión máxima alcanzada en cada una de ellas. Mientras que en la trayectoria 4 se alcanza la presión máxima establecida o presión



de rechazo, la trayectoria 3 representa un caso de que podría generarse hidrofracturamiento en caso de continuarse elevando la presión, como se comenta más adelante.

En la figura 51 se observan las trayectorias que seguiría el proceso de inyección de lechada dentro de las fisuras. Este proceso debe suspenderse cuando se toca la curva GIN, la cual denota la variación entre presión aplicada y volumen consumido por metro de barreno.

En la figura 52 se observan 5 curvas con sus respectivas presiones y volúmenes de consumo. A la primera curva, denominada de **“intensidad muy alta”**, corresponde un valor GIN de 2,500 barl/m con una presión máxima de 50 bar y un volumen de 300 l/min; además se observan las variaciones de intensidad con sus respectivos valores de GIN, de presión y de volumen máximo. En esta gráfica se manifiesta la elección del tipo de curva por emplear según las condiciones geológicas que se presenten, ya que dependerá de la presión máxima que pueda soportar el macizo rocoso. Ejemplo de ello son los taludes escarpados o una inyección cercana a la superficie, en donde serían aplicables las curvas 4 o 5, correspondientes a intensidades baja o muy baja, respectivamente.

La elección del valor de intensidad GIN es muy importante en el proceso de inyección ya que, como se ha mencionado previamente, depende directamente de la presión aplicada con su respectivo volumen consumido. Ejemplo de esta aseveración se observa en la trayectoria 1 de la figura 51, en la que se indican cuatro puntos a, b, c y d correspondientes a una intensidad baja, moderada, alta y muy elevada, respectivamente.

Para el primer caso, punto a, se observa un consumo de lechada de 150 l/m y una presión de 3 bar, mientras que para el caso b se presenta un consumo de 200 l/m y una presión de 3 bar, el punto c denota un consumo de 250 l/m con una presión de 6 bar y por último en el punto d se observa un consumo de 280 l/m con una presión de 9 bar. Esto refleja una variación de consumo de 130 l/min entre el punto a y d, presentando una diferencia de presión de 6 bar, por lo que se observa la importancia de la elección de la curva GIN.

Dentro de la figura 51 se presentan otros dos recorridos que experimenta la mezcla durante el proceso de inyección, en los que se reafirma que el consumo de la lechada y la presión dependen directamente del criterio GIN elegido, tal y como se observa en la trayectoria 2, en la que se presentan varias posibilidades de sellado en función de la intensidad GIN. Ejemplo de ello son los puntos a', b', c' y d', ya que si la inyección se hubiera detenido en el punto a', se tendría un consumo de 60 l/m con una presión de 18 bar, mientras que para el punto d' correspondiente a una intensidad GIN de 2,500 barl/m, el consumo y la presión cambian a 90 l/m y 28 bar, respectivamente.

Un detalle que se aprecia en la figura 51, trayectoria 3, tramo x-y, es el hidrofracturamiento que se produce cuando una junta o plano de estratificación es forzada repentinamente a una presión dada, la cual provoca una caída de ésta y por consiguiente un incremento en la velocidad de absorción de lechada. El proceso de inyección puede continuar a pesar de este suceso, con la condición de mantener una velocidad baja a una misma presión, para llegar a la curva de intensidad seleccionada.



Universidad Nacional Autónoma de México
 Capítulo 4. Control de la inyección usando el método GIN.

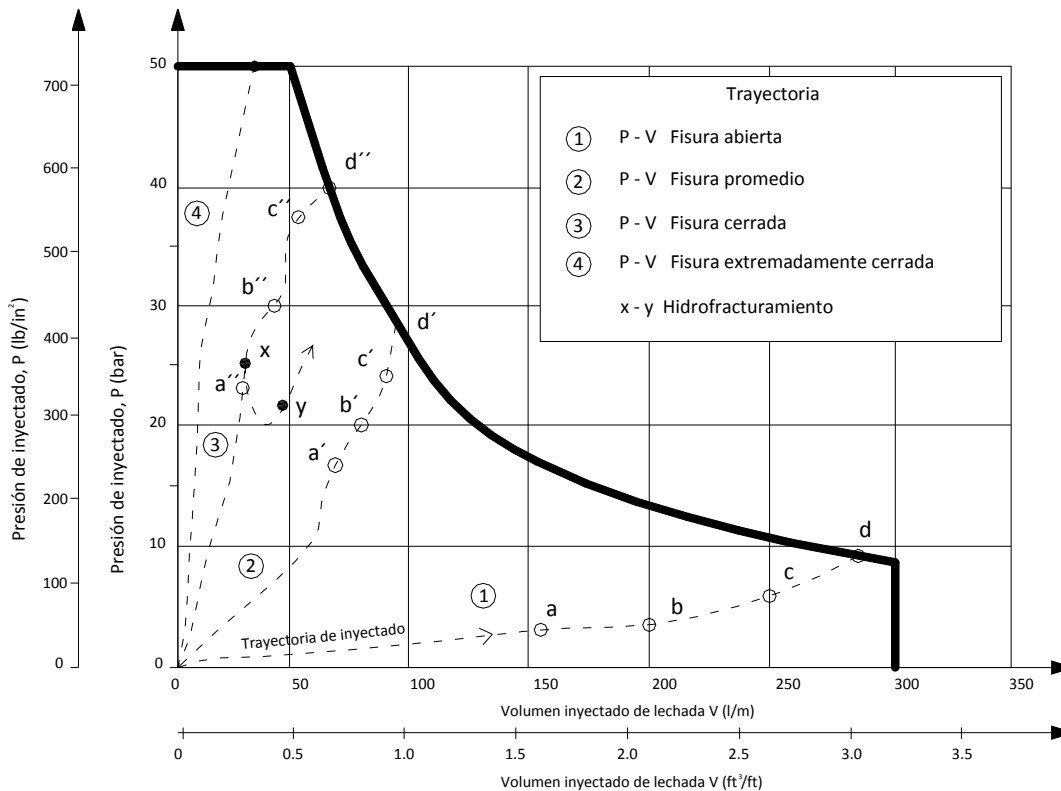


Figura 51. Ejemplo de trayectorias de inyectado (Lombardi y Deere, 1993).

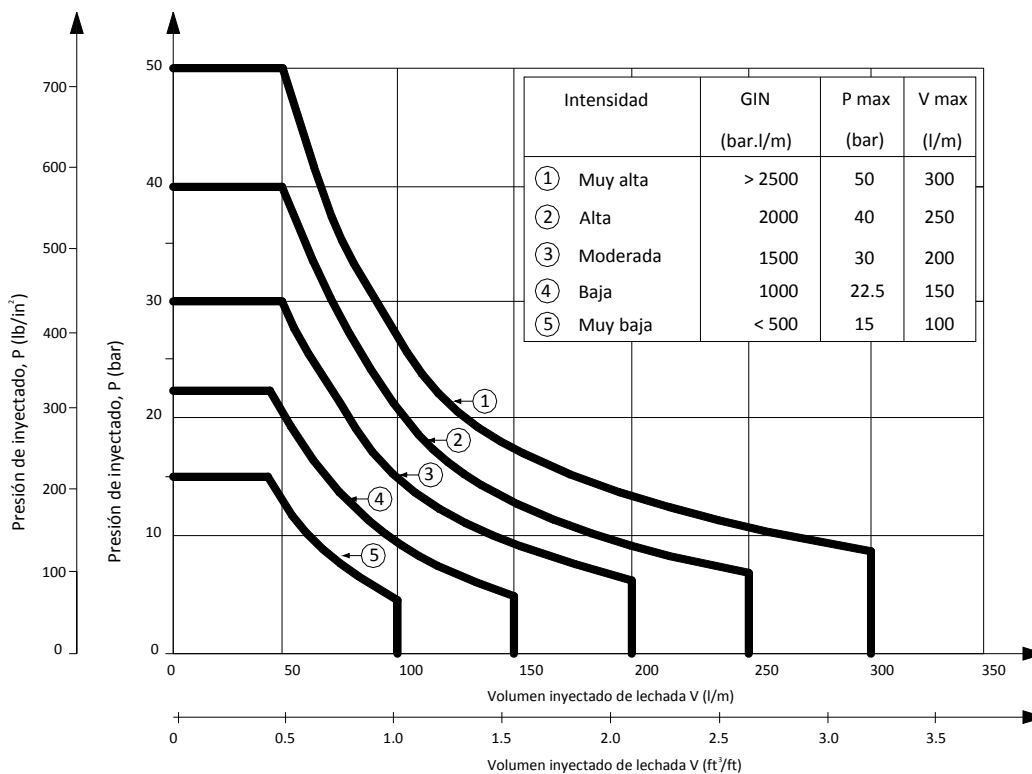


Figura 52. Envoltentes limitantes propuestas para inyectado (Lombardi y Deere, 1993).



4.6.4 Selección del valor GIN.

La elección del valor GIN en el proceso de inyección depende directamente de las condiciones geológicas, el valor de las futuras pérdidas de agua y valores de subpresión después del llenado del embalse, entre otras. No obstante, algunas de las recomendaciones que se toman al inicio del proceso de inyección es seleccionar un valor GIN moderado (1,500 barl/min). Sin embargo, se pueden presentar casos que dependiendo de la zona de inyección sea necesario modificar los límites superiores de presión y de volumen. Generalmente lo recomendable es iniciar un procedimiento de inyección de prueba en algunos tramos con la finalidad de seleccionar la envolvente limitante de inyectado idónea.

Dentro del valor de intensidad de inyección seleccionado, el límite superior de presión se verá influenciado por las características topográficas del lugar (es mayor para el fondo del valle debido a diferencias en la carga del embalse). Por lo regular, lo que se pretende es alcanzar la presión límite, la cual será dos veces la carga del vaso; desafortunadamente es complicado alcanzar este objetivo, no sin antes presentar hidrofracturamiento.

Un ejemplo de la elección del valor del GIN se muestra a continuación. Corresponde con las acciones llevadas a cabo durante la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa, ubicado en el estado de Nayarit, México.

El procedimiento para seleccionar el GIN se apoyó en la realización de pruebas de inyectabilidad realizadas en la margen derecha, sobre la traza del plinto en la elevación 130 msnm, con las siguientes características:

Perforaciones.

- a) Número de barrenos: 9 (perforados en cuatro etapas), ver figura 53.
- b) Diámetro de perforación: 3".
- c) Longitud: 60 m.
- d) Dirección: inclinados 60° con respecto a la horizontal hacia el NW 35°.

Equipo.

- a) Perforadora con martillo de fondo, con capacidad para alcanzar la profundidad requerida y el diámetro especificado.
- b) Bomba de pistón para inyección de lechadas, capaz de alcanzar presiones de 50 kg/cm² con adaptador regulador de presión.
- c) Mezclador de bajas revoluciones (agitador de la mezcla durante la inyección).
- d) Turbomezclador de altas revoluciones para fabricación de la mezcla.
- e) Manómetros registradores de 0 a 50 kg/cm².
- f) Medidor de volumen, para ser utilizado con fluidos con sólidos.
- g) Obturadores hidráulicos para barrenos de 3" de diámetro.

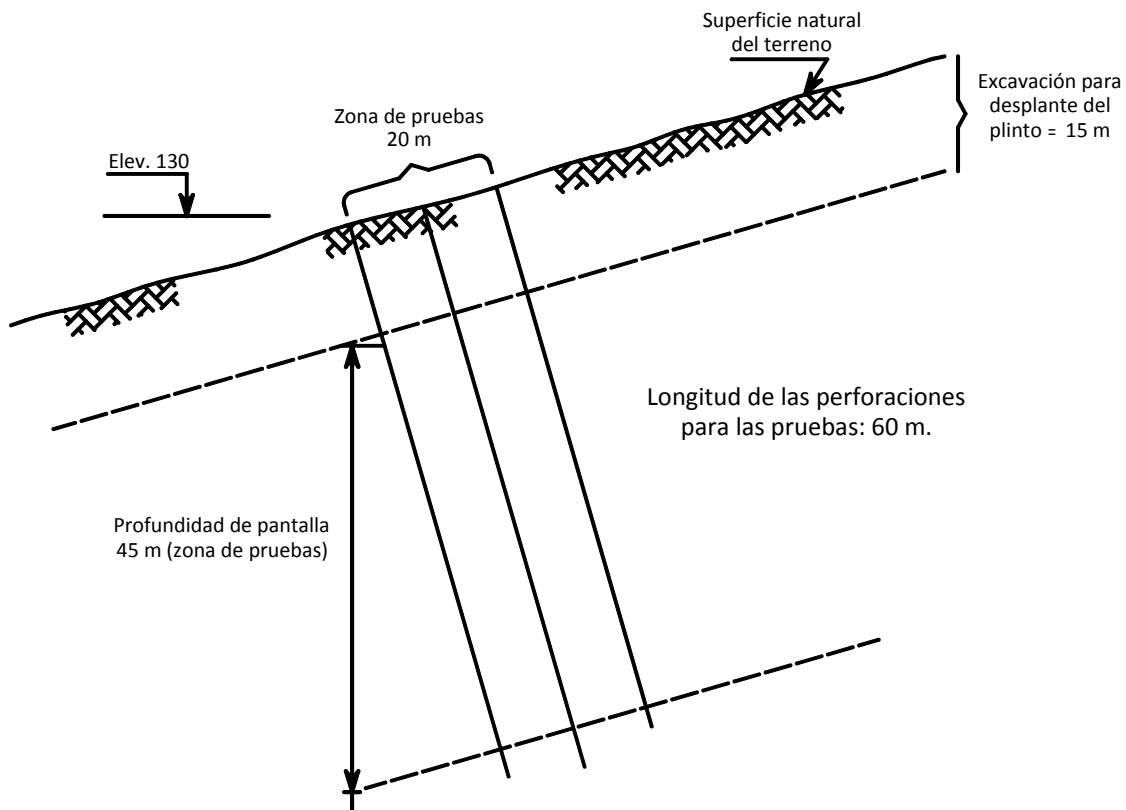


Figura 53. Zona de pruebas de inyección en margen derecha (Herrera, 1990).

Prueba de permeabilidad Lugeon.

Las pruebas Lugeon se hicieron en los barrenos de primera y segunda etapa (figura 54) en toda su longitud antes de que fueran inyectados, con el objeto de que se conociera la permeabilidad del terreno antes del tratamiento.

Una vez concluida la inyección de cuarta etapa se perforaron cuatro barrenos, cuya ubicación se indica en la figura 54, en los que se practicaron pruebas de permeabilidad a todo lo largo. La longitud de los barrenos fue también de 60 m.

Con estas pruebas finales (de verificación), se determinó la permeabilidad residual después del tratamiento y específicamente entre las etapas de inyección II-IV y III-IV.

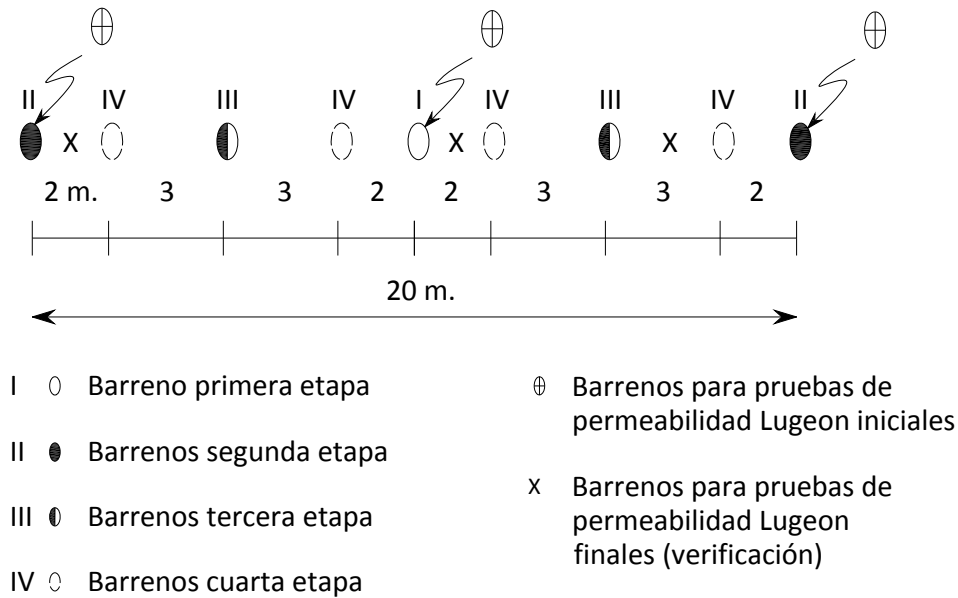


Figura 54. Características de espaciamiento entre barrenos de primera a cuarta etapa (Herrera, 1990).

Secuencia de perforación e inyección.

Se perforaron los barrenos de primera y segunda etapa, se hicieron las pruebas de permeabilidad indicadas y se realizaron las inyecciones siguiendo progresiones ascendentes. Posteriormente se perforaron e inyectaron los barrenos de la etapa III y una vez concluida ésta, se ejecutaron los de la etapa IV.

En la figura 54 se presentan las características de espaciamiento entre barrenos de primera a cuarta etapa.

Mezcla de inyección.

La mezcla de inyección se fabricó con cemento de alta finura (> 5000 cm²/gr), un fluidizante y agua, con el siguiente proporcionamiento:

| Relación a/c agua – cemento + fluidizante (peso) | Cemento (kg) | Agua (l) | Fluidizante (kg) |
|---|-----------------|-------------|---------------------|
| 0.7/1 + 1% | 50 | 35 | 0.5 |

La preparación de la mezcla se hizo con turbomezclador agregando primero el agua, luego el cemento y finalmente el fluidizante, manteniéndola en éste durante dos minutos después de agregado el último producto.



Debido a que la fluidez Marsh aumenta con el tiempo que permanece la mezcla en el agitador antes de ser inyectada en el terreno, no fue conveniente usar mezclas después de 60 minutos de su preparación.

Control y registros durante la inyección.

Durante la inyección de cada tramo de barreno se llevó un registro y gráfica continua de los siguientes datos:

- Registro:**
- a) Presión (kg/cm^2) – tiempo (min)
 - b) Volumen inyectado (l/m) – tiempo (min)

- Gráficas:**
- a) Presión (kg/cm^2) – volumen inyectado (l/m)
 - b) $\frac{\text{Gasto } (\text{l}/\text{min})}{\text{Presión } (\text{kg}/\text{cm}^2)} - \text{tiempo (min)}$

Las gráficas citadas en a) P-V se hicieron directamente sobre las hojas con las “curvas de control” de inyección por etapa mostradas en las figuras 55, 56, 57 y 58. Cada una de estas figuras corresponde a las etapas de inyección I, II, III y IV, y contienen la curva P-V = cte elegida para los barrenos de cada etapa, indicando las presiones máximas de inyección por tramo para los barrenos. Más adelante se comenta sobre la definición de los valores adoptados en relación a las curvas mencionadas. Se consideró terminada la inyección de un tramo cuando bajo la presión de inyección aplicada se alcanzaba el volumen por metro de barreno establecido por las “curvas de control” en cada caso. También se indica en las gráficas el volumen máximo de inyección por metro de barreno establecido para las diferentes etapas.

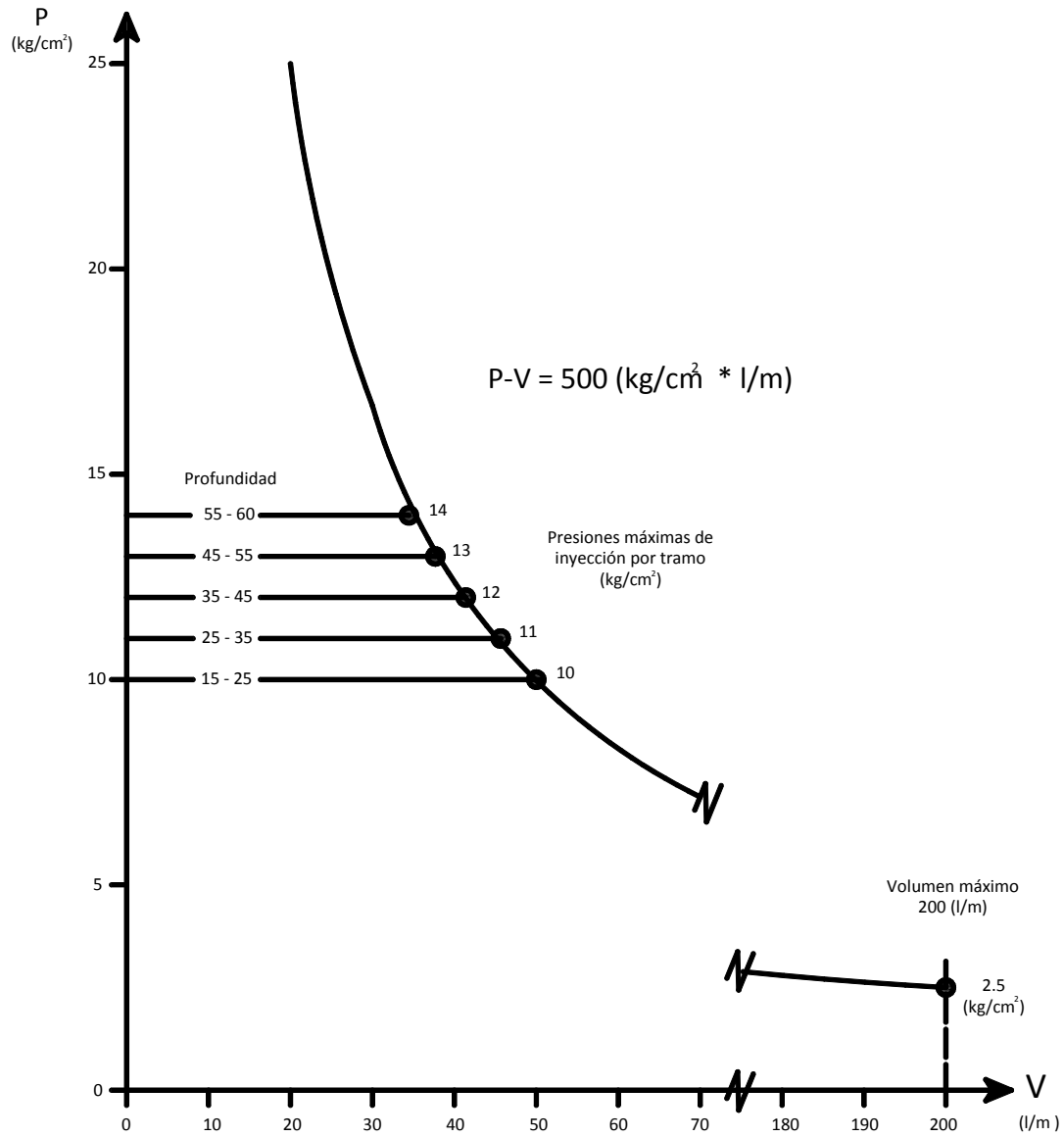


Figura 55. Gráfica de control P-V
Etapa I (Herrera, 1990).

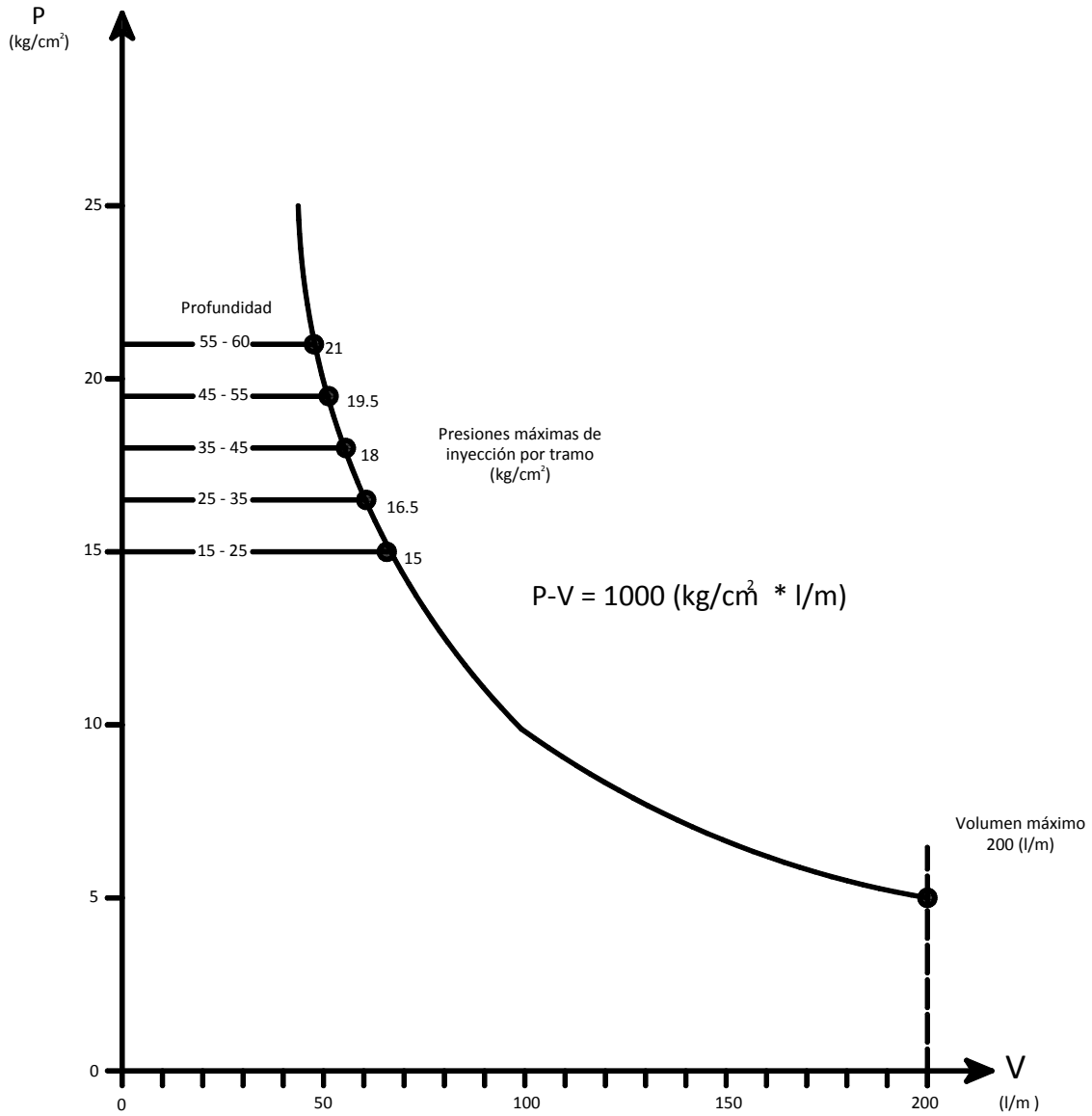


Figura 56. Gráfica de control P-V
Etapa II (Herrera, 1990).

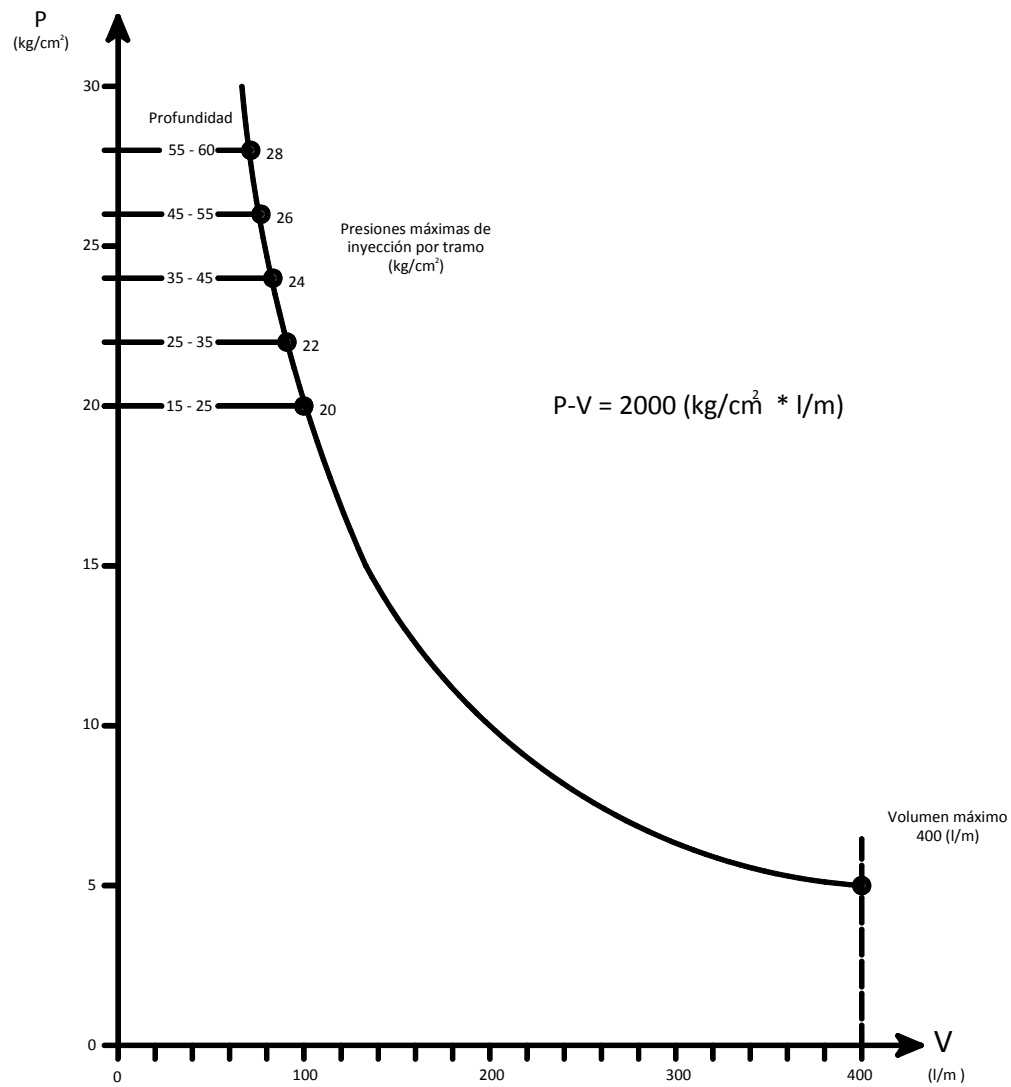


Figura 57. Gráfica de control P-V
Etapa III (Herrera, 1990).

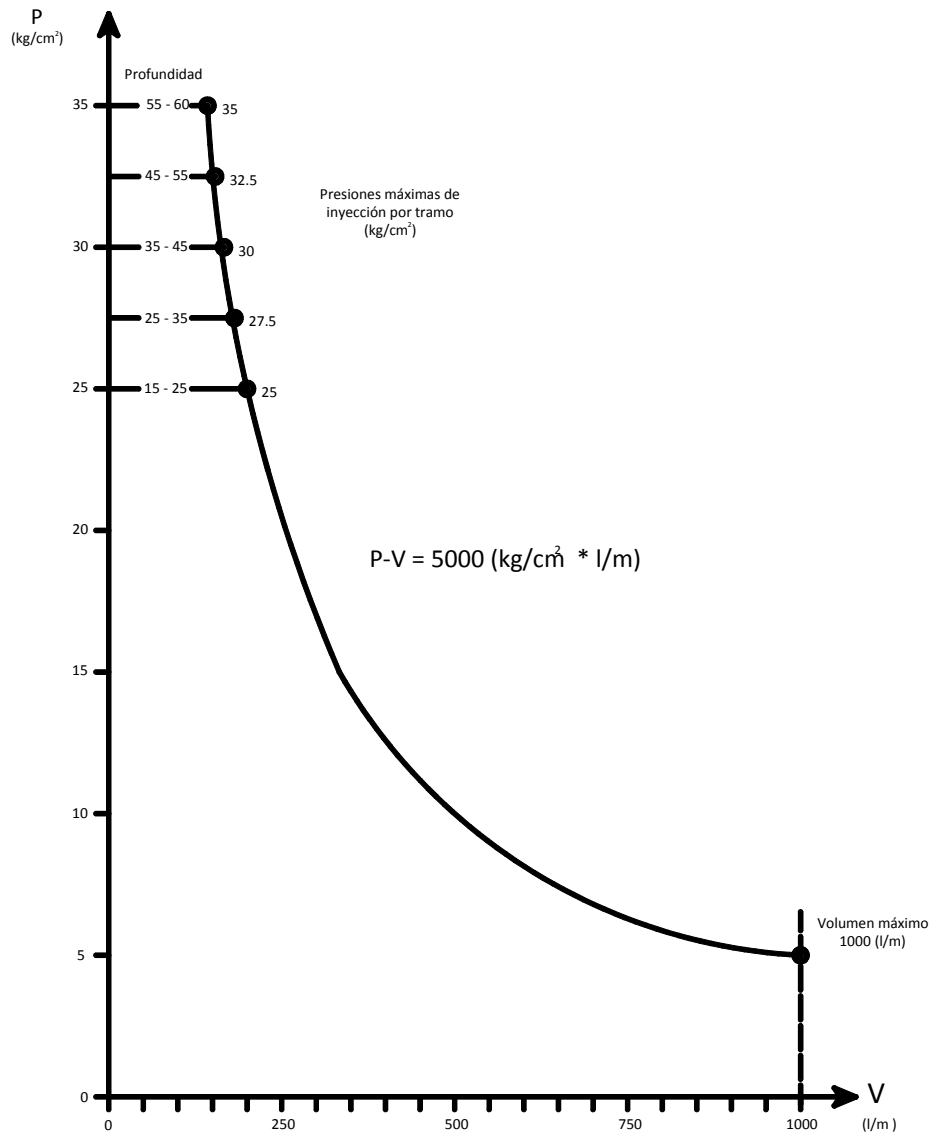


Figura 58. Gráfica de control P-V
Etapa IV (Herrera, 1990).



Saturación del terreno.

Cuando el tramo por inyectar se localizaba arriba del nivel freático, era necesario introducir agua con el objeto de saturar el terreno en un cierto radio teórico alrededor del barreno.

A continuación se presentan las presiones que se aplicaron al inyectar el agua para diferentes profundidades del tramo. El control para decidir si se había llegado a un cierto grado de saturación fue mediante la gráfica gasto – tiempo (l/min).

Presiones de inyección de agua para saturación del terreno (tramos arriba del NAF)

| Profundidad Tramo (m) | Presión (kg/cm ²) |
|-----------------------|-------------------------------|
| 15-25 | 10 |
| 25-35 | 10 |
| 35-45 | 12 |
| 45-55 | 12 |
| 55-60 | 14 |

- Cuando se alcanzaba un gasto constante en la gráfica Q-t, a la presión especificada, se mantenía esa condición durante 30 minutos.
- En caso de no alcanzarse la presión especificada, la inyección de agua al terreno se hacía hasta alcanzar un volumen total de 3 m³.

Gráficas de control P-V = cte.

