



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA CIVIL – GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL MÉTODO GIN (NUMERO DE INTENSIDAD DE INYECTADO)
EN INYECCIÓN DE PANTALLAS DE IMPERMEABILIZACIÓN EN MACIZOS
ROCOSOS.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
PEDRO GERARDO HERNÁNDEZ JUÁREZ

JORGE EFRAÍN CASTILLA CAMACHO
FACULTAD DE INGENIERIA

MÉXICO, D. F. JUNIO 2013



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: Dr. Jorge Abraham Díaz Rodríguez.

Secretario: Dr. Joaquín Eduardo Aguayo Camargo.

Vocal: M.I. Jorge Efraín Castilla Camacho

1^{er.} Suplente: Dr. Salvador Marín Córdova.

2^{do.} Suplente: Dra. Lilia Reyes Chávez.

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM.

TUTOR DE TESIS:

M.I. Jorge Efraín Castilla Camacho.

Resumen.

El mejoramiento de suelos por medio de tratamientos con inyecciones tuvo su origen más reciente en el siglo XIX, desde entonces su uso se ha extendido a lo largo del mundo como un técnica eficaz para solucionar diferentes problemas relacionados con el comportamiento de los suelos y rocas, resolviendo entre otros, problemas capacidad de carga, control de filtraciones o mejoramiento de módulos de deformabilidad a través de inyecciones de consolidación.

Este trabajo aborda los temas más importantes a considerar para el diseño y análisis de inyecciones en pantallas de impermeabilización, enfocándose principalmente al uso de inyecciones para el control de filtraciones en macizos rocosos, su contenido se basa en una recopilación de información necesaria para conocer el desarrollo de diferentes técnicas utilizadas y finalmente abordar el tema de inyecciones en roca, utilizando el método GIN (Número de Intensidad de Inyectado) como una de las técnicas más utilizadas en todo el mundo para el mejoramiento y control de filtraciones en macizos rocosos.

El método GIN es una técnica de inyección relativamente reciente, su origen data de 1993, año en que se dieron las primeras bases de su utilización, su aplicación requiere de un estudio detallado del sitio en donde se pretenda aplicar, el conocimiento de la geología y la descripción del macizo rocoso es muy importante, ya que este conocimiento aporta información básica para la selección adecuada de los métodos de exploración, tipo de pruebas a realizar, equipos a utilizar, mezclas de inyección adecuadas, profundidad, orientación y longitud de las pantallas de impermeabilización. Se presentan los puntos importantes del método, la explicación de su origen, las ventajas que proporciona y las bases teóricas en las que se fundamenta, se espera que este trabajo proporcione información útil para conocer el comportamiento de las pantallas de inyección, pero sobre todo ampliar el campo de estudio de una técnica que en el pasado era considerada como un método básicamente empírico, pero que se ha observado, a través del tiempo, que es un método con gran campo de estudio e investigación que permitirá optimizar su aplicación en diferentes áreas de la ingeniería de presas.

A Dios por ser mi guía en todos los aspectos de mi vida, porque me ha dado su apoyo en los momentos más complicados de mí existir, por enseñarme que la fe y el amor son el principio de cada gran logro.

Agradecimientos.

A mis Padres Heraclio Hernández y María Juárez por creer en mis sueños, gracias por su amor, por su apoyo, por la bondad de su corazón y por estar conmigo en todo momento.

A mi esposa Caty, por darle alegría a mi corazón, porque con tu amor y palabras me motivas cada día, por escucharme y estar a mi lado en todos los momentos importantes de mi vida, por sonreír y llorar a mi lado, por tu apoyo en este proyecto que con tu amor y comprensión fue posible lograr.

A mi hermana Gaby por su apoyo incondicional, por los consejos y palabras que siempre han sido parte importante en mi vida, a mis sobrinas Regina y Alondra, por ser una motivación para mí y por darle alegría a mi corazón con su sonrisa. A mi madrina Maru, por creer en mí y por ser como una segunda mamá para mi, gracias por tu apoyo en todo momento.

A mi tutor el M.I Jorge Castilla por su comprensión, por sus enseñanzas y soporte en todo momento, por su confianza y por acompañarme en esta travesía a pesar de la distancia. A mis sinodales Dr. Salvador Marín por su apoyo y por compartir parte de su tiempo para que pudiera yo estar en esta instancia, a la Dra. Lilia Reyes, al Dr. Abraham Díaz y al Dr. Eduardo Aguayo por su apoyo en la revisión de este trabajo, por sus aportaciones y por su comprensión.

Al Ing. Jorge Castro por su apoyo para poder lograr este objetivo, a los ingenieros Servando Arana, Víctor Orozco, Víctor Hugo Sánchez y Arturo Rodríguez por sus enseñanzas y apoyo en mi formación profesional.

A mis amigos, Jorge López, Ale Valencia, Carlos García y Alejandro Sánchez, por los momentos de alegría, por los días de trabajo, por brindarme su amistad y por compartir conmigo cada momento especial.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de prepararme y al CONACYT por brindarme su apoyo para poder lograr mis estudios de posgrado.