- Las curvas dibujadas en las gráficas de control se fijaron inicialmente para estas pruebas con base a las recomendaciones de los Consultores del Proyecto, que indicaron adoptar un valor P-V variable de 500 a 5000 (kg/cm² – l/min).
- La presión máxima de inyección se fijó considerando que cada punto de la pantalla impermeable debía inyectarse al menos a la presión del agua futura en ese punto.
- Finalmente el aumento de presión máxima de etapa a etapa se estableció de manera ascendente respecto a la etapa considerada, como se indica en la cuarta columna de la tabla siguiente:

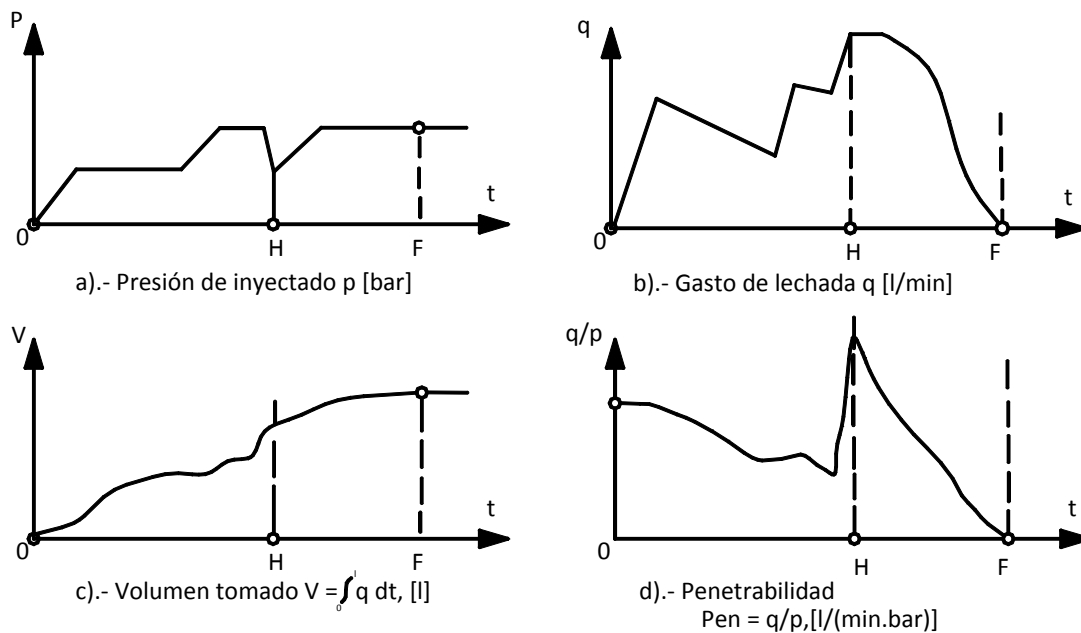
| Etapa No. | Número de barrenos | Separación (m) | Presión máxima de inyección | P-V = cte (kg/cm ² -l/min) |
|-----------|--------------------|----------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| I | 1 | 20 | P | 500 |
| II | 2 | 10 | 1.5 P | 1000 |
| III | 2 | 5 | 2 P | 2000 |
| IV | 4 | 2 y 3 | 2.5 P | 5000 |



4.7 Inyectado controlado por computadora.

El uso de computadora como apoyo durante el proceso de inyección es una herramienta importante, ya que se puede controlar de manera continua el proceso en tiempo real, midiendo por integración la presión de inyección P y el gasto de inyección o flujo q . Por medio de ésta se puede obtener el volumen acumulado V por unidad de longitud de barreno inyectado, desde el inicio de la progresión, o a partir de la derivación de la velocidad de flujo.

En la figura 59 se observan cuatro gráficas, las cuales denotan la presión, el gasto, el volumen acumulado y la penetrabilidad contra el tiempo. En ellas resalta la curva d), en la que se grafica el flujo específico (q/p) o penetrabilidad contra el tiempo, y que muestra el comportamiento del llenado de lechada de las fisuras y por consiguiente el crecimiento de la resistencia al inyectado, originada por la fuerza total cohesiva que se produce conforme avanza la lechada a lo largo de las fisuras de la roca. En dicha gráfica se observa el hidrofracturamiento o levantamiento hidráulico en el punto H, correspondiente al pico de la gráfica.



Presión de inyectado, Gasto de lechada, Volumen tomado y Penetrabilidad contra tiempo (típico)
 0 = Inicio de inyectado H = Hidrofracturamiento F = Término del inyectado

Figura 59. Proceso de inyectado de una progresión (evolución) (Lombardi y Deere, 1993).

4.7.1 Las curvas GIN y de penetrabilidad – volumen como controles prácticos del inyectado.

La figura 60 muestra las gráficas de control típicas que presenta la computadora durante el proceso de inyección, en ellas se observa la presión máxima p_{max} , el volumen máximo v_{max} por unidad de longitud y la curva hiperbólica **GIN** elegida, que puede introducirse dentro del programa, usualmente esta curva es solamente llamada **curva GIN** (ver figura 60 a)).

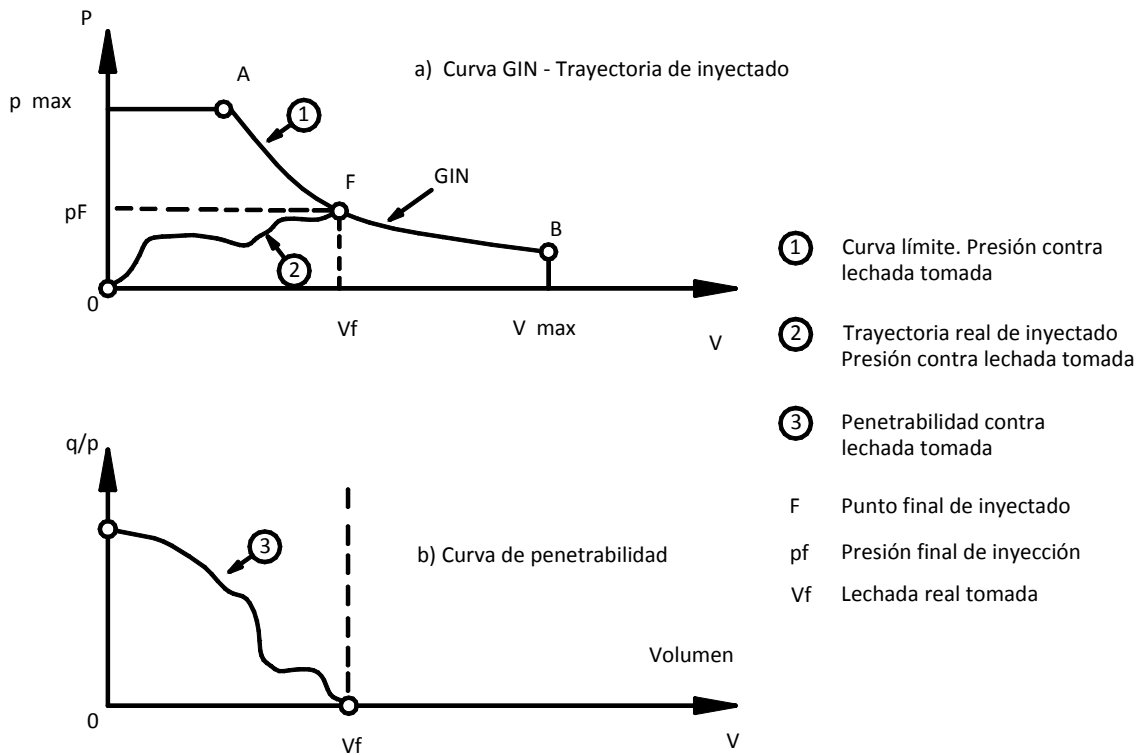


Figura 60. Proceso de inyectado de una progresión (control) (Lombardi y Deere, 1993).

En la figura 60 a) se observa la curva 2, que representa la trayectoria derivada del proceso de una inyección real en pequeños incrementos de tiempo, llegando a una presión final p_f con su respectivo volumen unitario acumulado de lechada inyectada v_f , deteniéndose a una velocidad de flujo “cero”.

Con respecto a la curva 3 de la figura 60 b), representa la “**curva de penetrabilidad**”, graficando la penetrabilidad (q/p) contra el volumen (V). En ella se observa la eficiencia de la inyección durante el recorrido de la lechada dentro de las fisuras, ya que conforme avanza la penetrabilidad se va reduciendo el volumen de lechada inyectada. En este proceso se mantiene una presión constante de inyectado, mientras que la velocidad de flujo va disminuyendo, o bien se puede presentar que la velocidad se mantenga constante al final mientras que la presión va creciendo. Estas posibilidades de cambio dentro del proceso dependen del tipo de bomba y de los detalles de operación; ejemplo de ello son las tuberías y las válvulas.

Otro detalle que es importante reconocer dentro de la figura 60 a) es la existencia de fisuras cerradas y abiertas, las cuales corresponden a los puntos A y B respectivamente. Cabe señalar que conforme se va acercando la lechada a la curva GIN, la velocidad de ésta decrece llevando consigo una mayor penetración, resultado de una eficiente inyección. De esta forma se manifiesta que la trayectoria que recorre la lechada dentro de las fisuras puede llegar a diferentes puntos del macizo rocoso con un decremento de velocidad y una mayor penetración, o bien una variante de estos parámetros.



4.8 Aplicación a pantallas de inyectado.

El método GIN tiene la posibilidad de ser empleado en todos los tramos de una perforación de inyectado, independientemente de la etapa a la que pertenezca la perforación. El método se basa en un razonamiento teórico fundamentado y la eficiencia de su aplicación a pantallas de inyectado de una línea está probada.

Existen pantallas de inyectado de tres líneas, empleadas en rocas altamente permeables o cavernosas (flujos de lavas, algunas calizas, areniscas fracturadas), en las cuales su procedimiento de inyección consta de una primera línea aguas abajo, seguida por la línea de aguas arriba y finalizando con la línea central. Las dos líneas exteriores funcionan como una barrera de confinamiento, inyectando únicamente las perforaciones primarias y secundarias, con el objeto de rellenar el mayor número de fisuras o huecos mayores. Por tanto, la línea central se considera como una sola línea, con perforaciones primarias hasta terciarias, y si son requeridas, hasta cuaternarias o quinarias.

Mediante el procedimiento GIN se establece la reducción de espaciamentos entre los barrenos empleados de etapa a etapa, consiguiéndose que el número de las fisuras más amplias se reduzcan cada vez más conforme se van incrementando las etapas. Se logra, además, que el volumen promedio de lechada absorbida disminuya de etapa a etapa, mientras que la presión final de inyectado se mantiene en un constante crecimiento. Este proceso se observa en la figura 61, en donde se manifiesta una migración de grupos de valores P-V según la curva GIN conforme se van ejecutando nuevas etapas; en este caso corresponde a etapas primarias, secundarias, terciarias y adicionales.

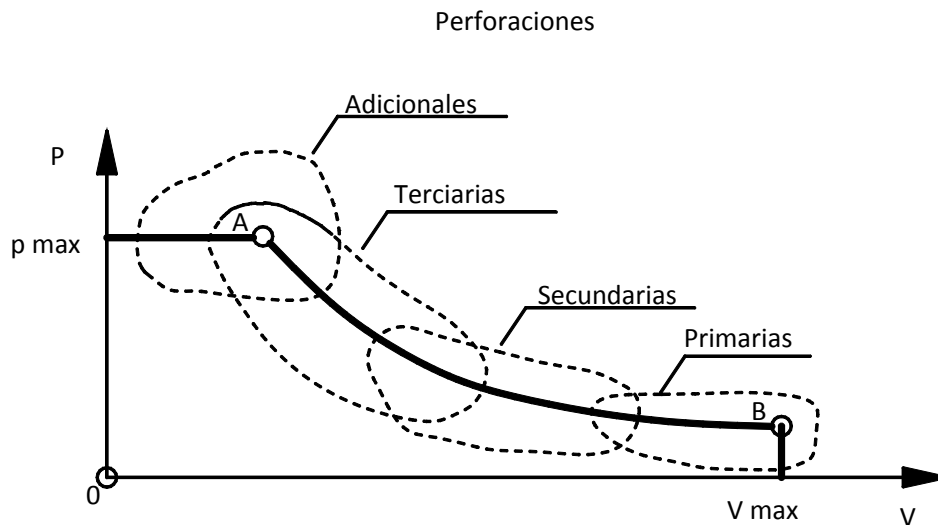


Figura 61. Ejemplo de resultados del inyectado para una pantalla. Puntos finales de las trayectorias de todas las progresiones de inyectado (típico) (Lombardi y Deere, 1993).

Con base en la experiencia se ha establecido, para una pantalla de inyectado, iniciar con perforaciones en una primera etapa con 10 a 12 m de separación y proseguir tal vez con una segunda y tercera etapas, dejando finalmente distancias de 2.5 a 3 m de perforación a perforación a lo largo de la línea de la pantalla, lo que, como se ha mencionado previamente, dependerá directamente de la geología y de los resultados obtenidos al inyectar las perforaciones previas en cada caso.



Para dar por finalizada la inyección en una pantalla, se deben obtener parámetros que consideren que el 90% de las fisuras se encuentren selladas. Esto se logra por ejemplo, mediante resultados de pruebas de permeabilidad tipo Lugeon o de absorción de agua, los que, comparados con pruebas ejecutadas antes de iniciar la inyección de la pantalla permitirían juzgar el beneficio logrado al inyectar. También podría establecerse que, valores menores a una unidad Lugeon ($UL = 1.3 \times 10^{-5}$ cm/s), podría representar un sellado suficiente del macizo de roca y, de esta forma, evitar la realización de perforaciones cuaternarias.

4.8.1 Relación de espaciamiento de los barrenos y del GIN.

La relación entre el espaciamiento de las perforaciones y el valor elegido del GIN depende directamente de la serie de etapas programadas durante la inyección, ya que si el espaciamiento de la primera etapa es amplio con un valor GIN bajo, no presentará consumo de lechada considerable en las etapas posteriores, dando como resultado una mala ejecución del inyectado en la pantalla.

Por otro lado, si el espaciamiento es demasiado corto con un valor GIN elevado, producirá un consumo de lechada muy bajo en las primeras dos etapas, mientras que en la tercera será un desperdicio. Cabe señalar que otra de las consideraciones que toma en cuenta el GIN es la distancia que viaja la lechada, hecho que permite estimar el espesor de la pantalla en roca o “muro”.

Por lo tanto, la recomendación que se ha puesto en práctica es la de seleccionar valores de GIN con un espaciamiento que permita que el volumen de inyectado por metro de progresión se reduzca en un 50%, entre etapas consecutivas programadas. Este hecho permite comprobar un cierre progresivo en la pantalla, para lo cual es importante realizar tramos de inyectado de prueba durante la fase de diseño.

4.8.2 Criterios para el sellado.

Una de las acciones que deben ejecutarse en el proceso de inyección para considerar que el cierre o sellado del tramo de barreno se ha alcanzado, es la adición de perforaciones en ambos lados del barreno que no lleguen a tocar la curva GIN, inyectándolos hasta la presión límite máxima, lo que debería ocurrir con bajos consumos de lechada.

En caso de que el programa de inyección no se haya realizado de manera óptima, lográndose una mala distribución de la inyección de lechada a lo largo de la pantalla, el método GIN tiene la capacidad de regularizar esta situación por sí solo. Se iría reduciendo el espaciamiento entre barrenos hasta alcanzar, de acuerdo con el método GIN, una última etapa, con presión de inyección límite y tomas unitarias reducidas.

Afortunadamente el método GIN considera las irregularidades que presenta el macizo rocoso, facilitando la distribución óptima del volumen total inyectado a lo largo de la pantalla, generando una relación costo beneficio inmejorable.



4.9 Principales puntos del método GIN.

Los principales conceptos y procedimientos del método GIN se muestran en los siguientes cuatro subtemas.

4.9.1 Conceptos básicos.

1. El manejo de una mezcla de lechada estable única, moderadamente espesa, tiene los siguientes objetivos:
 - a. Contar con un solo fluido Binghamiano con propiedades definidas.
 - b. Simplificar el procedimiento de inyectado, mejorando la eficiencia y reduciendo errores.
 - c. Reducir la sedimentación y el bloqueo prematuro.
 - d. Obtener una lechada endurecida, densa y resistente.
2. Empleo de la curva GIN para monitorear en tiempo real la presión y el volumen de inyectado, así como:
 - a. Permitir la aplicación de una presión elevada donde se requiera.
 - b. Evitar la presión elevada que pudiera provocar daños o desperdicios de lechada.
3. Control del proceso de inyectado por medio de una computadora de campo, obteniendo los siguientes beneficios:
 - a. Seguir en tiempo real la presión y la velocidad de flujo.
 - b. Graficar la trayectoria **P-V** sobre la curva GIN seleccionada.
 - c. Indicar la terminación del inyectado, empleando la trayectoria de inyectado **P-V** y la curva de penetrabilidad – volumen (**q/p – V**).

4.9.2 Diseño de la mezcla.

1. Manejo de aditivos dentro de la lechada, tales como:
 - a. Aditivo superplastificante para reducir la cohesión y viscosidad de la mezcla, con la finalidad de incrementar la penetrabilidad de la lechada.
 - b. Agente retenedor de agua para reducir la pérdida de agua durante el exprimido.
2. Manejo de pruebas de laboratorio aplicadas a mezclas de lechada con una relación variable de agua:cemento de 0.7:1 a 1:1 (por peso), con la finalidad de:
 - a. Probar diferentes cementos con una finura variable.
 - b. Probar diferentes aditivos en diferentes porcentajes.
 - c. Obtener valores del peso unitario de la lechada, viscosidad aparente en cono Marsh, sedimentación a las dos horas, cohesión, tiempos iniciales y finales de fraguado, resistencias a la compresión a los 7 y 28 días, y pérdida de agua en pruebas de exprimido.



4.9.3 Arreglo de las perforaciones de inyectado.

1. Presentación de un programa de perforaciones a base de etapas (primarias, secundarias, terciarias o hasta cuaternarias) con la finalidad de:
 - a. Proporcionar una cobertura mínima uniforme en todo el proceso.
 - b. Permitir que haya perforaciones con espaciamientos más cercanos, en donde las condiciones geológicas y los resultados así lo indiquen.
2. Elaboración de pruebas de inyectado de campo al final del diseño de la cortina, o bien durante la primera parte de la fase de construcción, pretendiendo:
 - a. Probar las diferentes zonas del sitio que tengan condiciones geológicas o topográficas diferentes.
 - b. Seleccionar el espaciamiento óptimo de las perforaciones primarias, de manera que las secundarias y terciarias posteriores muestren una disminución del 25 al 75% por etapa (considerando una separación de 10 a 12 m en la etapa primaria).
 - c. Permitir que se prueben diferentes curvas GIN.

4.9.4 Control de campo.

1. Definición de los elementos de la curva GIN con base a los resultados de pruebas de inyectado, aplicando consideraciones ingenieriles, de mecánica de rocas y geológicas para:
 - a. Garantizar los límites de volumen y presión que sean razonables para las características geológicas existentes.
 - b. Evaluar las diferentes posibilidades del GIN en diferentes partes de la obra.
2. Cada cuarta perforación primaria es inyectada como una perforación exploratoria, con la finalidad de:
 - a. Permitir una mejor definición por áreas de las condiciones geológicas y geohidrológicas, a base de perforaciones exploratorias con recuperación de núcleos y pruebas de presión de agua Lugeon hasta una profundidad que se iguale a la altura futura del embalse.
 - b. Permitir una selección final de la profundidad de los barrenos para las perforaciones primarias restantes (de 0.5 a 0.8 de la altura del embalse).
 - c. Asegurar que la curva GIN seleccionada sea apropiada.
3. Manejo de una computadora de campo empleando la curva GIN y la curva de penetrabilidad, observando:
 - a. El monitoreo en tiempo real de la trayectoria de inyectado.
 - b. El proceso de inyectado anticipándose a la curva de penetrabilidad declinante y del acercamiento de la trayectoria de P contra V hacia la curva GIN controladora.



4. El inyectado previo de agua antes de cualquier inyección de lechada arriba del nivel del agua subterránea, con la finalidad de saturar parcialmente la roca y reducir el riesgo de pérdida de agua de la lechada junto con un bloqueo prematuro.
5. El manejo de pruebas de presión de agua Lugeon, únicamente en perforaciones exploratorias primarias y en las perforaciones de comprobación, para comparar las permeabilidades iniciales y finales de la masa de roca.
6. El manejo de los resultados del inyectado por medio de métodos estadísticos gráficos, que aseguren el cierre progresivo de las fisuras de la roca con una permeabilidad residual resultante aceptablemente baja.





Capítulo

5

Análisis y conclusiones del método de evaluación usando el método GIN aplicado a presas en México.

5.1 Introducción.

En este capítulo se presentan dos ejemplos de presas construidas en México, en las cuales se tratan problemas relacionados al proceso de inyección. Estas presas son la Internacional La Amistad y la Luis Donaldo Colosio (Huites).

En la primera se presentan dos criterios de inyectado diferentes en caliza carstificada y en la segunda se observa la aplicación del principio GIN en un intrusivo granodiorítico, tomando como base los conceptos presentados en el Capítulo 4.

5.2 Presa Internacional “La Amistad”, frontera entre México y los E.U.A.

5.2.1 Datos generales.

La presa internacional “La Amistad” fue construida por los gobiernos mexicano y americano entre 1964 y 1969 sobre el Río Bravo, en la frontera entre ambos países (ver figura 62). Se construyó a través de una Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los EUA y sigue siendo administrada por esta institución. Del lado mexicano se encargó el proyecto a la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (actualmente Comisión Nacional del Agua). Los costos de construcción y mantenimiento fueron cubiertos por ambos países, de acuerdo con su proporción de participación en el agua; México tiene una participación de alrededor del 45%.

Esta presa es una de varias que fueron construidas de común acuerdo por ambos países; sirve para riego, generación de energía, abastecimiento de agua potable y ante todo para control de avenidas. Su volumen de almacenamiento asciende a 7,000 Mm³; la descarga por el vertedor tiene una capacidad de 43,700 m³/s.

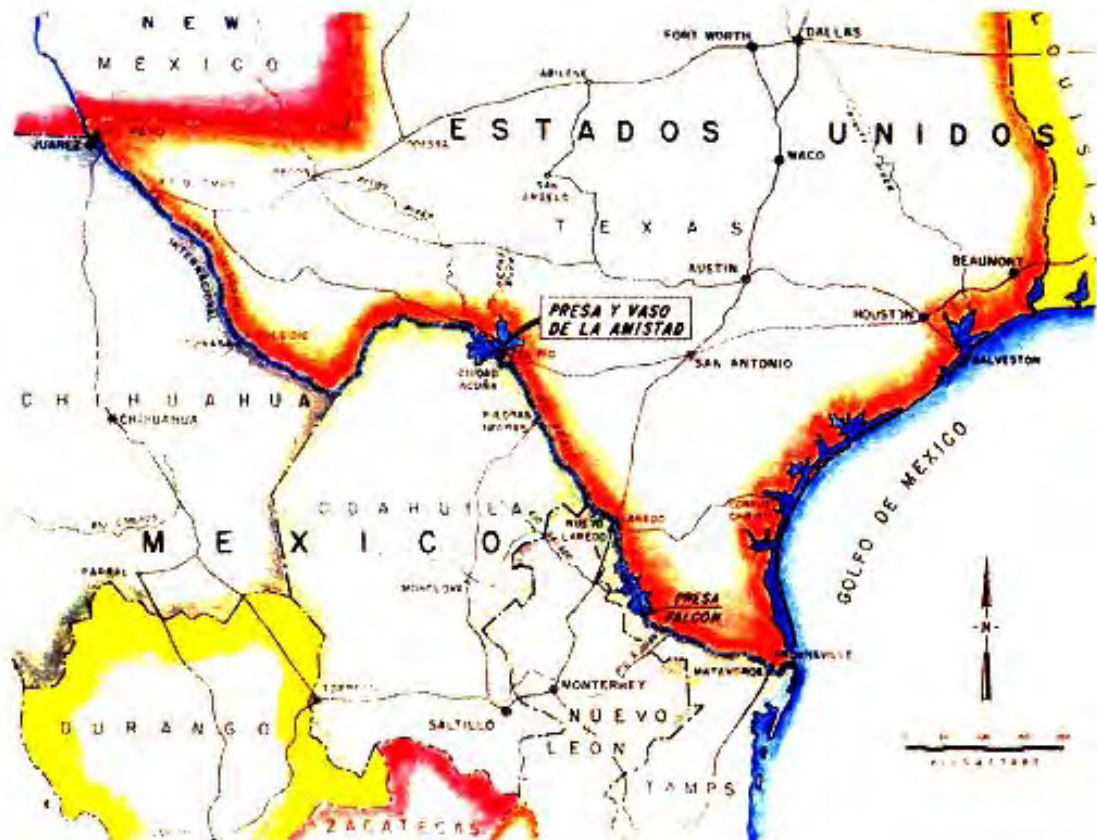


Figura 62. Presa “La Amistad”. Plano general de localización (Hungsberg, 2001).

La presa consta de tres partes constructivas diferentes:

- En el cauce se construyó una cortina de concreto simple, tipo gravedad, con una longitud de 665 m y una altura de 87 m. En esta cortina queda integrada la obra de control de excedencias y en cada país se instaló una planta hidroeléctrica.
- Hacia ambos lados de la cortina de gravedad se construyeron cortinas de materiales graduados, con núcleo de arcilla, que cierran el vaso; su altura media asciende a 34 m. La cortina de tierra del lado mexicano tiene una longitud de 6,506 m y la del americano 2,588 m (ver figura 63). Ambas cortinas tienen un núcleo central amplio de arcilla con capas de filtros y respaldos permeables de apoyo en ambos lados. Para la protección contra erosión y acción de oleaje ambos taludes tienen una chapa de roca (ver figura 64).



Figura 63. Presa “La Amistad”. Vista general de la cortina (Hungsberg, 2001).

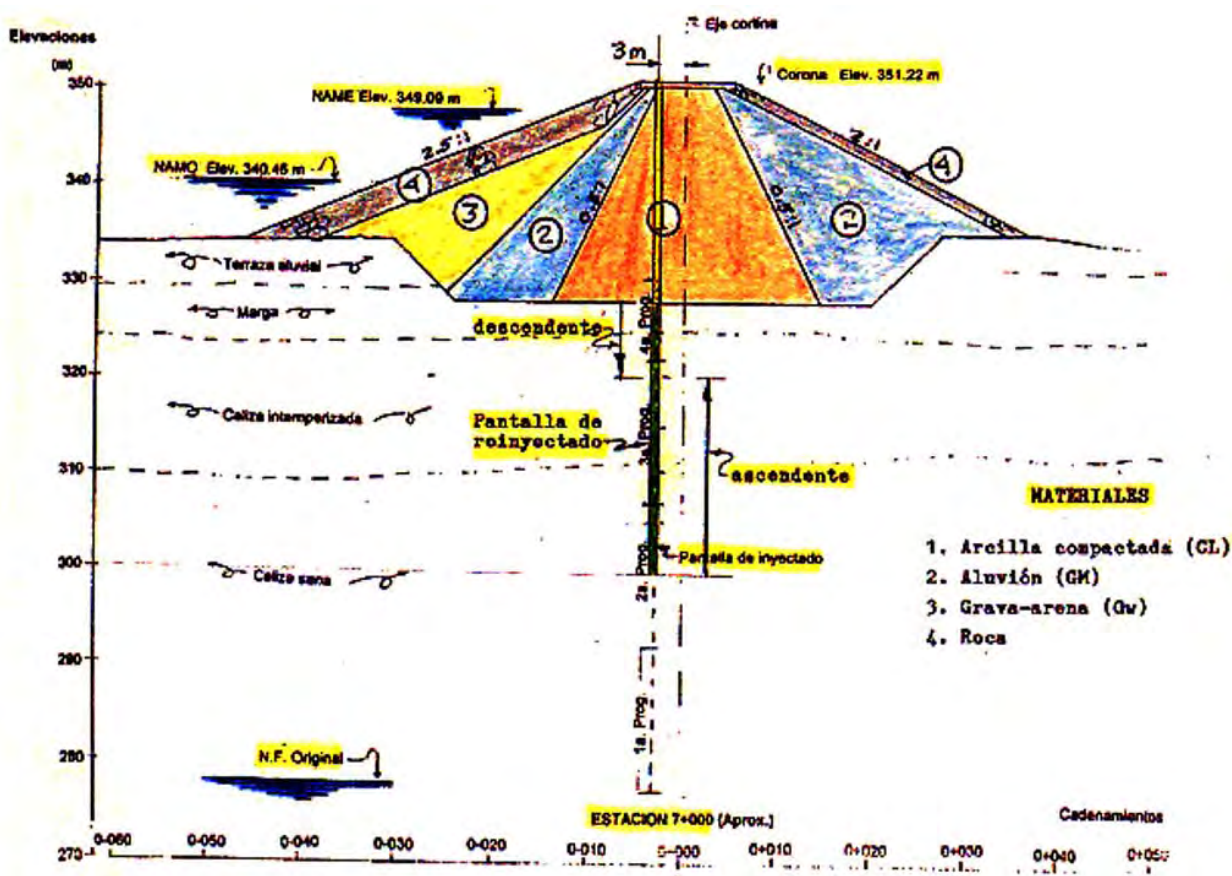


Figura 64. Presa “La Amistad”. Perfil típico de la cortina de materiales graduados (Hungsberg, 2001).



a) Geología regional.

El río Bravo cortó su valle a través de la plataforma de las calizas Edwards. Esta serie de calizas contiene algunas fallas; las capas tienen inclinación de alrededor de 5° hacia el SE en dirección al Golfo de México. Las fallas tienen generalmente un rumbo NE-SW. Las capas muestran desplazamientos verticales desde pocos centímetros hasta algunos metros. El relieve es bastante plano y solamente interrumpido por el cauce del río Bravo, que alcanza hasta 50 m de profundidad. El río y sus afluentes siguen regionalmente un sistema ortogonal de juntas. Las juntas, fallas y planos de estratificación han provocado la formación de dolinas y cavernas, es decir, la caliza está bastante carstificada y permeable. El río Bravo es el colector principal de todo el sistema de agua subterránea.

b) Geología de la boquilla.

En el sitio de la cortina afloran las siguientes formaciones, desde la más antigua hasta la más joven, considerando el punto de vista estratigráfico:

1. Caliza Georgetown.
2. Lutita Del Río.
3. Caliza Buda.
4. Una terraza elevada aproximadamente 50 m arriba del nivel del cauce.
5. La terraza aluvial con gravas y arenas del cauce.

La caliza Georgetown tiene un espesor de más de 100 m y consta de dos unidades:

1. Inferior – una caliza con estratificación uniforme dura de grano fino color gris claro, que intemperiza a gris oscuro.
2. Superior – una serie de calizas margosas, que se intemperizan con un color gris azulado.

La Formación Del Río descansa discordantemente sobre una superficie de erosión sobre la caliza Georgetown. La caliza Buda se encuentra en forma de remanentes de erosión en algunas zonas locales sobre la superficie de la Formación Del Río en el lado derecho de la cortina y vaso.

La cortina tiene una longitud total de 12 km, mientras que el cañón del río Bravo tiene abajo una amplitud de sólo 350 m y a la altura del inicio del talud aproximadamente 500 m. La garganta que forma el sitio de la presa consiste principalmente de caliza Georgetown. Esta se encuentra fuertemente intemperizada en la superficie y tiene ranuras de erosión y disolución. A lo largo de los planos de estratificación, juntas y fallas se han desarrollado cavernas de Carst. En el lado derecho (mexicano), la caliza está cubierta por sedimentos margosos. Los cuales tienen espesor de 6 a 8 m y alcanzan una distancia aproximada de 300 m. Luego sigue la Lutita Del Río (ver figura 65). Del lado izquierdo (americano) de la boquilla solamente aflora la caliza Georgetown; mientras que la terraza elevada ha sido erosionada en tiempos geológicos.



PRESA LA AMISTAD

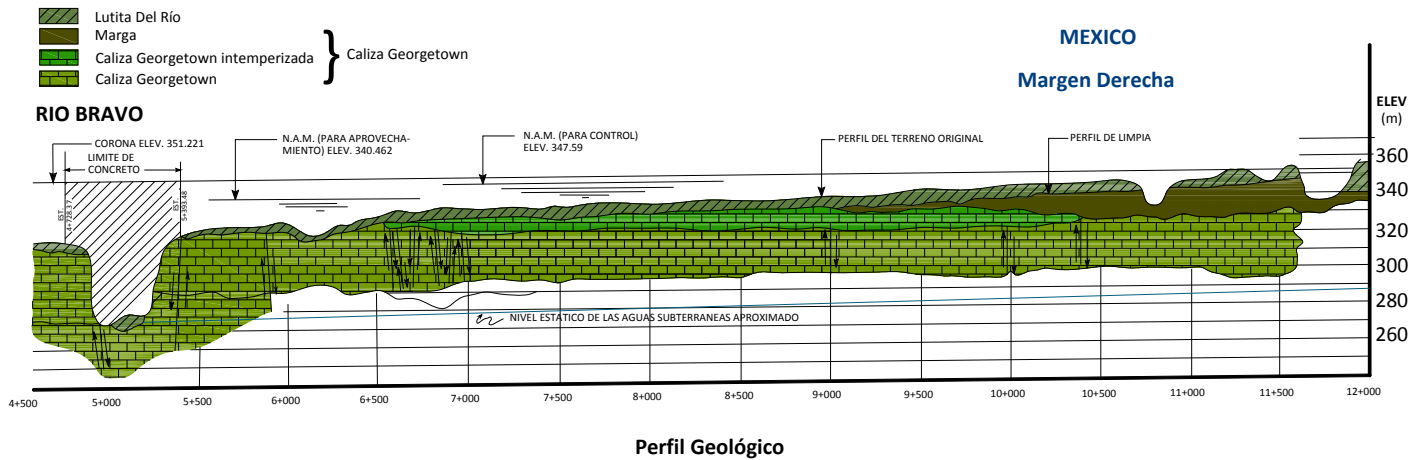


Figura 65. Presa “La Amistad”. Perfil geológico longitudinal esquemático (Hungsberg, 2001).

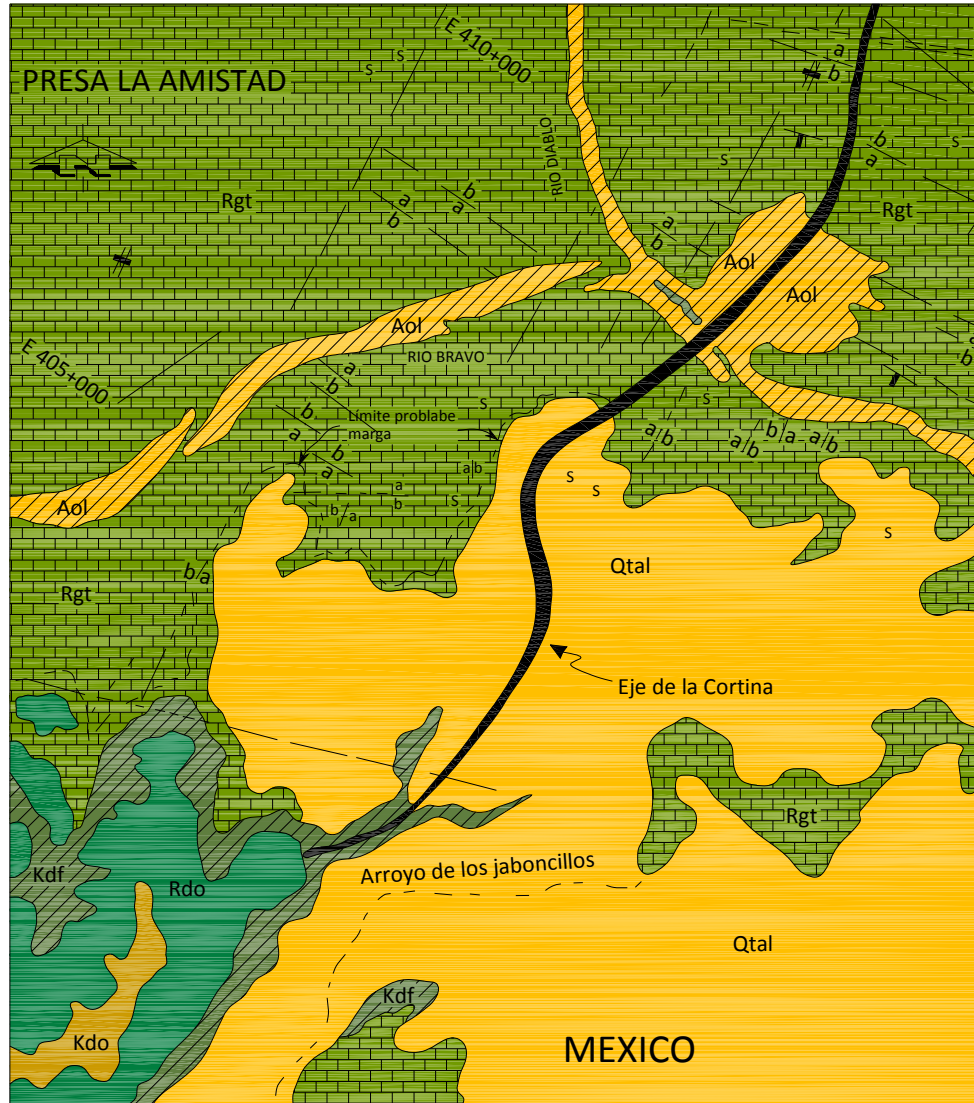
Durante las exploraciones, antes de la construcción, se cartografiaron superficialmente muchas dolinas grandes y pequeñas. Las exploraciones efectuadas indicaban frecuentemente una caliza muy permeable, con huecos que parcialmente tenían rellenos de arcilla y arena. El nivel de agua subterránea se encontraba aproximadamente a 60 m con respecto al nivel del terreno natural y generalmente tenía un gradiente muy bajo hacia el río Bravo. Todo el embalse queda en la caliza Georgetown, es decir, a priori, habría que esperar grandes pérdidas de agua en el vaso (ver figura 66).

A pesar de estas condiciones geohidrológicas desfavorables, se decidió construir una pantalla de impermeabilización con inyecciones de cemento.

Al principio se exploró el eje de la cortina con 81 perforaciones verticales y 177 inclinadas. En ellas se efectuaron pruebas de absorción de agua, para definir las zonas permeables y especialmente las carstificadas. De acuerdo a los informes, se desprende, que la zona más permeable se encontraba en la cercanía del nivel de agua subterránea. Durante estas exploraciones se observaron muchos fenómenos de disolución, que se notaban por hundimientos, dolinas y cavernas.

En este caso hay tres grupos que se pueden diferenciar:

1. En el punto de cruce de las fallas y las juntas se han desarrollado conductos de erosión más o menos horizontales, que después de recorridos relativamente largos salen en las paredes del cañón.
2. Dolinas, que se encuentran cerca del talud del cauce y que tienen un recorrido corto.
3. Dolinas, que no tienen descargas aparentes en el valle.



a=alto
b=bajo

Falla

Rumbo y echado de las capas

Rumbo y echado de las juntas

Rumbo de junta vertical menor

Corriente intermitente

S Sumidero

Aol Aluvión

Qtal Aluvión de terraza

Kdo Formación Boquilla

Rdo Caliza Buda

Kdf Lutita Del Río

Rgt Caliza Georgetown

ESCALA 1:50,000

Figura 66. Presa "La Amistad". Geología superficial (Hungsberg, 2001).

5.2.2 Inyectado bajo del tramo mexicano de la cortina.

Antes de la excavación para la cimentación hasta la roca firme, se instaló la pantalla de inyecciones que llegó hasta el nivel de aguas subterráneas. En vista de que no se encontraba roca más densa abajo, se trata entonces de una pantalla colgante.



La pantalla de inyecciones se construyó en una sola línea, con una distancia entre barrenos de 3 m del lado de aguas arriba del eje de la cortina. Las perforaciones se hicieron inclinadas 20° respecto a la vertical, hacia la margen derecha, llegando a la estación 5+691. A continuación se redujo la inclinación a 10°; con ello se esperaba cortar mejor las juntas casi verticales. Del lado americano se aplicó un proyecto similar; sin embargo, las perforaciones se inclinaron hacia la margen izquierda.

Se inyectaron las progresiones hasta el rechazo en por lo menos dos etapas. En la primera etapa el espaciamiento entre barrenos fue de 6.1 m y en la segunda 3.05 m; en las otras etapas se fue reduciendo el espaciamiento cada vez a la mitad. Se ejecutaba la perforación de la etapa siguiente con una absorción de cemento mayor de 50 sacos por progresión. Frecuentemente se inyectaron perforaciones hasta de cuarta etapa, es decir, hasta una separación de 0.76 m.

Todas las perforaciones tenían una profundidad de 60 m y se inyectaron en 4 progresiones ascendentes de 15 m de longitud. Después del lavado de cada perforación se efectuaron pruebas de absorción de agua a baja presión (1 kg/cm²) para definir las mezclas, que deberían inyectarse. Se inyectó una suspensión agua – cemento con adición de bentonita. Cuando las absorciones de cemento eran elevadas, se agregaba arena. Las perforaciones en la terraza o que empezaban en la Lutita Del Río, se entubaban hasta 60 cm abajo del contacto con la caliza Georgetown.

Según el valor de las absorciones de agua, se inyectaba con base en lo que indica la tabla 14.

Tabla 14. Relación de absorción de agua con respecto a la relación a/c (en peso) en la presa “La Amistad” (Hungsberg, 2001).

| Absorción de agua (l/min/m) | Relación a/c |
|-----------------------------|-----------------|
| 0 a 40 | No se inyectaba |
| 40 a 80 | 5:1 |
| 80 a 125 | 3:1 |
| 125 a 150 | 2:1 |
| > de 250 | 1:1 |

No se podía aplicar una presión mayor de 13.5 kg/cm², ya que los empacadores neumáticos (obturadores) no soportaban una presión mayor. Para el aumento de las presiones con la profundidad, se aplicó la siguiente regla:

De 0 a 15 m 0.345 kg/cm²/m
A más de 16 m 0.460 kg/cm²/m

Las presiones manométricas efectivas para cada progresión se calculaban con un contenido a/c de 3:1. Si al estar inyectando la mezcla más espesa no era posible levantar la presión, se agregaba arena.

Después de la terminación de los trabajos de inyectado se efectuaron perforaciones de comprobación con espaciamientos entre 50 y 100 m.



5.2.3 Datos generales de la primera pantalla de impermeabilización.

Los valores característicos de la primera pantalla se resumen en la tabla 15.

Tabla 15. Valores característicos de la pantalla de impermeabilización (Hungsberg, 2001).

| Elemento considerado | Valor característico |
|---|---|
| Profundidad media | 56.2 m |
| Profundidad media de entubación | 11.6 m |
| Longitud total de la pantalla mexicana | 6,529.0 m |
| Consumo total de cemento | 29,504 ton |
| Consumo de arena | 4,836 m ³ |
| Número de perforaciones | 3,266 |
| Consumo medio de sustancias sólidas por metro | 0.17 m ³ |
| Consumo medio por metro de pantalla | 7.4 m ³ |
| Consumo medio por metro cuadrado de pantalla | 0.085 m ³ |
| Consumo medio de cemento | 215 kg/m (4.3 sacos de cemento por metro) |

El consumo medio de cemento para las cuatro etapas ascendió, tal y como se observa en la figura 67.

| | Etapas | kg/m |
|---|--------|------|
| 1 | 6.1 m | 445 |
| 2 | 3.05 m | 150 |
| 3 | 1.52 m | 65 |
| 4 | 0.76 m | 70 |

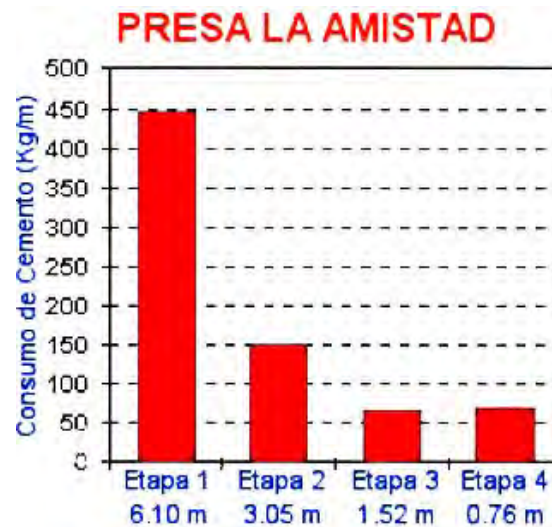


Figura 67. Presa “La Amistad”, representación gráfica del consumo de cemento (Hungsberg, 2001).



De los valores medidos se puede concluir que la pantalla logró un cierre con este método hasta la tercera etapa, mientras que con la cuarta etapa ya no se logró una mejoría importante.

Después de la terminación de la pantalla se hizo la excavación de la cimentación para el desplante del núcleo de arcilla. Si se encontraba durante la excavación una caliza muy fracturada o carstificada, se efectuaban inyecciones de consolidación, aplicando los mismos criterios mencionados previamente.

5.2.4 Primer llenado y operación.

La cortina se cerró en julio de 1968 y hasta la fecha solo ha tenido un almacenamiento máximo de 1,350 Mm³. Desde el primer llenado se presentaron grandes pérdidas de agua en forma de manantiales aguas abajo de las cortinas laterales, que escurrían por los diversos arroyos y llegaban nuevamente al río Bravo. Las filtraciones máximas alcanzaron un total de 5 m³/s, de los cuales una mayor parte del lado mexicano correspondió a 3.5 m³/s en comparación a los 1.5 m³/s del lado americano. Estas cantidades de agua se miden sistemáticamente por parte de la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los EUA, para llevar una contabilidad del agua.

Las salidas más importantes de agua aparecieron en el arroyo Carmina, el cual es alimentado por más de 100 diferentes manantiales (ver figura 68). Al principio de 1970, con un embalse a la elevación 322 los escurrimientos ascendían a 400 l/seg. En 1971 aumentó la cantidad con un embalse de 328 m a 900 l/s. Después aumentaron las cantidades durante los años siguientes con un nivel de embalse a la 343 hasta un máximo de 2,000 l/s. En 1974 el embalse alcanzó su nivel máximo a la elevación 346; en ese tiempo las aportaciones, únicamente en el arroyo Carmina, fueron de 2,140 l/s. Además, había otros manantiales importantes; de manera que las descargas totales de ambos lados de la cortina llegaron hasta 5,000 l/s. Desde entonces no se volvieron a alcanzar estas elevaciones del embalse y ahora el arroyo Carmina tiene una descarga de solamente 1,100 l/s (ver figura 69).

Las zonas de fallas y juntas que cruzan a la caliza son los conductos principales del sistema de agua subterránea. Antes de la construcción de la cortina ya existía un sistema de agua subterránea que se encontraba mucho más profundo que el actual (ver figura 70). Después de la terminación de la cortina, se sobrepuso un nuevo sistema de flujo de agua subterránea a una elevación mucho mayor, que rellenó el sistema de huecos, que se encontraba seco, y lo sometió a presión (ver figura 71).



Figura 68. Presa “La Amistad”, plano general de localización de manantiales (Hungsberg, 2001).

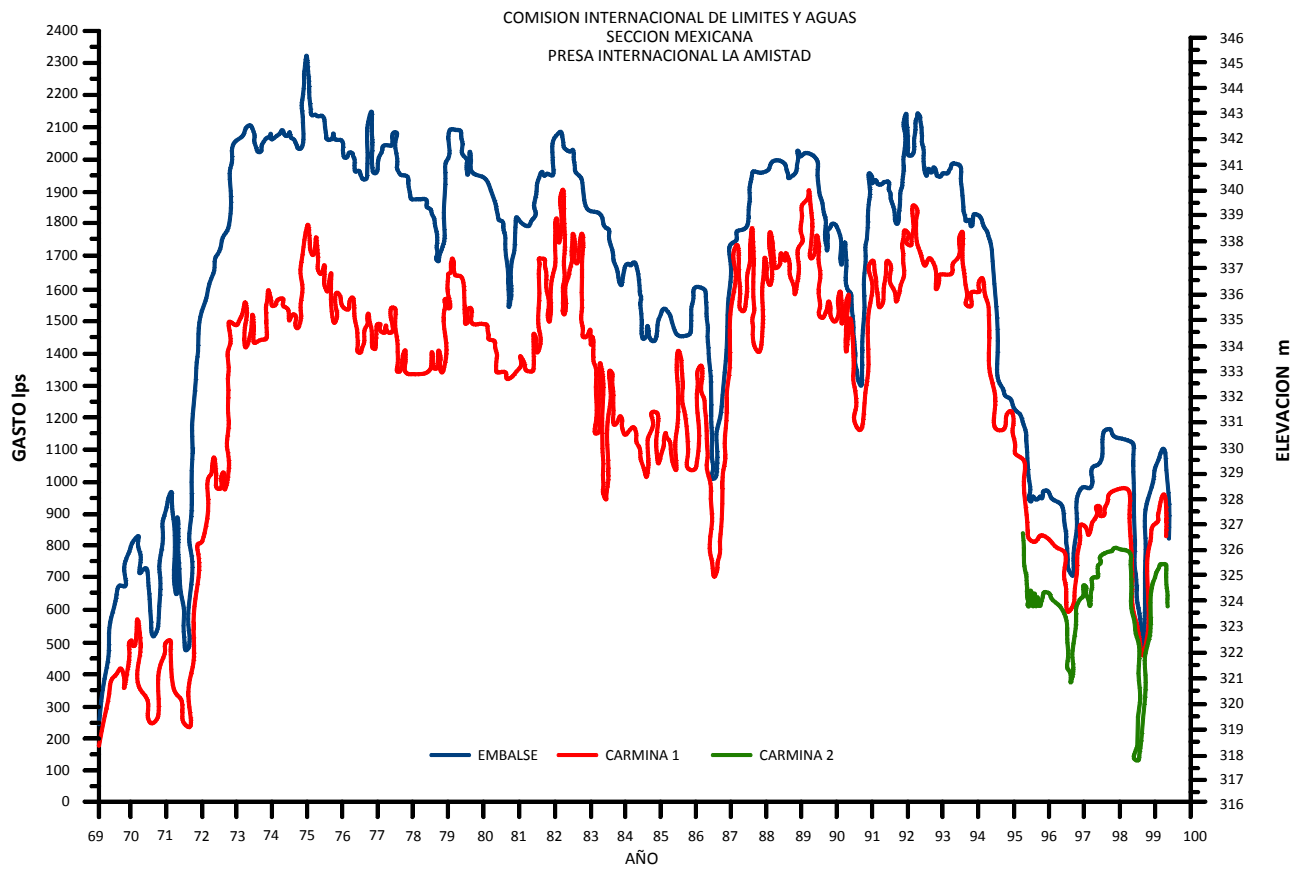


Figura 69. Presa “La Amistad”, variación del manantial Carmina con el tiempo (Hungsberg, 2001).

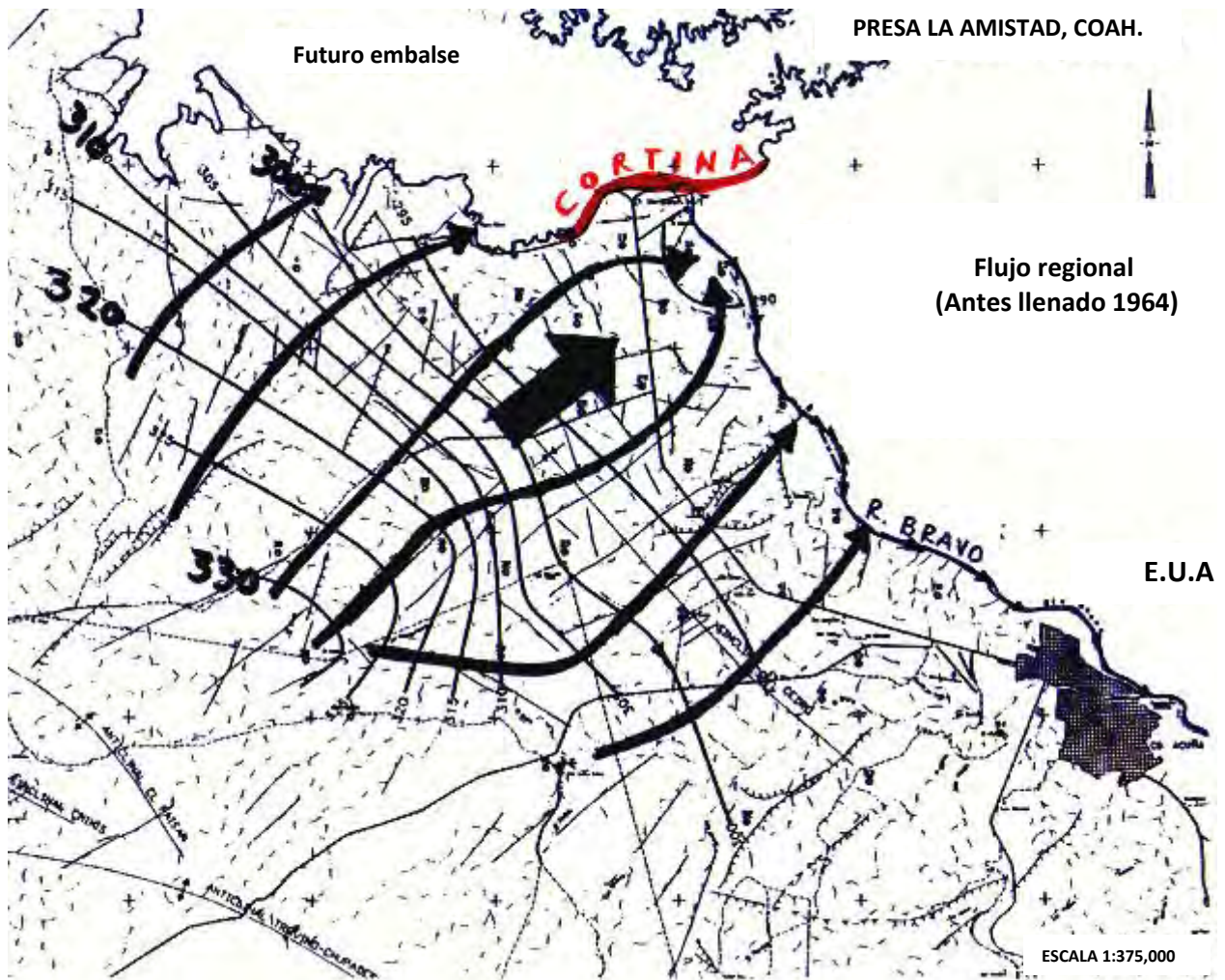


Figura 70. Presa “La Amistad”, sistema de agua subterránea antes del embalse (Hungsberg, 2001).

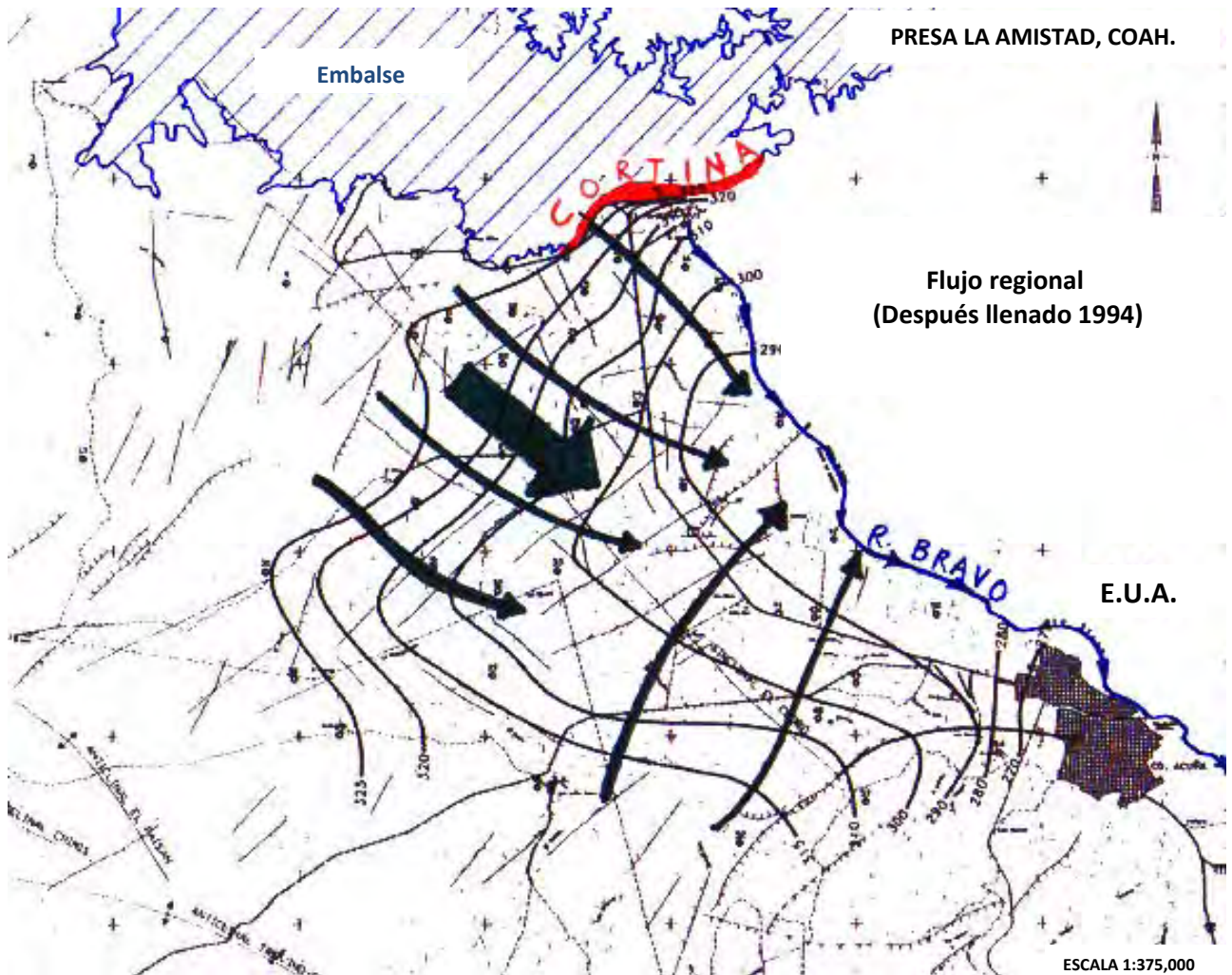


Figura 71. Presa “La Amistad”, sistema de agua subterránea después del cierre de la presa (Hungsberg, 2001).

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EUA comparó el desarrollo de las pérdidas de agua con las elevaciones del embalse (ver figura 72), y encontró que las pérdidas de agua con igual altura de embalse en el periodo de 1982 a 1986, aumentaron en comparación con el periodo de 1990 a 1993. De esto se concluyó, que se había empeorado la efectividad de la pantalla de impermeabilización con el tiempo. Sin embargo, esto no provocó una nueva impermeabilización, ya que las pérdidas de agua se captaban nuevamente aguas abajo por la siguiente presa internacional (Falcón). Ahí se volvía a utilizar y se contabilizaba. Además, no había ningún indicio de salidas peligrosas de agua directamente al pie de la cortina, que pudieran indicar un riesgo para la seguridad de la misma.

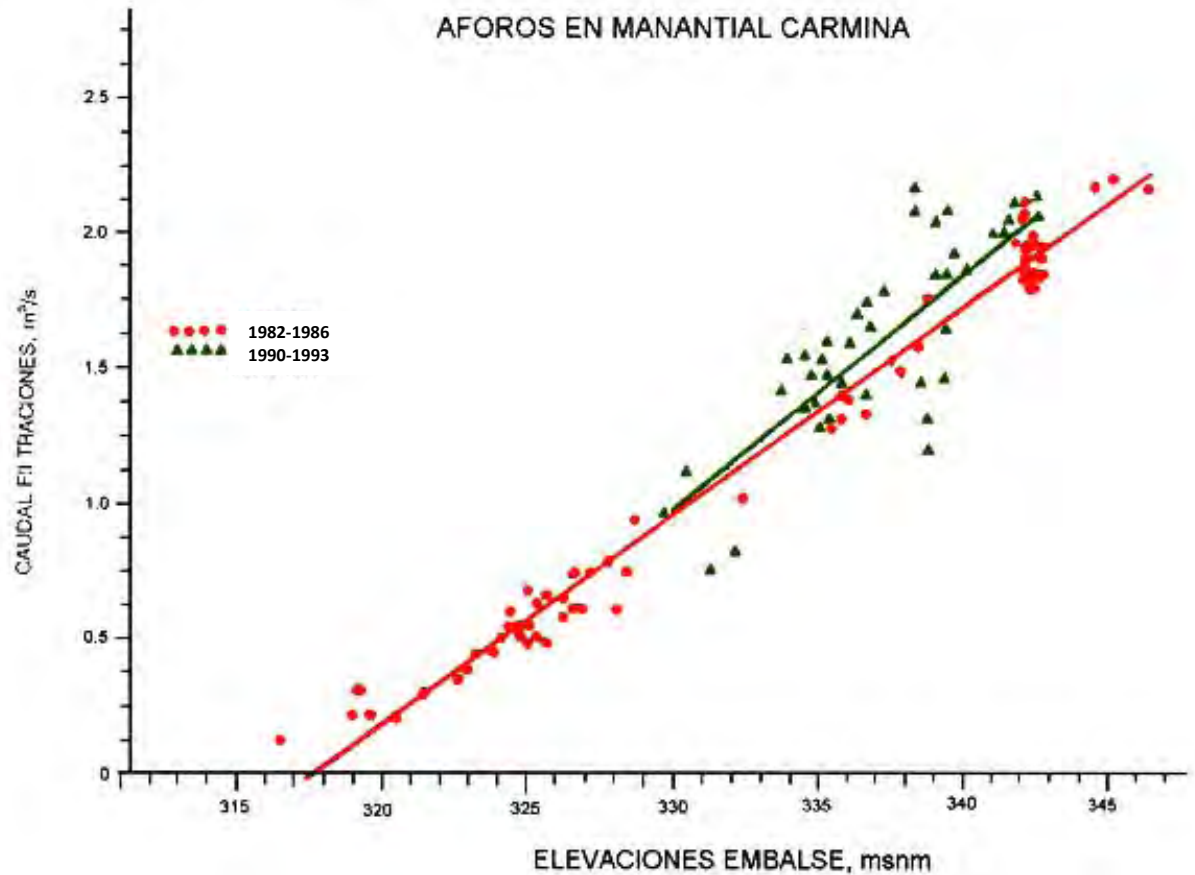


Figura 72. Presa “La Amistad”, correlación de las salidas del arroyo Carmina en el embalse (Hungsberg, 2001).

5.2.5 Desarrollo de nuevos sumideros.

En 1994, el nivel de embalse después de una prolongada sequía se encontraba nuevamente muy bajo y entonces se descubrió, entre septiembre y noviembre, en el lado mexicano, un nuevo sumidero en el vaso, denominado sumidero 1. Tenía un diámetro de 2.5 m con una carga aproximadamente de 0.20 m entrando cerca de 900 l/s desde la orilla del sumidero hacia abajo (ver figura 73). En los años siguientes continuó bajando el nivel del embalse y se descubrieron hasta 20 nuevos sumideros con diversos diámetros y cantidades de pérdidas.



Figura 73. Presa “La Amistad”, sumidero 1, formado en 1994 (Hungsberg, 2001).

Con la adición de colorantes (fluoreseína) pudo comprobarse una comunicación directa entre el sumidero 1 y el manantial MF-13 (ver figura 68); el agua coloreada apareció después de siete horas aproximadamente a 400 m aguas abajo de la cortina. Ya que el sumidero se encontraba unos 270 m aguas arriba del eje de la cortina, resultó una velocidad media de flujo de 2.8 cm/s. Este sumidero se aisló del embalse un tiempo con costales de arena y su nivel de agua bajó inmediatamente hasta 4 m abajo de su orilla. Por esta reducción de presión de agua se presentó a los pocos minutos una reducción del flujo en el manantial MF-13 de 43 l/s a 19 l/s. Después de que se volvió a conectar el sumidero con el embalse, volvió a subir el manantial hasta 32 l/s.

Los asesores de ambos países recomendaron un re-inyectado parcial de la pantalla de impermeabilización. Además, los nuevos sumideros debían rellenarse con un procedimiento especial e inyectarse parcialmente. En los sumideros se instalaron filtros invertidos, los cuales después se inyectaron a baja presión.

Al mismo tiempo se decidió instalar en el tramo de renovación de la pantalla, piezómetros antes del inyectado, para poder vigilar mejor la pantalla.

Todas las observaciones permiten concluir que se pudo formar un camino de agua directo a través de la pantalla que puso en riesgo funcional a la cortina. Como especialmente peligroso se consideró la posibilidad de la formación de un sumidero directamente debajo del talud de aguas arriba de la cortina. Esto podría causar un flujo concentrado de agua en el contacto entre el núcleo y las margas de la formación Georgetown.

El consumo de cemento de todo el inyectado original se analizó estadísticamente. De lo anterior resultó, que el tramo entre las estaciones 6+510 y 7+610 había recibido la cantidad mayor de inyección. Esto evidentemente tiene relación con la existencia considerable de zonas de hundidos y sumideros (ver figura 74) y, además, con la evidencia de una conexión directa entre el embalse y los manantiales aguas abajo de la cortina.

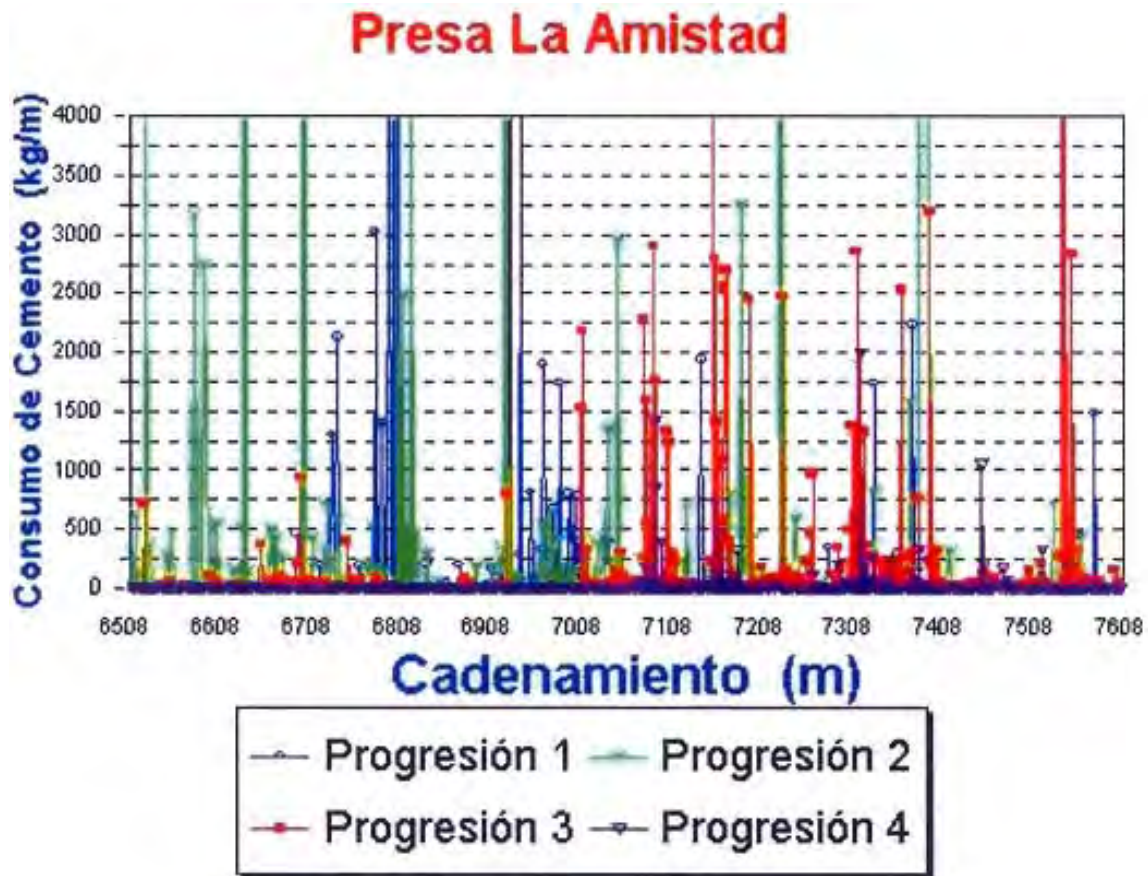


Figura 74. Presa “La Amistad”, tramo de la pantalla original con el consumo máximo de cemento (Hungsberg, 2001).

Después de una evaluación de los resultados de las inyecciones originales, se tomó la decisión de re-inyectar un tramo de 600 m con centro en la estación 7+000. Esta estación se encontraba aproximadamente sobre la línea recta de conexión entre el sumidero 1 y el manantial MF-13 (ver figura 68). El tramo corresponde al de consumos originales máximos de cemento.

Para la nueva pantalla se diseñó una profundidad media de 27 m abajo del núcleo de arcilla; con objeto de re-inyectar la capa superior de margas y la parte superior de la caliza de la formación Georgetown (ver figura 75). El acortamiento considerable de la profundidad de la pantalla se justificó con el hecho de que quería protegerse el núcleo de arcilla de la cortina en su zona de contacto con las margas subyacentes, para evitar flujos concentrados que pudieran poner en riesgo por erosión la seguridad de la cortina.



PRESA INTERNACIONAL "LA AMISTAD" MEXICO - EUA

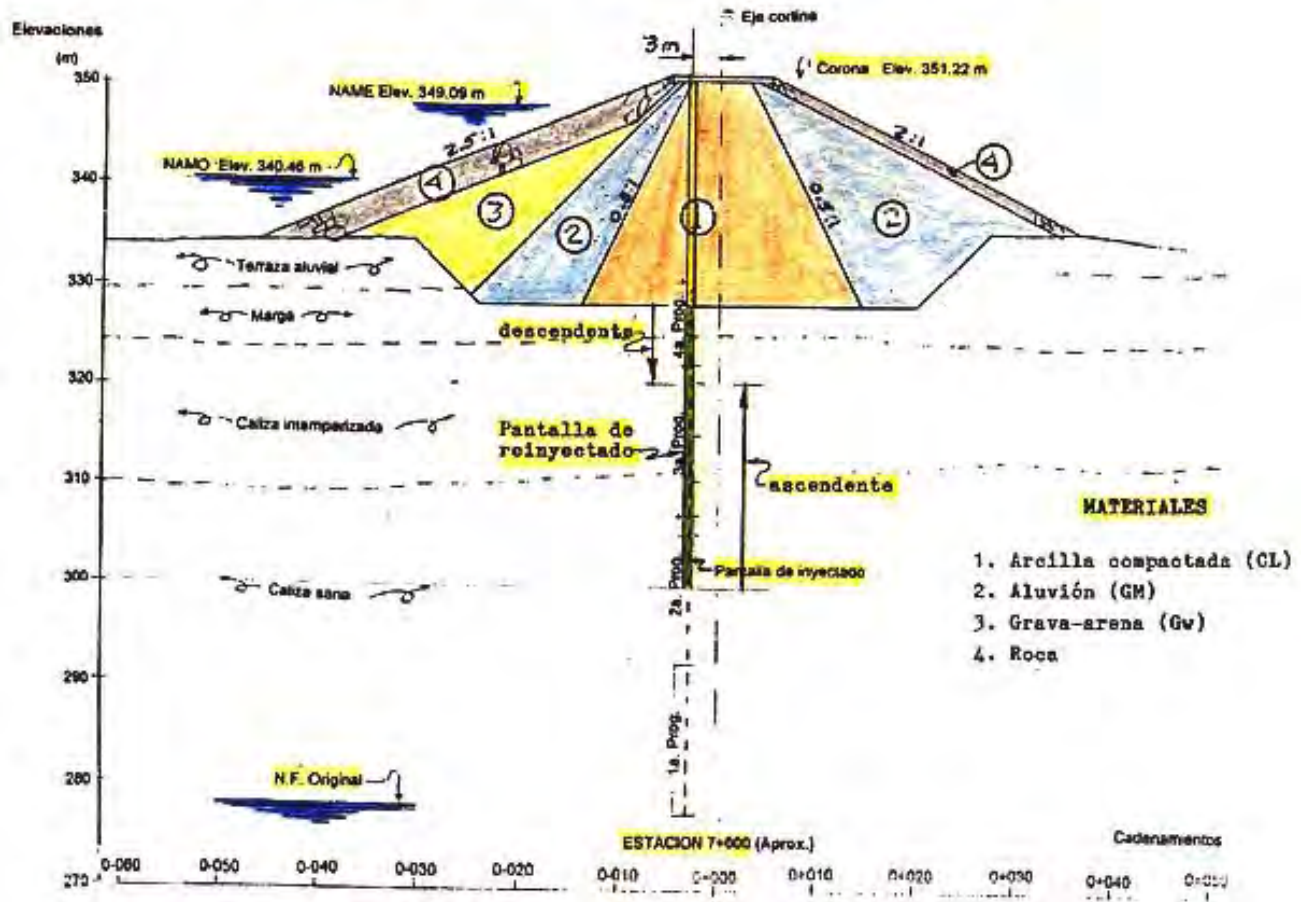


Figura 75. Presa “La Amistad”, perfil típico de re inyectado (Hungsberg, 2001).

5.2.6 Ejecución del re-inyectado.

Las perforaciones se efectuaron desde la corona de la cortina. Para proteger al núcleo de arcilla contra fracturamiento hidráulico, se perforaron barrenos verticales con broca helicoidal en seco hasta 1 m abajo del contacto del núcleo con la formación margosa Georgetown; enseguida se procedió a sellar el espacio del núcleo anular entre el tubo de ademe y la pared del barreno con lechada de cemento – agua. Después se continuaron las perforaciones con equipo de percusión hasta el final de la primera progresión y se inyectaba a una presión de 2 kg/cm². A continuación se perforaba la progresión ya inyectada y se prolongaba el barreno hasta su profundidad final. El inyectado de las siguientes progresiones se hacía en forma ascendente con una longitud de 5 m (ver figura 76).

El re-inyectado se efectuó por etapas. En la primera, la separación entre barrenos fue de 5 m y en la segunda de 2.5 m; las perforaciones de la tercera etapa se desplazaron 2 m hacia aguas abajo del eje por que se temía dañar el núcleo de arcilla con distancias demasiado cortas entre perforaciones (ver figura 76). Las demás etapas se efectuaron entonces cuando el consumo de cemento anterior excedía los 50 l/m.

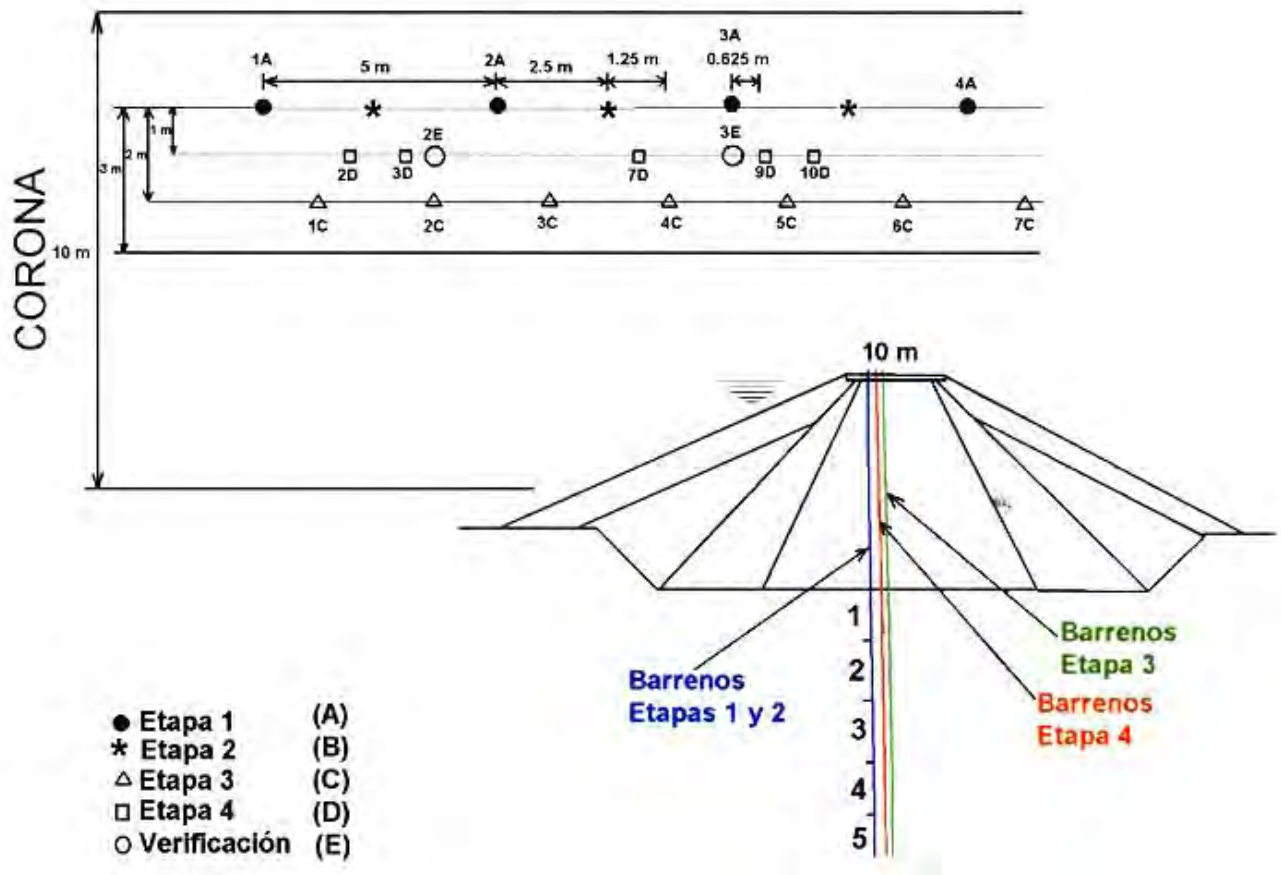


Figura 76. Presa “La Amistad”, planta de la distribución de etapas en un perfil esquemático (Hungsberg, 2001).

Para la ejecución de este inyectado se aplicó un método GIN modificado, que fue acordado con el Dr. Don U. Deere. En vista de que se trataba de una caliza carstificada margosa, se definieron volúmenes máximos de inyectado mayor a los usuales, los cuales se presentan en la tabla 16.

Tabla 16. Valores GIN (Hungsberg, 2001).

| Progresión | GIN | Presión máxima (kg/cm ²) | Volumen máximo de inyectado (l/m) | Longitud (m) |
|------------|------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| 1 | 500 | 2 | 500 | 7 |
| 2 | 1500 | 7.5 | 1000 | 5 |
| 3 hasta 5 | 1500 | 15 | 1000 | 5 |

Cuando una perforación alcanzaba el volumen máximo definido de inyección según la curva GIN y la velocidad de inyectado todavía excedía a un l/min, se continuaba el inyectado, aplicando en forma escalonada mezclas más espesas como lo indica la tabla 17.



Tabla 17. Tipos de mezclas (Hungsberg, 2001).

| Mezcla no. | Relación a/c | Fluidificante Sikament NZ O 300 | Silicato de sodio | Ceniza volante (Fly Ash) |
|------------|----------------|---------------------------------|-------------------|--------------------------|
| 1 | 0.70:1 a 0.9:1 | 0.0075 (0.326 l) | ----- | ----- |
| 2 | 0.75:1 a 0.9:1 | 0.01 (0.435 l) | 0.01 (0.357 l) | ----- |
| 3 | 1:1 | 0.01 (0.435 l) | 0.015 (0.535 l) | 0.25 (12.5 kg) |
| 4 | 1:1 | 0.01 (0.435 l) | 0.015 (0.535 l) | 0.50 (25 kg) |
| 5 | 1.5:1 | 0.075 (0.326 l) | 0.02 (0.714 l) | 1.00 (50 kg) |

Las propiedades típicas de una de las mezclas fueron:

- Relación a/c = 0.8:1
- Cemento puzolánico con finura Blaine = 5100 cm²/g
- Peso específico = 1.5 hasta 1.55 g/cm³
- Cohesión relativa = 0.08 hasta 0.15 mm
- Viscosidad Marsh = 30 hasta 33 s
- Sedimentación en 2 hrs. = 3%
- Resistencia a compresión después de 7 días = 90 hasta 100 kg/cm²

El inyectado de una progresión quedaba concluido, cuando la velocidad de inyectado era inferior a un l/min.

El proceso de inyectado debía controlarse en forma continua mediante un registro computarizado automático. Por lo tanto, se instaló un sistema computarizado; las cabezas de los barrenos y los equipos de inyectado fueron equipados con sensores eléctricos. Se podía vigilar simultáneamente el inyectado hasta en 3 perforaciones desde una cabina central por medio de la teletransmisión de datos (ver figura 77). El proceso de inyectado se registraba simultáneamente en forma gráfica y con los siguientes parámetros: velocidad de inyectado en volumen/tiempo, presión, penetrabilidad (según Lombardi y Deere, 1993) y volumen de inyectado. El proceso de inyectado podía corregirse en cualquier instante. Simultáneamente se evaluaban los datos en forma estadística, para fijar la continuación de las etapas. La evaluación estadística incluyó la determinación de la distribución de frecuencia de consumos (ver figura 78). Esta evaluación es requerida para reconocer si se está logrando una impermeabilización.

Eje: B Barreno: 201 C Progresión: 02
- Profundidad (m): 5,00131, 36-36, 36 Cadenamiento: 7+351.25
- Método de inyección: DESCENDENTE GIN en uso: 1500
Eje: B Barreno: 201C Progresión: 02
- Profundidad (m): 5,00131, 36-36, 36 Cadenamiento: 7+351.25
- Método de inyección: DESCENDENTE GIN en uso: 1500
BOMBA EN USO: PERONI DUPLEX (BPDN2)

Inicio: 03/20/96---9:12 AM
Pausa: 03/20/96---11:31 AM...139 (min)
Volumen acumulado (l): 1611
Paro: 03/20/96---11:32 AM

OBSERVACIONES:

SE UTILIZO EL METODO GIN
TOCO LA CURVA GIN A 5 KG/CM2
A 1504.0 LTS. SE MANTUVO LA INYECCION
DURANTE 15 MIN. DESPUES DE TOCAR LA ENVOLVENTE.

VOLUMEN EN PLANTA 1624.0 LTS
GASTO FINAL: 5.22 LTS/MIN. 322.2 l/m

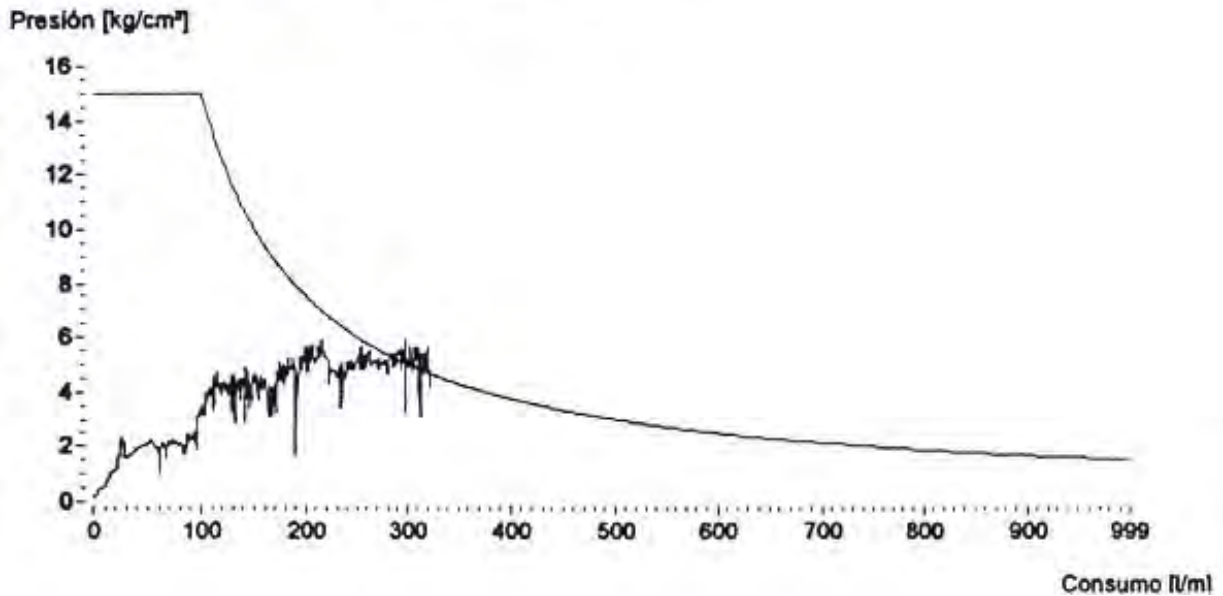


Figura 77. Presa “La Amistad”, ejemplo del registro con computadora durante el inyectado (Hungsberg, 2001).

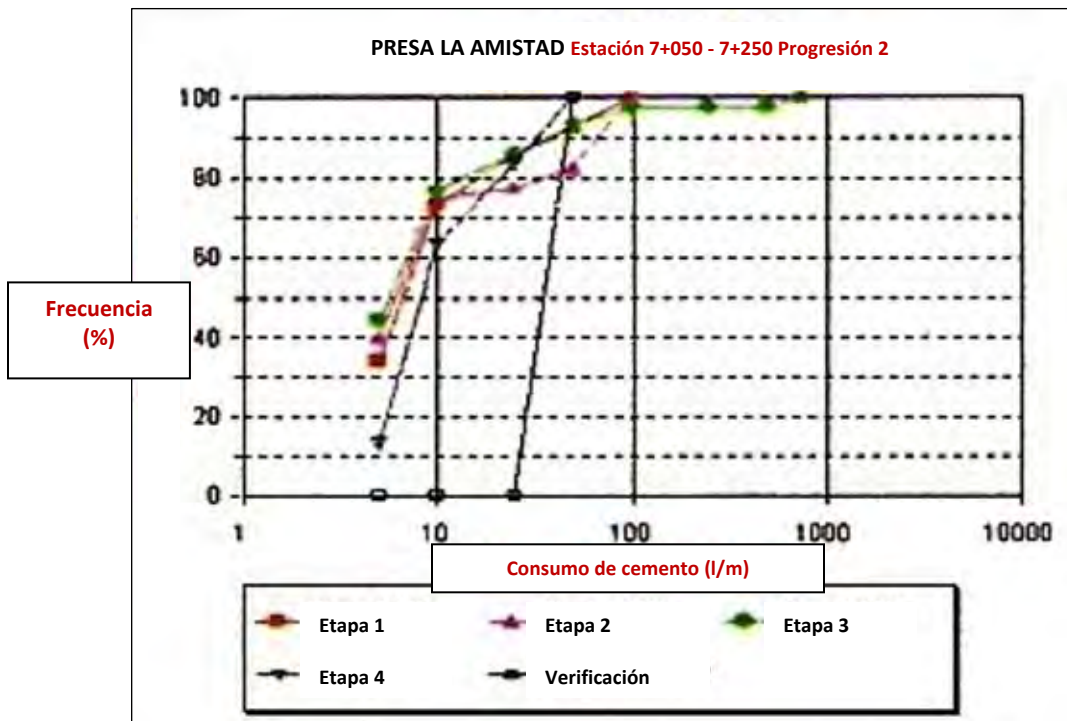
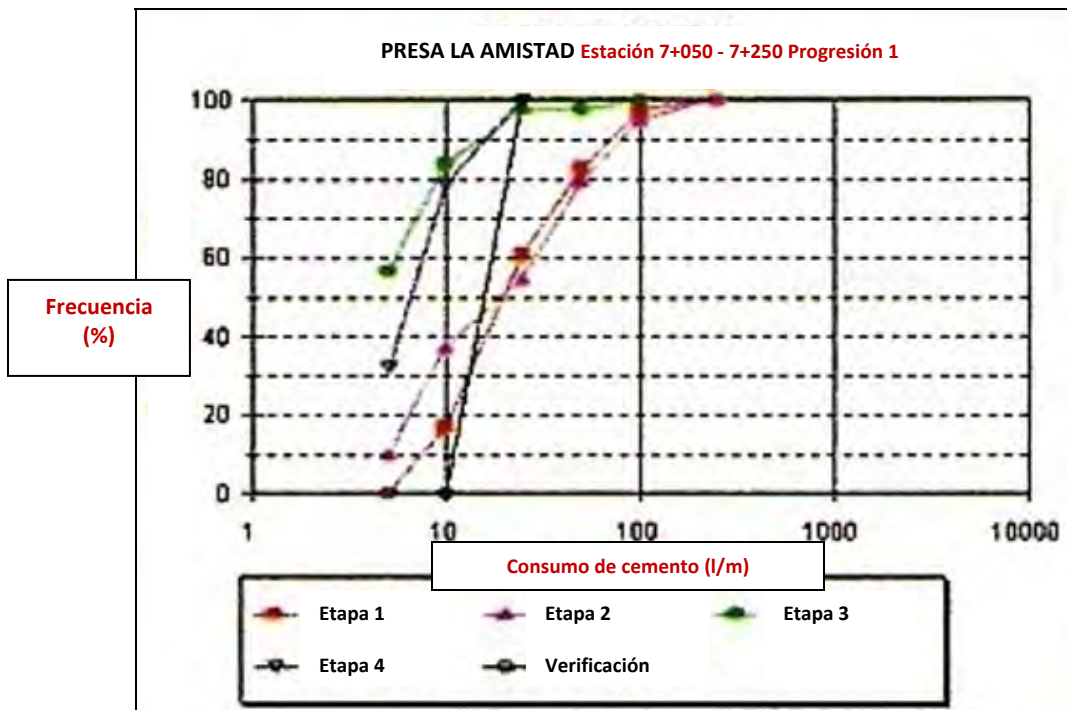


Figura 78. Presa “La Amistad”, gráficas frecuencia – consumo de cemento para diversas progresiones y etapas en barrenos de un tramo de pantalla (Hungsberg, 2001).

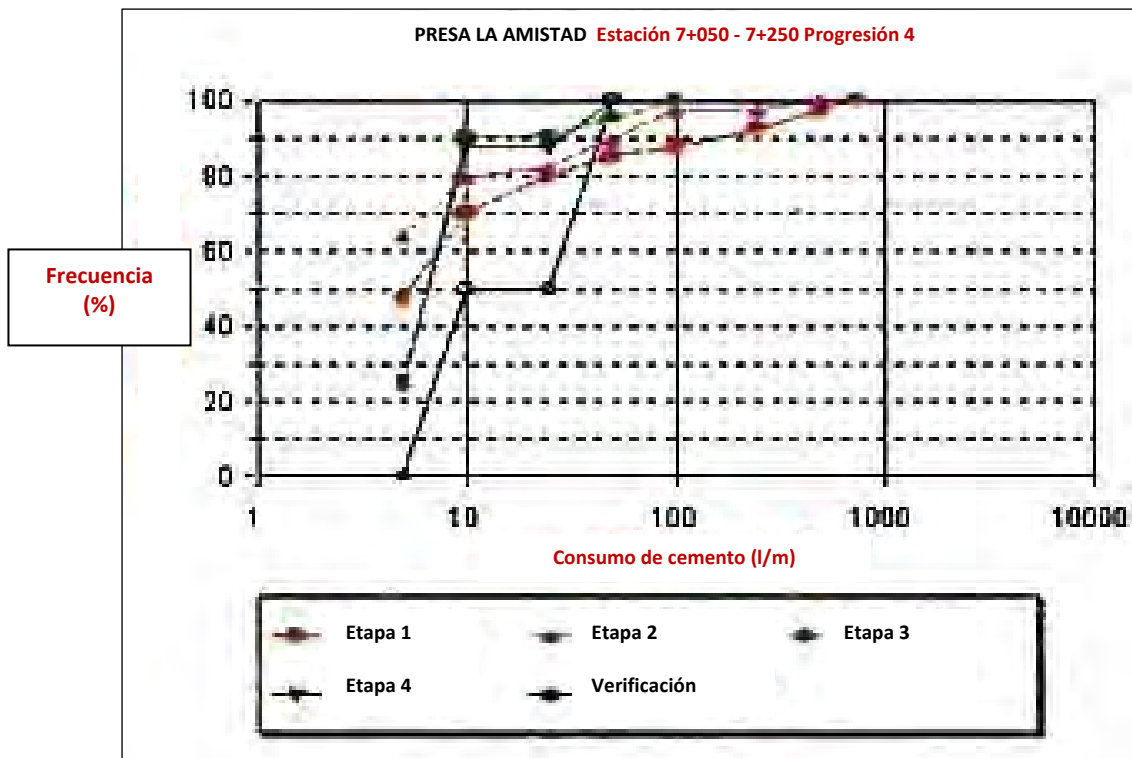
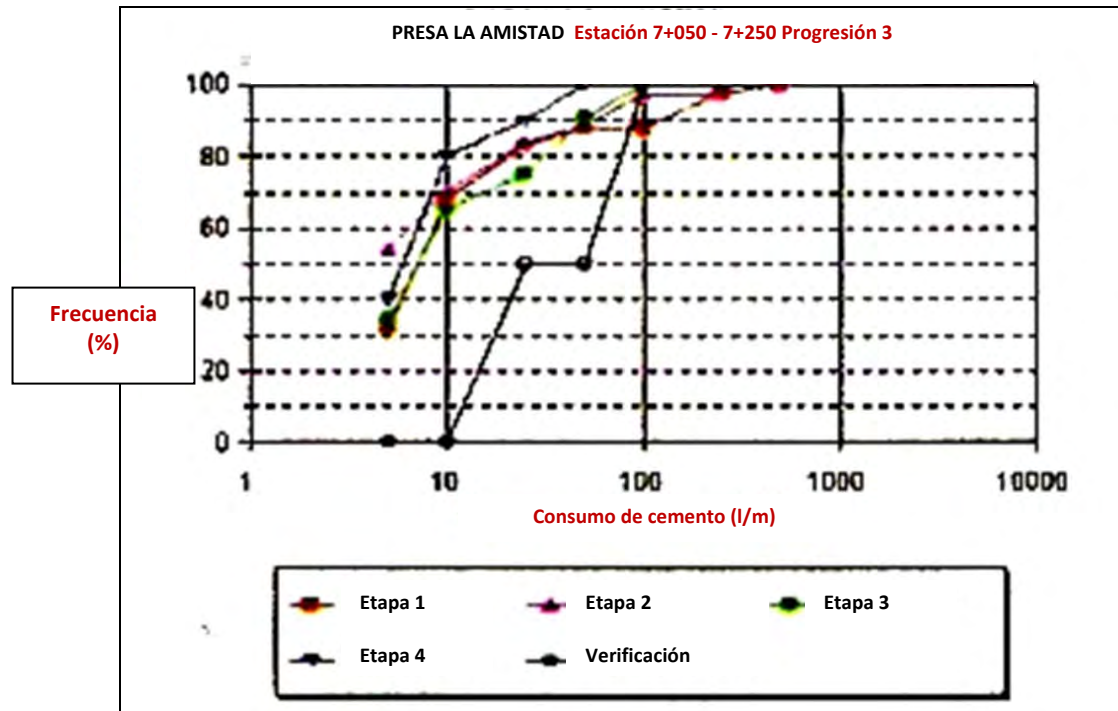


Figura 78 (continuación). Presa “La Amistad”, gráficas frecuencia – consumo de cemento para diversas progresiones y etapas en barrenos de un tramo de pantalla (Hungsberg, 2001).

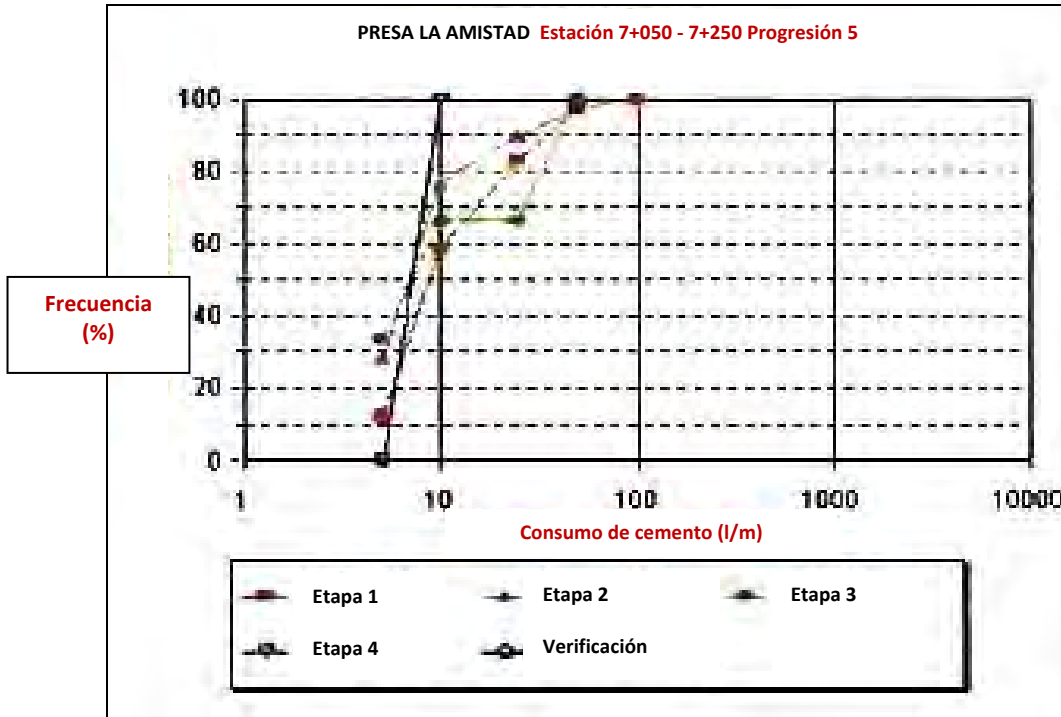


Figura 78 (continuación). Presa “La Amistad”, gráficas frecuencia – consumo de cemento para diversas progresiones y etapas en barrenos de un tramo de pantalla (Hungsberg, 2001).

La figura 79 muestra el consumo de cemento en l/m para cada etapa y progresión. Resalta que el consumo fue muy variable. Por ejemplo, en la segunda progresión fueron absorbidos en promedio durante la primera etapa 48 l/m; sin embargo, en la segunda etapa 18 l/m, para volver a subir en la tercera a 121 l/m. Esto se considera como un indicio claro de la distribución aleatoria de los huecos carstificados. Quizá también tenga que ver algo con el hecho de que las perforaciones de todas las etapas no se hicieron sobre una sola línea, sino que se desplazaban lateralmente por etapas.

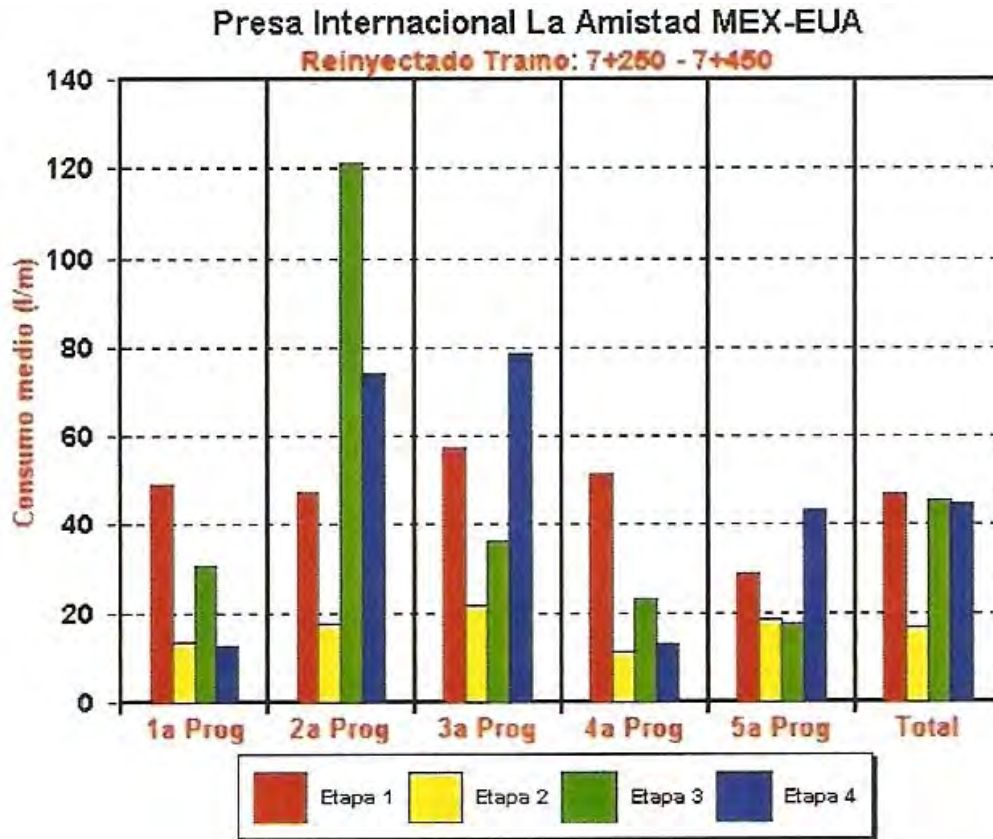


Figura 79. Presa “La Amistad”, histogramas del consumo de cemento de cada progresión y por etapas (Hungsberg, 2001).

En promedio el consumo de cemento fue muy reducido. En la capa superior de marga fue un poco mayor que en la caliza, en donde localmente se lograban absorciones mayores. Para comprender los valores medios pequeños del consumo de cemento habría que tomar en cuenta que los huecos conductores de agua son bastante aislados y están rodeados por caliza impermeable masiva. Otra razón podría ser el efecto del inyectado anterior, que sólo fue erosionado localmente.

En los casos de rellenos de grandes cavidades a muy baja presión se le agregaba a la suspensión ceniza volante (fly-ash) como relleno. El inyectado se efectuaba con interrupciones temporales, hasta alcanzar la presión máxima. Junto a las perforaciones con grandes consumos se hicieron otras perforaciones, que después se inyectaban en la misma forma.

Después de los trabajos realizados no se sabe si el embalse de la presa ha experimentado niveles altos, del orden de los que causaron las dolinas o un incremento de las filtraciones en los manantiales, motivos por los cuales se llevaron a cabo los trabajos de re-inyectado descritos.

5.2.7 Piezometría.

Antes del inicio del re-inyectado se instalaron secciones piezométricas sobre tres ejes transversales al eje de la cortina en las estaciones 6+950, 7+150 y 7+350.

Cada sección fue equipada con cuatro piezómetros, una sin celda aislada, del lado de aguas arriba del pie de la cortina como pozo de observación y los otros tres del lado de aguas abajo de la cortina, cada una equipada con celdas a diferentes profundidades (ver figura 80).



Figura 80. Presa "La Amistad", plano general de localización de perfiles de estaciones piezométricas (Hungsberg, 2001).

La figura 81 indica la distribución de la presión en los cuatro piezómetros sobre la sección de la estación 7+150. El nivel del piezómetro aguas arriba se encuentra siete metros abajo del nivel del embalse y la pérdida de carga a través de la pantalla asciende a sólo un metro. Estas diferencias de presión fueron bastante constantes durante todo el periodo de observaciones. Lo anterior se interpreta como sigue:

- La pérdida de carga de solamente 1 m a través de la pantalla de inyecciones indica que no es muy efectiva, ya que se trata de una pantalla colgante en una roca regionalmente muy permeable.
- La pérdida de carga de 7 m desde el embalse al pie de aguas arriba de la cortina, confirma la existencia de un delantal menos permeable formado por la capa superior de margas de la formación Georgetown que cubre a la caliza permeable.
- El tapete de marga de aguas arriba impide el acceso directo del agua desde el embalse al subsuelo. El agua penetra espacialmente a través de las paredes verticales de los cañones

desde el embalse en el subsuelo. La capa de marga protege a la cortina consecuentemente más que la pantalla. Sin embargo, el problema es que esta capa de marga parcialmente no es compacta, de manera que siempre vuelve a fracturarse y se forman nuevos sumideros. Por lo anterior, siempre será necesario vigilar este tapete y cada vez que aparezca un nuevo sumidero, tratar de recubrirlo lo mejor posible, para evitar flujos de agua concentrados. La amplitud de este delantal de marga desde la cortina asciende aproximadamente a 300 m (ver figura 82).

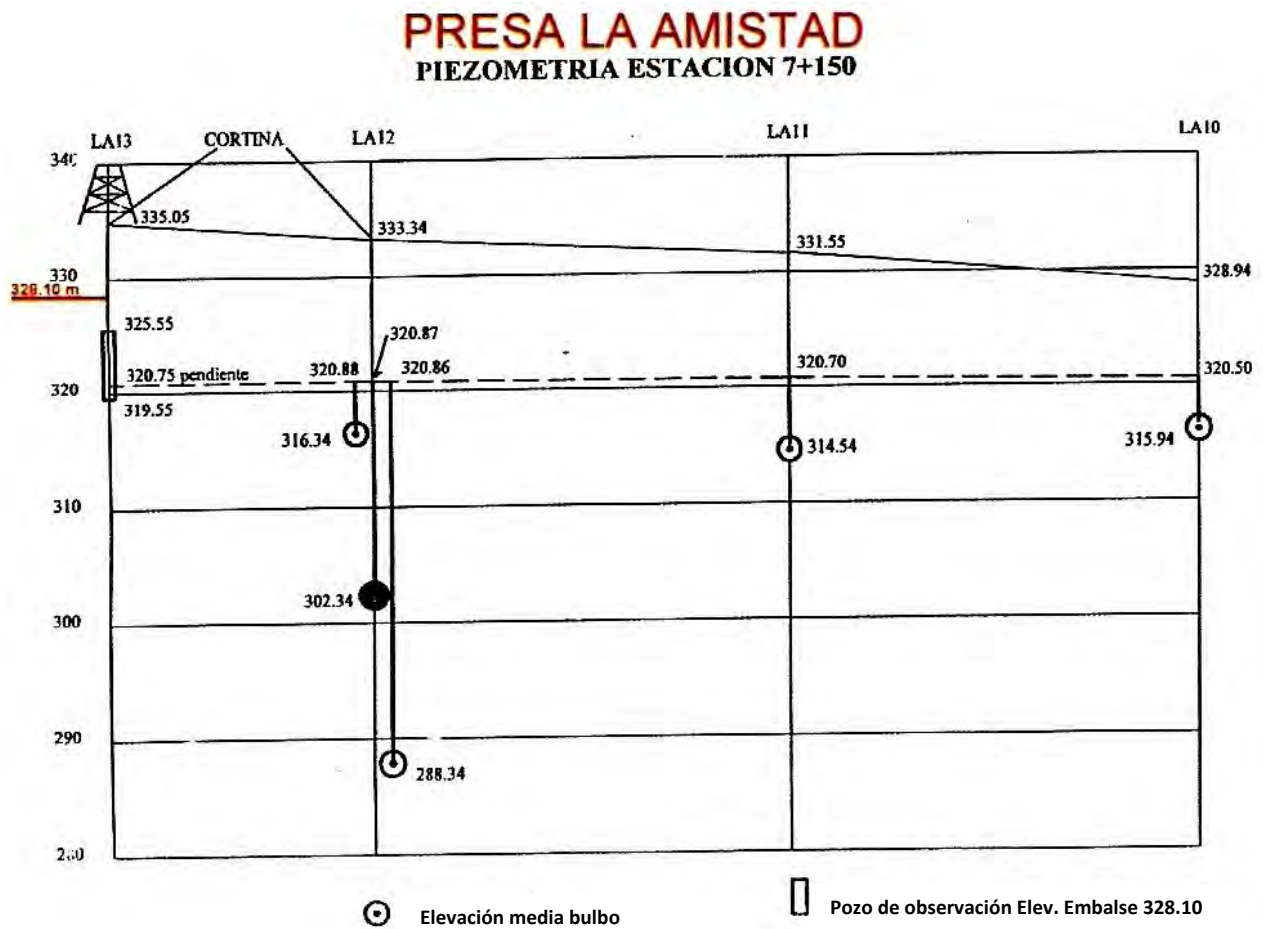


Figura 81. Presa "La Amistad", perfil piezométrico en la sección de la estación 7+150 (Hungsberg, 2001).

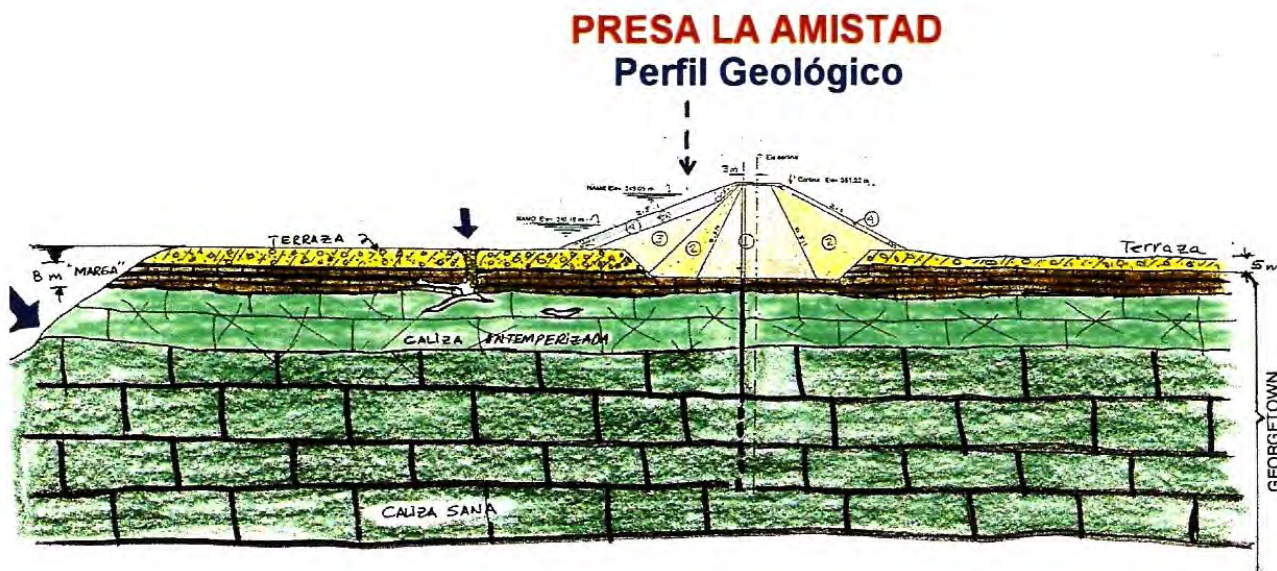


Figura 82. Presa "La Amistad", corte geológico esquemático que ilustra el delantal impermeable (Hungsberg, 2001).

5.2.8 Conclusiones.

Para solucionar el problema de filtraciones bajo la cortina de la presa presentada, evidenciadas por la aparición de dolinas al quedar expuesto el fondo del embalse al descender éste durante una sequía ocurrida en la región, se reforzó la pantalla de inyecciones realizada bajo la cortina antes de construirse ésta, además de atenderse el problema que representaban las dolinas.

El refuerzo de la pantalla de inyecciones se realizó aplicando los principios establecidos en el método GIN para tratamiento de cimentaciones de presas, adecuándolo a la naturaleza del terreno, particularmente a las calizas existentes bajo la capa superficial de margas que constituyen, la secuencia estratigráfica en el sitio.

La modificación al método GIN consistió prácticamente en establecer volúmenes máximos para la toma de lechada que se inyectara, mayores a los usuales, dada la naturaleza cárstica del terreno, la cual se manifestaba por la existencia de oquedades en el cruce de fracturas o discontinuidades, como ampliación de las fracturas o discontinuidades por disolución de la caliza en la que se encontraban.

El método GIN se aplicó siguiendo los controles mencionados en capítulos anteriores. Sin embargo, los resultados no mostraron una convergencia al cierre progresivo de los huecos en la masa rocosa como era de esperarse, sino más bien mostraron una dispersión, a veces no convergente al cierre, debido a la aleatoriedad en la distribución espacial de los huecos dentro de la masa de roca, ocasionada por la génesis de los mismos.

El consumo de lechada promedio fue relativamente reducido, 36 l/m (aproximadamente, 24 kg de cemento por metro), no obstante que hubo zonas puntuales en que el consumo fue alto debido a la presencia local de oquedades en la caliza.



Aunque la masa de roca en la que se realizaron las inyecciones pudiera no haber sido la ideal para la aplicación del método GIN, el procedimiento aplicado y los controles durante su aplicación, permitieron mejorar las condiciones de permeabilidad local de la masa, al reducir el flujo directo desde el área del embalse afectado por las dolinas hacia los manantiales del arroyo Carmina. Este hecho no se manifestó en las mediciones piezométricas, en virtud de que el tratamiento, fue sólo local y, conformó una zona mejorada aislada en el medio, en la que se redujo el flujo pero prácticamente no se modificaron las presiones del agua subterránea.

Los sumideros seguramente se formaron por el cambio de nivel que experimenta el embalse al descender y que provoca arrastre del material que constituye el tapete natural de impermeabilización del vaso hacia las fracturas u oquedades existentes en la caliza que lo subyace. El sellado de los mismos mediante su relleno con filtros invertidos y material impermeable en su superficie, constituyó también una medida eficaz para reducir el flujo entre el embalse y los manantiales de aguas abajo.

5.3 Presa “Huites”, Estado de Sinaloa, México.

5.3.1 Datos generales.

Esta presa se encuentra aproximadamente a 1,300 km al noroeste de la ciudad de México sobre el río Fuerte, que descarga al Océano Pacífico (ver figura 83). Forma parte del sistema de presas sobre el río Fuerte junto con las presas Miguel Hidalgo y Josefa Ortiz de Domínguez que se encuentran aguas abajo.



Figura 83. Presa “Huites”, plano general de localización (Hungsberg, 2001).

La presa Huites tiene una capacidad de almacenamiento de 4,600 Mm³ y fue construida entre 1990 y 1995, destinada al riego de 70,000 ha, producción de energía eléctrica (capacidad instalada: 422 MW) y para control de avenidas del valle del río Fuerte.

La cortina consta de dos partes: una de concreto de gravedad sobre el lado izquierdo y una en arco sobre el lado derecho:

1. La cortina de gravedad tiene una altura de 160 m y una longitud en la corona de 316 m. El lado izquierdo se conecta junto con el vertedor de excedencias hacia la ladera y del lado derecho se recarga en un contrafuerte de concreto.
2. La cortina en arco tiene una altura de 88 m y una longitud de 104 m. Queda desplantada sobre un zócalo de concreto de 57 m de altura, que empotra en la ladera derecha. Aguas abajo de esta última cortina se encuentra la planta hidroeléctrica a cielo abierto.

El vertedor de excedencias tiene una capacidad máxima de 22,450 m³/s. El desagüe de fondo se encuentra entre el contrafuerte y el zócalo de la cortina en arco y tiene un diámetro de 4.50 m. En conjunto se colocaron en un tiempo muy breve 3.5 millones de m³ de concreto, lo que en aquel tiempo fue un récord mundial (ver figuras 84 y 85).

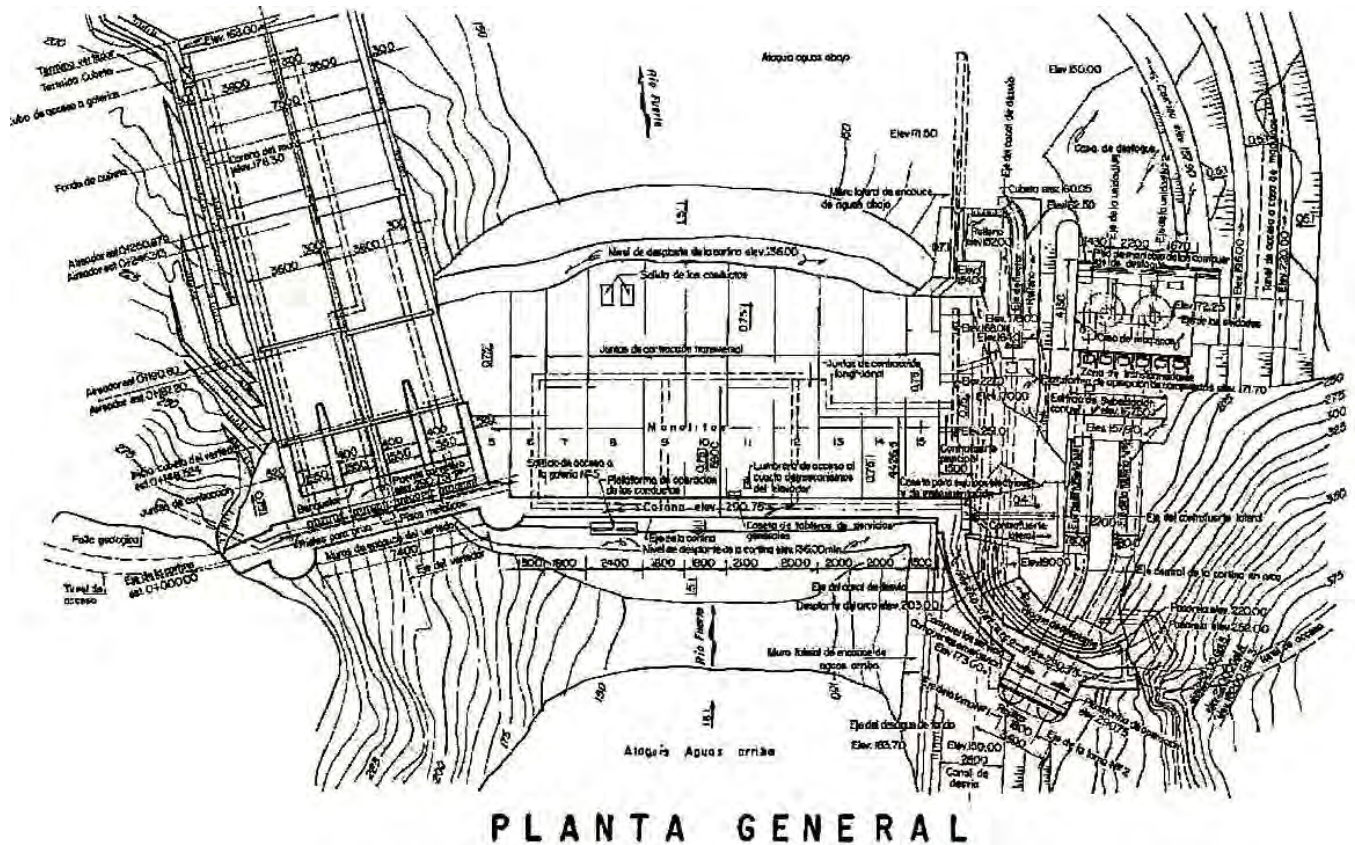


Figura 84. Presa “Huites”, plano general de la presa (Hungsberg, 2001).

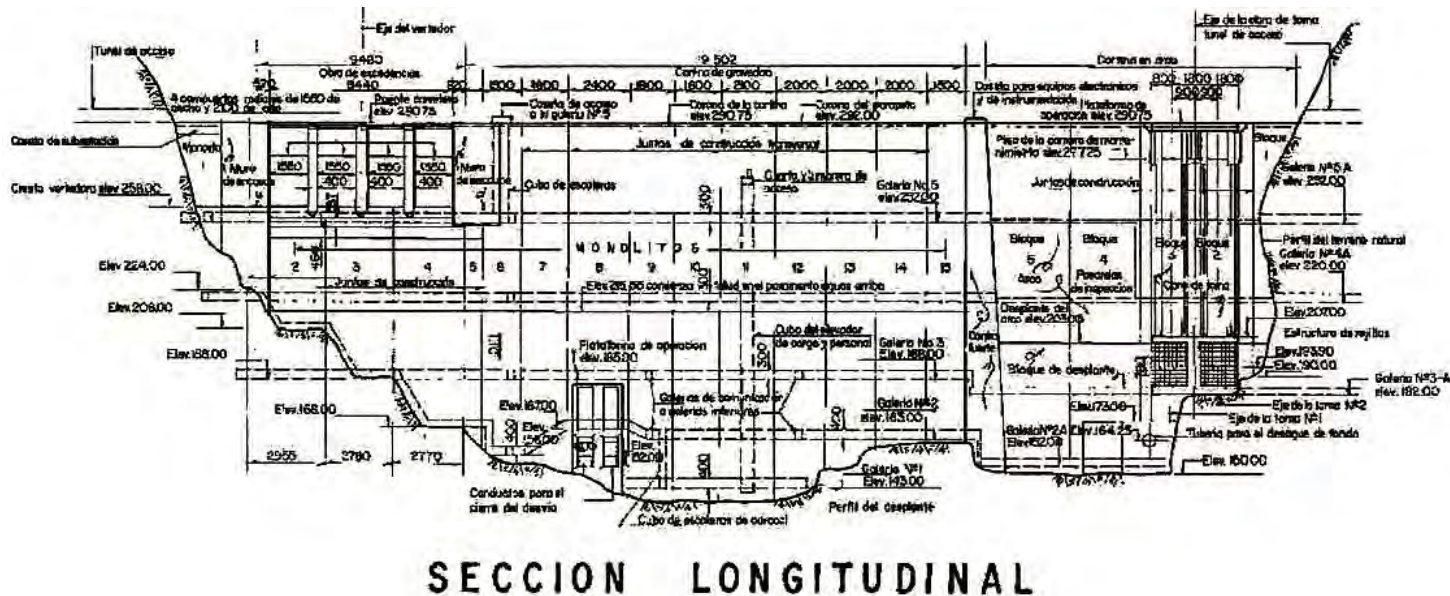
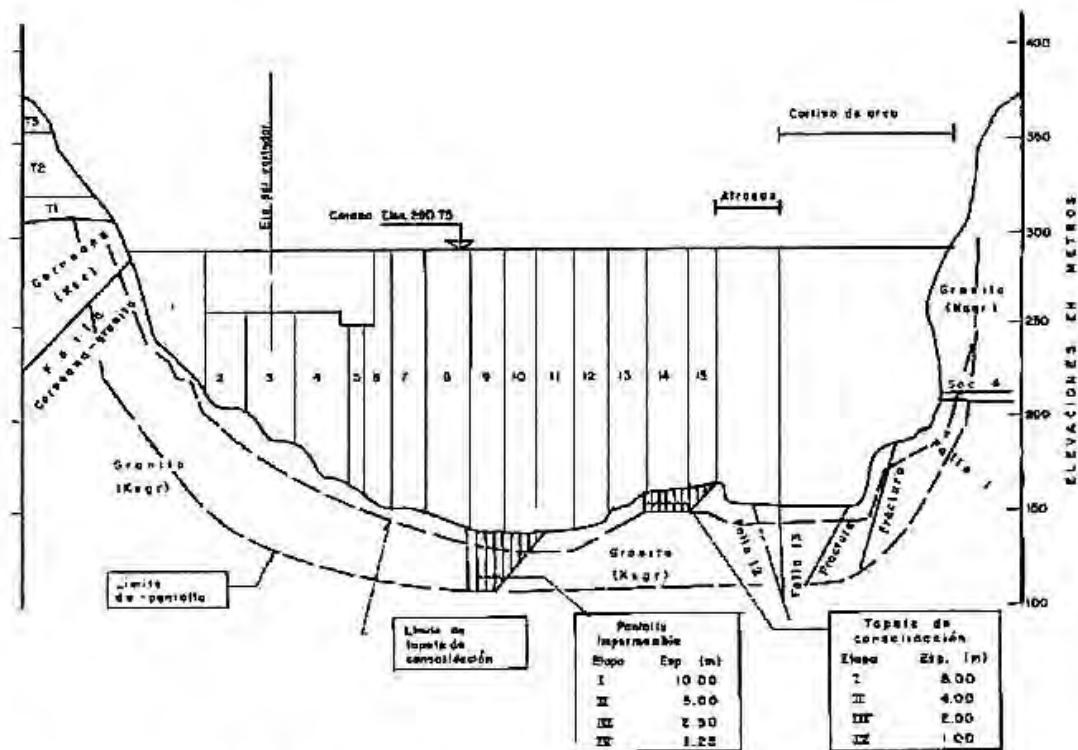
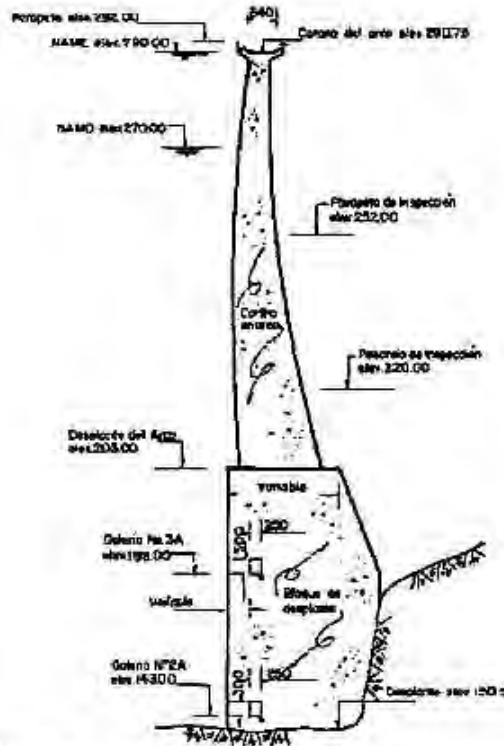


Figura 84 (continuación). Presa “Huites”, plano general de la presa (Hungsberg, 2001).

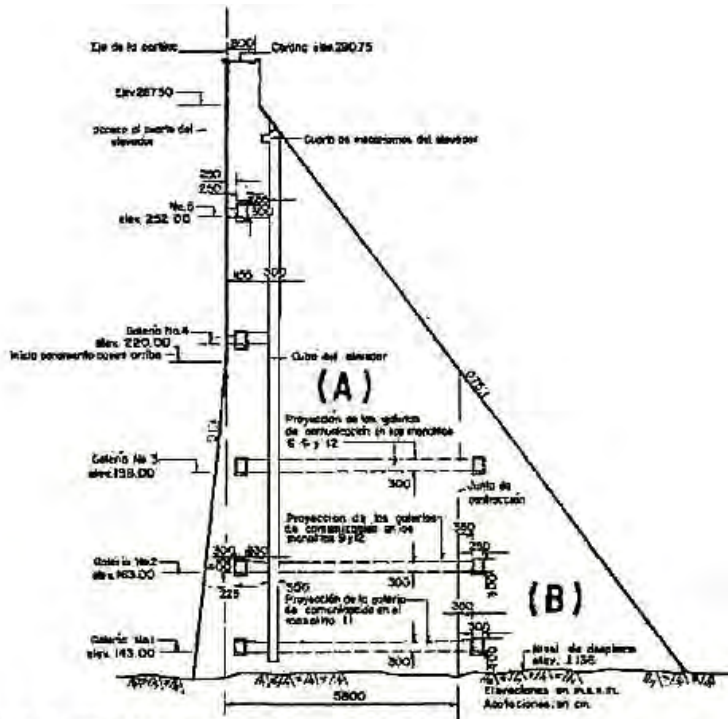


TRATAMIENTO DE PANTALLA IMPERMEABLE Y CONSOLIDACION

Figura 85. Presa “Huites”, cortes transversales y vista general de la cortina desde aguas arriba (Hungsberg, 2001).



SECCION TRANSVERSAL DE LA CORTINA EN ARCO



SECCION TRANSVERSAL-UBICACION DE GALERIAS EN LA CORTINA DE GRAVEDAD

Figura 85 (continuación). Presa "Huites", cortes transversales y vista general de la cortina desde aguas arriba (Hungsberg, 2001).



a) Geología regional.

La presa se sitúa en el NW del país. En la región dominan rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental. Presenta granitos y dioritas y en sus límites exteriores aparecen rocas extrusivas riolíticas y andesíticas.

b) Geología del vaso.

En el vaso predominan ignimbritas y andesitas y en el eje se encuentra un cuerpo de granito en forma cómica.

c) Geología del sitio.

En ambas laderas y debajo de la cimentación existe granito masivo gris claro hasta color rosa y en la ladera derecha el granito muestra las formas típicas de intemperización, incluyendo las juntas de descompresión concéntricas. En el granito se han desarrollado dos sistemas de juntas. Un sistema principal con un echado vertical y rumbo NE-SW y el segundo tiene un echado de 77° hacia el SW con un rumbo NW-SE. La mayoría de las juntas están cerradas o tienen relleno arcilloso.

El granito queda cubierto en forma discordante por un Hornfels de color gris oscuro hasta gris verdoso; su textura varía entre la de la brecha hasta la de un pórfido. El Hornfels contiene fragmentos principalmente de origen volcánico. Se trata de andesitas, riolitas, dacitas, cuarcita, gneis y pizarras. El Hornfels queda cubierto a su vez por una serie volcánica de ignimbritas, que consiste de tobas riolíticas que forman taludes verticales.

En el fondo del valle, el río depositó 20 m de arenas y gravas.

En el sitio de la presa se pueden observar adicionalmente varios sistemas y desplazamientos que se formaron por la tectónica local de bloques (ver figura 86).



Figura 86. Presa “Huites”, vista del sitio desde aguas abajo antes del inicio de la obra (Hungsberg, 2001).

d) Sismología.

En esta zona los sismos son raros y solo tienen una intensidad reducida. A pesar de ello, las investigaciones efectuadas en los EUA resultaron en la determinación de una aceleración de 0.3 g para el dimensionamiento de la cortina.

5.3.2 Perforaciones de exploración.

Las primeras perforaciones para la presa se efectuaron en los años setenta. Después de que se definió el proyecto, se efectuaron 17 perforaciones verticales con recuperación de núcleos y pruebas de absorción de agua con espaciamentos de cerca de 40 m (ver figura 87). La recuperación de los núcleos se encontraba, con excepción de zonas locales fracturadas, arriba del 95%; el valor RQD quedaba arriba del 90%. El 95% de las pruebas de absorción de agua dieron valores Lugeon entre 0 y 3 UL, el 5% restante alcanzaba valores entre 3 y 10 UL y en muy raras ocasiones se encontraron valores arriba de 20 UL. Las presiones críticas, que provocaban el fracturamiento de juntas latentes fueron muy variables: oscilaban entre 3 y 17 kg/cm². El Prof. Ewert investigó este conjunto de datos entre 1997 y 1998 y llegó a la conclusión de que se trataba fundamentalmente de una roca impermeable. Esto lo comprueban los ejemplos de las figuras 88 y 89.

- En la primera etapa de perforación el 80% de los ensayos no tuvieron ninguna absorción de agua (0 UL), el 20% restante dio valores entre 17 y 25 UL con presiones críticas de fracturamiento entre 8.5 y 13 kg/cm².
- En la segunda etapa de perforación el 95% de las pruebas no tuvo absorciones de agua (0 UL), las presiones críticas variaron entre 2 y 7 kg/cm².

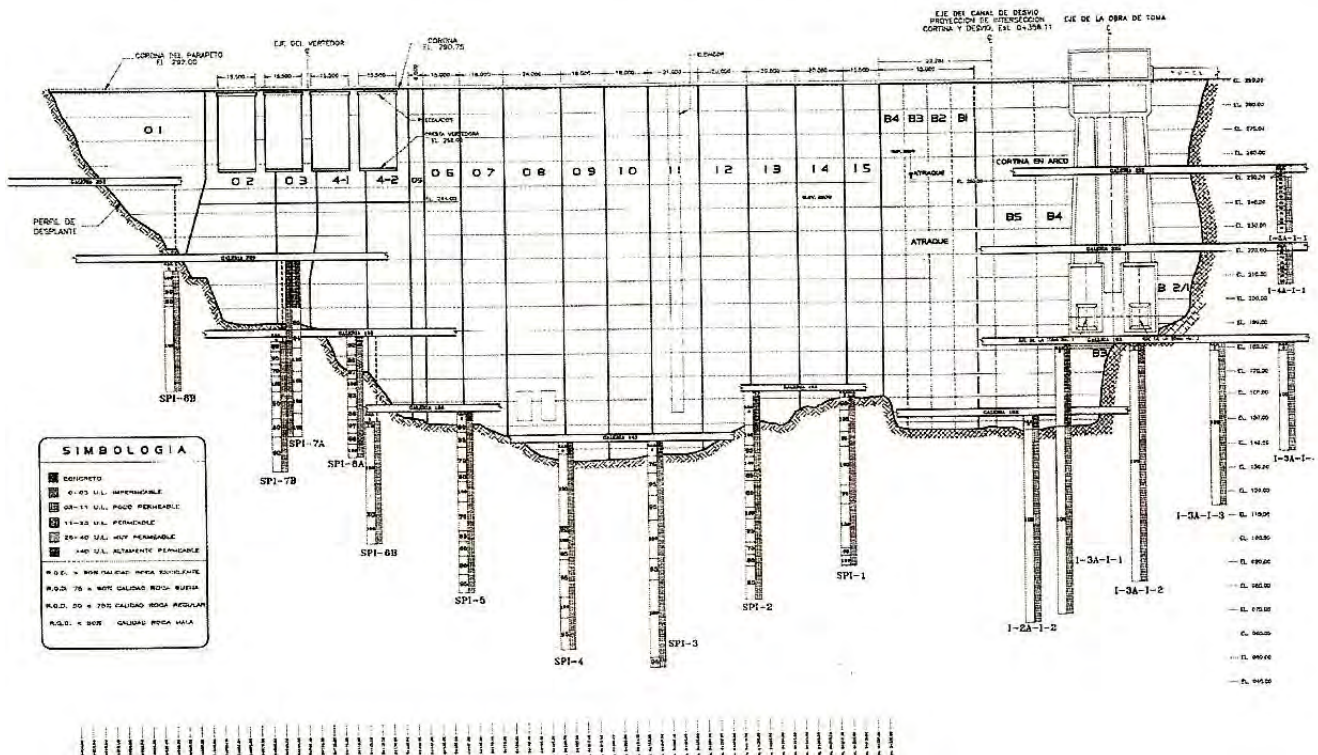


Figura 87. Presa "Huites", perfil de exploraciones y de pruebas de absorción de agua (Hungsberg, 2001).

PRESA HUITES
PRUEBA DE ABSORCION DE AGUA
Pozo SPI-06B

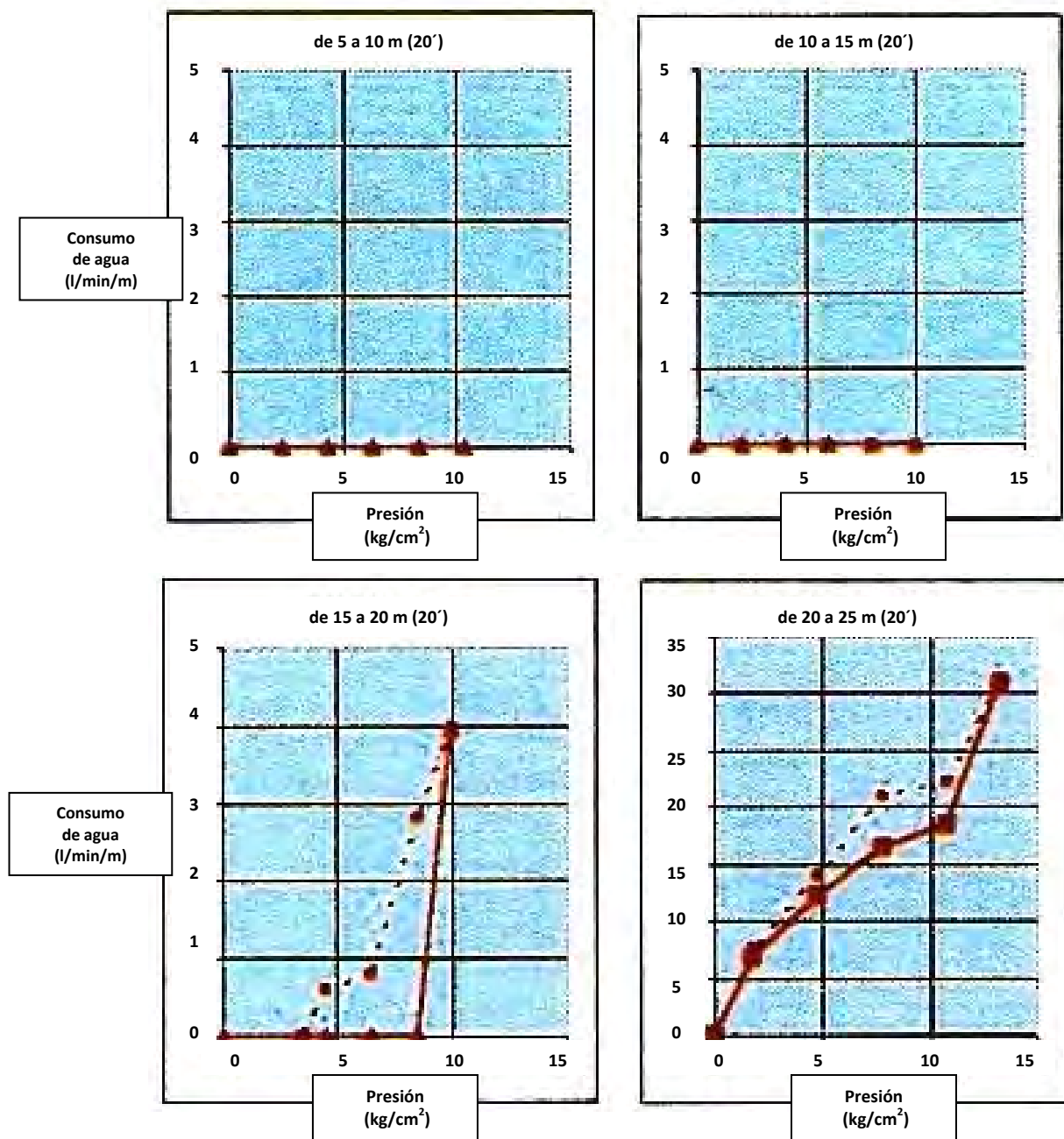


Figura 88. Presa "Huites", pruebas de absorción de agua en la perforación SPI-06B (Hungsberg, 2001).

PRESA HUITES
PRUEBA DE ABSORCION DE AGUA
Pozo SPI-06B

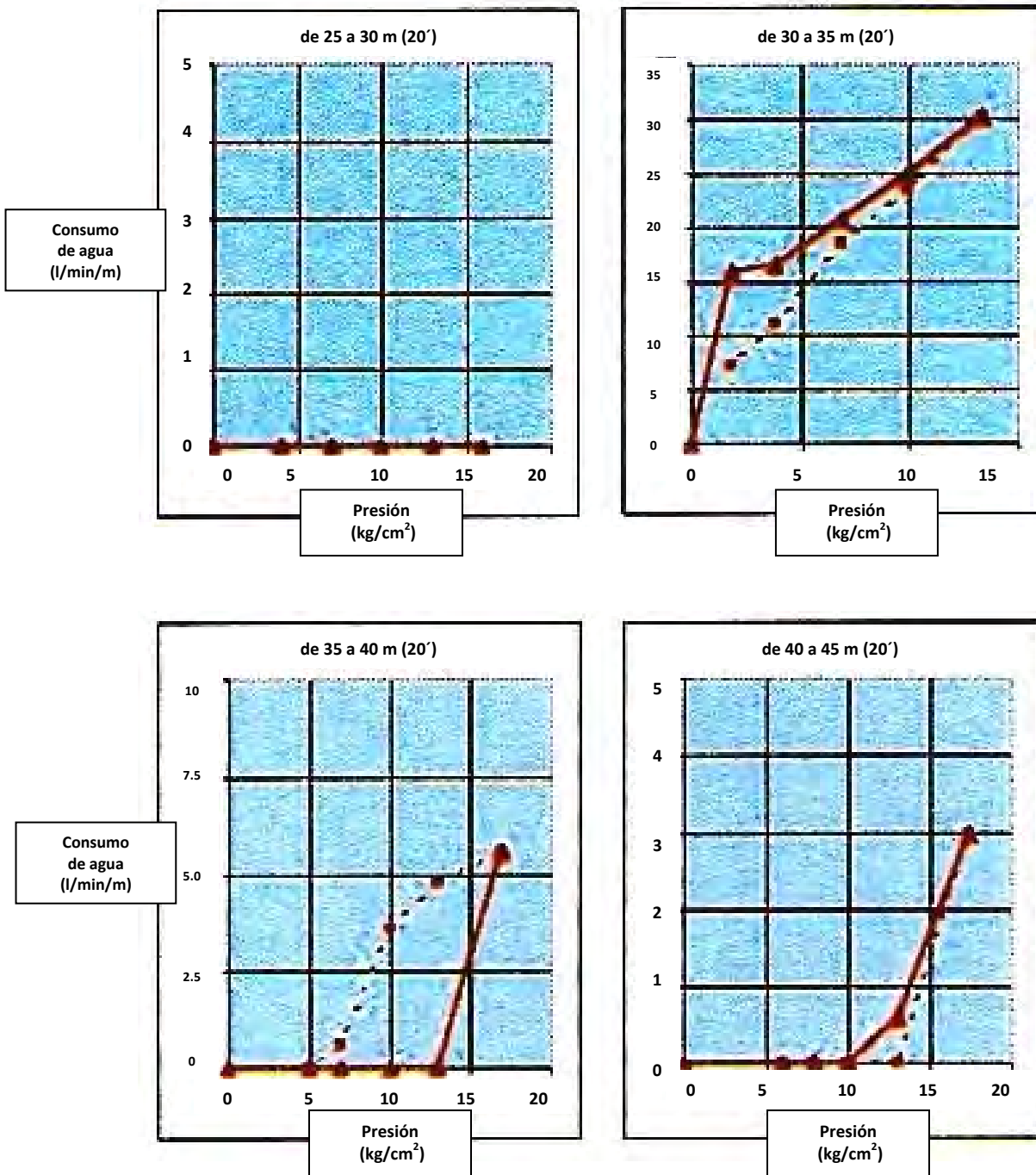
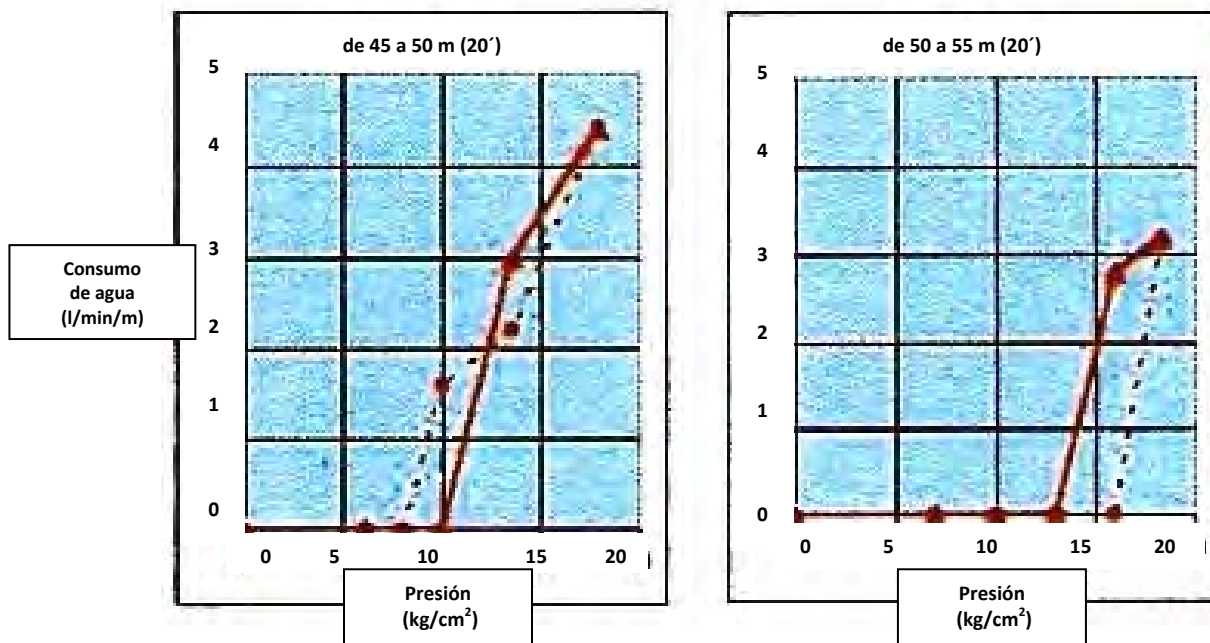


Figura 88 (continuación). Presa "Huites", pruebas de absorción de agua en la perforación SPI-06B (Hungsberg, 2001).

PRESA HUITES
PRUEBA DE ABSORCIÓN DE AGUA
Pozo SPI-06B



| Pozo: SPI-06B | | | |
|---------------|--------|----------------------------------|-----------------------------|
| Progresión | Lugeon | P. Crítica (kg/cm ²) | Pmax. (kg/cm ²) |
| 5-10 | 0 | - | 10 |
| 10-15 | 0 | - | 10 |
| 15-20 | 0 | 8.5 | 10 |
| 20-25 | 17.03 | 10.805 | 13.32 |
| 25-30 | 0 | - | 15.985 |
| 30-35 | 25.4 | - | 13.31 |
| 35-40 | 0 | 13 | 16.925 |
| 40-45 | 0 | 13 | 17.395 |
| 45-50 | 0 | 10 | 17.968 |
| 50-55 | 0 | 13 | 18.33 |

Figura 88 (continuación). Presa "Huites", pruebas de absorción de agua en la perforación SPI-06B (Hungsberg, 2001).

PRESA HUITES
PRUEBA DE ABSORCION DE AGUA
Pozo 1-2A-12

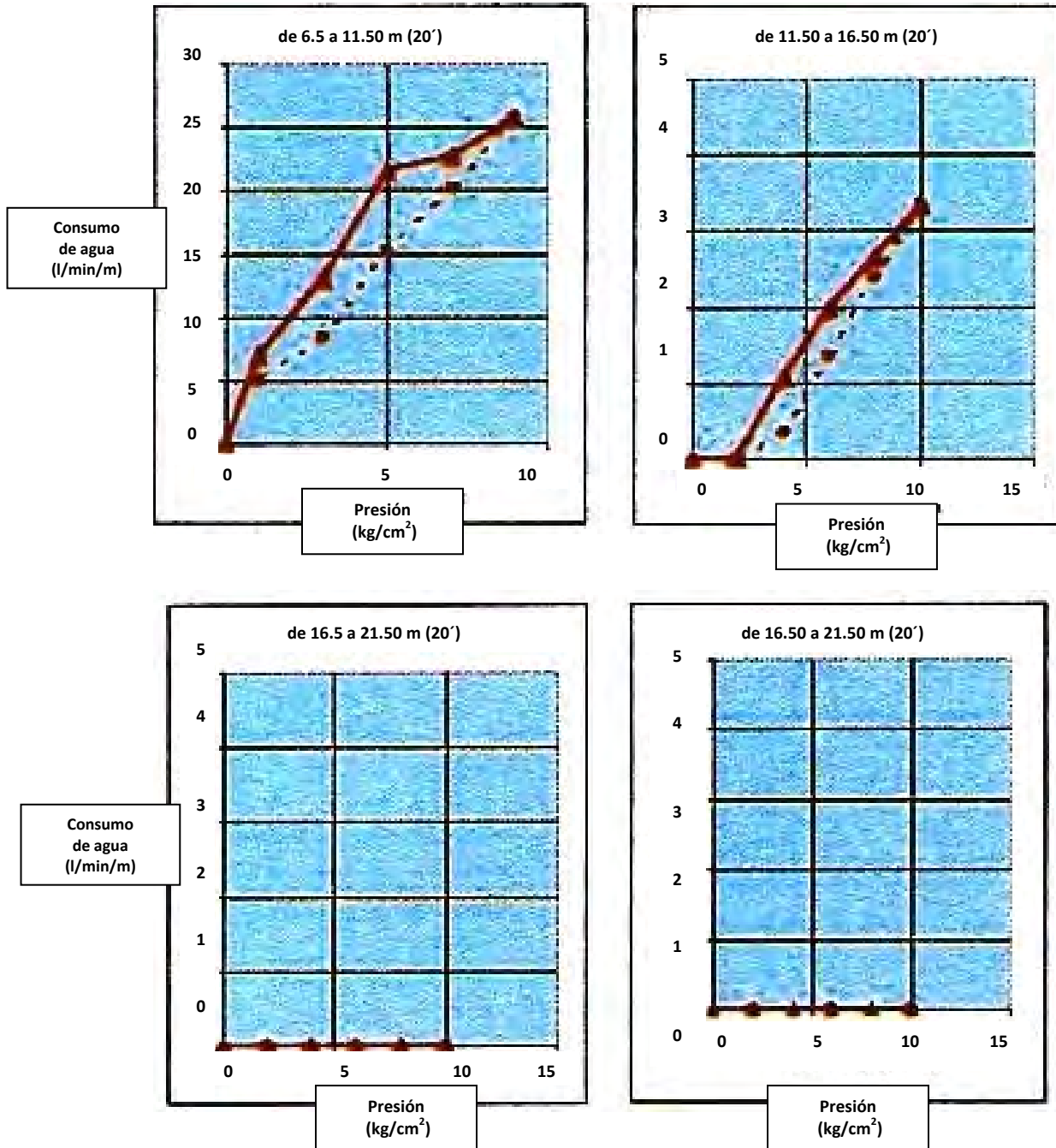


Figura 89. Presa "Huites", pruebas de absorción de agua en la perforación I-2A-12 (Hungsberg, 2001).

PRESA HUITES
PRUEBA DE ABSORCION DE AGUA
Pozo 1-2A-12

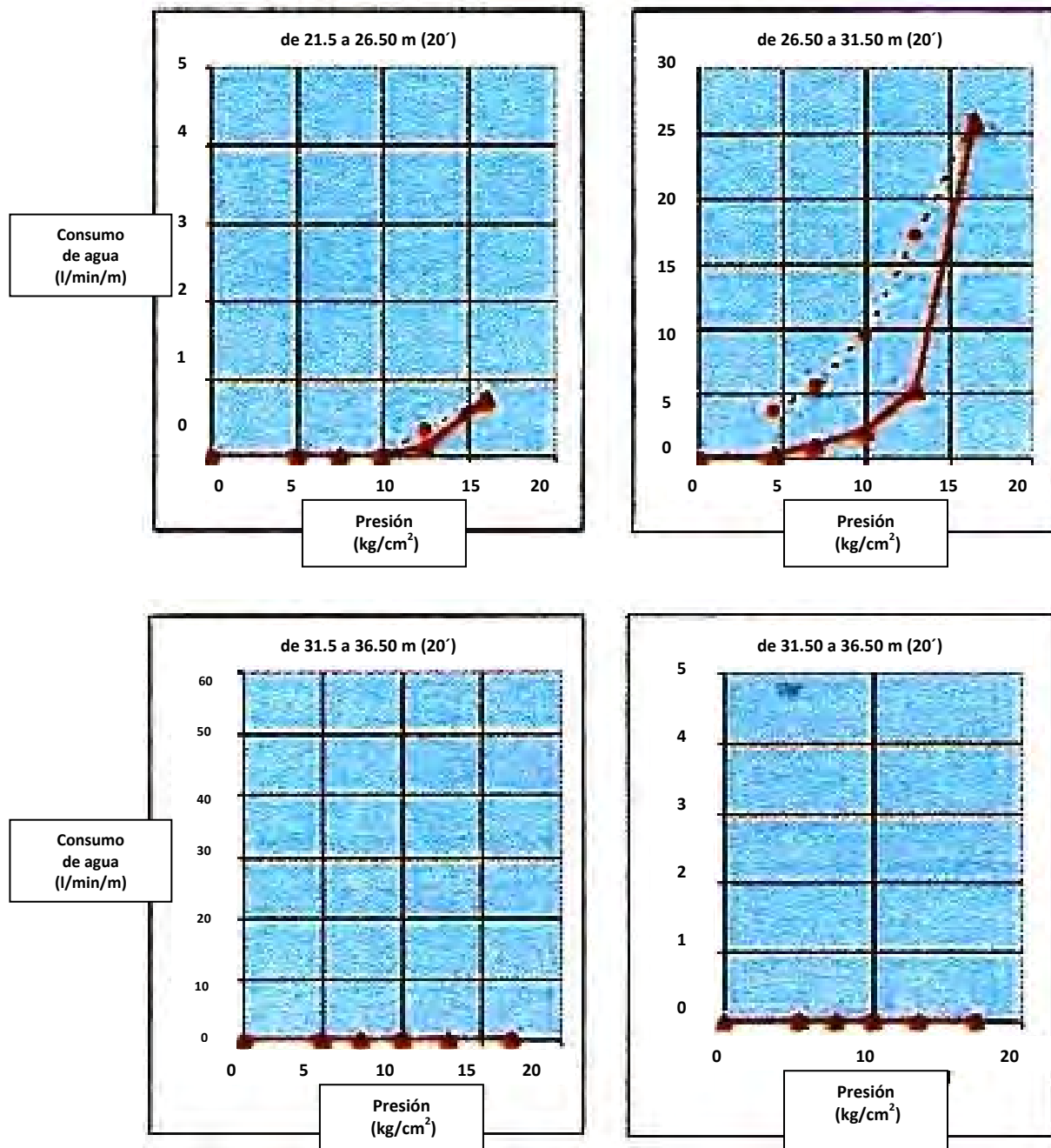


Figura 89 (continuación). Presa "Huites", pruebas de absorción de agua en la perforación I-2A-12 (Hungsberg, 2001).



PRESA HUITES
PRUEBA DE ABSORCION DE AGUA
Pozo 1-2A-12

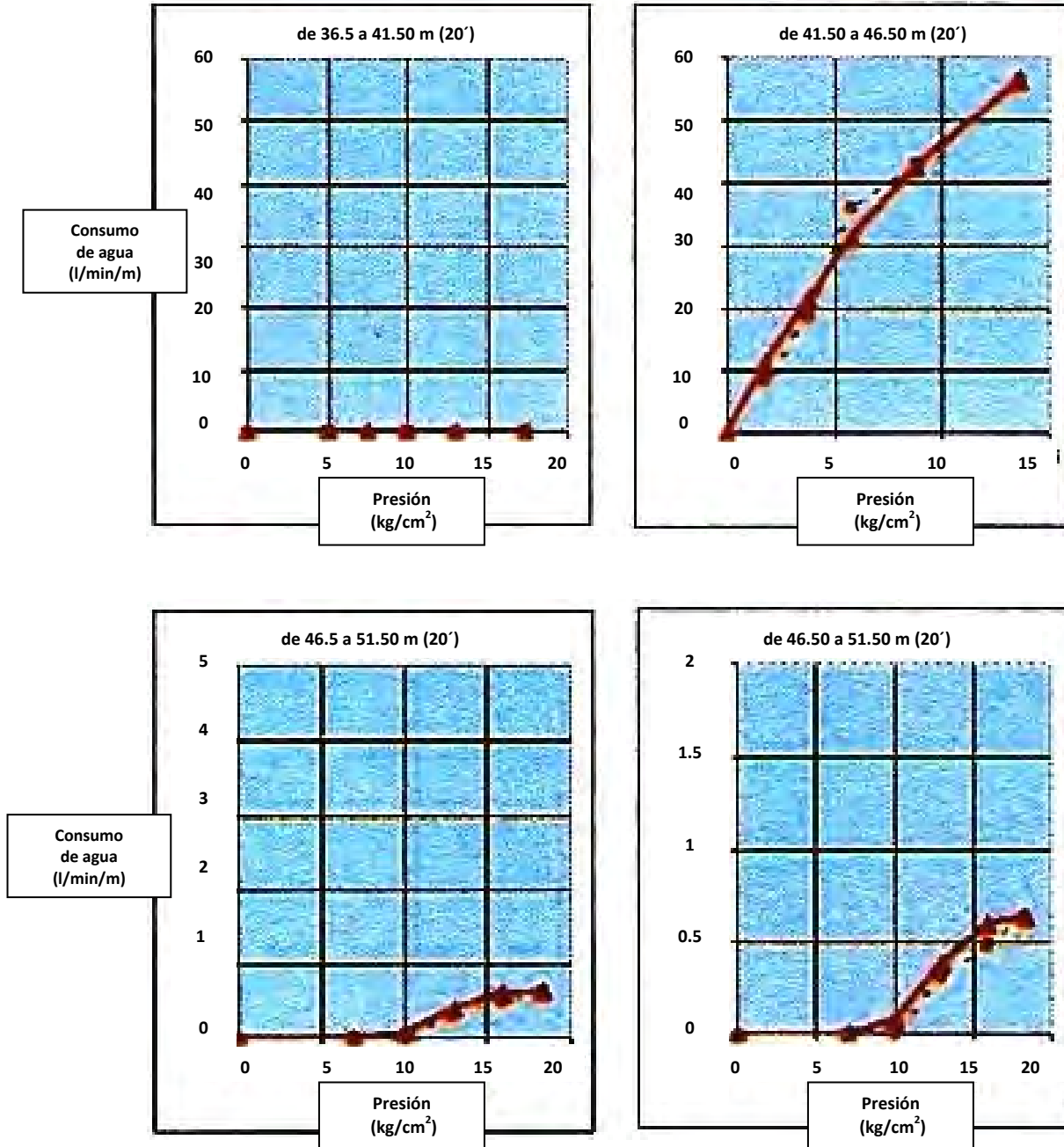


Figura 89 (continuación). Presa "Huites", pruebas de absorción de agua en la perforación I-2A-12 (Hungsberg, 2001).

PRESA HUITES
PRUEBA DE ABSORCIÓN DE AGUA
Pozo 1-2A-12

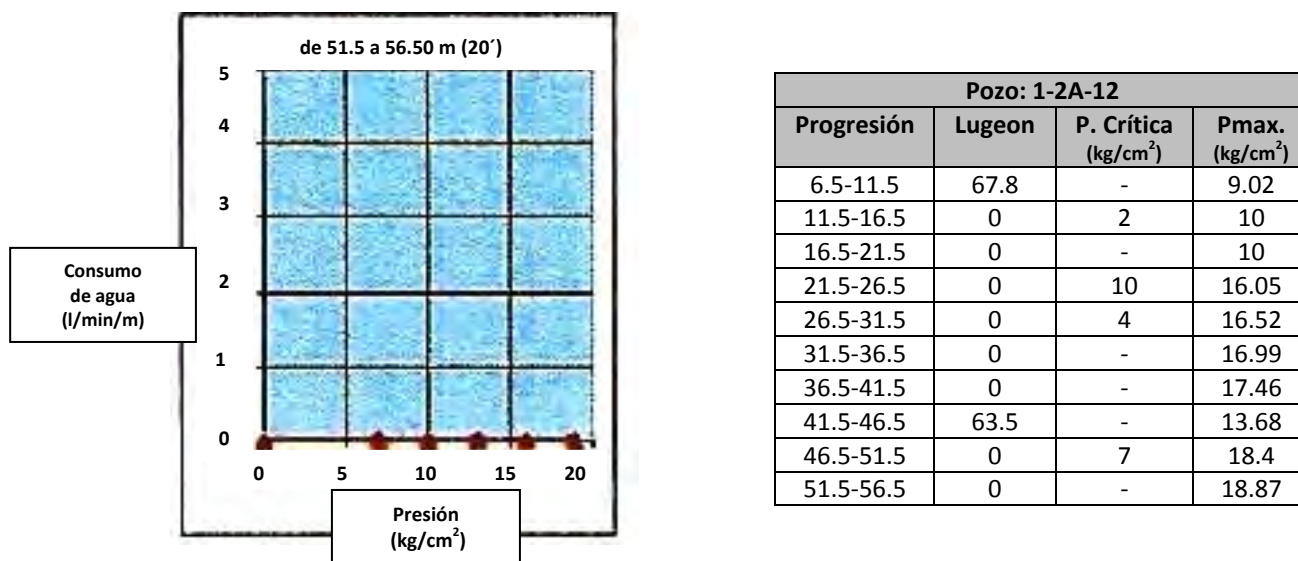


Figura 89 (continuación). Presa "Huites", pruebas de absorción de agua en la perforación I-2A-12 (Hungsberg, 2001).

5.3.3 Tratamientos de impermeabilización.

Para la impermeabilización del subsuelo en el sitio de la cortina se efectuaron dos programas: primero un inyectado de consolidación debajo de toda la superficie de desplante y después la pantalla de inyecciones.

5.3.4 Inyectado de consolidación.

Al principio se removieron los depósitos fluviales y la zona intemperizada del granito, de manera que afloraba finalmente roca sana en la excavación. Su superficie fue limpiada cuidadosamente, las juntas abiertas se impermeabilizaban en la superficie y posteriormente se inyectaban mediante perforaciones inclinadas a 45°, hasta una profundidad de 10 m.

Sobre la superficie limpia se colocaba un colado inicial de concreto como base ($f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$). La colocación de concreto debería efectuarse con la mayor prontitud posible para evitar la formación rápida de juntas nuevas de descompresión. Esta cubierta de concreto servía para la impermeabilización de la zona superior de roca y para lograr un buen contacto entre el concreto y la roca.

Después se efectuaron inyecciones de consolidación. Estas perforaciones tenían una profundidad de 15 m y se inyectaban con tres progresiones ascendentes. En algunos monolitos en el centro del cauce se efectuaron perforaciones hasta 25 m de profundidad e igualmente se inyectaron en progresiones ascendentes a cada 5 m. Durante el inyectado se aplicó el método GIN con un valor de $1,500 \text{ kg/cm}^2 \times \text{l/m}$; la presión máxima de inyectado ascendió a 30 kg/cm^2 y el volumen máximo de inyectado fue de 300 l/m . Para el inyectado se aplicó una sola mezcla de cemento, lo cual se explicará más adelante.



Las perforaciones para la inyección de consolidación se acomodaron en primera etapa en una cuadrícula de 8x8 m. Las perforaciones de la segunda etapa se colocaron al centro de estos cuadrados. En los 5 monolitos al centro del cauce se ejecutó la segunda etapa en forma obligatoria; en los demás monolitos solamente cuando se excedía el consumo de cemento durante la primera etapa de 50 kg/m. En donde las absorciones de la segunda etapa excedían los 30 kg/m, se efectuaba una tercera etapa. En estos casos se hacían cuatro perforaciones alrededor de las perforaciones de segunda etapa con una equidistancia de 2 m y se inyectaban. En la cuarta etapa se efectuaban nuevamente cuatro perforaciones alrededor de las perforaciones de la tercera etapa, que tuvieran consumos mayores de 30 kg/m a una distancia de 1 m. Este procedimiento se continuaba hasta la sexta etapa con una equidistancia entre pozos de hasta 0.5 m, la cual se alcanzó en algunos casos. Se empleó solamente una mezcla de cemento con los siguientes valores índice:

- Relación a/c = de 0.6 hasta 0.8:1
- Viscosidad Marsh = de 30 a 35 seg
- Densidad = 1.5 ton/m³
- Cohesión relativa = de 0.08 hasta 0.15 mm
- Sedimentación máxima en 2 horas = 5%
- Cemento normal con finura Blaine = 4,000 cm²/g

Para lograr estas propiedades se agregaba un fluidificante en un porcentaje muy bajo para incrementar la penetrabilidad. Estas propiedades de la mezcla se comprobaban en forma regular. Antes del inyectado de cada progresión se inyectaba agua a una presión de 2 kg/cm² o hasta que se alcanzara la cantidad de 600 l/m; este procedimiento tenía el objetivo de saturar la roca.

Según el método GIN, el producto de la presión y el volumen unitario inyectado debía mantenerse constante, es decir, durante el proceso de inyectado debía controlarse la presión y el volumen de forma tal, que su producto no sobrepasara el valor GIN. La curva GIN es una hipérbola: en el eje "Y" se encuentra la presión hasta un máximo de 30 kg/cm² y en el eje "X" la cantidad de absorción hasta un máximo de 300 l/m (ver figura 90). Esto significa que los puntos para P-V, deberían encontrarse en lo posible dentro de la trayectoria de la curva GIN.

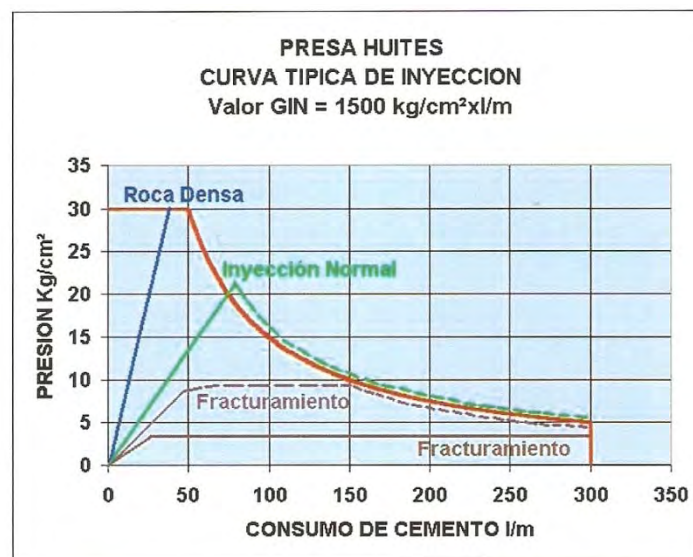


Figura 90. Presa "Huites", curvas típicas de inyectado con un GIN = 1,500 kg/cm²xl/m (Hungsberg, 2001).

El inyectado se efectuaba como sigue: siempre se iniciaba con una presión mínima de 2 kg/cm² y cada dos minutos se elevaba la presión otros 2 kg/cm², salvo que se observaran absorciones de cemento. De esta manera se controlaba la presión para que los puntos presión - volumen siempre quedaran dentro de la curva delimitada por el GIN. Entonces había dos casos extremos.

1. La curva subía en forma casi vertical hasta alcanzar la presión máxima, lo que era el caso en la mayoría de las veces. Estas inyecciones podían concluirse, es decir, la roca era impermeable.
2. La curva tenía un recorrido casi horizontal, es decir, llegaba hasta la cantidad máxima de absorción. Con esto se concluía el inyectado y se daba por terminada la progresión.

Entre estos dos extremos se encontraban las demás curvas de inyectado, en las cuales se llevaban los procesos de inyectado hasta la hipérbola de la curva GIN. En estos casos se trataba, cuando todavía había una absorción de cemento, de bajar la presión, de manera que los puntos presión - volumen seguían aproximadamente la curva GIN.

En muchos casos la curva de inyectado ascendía primero en forma casi vertical y luego pasaba a un tramo casi horizontal. Un recorrido de esta forma era causado por el fracturamiento de la roca; probablemente se había excedido la presión crítica de la misma.

Para el registro y control del inyectado se desarrolló, por parte del Consultivo Técnico, un programa de computadora. Durante cada escalón de presión se registraba la presión aplicada y el volumen inyectado. De ello resultaban gráficas que ilustraban el proceso de inyectado con curvas, que servían como indicadores para la continuación del inyectado (ver figura 91). Ya que no era posible instalar en cada punto de inyectado una computadora, se hizo después el control manualmente.

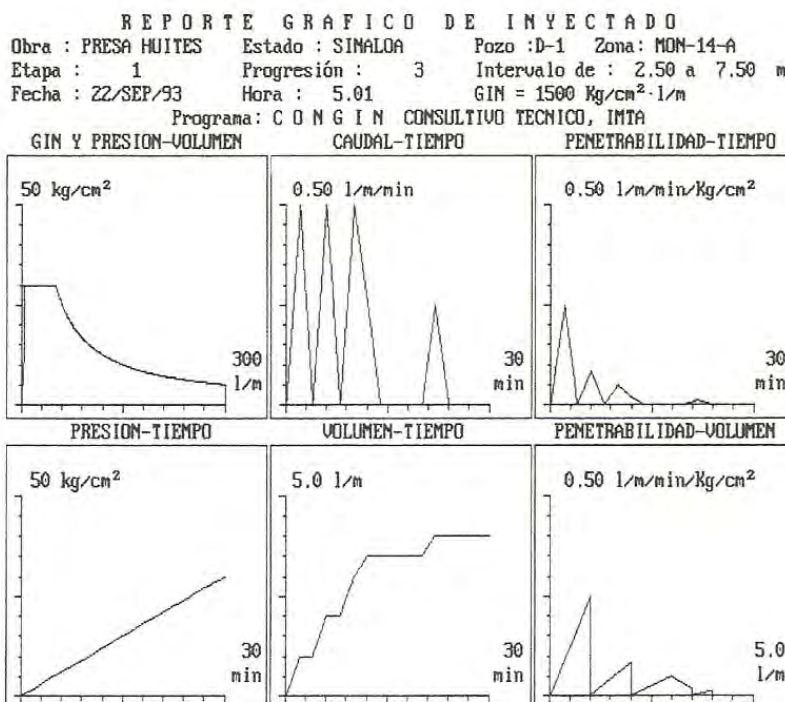


Figura 91. Presa "Huites", ejemplo de la salida gráfica de un proceso de inyectado según el método GIN con el programa de computadora del Consultivo Técnico (Hungsberg, 2001).



5.3.5 Equipo de perforación.

Se emplearon equipos de perforación del tipo “trackdrill” con martillo neumático. Cuando el concreto tenía una edad menor de 72 horas, se efectuaban perforaciones rotatorias. El diámetro de perforación variaba de acuerdo con el diámetro disponible de los empacadores entre 2 y 3 5/8”.

5.3.6 Equipo de inyectado.

Para la preparación de las mezclas de cemento se utilizaban turbo-mezcladores con una velocidad de 1,200 rpm y mezcladores más lentos de 60 rpm. Se emplearon bombas de doble pistón de la marca Hány, que permitían un buen control de la presión de inyectado. Primero se utilizaban equipos registradores automáticos, los cuales no resultaron funcionales, de manera que pronto todas las mediciones se hacían a mano.

5.3.7 Pantalla de inyecciones.

Antes de la instalación de la pantalla de inyecciones se hacían exploraciones a cada 40 m a lo largo del eje de la cortina, con recuperación de núcleos hasta una profundidad de 90 m, en las cuales se efectuaban pruebas de absorción de agua. En caso necesario, se hacían localmente otras exploraciones para descubrir posibles zonas permeables. Después del inyectado se efectuaron barrenos de comprobación con pruebas de absorción de agua para verificar el éxito de la impermeabilización.

La pantalla se efectuó en una sola línea. Las galerías de inyectado e inspección se encontraban cerca del lado de aguas arriba de la cortina. Los barrenos de inyectado se hicieron inclinados 15° respecto a la vertical y con dirección hacia aguas arriba. Se efectuaron con una profundidad de 50 m. Las perforaciones de la primera etapa tenían una separación de 10 m entre sí. La segunda etapa siempre se efectuaba, aún cuando el consumo de cemento en la primera fuera pequeño. La tercera etapa, con una separación de 2.5 m, se efectuaba cuando el consumo de cemento era mayor de 50 l/m. Se suponía que con este esquema se podía alcanzar una impermeabilización suficiente. Las perforaciones de control se inyectaban igualmente de acuerdo con el mismo esquema, sin embargo, en ellas se aplicaba un valor $GIN = 2,000 \text{ kg/cm}^2 \times \text{l/m}$ (presión máxima = 30 kg/cm^2 , volumen máximo = 500 l/m).

En el inyectado de la pantalla, se efectuaban continuamente pruebas de laboratorio para comprobar las propiedades de las suspensiones de cemento; y se obtuvieron los siguientes valores típicos promedio:

- Relación a/c = 0.7:1
- Cemento puzolánico, finura Blaine < 4,000 cm^2/g
- Aditivos= 0.3% Sikament 320
- Velocidad Marsh = 35 seg.
- Peso específico de la mezcla fraguada = 1.66 ton/m^2
- Cohesión relativa = 0.17 mm
- Sedimentación después de 2 horas = 0.5%
- Resistencia en muestras de 0.10 m de diámetro y altura de 0.20 m = de 90 hasta 220 kg/cm^2

Con temperaturas diurnas mayores de 40°C, el agua para la preparación de las suspensiones tenía una temperatura de 30°C. Cuando se presentaban temperaturas mayores, se agregaba hielo para poder mantener las propiedades de fluidez deseadas.

5.3.8 Perforaciones de comprobación.

Después de la conclusión de la pantalla se efectuaron 7 perforaciones de comprobación con recuperación de núcleos, cuya localización se presenta en la figura 92. El resultado fue que el 98% de los 350 m perforados en roca tenían un valor de absorción de 0 UL y solamente 5 m una permeabilidad entre 3 y 11 UL.

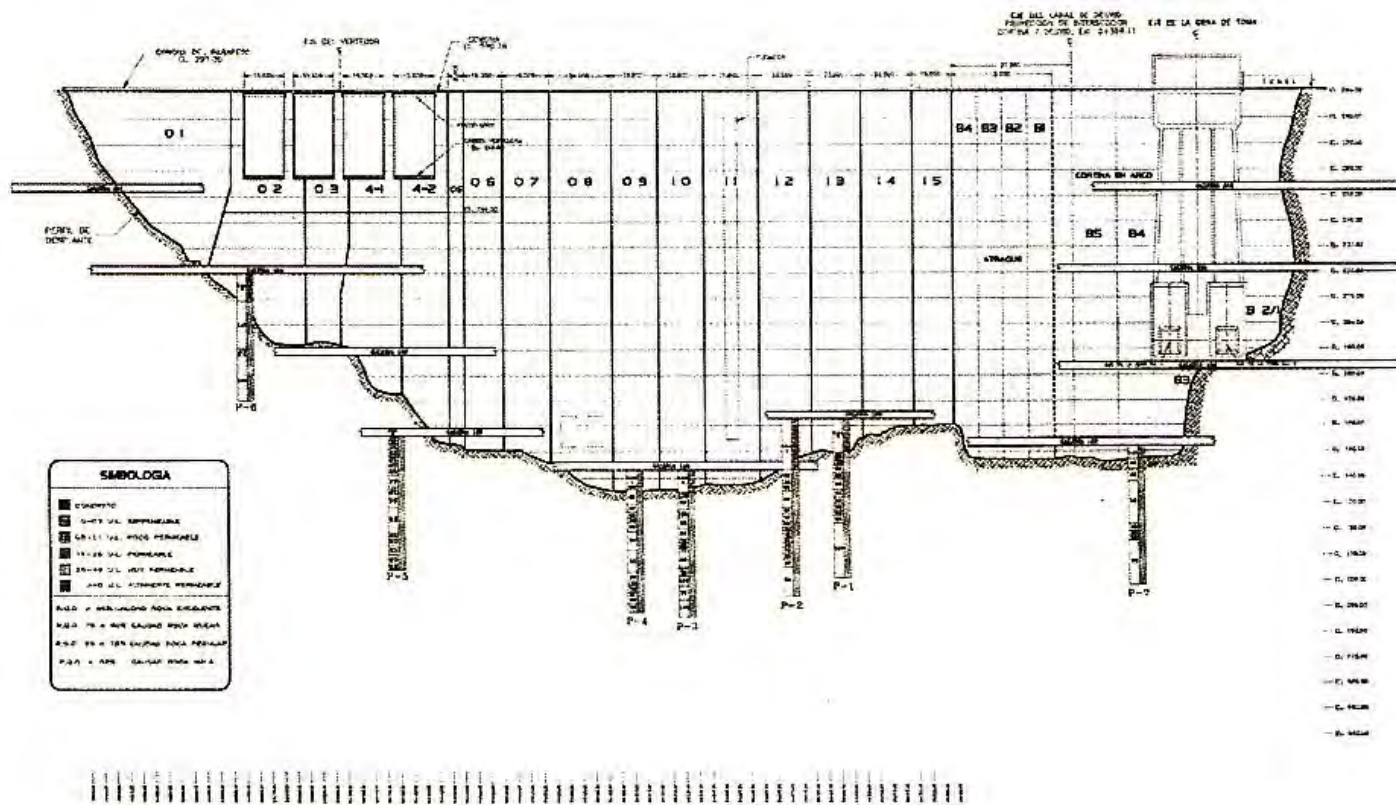


Figura 92. Presa “Huites”, perforaciones de comprobación (Hungsberg, 2001).

5.3.9 Evaluación estadística de la pantalla.

Durante los trabajos no se pudo efectuar una evaluación completa simultánea de los resultados de inyectado. Fue necesario construir la presa con gran premura, por lo tanto se requería también un avance rápido en los trabajos de inyectado. Por supuesto, esto no fue adecuado, pero no era posible modificarlo. Para las visitas periódicas del Cuerpo de Consultores, se preparaban resultados detallados y se explicaban. Se trataba de vigilar especialmente que se cumplieran las directrices para el método GIN y se definía si se requerían localmente otras etapas porque se había alcanzado o rebasado un consumo de 50 l/m. En las figuras 93, 94 y 95 se expone el arreglo de las perforaciones, es decir, mientras más cerrados los espaciamientos de los barrenos fueron efectuadas más etapas.

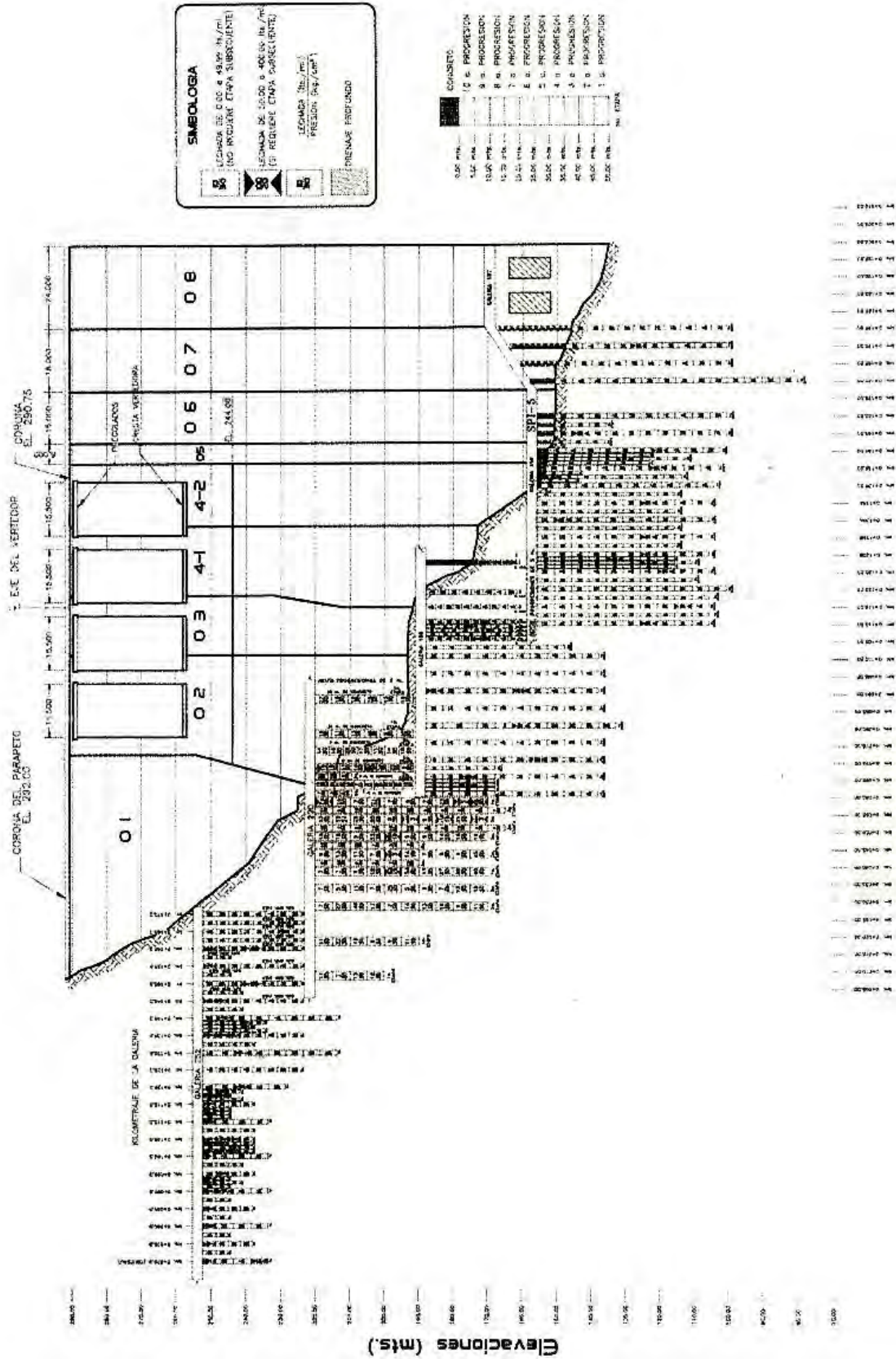


Figura 93. Presa "Huites", ladera izquierda (Hungsberg, 2001).

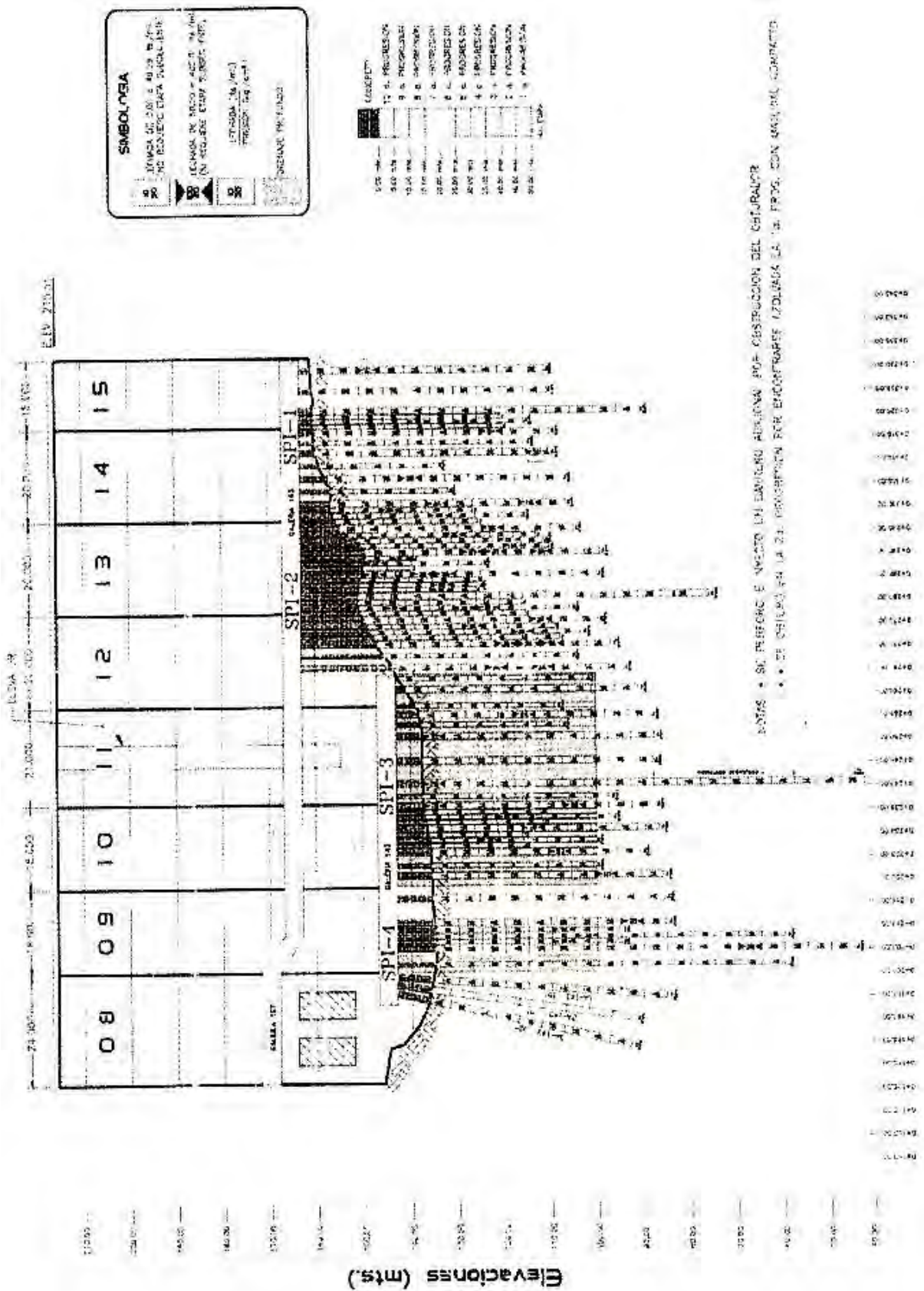


Figura 94. Presa "Huites", fondo del cauce (Hungsberg, 2001).

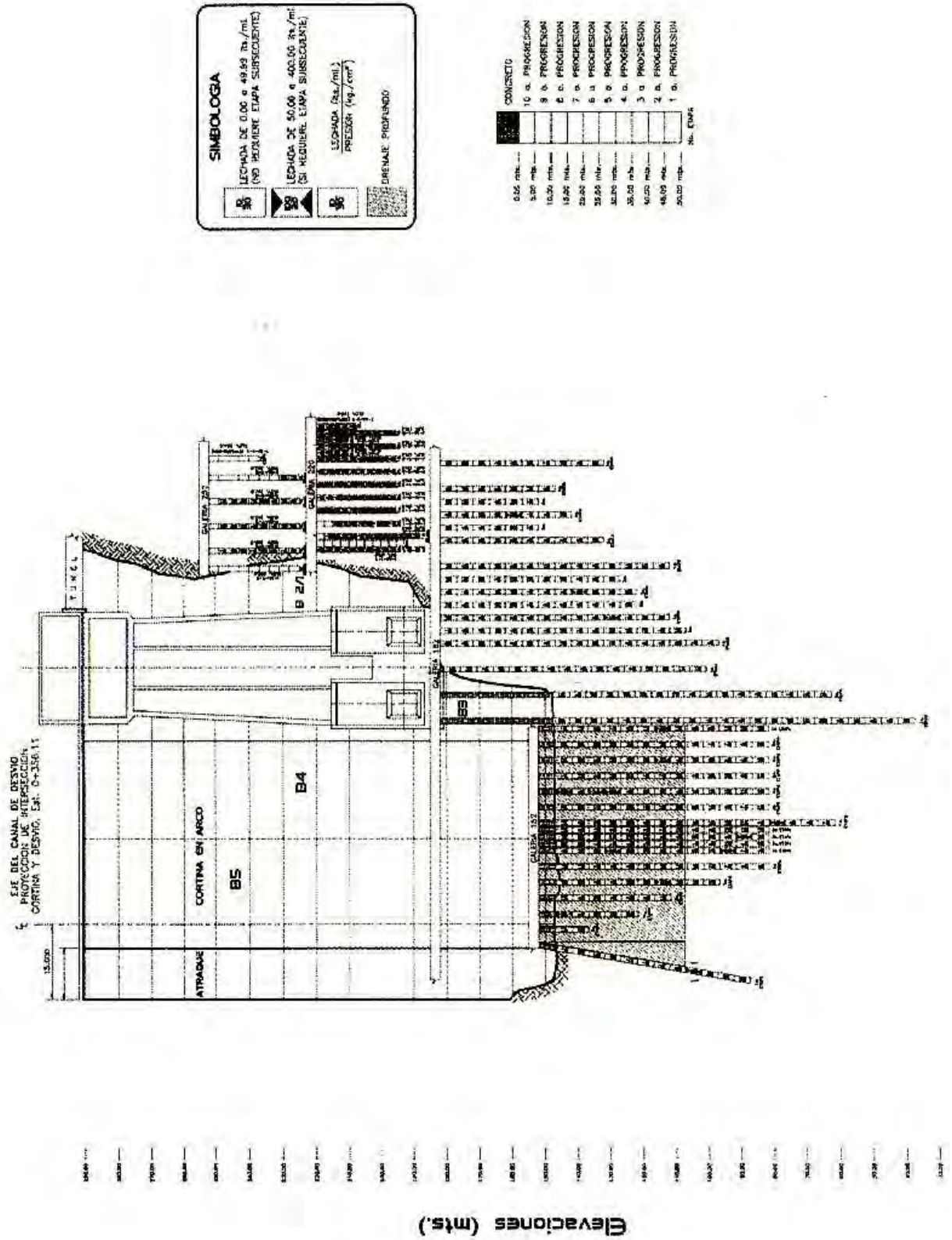


Figura 95. Presa "Huites", ladera derecha (Hungsberg, 2001).

En la figura 96 se presentan los consumos medios de cemento para la pantalla en sus diferentes secciones. Para la ladera izquierda, el cauce del río y la ladera derecha subdivididos según etapas. Se demuestra que todos los volúmenes inyectados son muy reducidos, menores de 30 l/m. Las cantidades mayores se inyectaron en la ladera izquierda y variaron; esto confirma las condiciones menos favorables de la roca en este lado de la boquilla. Debajo del cauce las cantidades inyectadas fueron menores, es decir, entre 17 y 21 l/m. En la ladera derecha, el consumo fue todavía menor y se encontró entre 12 y 14 l/m.

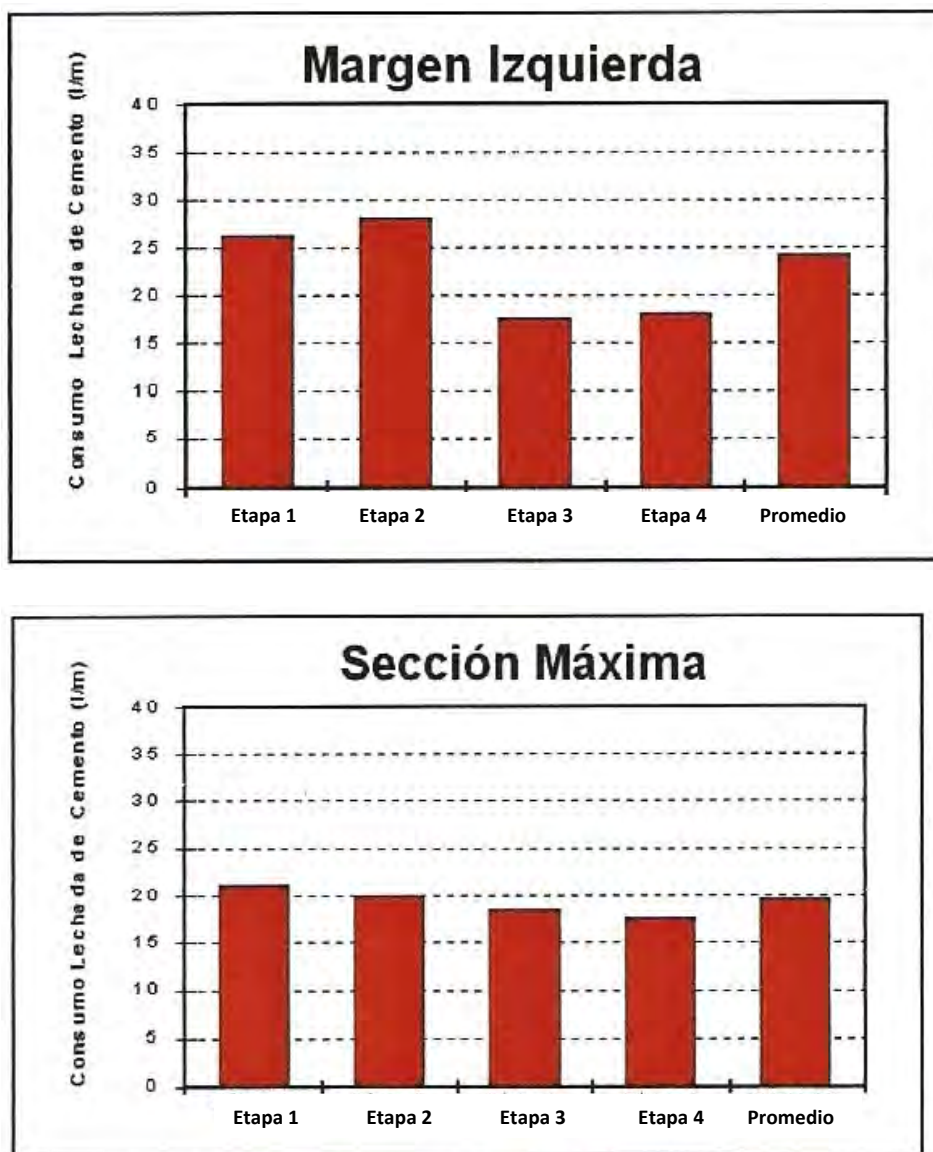


Figura 96. Presa "Huites", diagramas columnares de los consumos medios de cemento para cada etapa (Hungsberg, 2001).

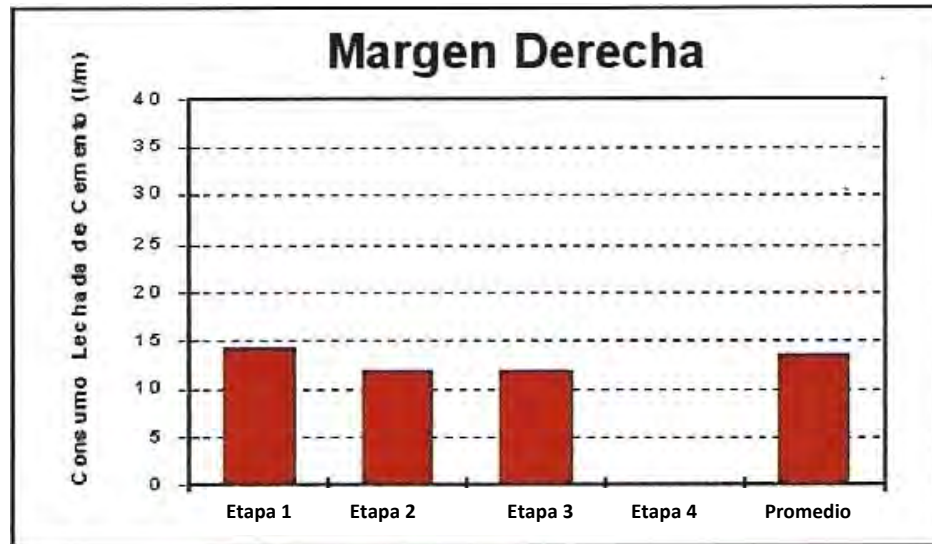


Figura 96 (continuación). Presa “Huites”, diagramas columnares de los consumos medios de cemento para cada etapa (Hungsberg, 2001).

Tomando en cuenta los volúmenes reducidos de inyectado, debe concluirse que prácticamente no se inyectó cemento, ni siquiera en las perforaciones de primera o segunda etapa se pudieron lograr absorciones medias mayores de 50 l/m, lo que normalmente se esperaría en una roca inyectable. En la ladera izquierda se observa un aumento de cemento en la segunda etapa, lo que permite concluir que hubo un fracturamiento de la roca; lo mismo se aplica para la cuarta etapa. De acuerdo a las etapas sucesivas se observa una reducción muy pequeña o ninguna en el consumo, es prácticamente insignificante.

Para lograr una visión mejor de la distribución estadística del consumo de cemento, se elaboraron histogramas de frecuencia. La figura 97 ilustra la ladera izquierda. En el eje “X” se registra en forma logarítmica el consumo de cemento en l/m y sobre el eje “Y” la frecuencia acumulativa de los volúmenes inyectados. Las líneas acumulativas se asemejan a las que logró el Prof. Ewert en sus evaluaciones estadísticas, con la diferencia de que las cantidades se registran en escala semi logarítmica. Cuando las cantidades absorbidas después de cada etapa se reducen, las líneas acumulativas se desplazan normalmente hacia la izquierda. Un desplazamiento de este tipo solo se observa en las dos primeras progresiones hasta los 10 m de profundidad; después las curvas casi siempre coinciden o se desplazan hacia la derecha. Lo último deja concluir que hubo un hidrofracturamiento de la roca. Consecuentemente puede decirse que con el inyectado no se logró ninguna impermeabilización y que se hubiera podido ahorrar el inyectado con excepción de la zona superior. Una impermeabilización de las dos progresiones superiores hubiera sido suficiente. Se hubiera podido eliminar la pantalla de inyecciones e impermeabilizar solamente la zona superior.

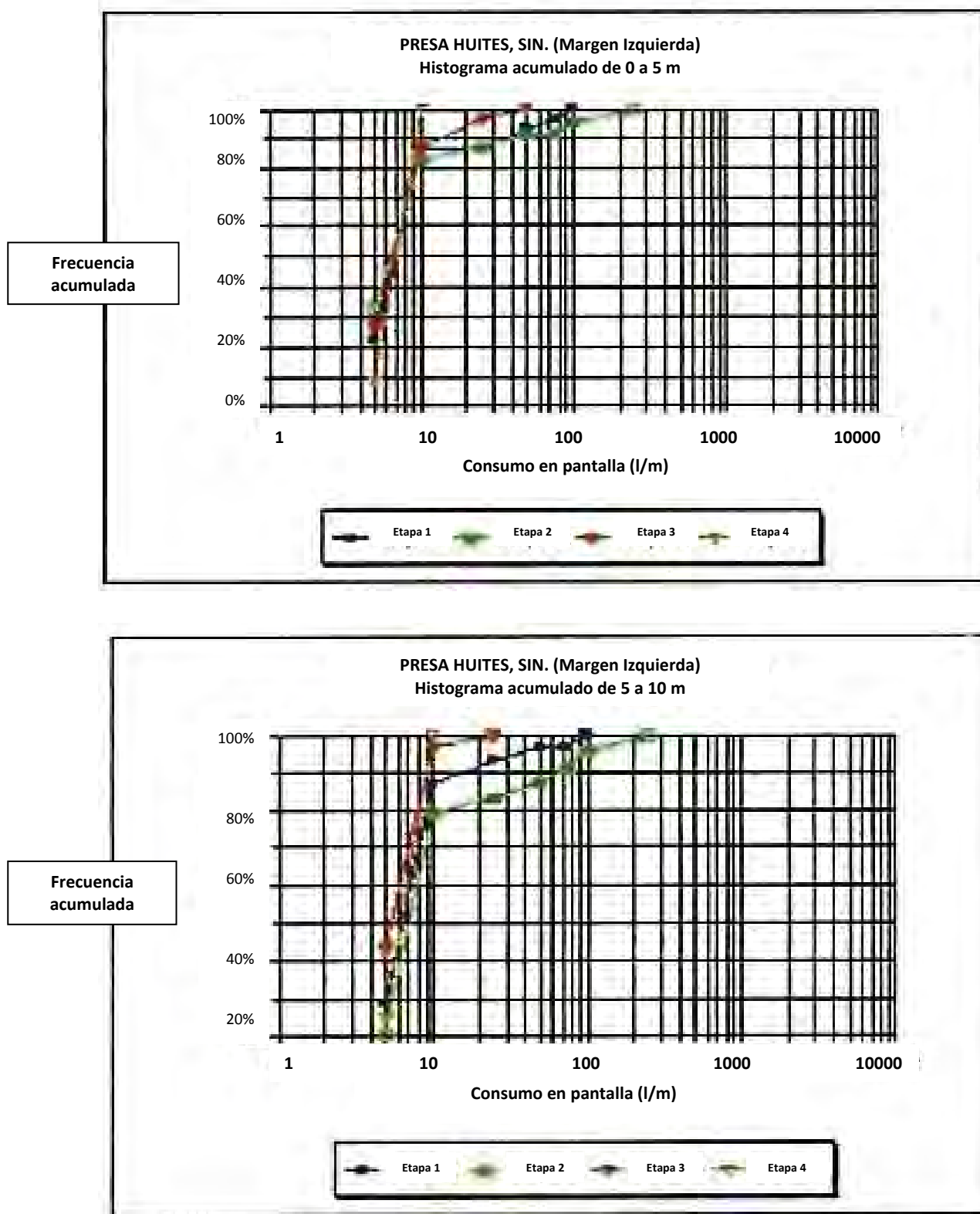


Figura 97. Presa "Huites", distribución de la frecuencia del consumo de cemento en la ladera izquierda (Hungsberg, 2001).

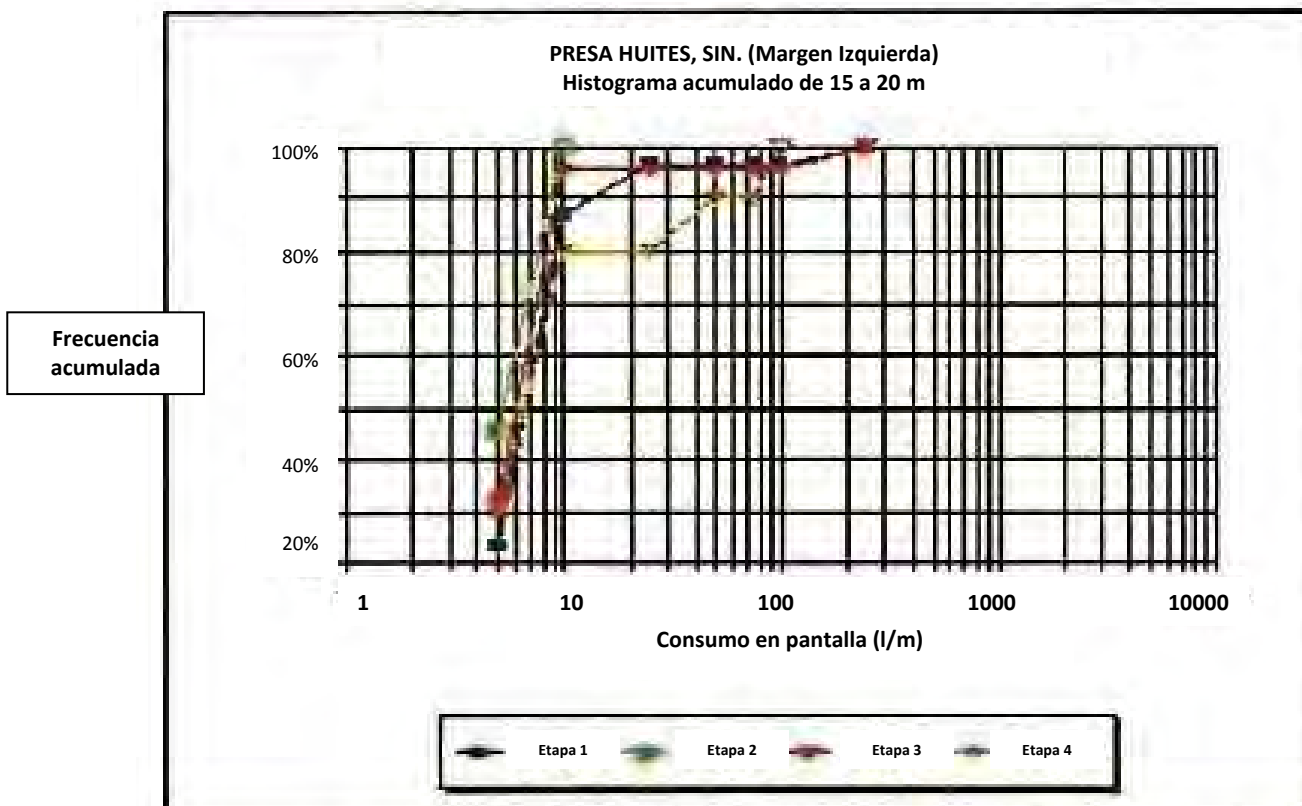
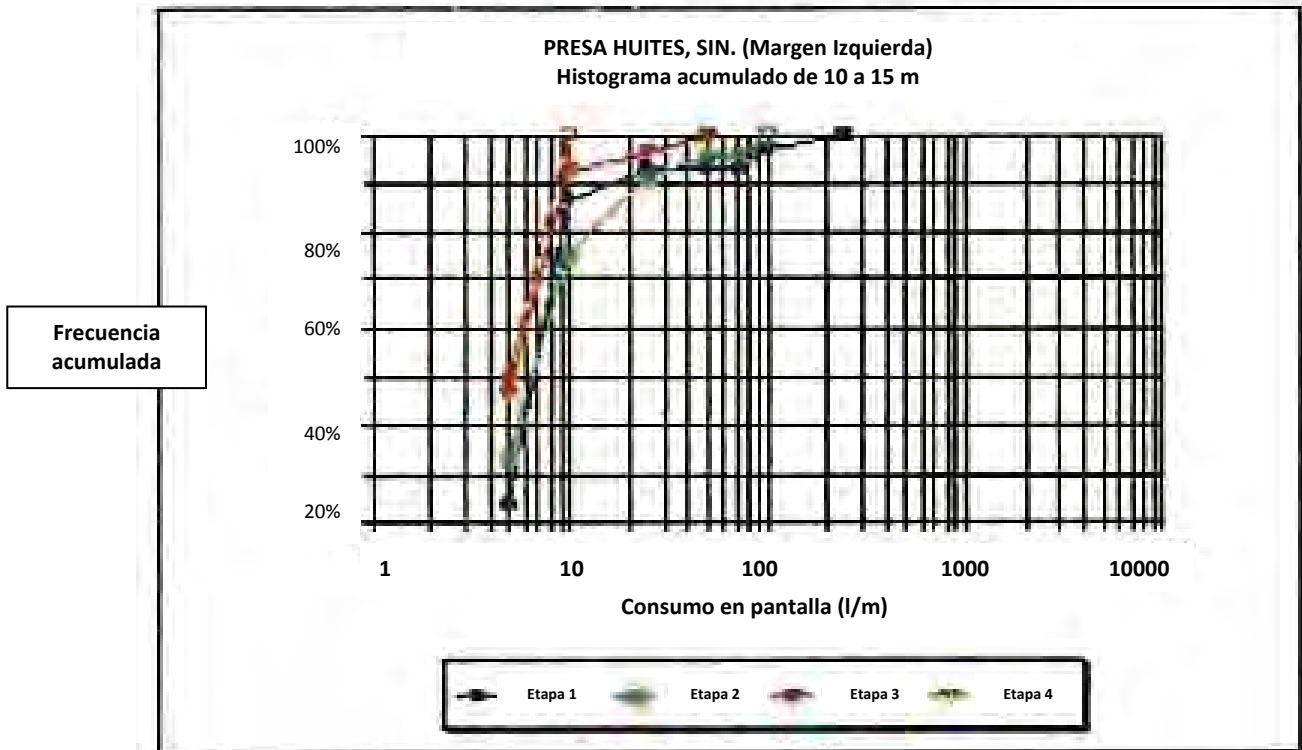


Figura 97 (continuación). Presa “Huites”, distribución de la frecuencia del consumo de cemento en la ladera izquierda (Hungsberg, 2001).

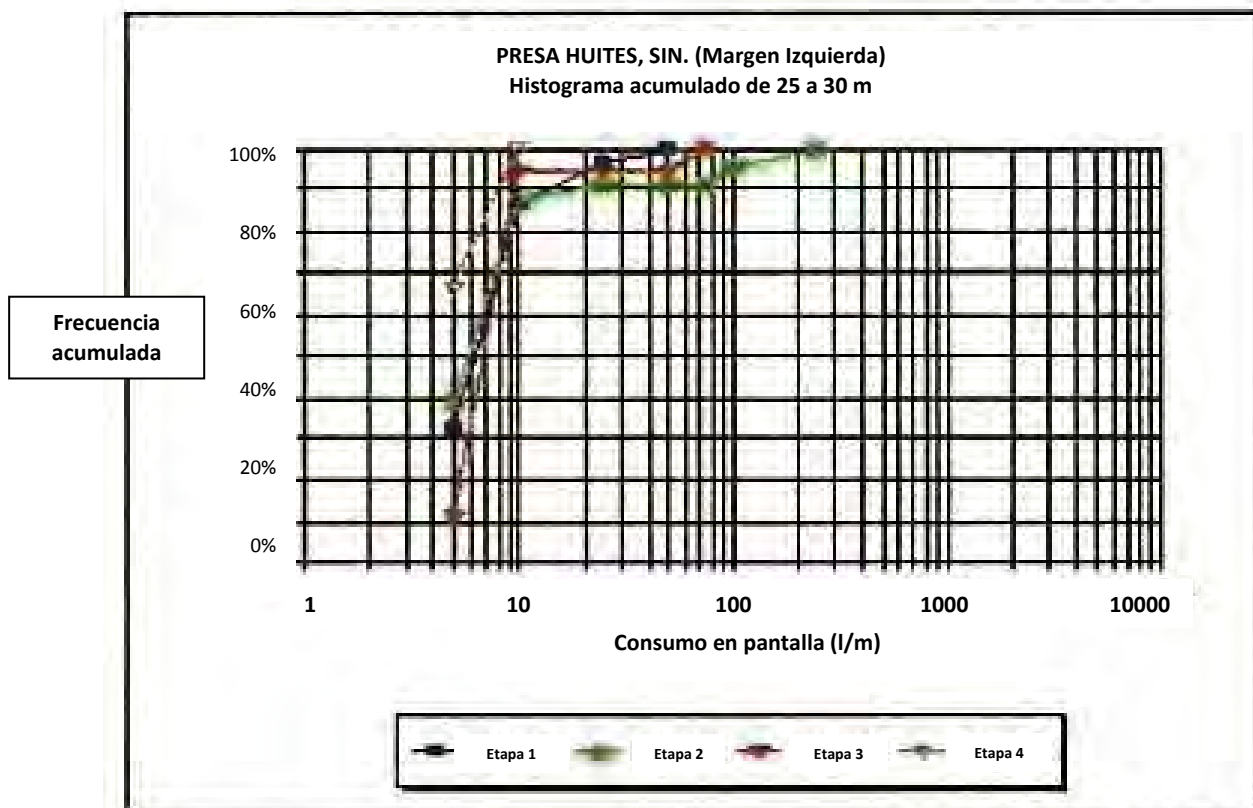
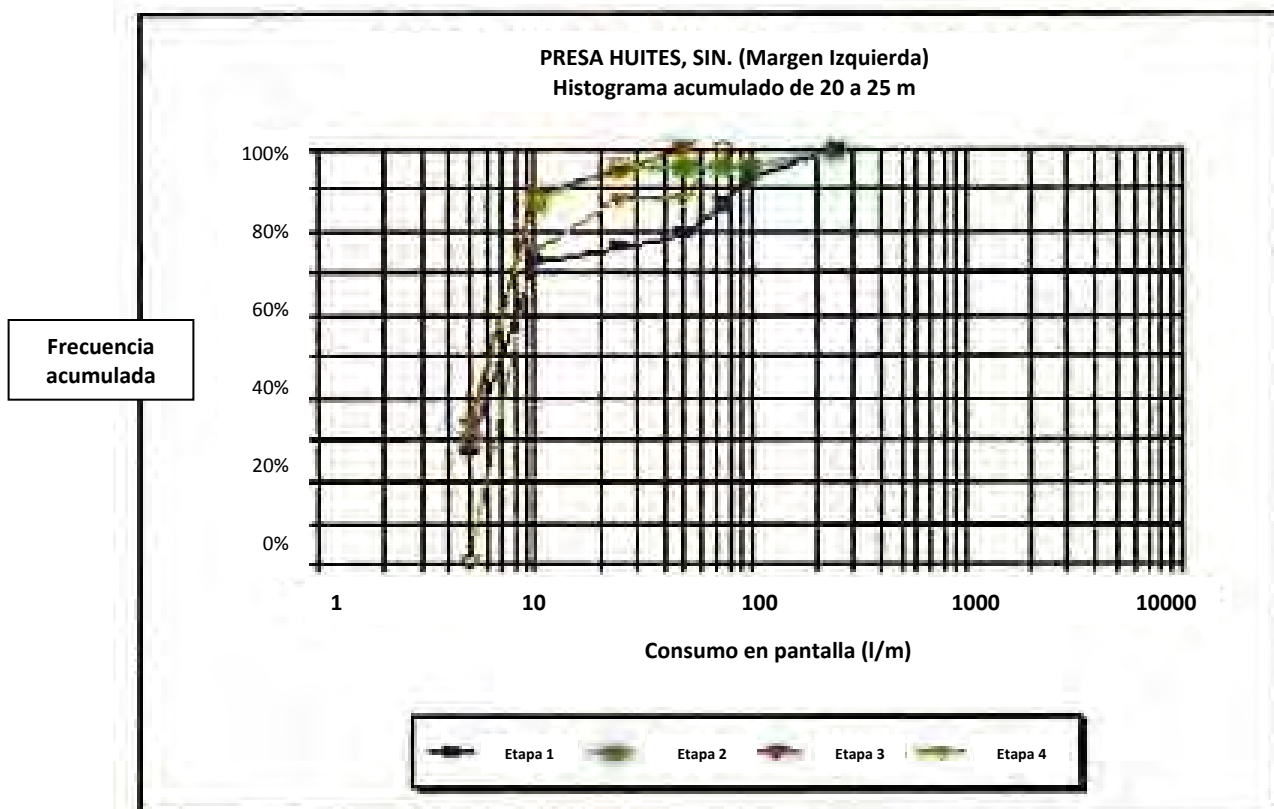


Figura 97 (continuación). Presa “Huites”, distribución de la frecuencia del consumo de cemento en la ladera izquierda (Hungsberg, 2001).

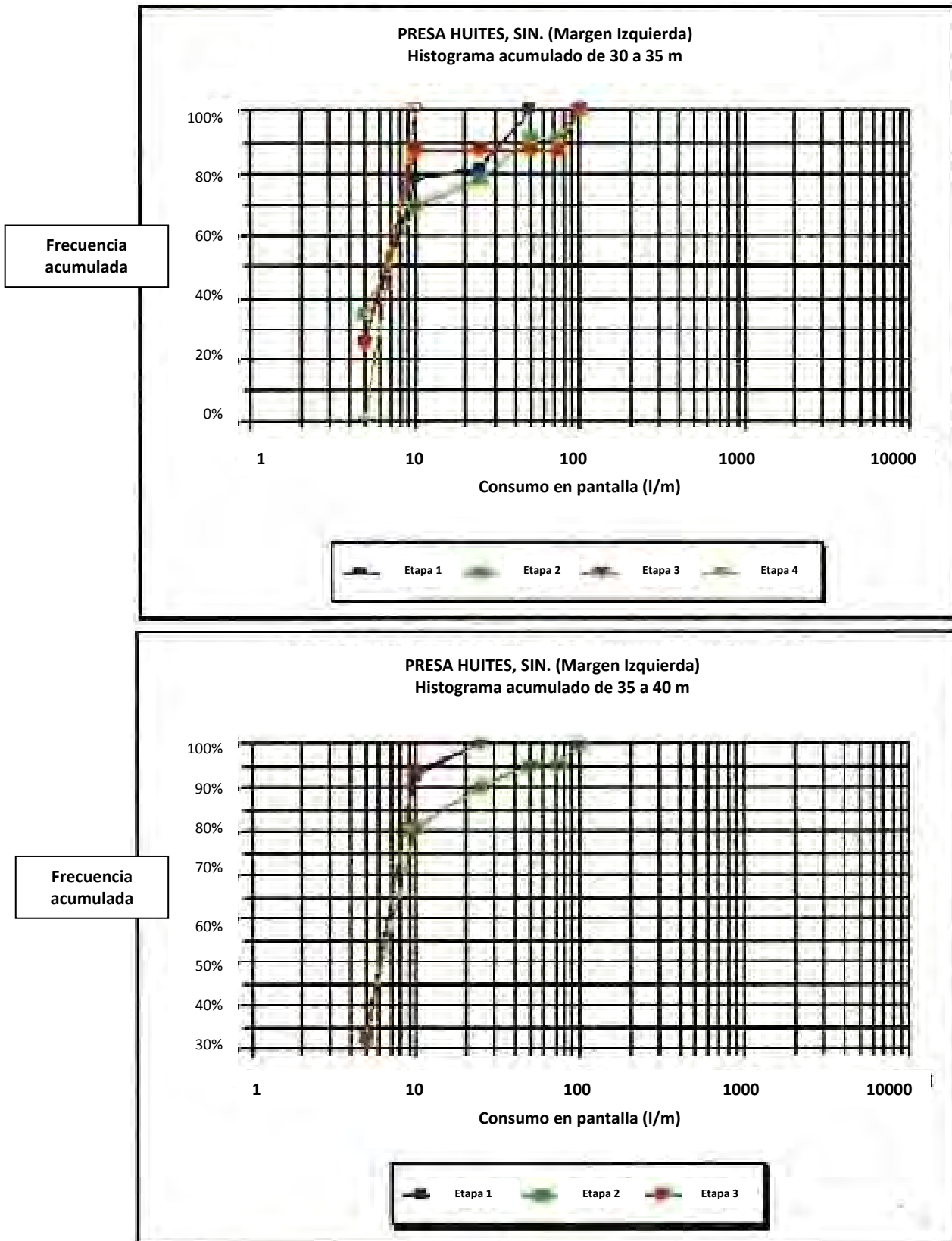


Figura 97 (continuación). Presa "Huites", distribución de la frecuencia del consumo de cemento en la ladera izquierda (Hungsberg, 2001).

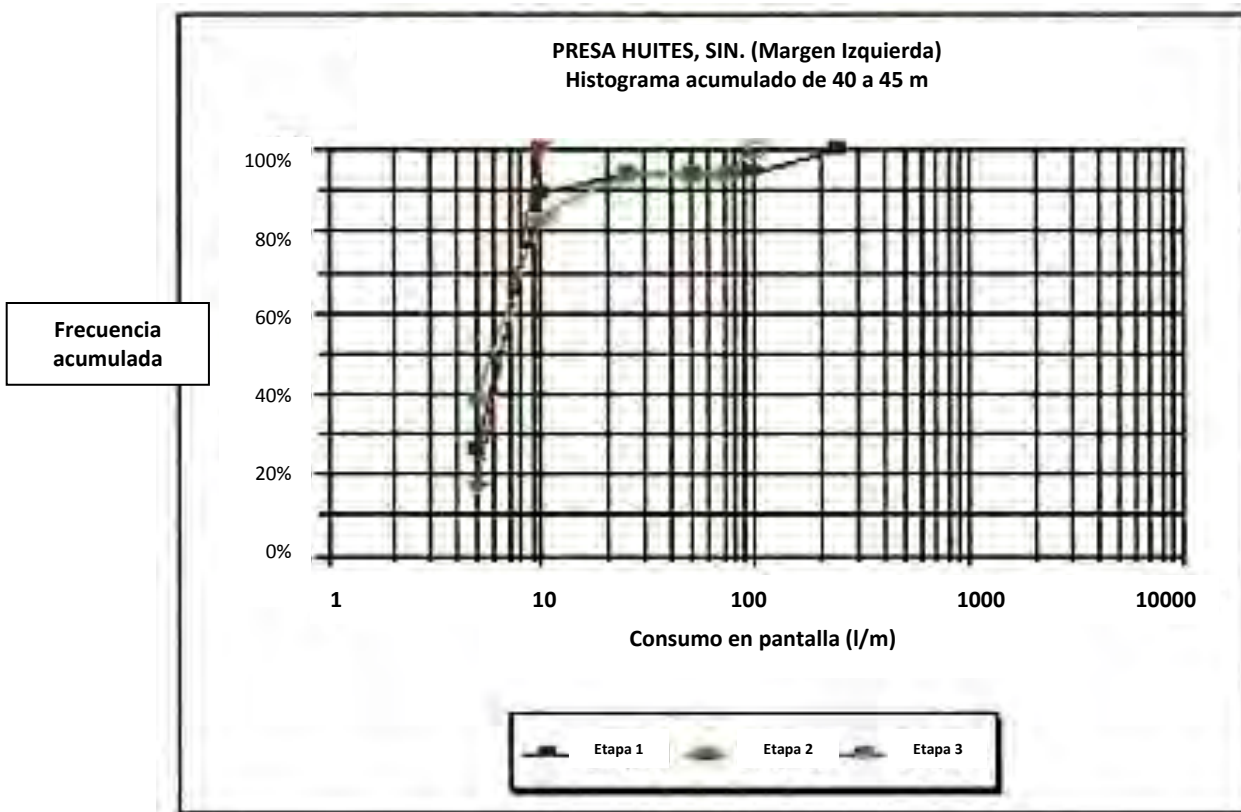


Figura 97 (continuación). Presa “Huites”, distribución de la frecuencia del consumo de cemento en la ladera izquierda (Hungsberg, 2001).

5.3.10 Piezometría.

En vista de que se trataba de una cortina bastante grande, que también contenía peculiaridades constructivas, era importante vigilarla durante la construcción y después de su llenado. Para esto se instaló un sistema de instrumentos de medición. Incluyó piezómetros, péndulos, puntos de referencia geodésicos para la observación de movimientos de los diferentes monolitos, celdas de medición de temperatura en el concreto y medidores de juntas.

Con relación a la pantalla de inyectado es interesante observar como es la distribución de presiones debajo de la cimentación. Para ello se muestran dos perfiles de subpresión, en la figura 98 está la distribución de la subpresión debajo de la cortina de gravedad. Ahí se instalaron dos piezómetros del lado de aguas arriba y tres del de aguas abajo. Los piezómetros de aguas arriba indicaron una reducción de la subpresión entre el 8 y el 9%. Esto se refiere a la reducción con respecto a la subpresión teórica que resultaría sin efecto de drenaje. En el lado de aguas abajo de la galería de drenaje la reducción de la subpresión fue del 90%. Confirma el efecto de las perforaciones de drenaje que están inclinadas hacia el lado de aguas abajo. De esta reducción de subpresiones debe suponerse que no existe una pantalla efectiva y que el decaimiento de presión solamente se debe al drenaje.

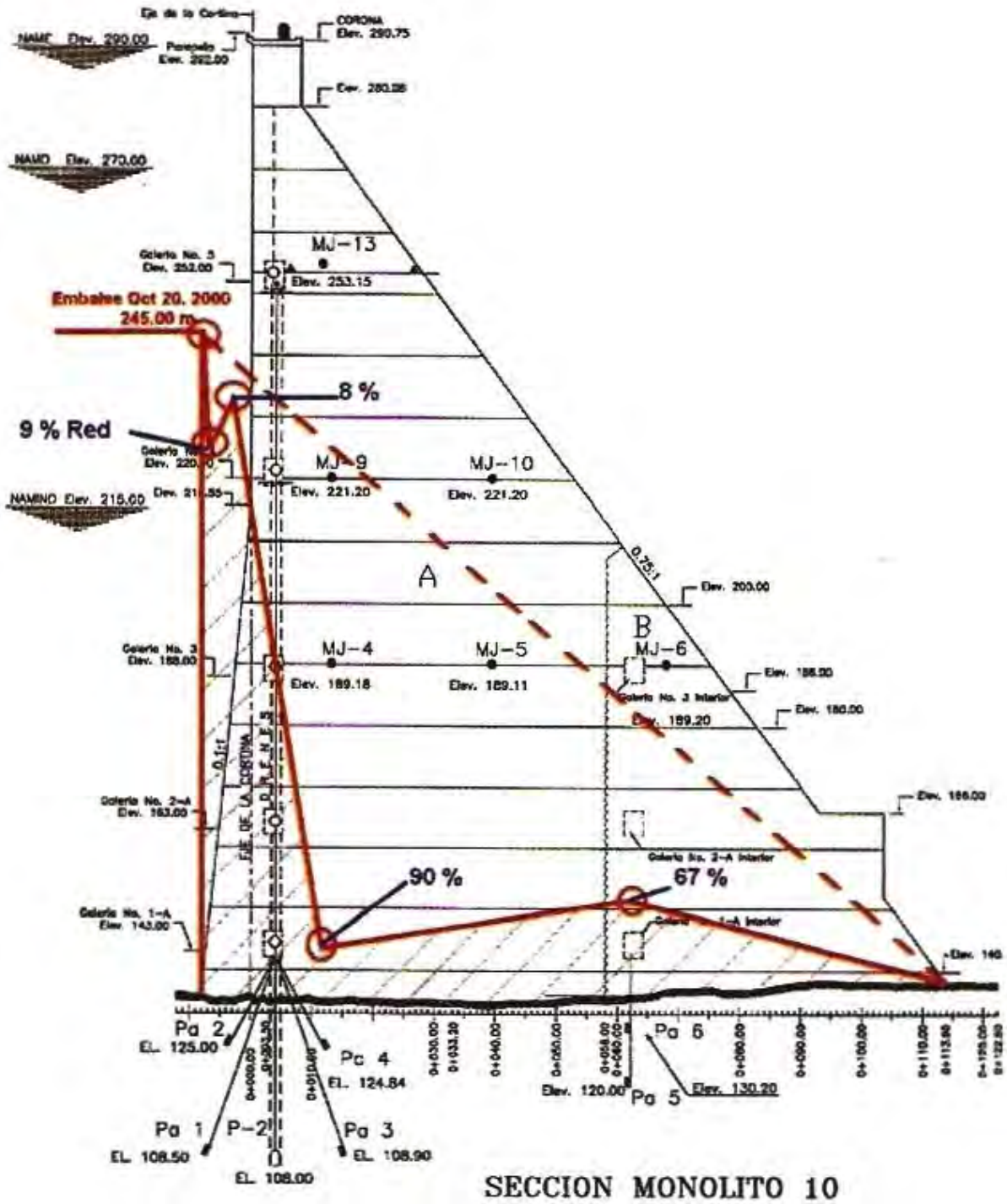


Figura 98. Presa "Huites", distribución de la subpresión debajo de la cortina de gravedad (Hungsberg, 2001).

En la figura 99 se ilustra la distribución de la subpresión debajo de la cortina en arco. Los piezómetros del lado de aguas arriba indican una reducción teórica de la presión de aproximadamente el 30% del lado de aguas abajo es de alrededor del 75%. Esta distribución hace dudar; por un lado del efecto de la pantalla de inyecciones y por otro lado, que sería adecuado efectuar perforaciones de drenaje adicionales para mejorar la reducción de la subpresión.

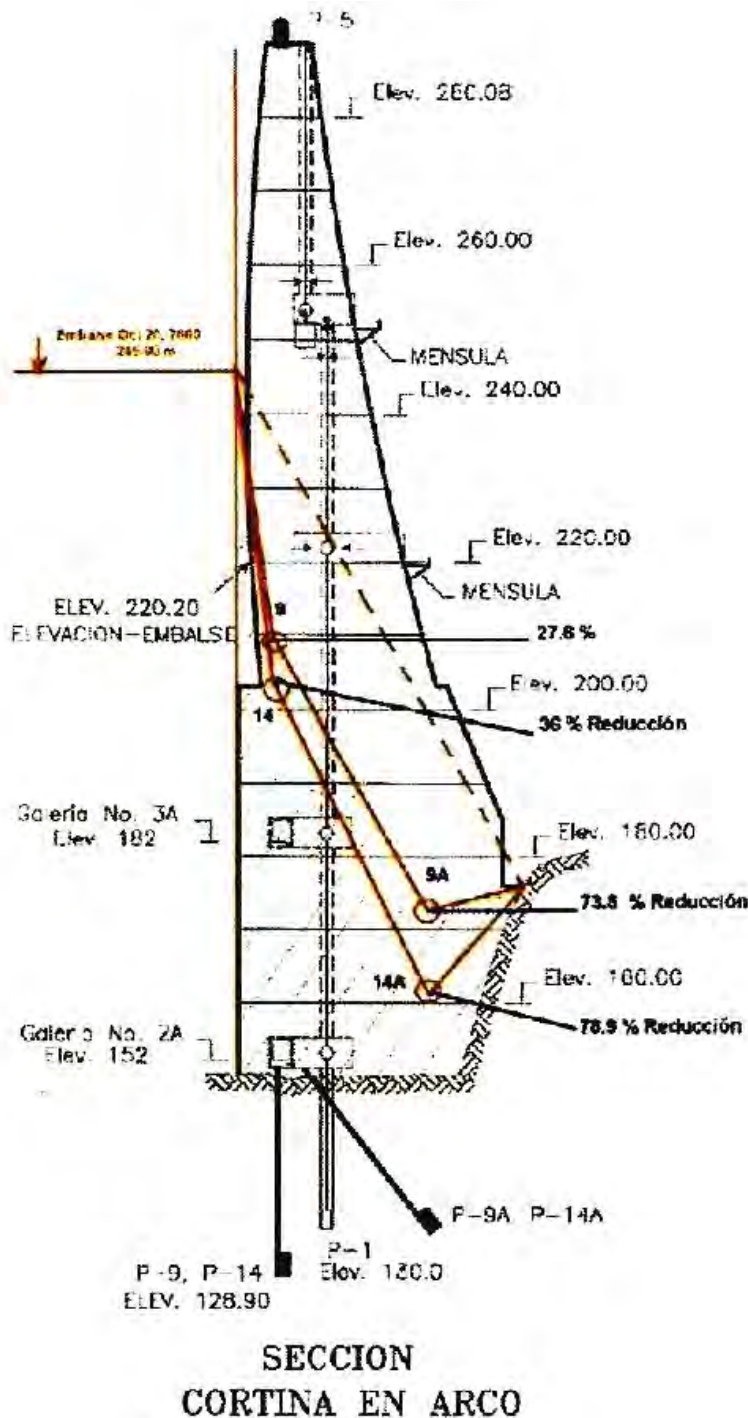


Figura 99. Presa "Huites", distribución de la subpresión debajo de la cortina en arco (Hungsberg, 2001).

En la figura 100 se obtiene una correlación entre las mediciones de presión del piezómetro 9-A que se encuentra debajo de la cortina en arco y el nivel del embalse. Es interesante observar, como se agrupan los puntos alrededor de una curva, que se parece mucho a una prueba de absorción de agua en una roca resistente, que se expande elásticamente. Además, se puede notar que el primer periodo de registro, que se inició el 30 de mayo de 1996 está desplazado lateralmente hacia la izquierda, lo que puede ser o bien un error sistemático de observación o bien, que se presentó después del primer periodo una impermeabilización de las juntas en la roca.

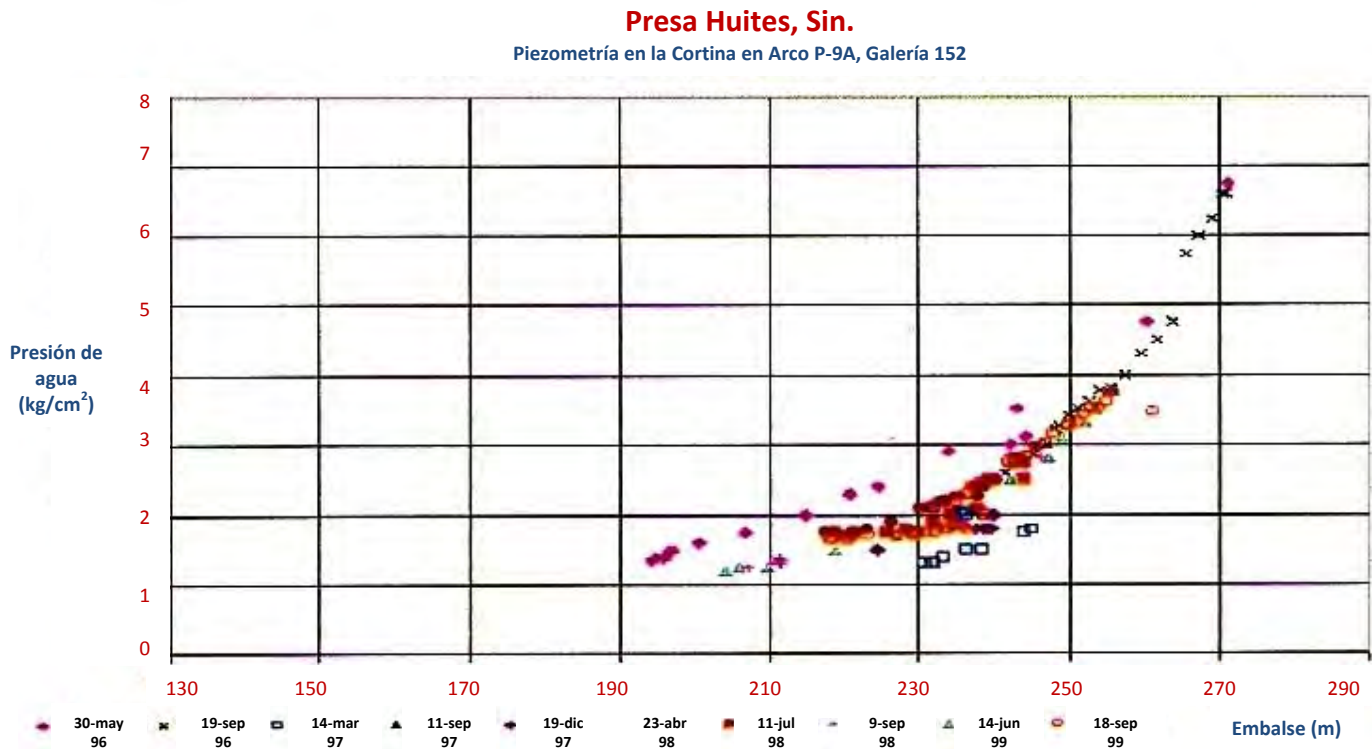


Figura 100. Presa “Huites”, correlación del piezómetro 9-A con el nivel del embalse debajo de la cortina en arco (Hungsberg, 2001).

5.3.11 Filtraciones.

Durante el primer llenado parcial, de septiembre a noviembre de 1995, el embalse alcanzó un nivel de 252 m. Las filtraciones, especialmente en las galerías de control de la cortina de gravedad, llegaron a ser del orden de 200 l/s. Debido principalmente a un concreto insuficientemente compactado y por tanto poroso, así como a las juntas entre los monolitos. Por lo anterior se efectuó un programa especial de inyectado. Posteriormente fue necesario renovar el sistema de drenaje. No fue posible diferenciar las filtraciones a través de la cimentación de las que ocurrieron en las galerías.

Durante el segundo llenado, en octubre de 1996, se alcanzó el nivel 260 m. Las filtraciones en la cortina de gravedad fueron de 70 l/s. Solamente pudo tenerse una idea indirecta de la magnitud de las filtraciones a través de la cimentación y de la variación de las mediciones en la galería más profunda a la elevación 143 (ver figura 101), que indicaba una reducción de los volúmenes drenados para iguales niveles de embalse alcanzados en años consecutivos.



Presas: Luis Donald Colosio M., "Huites"

**Cortina de Gravedad
 Filtraciones en la Galería 143**

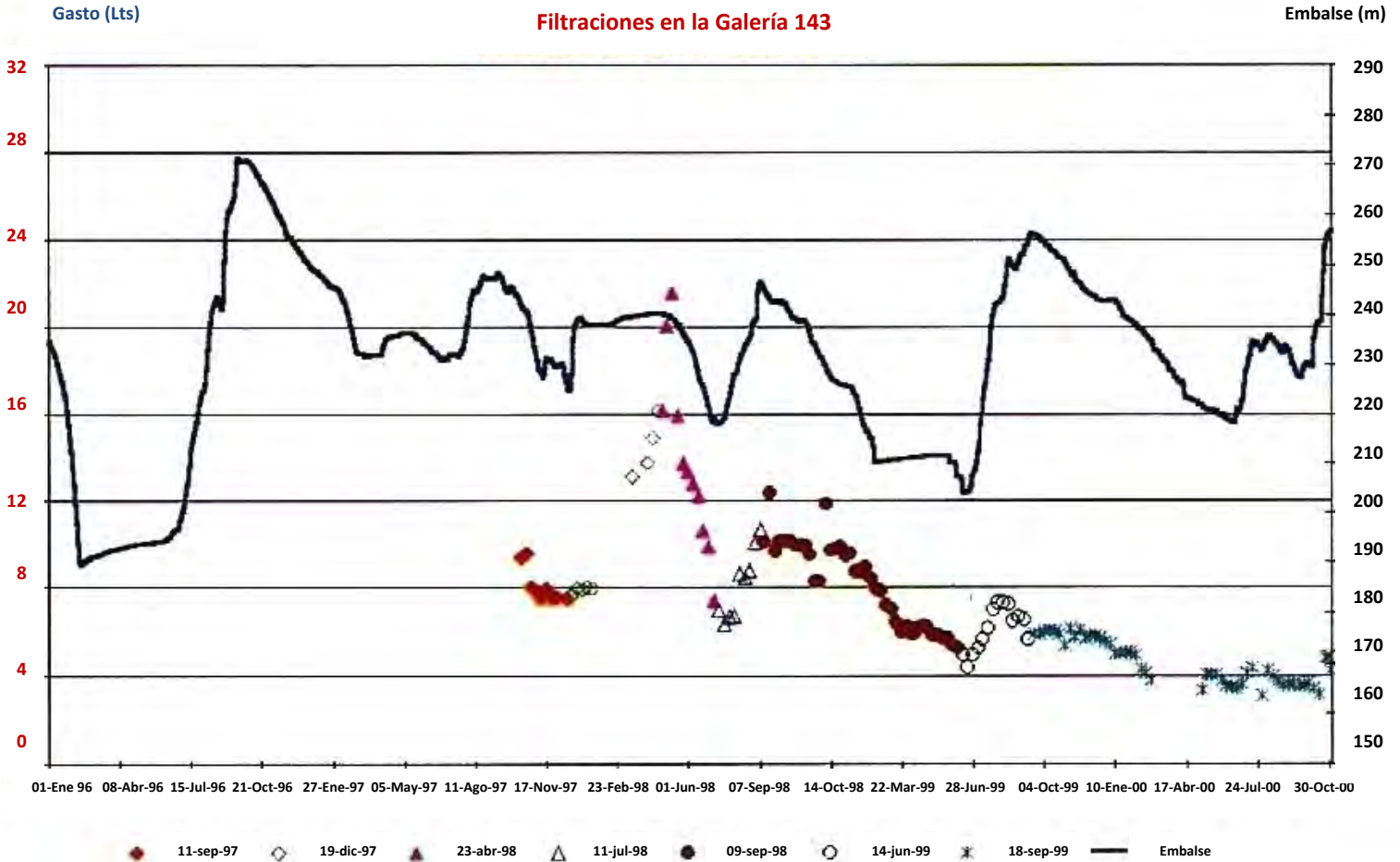


Figura 101. Presa "Huites", volúmenes de filtraciones en la galería 143 medidas debajo de la cortina gravedad (Hungsberg, 2001).

5.3.12 Conclusiones.

La roca sobre la que se desplantó la cortina de este proyecto es en general impermeable, con zonas aisladas, asociadas a discontinuidades particulares, de relativas altas permeabilidades.

Superficialmente, hasta el desplante definitivo de la estructura (10 m de profundidad), la roca estaba descomprimida, lo que obligó a realizar un tratamiento de consolidación en toda el área.

La pantalla de inyecciones manifestó tomas de lechada relativamente uniformes en las etapas, lo que indicó homogeneidad relativa de la masa de roca. Las tomas en promedio fueron reducidas, entre 12 y 27 l/m (aproximadamente, 9 y 20 kg de cemento por metro, respectivamente), un poco mayor en la margen izquierda que en el centro del cauce y en la derecha.

La aplicación del método GIN y su control pudo llevarse a cabo no obstante lo reducido de las tomas de lechada por la masa de roca, lográndose la impermeabilidad adecuada en la cimentación, como indican las filtraciones medidas en la galería 143, la más baja de la estructura.





Capítulo

6

Conclusiones

6. Conclusiones.

Con base en los temas presentados en este trabajo, se llega a las conclusiones siguientes:

1. El proceso de inyección de los macizos rocosos es una actividad complicada, difícil de encuadrar en un modelo que permita la predicción de resultados de manera precisa, por lo que ha sido más bien la práctica empírica la que ha permitido el desarrollo y evolución de los procedimientos que se utilizan. Aún así, se han desarrollado modelos para entender o evaluar, al menos conceptualmente, los aspectos más relevantes del proceso, los que junto con la experiencia acumulada han permitido establecer reglas o guías para la realización de los trabajos.
2. El intento de explicar los fenómenos ocurridos en un macizo de roca, al provocarle cambios en su estado de esfuerzos, por la excavación de un túnel que funcionó como dren causándole deformaciones importantes en el apoyo de la cortina de una presa, condujo a concebir un modelo denominado FES, por referirse a un medio fisurado, elástico y saturado. Con apoyo en este modelo, en el cual se consideraron las fisuras en la masa de roca como elementos con características particulares en cuanto a su extensión, abertura, forma, rugosidad de paredes y tipo de relleno, se desarrolló un modelo de inyección de fisuras utilizando lechadas de agua-cemento, y estableciendo, a partir de él, procedimientos para inyectar macizos de roca.
3. Dado que el objetivo de la inyección de los macizos rocosos es la disminución de su permeabilidad, principalmente mediante la introducción de mezclas agua-cemento, en sus fisuras, los barrenos por los que se introducirán las mezclas y que constituirán la pantalla de inyecciones, deben de realizarse cruzando convenientemente el mayor número de fisuras que se inyectarán. Para ello la exploración e inspección de los macizos rocosos juega un papel preponderante en el diseño de un tratamiento por medio de inyecciones.
4. Como parte de la exploración de la masa de roca en la que se realizará un tratamiento con inyecciones, es imprescindible realizar pruebas de absorción de agua para conocer la permeabilidad original de aquella. La presión máxima a la que conviene hacer esas pruebas es de 1.2 veces la presión de agua a la que estará sujeta la masa de roca en el punto donde se realice la prueba. Durante la ejecución de una prueba podría presentarse



una presión crítica que manifieste hidrofracturamiento (creación de fracturas nuevas) o distensión (abertura de fracturas o discontinuidades preexistentes), lo cual debe considerarse al diseñar el tratamiento de inyección. La presión máxima de la prueba podría o no exceder los 10 kg/cm^2 , con lo que podría o no asignarse un valor en unidades Lugeon a la permeabilidad de la masa de roca, el cual sólo serviría para fines de comparación con otras masas y consigo misma si se realizaran pruebas semejantes (de absorción o Lugeon) después del tratamiento.

5. La lechada agua-cemento que se utilice para rellenar las fisuras de la masa de roca, debe penetrar lo más posible en ellas y permanecer después de la inyección. Para ello debe de tener baja resistencia o cohesión y alta fluidez además de ser estable en su composición. Para definir la mezcla más apropiada para un caso determinado, debe realizarse el diseño de ésta en laboratorio y controlar los parámetros que la caracterizan. A fin de lograr propiedades más adecuadas generalmente es necesario adicionar a la mezcla agua-cemento un aditivo fluidizante.
6. El método GIN (Grout Intensity Number - Número de Intensidad de Inyectado), además de considerar el uso de una sola mezcla para todo el proceso, establece el control de la inyección a partir del parámetro dado por el producto de la presión de inyección y el volumen de mezcla inyectada por metro lineal de barreno (PV). Este valor establece a priori a partir de pruebas de inyectabilidad realizadas en el macizo en que se realizará el tratamiento. Esas pruebas permiten también fijar un valor máximo de volumen a inyectar y de la presión de inyección. Ésta última se fija también considerando las presiones máximas que pueden aplicarse sin dañar al terreno o a estructuras anexas al sitio de inyección. El producto PV (número GIN) que se establece, es una constante que puede modificarse en las diferentes zonas en la que se realice el tratamiento. Los tres parámetros de control del proceso, presión máxima, volumen máximo y producto PV se plasman en una gráfica presión-volumen/metro de barreno en la cual grafican la evolución de la presión y volumen/metro durante la inyección, la cual se suspende cuando la gráfica del mismo alcanza los valores de presión máxima, volumen máximo o intercepta a la hipérbola que representa al producto $PV = \text{constante}$. La gráfica elaborada permite identificar el tipo de fisuras que se inyectan; si son abiertas, el volumen será alto y la presión baja, y si son cerradas, lo contrario. Al proceder por etapas en el tratamiento de un macizo de roca, las primeras etapas servirán para rellenar fisuras abiertas; conforme se aplican etapas sucesivas, se rellenan fisuras más finas.
7. Una vez establecidos los parámetros que permiten llevar a cabo el tratamiento de un macizo rocoso, durante la ejecución del mismo, y con base en los resultados que se vayan obteniendo, se deberán realizar, en caso necesario, ajustes a los mismos para lograr un tratamiento lo más uniforme posible. De esta forma se define un GIN diferente para zonas con características geológicas particulares.
8. El método GIN no es aplicable a cualquier macizo de roca. Fue desarrollado para aplicarse a medios fisurados, elásticos y saturados, en los que el fisuramiento es relativamente homogéneo, el estado de esfuerzos propicia el comportamiento elástico de la masa al aplicarle presiones, y el nivel de aguas freáticas está por arriba de la zona en tratamiento. No es aplicable a terrenos con oquedades o cavernas, con elevada alteración o intemperización, y situados a poca profundidad respecto al terreno natural.



9. La aplicación del método en la Presa “La Amistad” no manifestó un cierre progresivo de los espacios vacíos en la masa de roca, dada la naturaleza cárstica del terreno y la heterogeneidad en la distribución de las oquedades en la misma masa. Los consumos de lechada en promedio fueron bajos, aunque hubo puntos o zonas en que hubo altas cantidades de mezcla por la misma naturaleza del terreno. El tratamiento permitió mejorar localmente las condiciones de impermeabilidad, reduciendo el flujo desde el embalse hacia los manantiales aguas abajo de la cortina a través del tramo de pantalla tratado.

10. En la Presa “Huites” la aplicación del método manifestó la homogeneidad y relativa baja permeabilidad del terreno de cimentación, al tenerse consumos de lechada relativamente bajos y uniformes en las etapas de tratamiento, y permitió sellar las filtraciones aisladas a través de fracturas en la masa de roca y mejorar las condiciones de la porción superficial del terreno de cimentación, el cual estaba descomprimido y permeable.





Referencias.

- Aggelis D.G., T. Shiotani y Kasai K. (2007). **“Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo”**, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Japan.
- Al Kuisi Mustafa, El Naqa Ali y Shaqour Fathi. (2005). **“Improvement of Dam Foundation Using Grouting Intensity Number (GIN) Technique at Tannur Dam Site, South Jordan”**, *EJGE University of Jordan, Department of Geology*, Jordan.
- American Society of Civil Engineers. (2003). **“Grouting and Ground Treatment: Proceedings of the Third International Conference”**, *Proceedings of the Geo-Institute and Deep Foundations Institute Speciality Conference on Grouting*, New Orleans, Louisiana, Volume 1 and 2.
- Bergado Dennes T, Areepitas Chanin y Prinze Friedrich. (1984). **“Foundation problems on karstic limestone formations in Western Thailand – A case of Khao Laem Dam”**, *Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholus*, Orlando, Florida: 397-401.
- Bernal M. Carlos. (1978). **“Instructivo para diseño de pantalla de inyección y drenaje”**, *Comisión Federal de Electricidad*, México.
- Brantberger M., Stille H. y Eriksson M. (2001). **“Controlling Grout Spreading in Tunnel Grouting - Analyses and Developments of the GIN-method”**, *Tunnelling and Underground Space Technology Grouting Research*, Stockholm, Sweden.
- Castilla Camacho J. E. (2009). **“Comentarios a la interpretación de la prueba Lugeon de permeabilidad”**.
- Cambefort Henry. (1968). *Inyección de suelos*, Ediciones OMEGA S.A. Barcelona.
- Comisión Federal de Electricidad. (2006). **“Tratamientos de la roca”**, *Especificaciones de Construcción de Obra Civil del P.H. La Yesca, Identificación LIYES1805DICTEC01*, México.
- Dalmam Thomas. (2004). **“Choice of Grouting Method for Jointed Hard Rock based on Sealing Time Predictions”**, *Division of Soil and Rock Mechanics of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology*. Stockholm, Sweden.
- Deere Don U. (1980). **“Some Recent Experiences in Curtain Grouting for High Dams”**, *American Society of Civil Engineers and Assoc. of Eng. Geol.*, Denver Sections.
- Deere Don U. (1982). **“Field Control of Cement – Bentonite Grouting for Dams”**, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*.
- Deere Don U. y Lombardi Giovanni. (1985). **“Grout Slurries – Thick or Thin?”**, *Issues in Dam Grouting. Proceedings of the session sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE Convention*, Denver, Colorado: 156 – 164.



- Escalante Arias Horacio. (1973). **“Composición de las mezclas estables de inyección”**, *Comisión Federal de Electricidad*, México, D.F.
- Escalante Arias Horacio. (1973) **“Procedimientos generales sobre diferentes técnicas de inyectado en roca y aluviones”**, *Comisión Federal de Electricidad*, México, D.F.
- Ewert Friedrich Karl. (1992). **“The individual groutability of rocks”**, *Water Power & Dam Construction*. United Kingdom: 23-30.
- Ewert Friedrich Karl. (1994), **“Rock Permeability and Groutability related to Dams and Reservoirs (Lecture Notes)”**, *University of Paderborn*. Germany.
- Ewert Friedrich Karl. (1995). **“Presa de Aguamilpa, Visita de sus oficinas, excursión al Proyecto de Zimapán y discusiones sobre inyecciones. 8-5-1995/SRHC´maan/08-V-95”**, *Comisión Federal de Electricidad*, México, D.F.
- Finnish Grouting Instructions. (2003). **“Report of Hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden, and Norway”**, *INTE*, Austria.
- González Sánchez Francisco, Puente Solís Rafael, González Partida Eduardo y Camprubí Antoni. (2007). **“Estratigrafía del Noreste de México y su relación con los yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb”**, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LIX, Núm. 1, México: 43-62.
- González de Vallejo Luis I., Ferrer Mercedes, Ortuño Luis y Oteo Carlos. (2002). *Ingeniería Geológica*, Pearson Educación, Madrid.
- Herrera Castañeda Sergio Raúl. (1990). **“Especificaciones y procedimiento de ejecución de las pruebas de inyección utilizando la nueva tecnología propuesta por el grupo de consultores”**, *Informe 90-24-GR. P.H. Aguamilpa, Nay. Comisión Federal de Electricidad. Subdirección de Construcción. Gerencia de Ingeniería Experimental y Control*, México.
- Herrera Castañeda Sergio Raúl. (2001). **“Tratamiento de la Cimentación”**, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Geotecnia en Ingeniería de Presas, Coordinación de Tecnología Hidráulica*, México.
- Hungsberg Ulrich. (2001). **“Desarrollo del inyectado en roca para presas en México (Entwicklung der Felsverpressung für Talsperren in Mexiko)”**, *Subdirección General Técnica. Gerencia del Consultivo Técnico*, Wildegg, Suiza.
- Ingenieros Civiles Asociados. (2007). **“Tratamientos de la roca”**, *Especificaciones de construcción de obra civil del P.H. El Cajón, Identificación LICAJ2900 RG1EEC35*, México.
- Landry E, Lees D y Nadts A. (2000). **“New developments in rock and soil grouting: design and evaluation”**, *Dam Engineering Vol XI Issue 2. ECO Grouting Specialists Ltd. RR1*. Grand Valley. Ontario. Canadá. LON 1G0: 111-129.



- Lombardi G. (1985). **“The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock”**, *Consulting Engineer*, Locarno, Switzerland 1985.
- Lombardi G. (1985). **“Some Theoretical Considerations on Cement Rock Grouting”**, 15th ICOLD - Congress, Lausanne, Vol. III: 235-261.
- Lombardi G. (1987). **“La Roca y el Macizo Rocoso. Leyes Constitutivas”**, *Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Buenos Aires. Sesiones Científicas “Ing. Francisco García Olano”*. *La mecánica de Rocas en la Ingeniería Civil*. Argentina.
- Lombardi G. (1992). **“The F.E.S. - Model and foundations for concrete dams”**, *Consulting Engineer*, Locarno, Switzerland.
- Lombardi G. (1992). **“The FES rock mass model - Part 1”**, *Dam Engineering*, Issue 1, Volume III: 49-76.
- Lombardi G. (1992). **“The FES rock mass model - Part 2”**, *Dam Engineering*, Issue 3, Volume III: 201-221.
- Lombardi G. y Deere D. (1993). **“Grouting design and control using the GIN principle”**, *Water Power & Dam Construction*, United Kingdom.
- Lombardi G. (1994). **“Cimentaciones de presas de hormigón y sus tratamientos”**, *Symposium Internacional de la ISRM – 1994 y IV Congreso Sudamericano de Mecánica de Rocas*, Santiago de Chile. Mayo 1994.
- Lombardi G. (1997). **“GIN principle revisited”**, *Rock Grouting Tunneling & Rock Mechanics*. Sweden.
- Lombardi G. (2003). **“3RD International Conference on Grouting and Grout Treatment”**, *Grouting of Rock Masses*, New Orleans, Louisiana.
- Lombardi G. (2008). **“Misunderstanding of GIN Confirmed”**, *Grout Line*. North America.
- Morales Amaya Joao. (2007). **“Comportamiento Geotécnico de Excavaciones Subterráneas en Roca, Tesis que para optar el grado de Maestro de Ingeniería”**, *Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería*. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Mutoh H. et al. (1999). **“Experimental Study on Grouting Mechanism in Jointed Rock Masses using Transparent Tubes”**, *J. JSDE*, Vol. 9, No. 1, 29–38.
- Pelizza Sebastiano y Peila Daniele. (2005). **“TBM Tunneling in Rock: Ground Probing and Treatments”**, *World Long Tunnels Conference*. Taiwan
- Rábago Armando. (1982). **“Chicoasen Project Grouting and Drainage System”**, *Grouting in Geotechnical Engineering*.



- Rombough Vafa, Bonin Grant y Shuttle Dawn. (2006). **“Penetrability Control of GIN Mixes During Fractured Rock Grouting”**, *Geotechnique*. Vancouver, Canada: 528 – 535.
- Ruiz Vázquez M., González Huesca S. (2007). *Geología Aplicada a la Ingeniería Civil*, Editorial Limusa, Noriega Editores, México D.F.
- Satoh H., Yamaguchi Y. y Abe T. (2003). **“Investigation on Dam Foundation Grouting Process”**, *NITTOC Construction CO., LTD.*, Tokyo, Japan.
- Shuttle Dawn, Rombough Vafa y Bonin Grant. (2008). **“An Alternative Viewpoint on GIN”**, *Grout Line*. North America.
- Shuttle Dawn, Rombough Vafa y Bonin Grant. (2007). **“GIN Distilled”**, *Grout Line*, North America.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas. (1987). **“Aplicaciones de la Mecánica de Rocas en las Obras de Ingeniería en México”**, *II Reunión Nacional de Mecánica de Rocas*. México D.F.
- SOLER. (1999). *“Manual para inyección de rocas con lechadas de cemento en obras mineras”*, Primera edición, Coahuila, México.
- Welsh Joseph P., Fetzer Claude A., Kim Jin, Rigny Marcel P. y Vithalani Jaman M. (1986). **“Grouting to rectify seepage in embankment dams”**, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*.
- Weyermann Walter J. (1977). **“The karstic rock mass of canelles dam, Rock Conditions improved through Pressure Grouting”**, *A publication by RODIO in Collaboration with The Institute for Engineering Research Foundation Kollbrunner – Rodio*, Zúrich, Switzerland: 16-24.
- Widmann R. (1996). **“International Society for Rock Mechanics Commission on Rock”**, *Commission on Rock Grouting*, Portugal.
- Williams Bobby E. y Robinson Ronald L. (1997). **“Grouting to Great Depths”**, *Civil Engineering*: 47-49.
- Zuomei Zhang y Pinshou Huo. (1982). **“Grouting of the karstic caves with clay fillings”**, *Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering Edited by Wallace Hayward Baker. Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in cooperation with ASCE/AIME Underground Technology Research Council Louisiana Section, ASCE, New Orleans Branch*: 92-104.