A la Comisión Federal de Electricidad por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

1	INTRODUCCIÓN.	11
1.1	Antecedentes.....	11
1.2	Objetivos.....	12
1.3	Alcances.	13
2	HISTORIA DE LA INYECCIÓN.	14
2.1	Inyección en suelos.	17
2.1.1	Inyección por compactación.	17
2.1.2	Inyección por impregnación.	18
2.1.3	Inyección por fracturamiento hidráulico.....	20
2.1.4	Jet Grouting.....	21
2.1.5	Deep Mixing (DMM).....	24
2.2	Inyección en Rocas.....	26
2.3	Propiedades de las rocas.	28
2.3.1	Influencia de las Discontinuidades.....	37
2.4	Inyección para el control de filtraciones.	41
2.5	Pruebas de agua.....	42
2.5.1	Unidad Lugeon.	44
2.6	Inyecciones de consolidación.....	49
2.7	Metodologías de inyección.....	49
2.7.1	Tecnología Convencional.....	50
2.7.2	Teoría de la viabilidad.....	51
2.7.3	Numero de intensidad de Inyectado (GIN).....	53
3	CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOHIDROLÓGICAS.	54
3.1	Revisión de la Geología Regional.	54

3.2 Fotointerpretación.....	55
3.3 Mapeo Geológico.	55
3.3.1 Mapeo Geológico antes de la construcción.....	55
3.3.2 Mapeo Geológico durante la construcción.	56
3.4 Investigación Geofísica.	56
3.5 Investigaciones Directas.....	57
3.5.1 Trincheras de exploración.....	57
3.5.2 Barrenos de exploración.	57
3.5.3 Exploración por socavones o galerías de exploración.	58
3.6 Estudios Geohidrológicos.....	58
4 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UNA CORTINA DE INYECCIONES.....	60
4.1 Pruebas de inyección.....	60
4.2 Profundidad de la cortina de inyecciones.	62
4.3 Longitud y espaciamiento de los barrenos de inyección.....	63
4.4 Orientación de los barrenos.	66
5 EL MÉTODO GIN (GROUT INTENSITY NUMBER).....	68
5.1 El modelo FES del macizo rocoso.	70
5.2 Mezclas de inyección.....	74
5.3 Conceptos teóricos del flujo de lechada y su penetración.	77
5.3.1 Formulas básicas para un flujo visco-plástico.	77
5.3.2 Investigaciones Teóricas.	80
5.4 Selección de la mezcla de inyectado.	86
5.5 Diseño de obras de Inyectado.....	89

5.6	Inyección de Fisuras.....	90
5.6.1	Inyectado de Fisuras abiertas.....	90
5.6.2	Inyectado de Fisuras Finas.....	91
5.6.3	Inyectado de una discontinuidad única.....	92
5.7	Reducción del espaciamiento de las perforaciones (Inyecciones por etapas).....	97
5.8	Pruebas de presión de agua (Lugeon).....	98
5.9	Hidrogateo (Hidrojacking) e Hidrofracturamiento.....	98
5.10	Energía Específica Empleada.....	100
5.11	Envolventes limitantes.....	102
5.12	Selección de la energía específica o Curva GIN.....	105
5.13	Inyección con equipo automatizado.....	106
5.14	Gráficas de monitoreo en el proceso de inyección.....	107
5.15	Cortina de Inyección.....	109
5.16	Relación barrenos de inyección y la energía específica de inyectado GIN.....	111
5.17	Criterios de evaluación.....	111
5.18	Análisis de resultados.....	112
6	PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA JALISCO-NAYARIT MÉXICO.....	114
6.1	Datos generales.....	114
6.2	Estudios Realizados.....	115
6.3	Geología del Sitio.....	116
6.4	Aspectos Geológico-estructurales.....	119

6.5	Parámetros del macizo rocoso.....	121
6.6	Pruebas Lugeon.	125
6.7	Pruebas de Inyectabilidad.	125
6.8	Diseño de la cortina de inyecciones.	128
6.9	Inyecciones en la roca para consolidación y/o impermeabilización.	132
6.10	Tratamientos mediante inyecciones de consolidación bajo el Plinto.....	133
6.11	Tratamientos mediante inyecciones de la Pantalla de Impermeabilización Profunda.	134
6.12	Tratamientos mediante inyecciones del contacto concreto-roca del Plinto.	134
6.13	Metodología de Inyección.....	134
6.14	Materiales y equipo.	137
6.14.1	Equipos de perforación.	137
6.14.2	Equipos de inyección.	139
6.15	Mezclas de inyección.	140
6.16	Análisis resultados.....	144
6.16.1	Tramo de inyección zona del cauce.	144
6.16.2	Tramo de inyección zona de la Margen Derecha P9-P10.	150
6.16.3	Tramo de inyección zona de la Margen Derecha P10-P11'.	155
6.16.4	Tramo de inyección zona de la Margen Derecha P11'-P12.....	161
6.16.5	Tramo de inyección zona de la Margen Derecha P12-P13.	166
6.16.6	Tramo de inyección zona de la Margen Derecha P13-P14.	170
6.16.7	Tramo de inyección zona de la Margen Izquierda P7-P8.....	174
6.16.8	Tramo de inyección zona de la Margen Izquierda P6-P7.....	179
6.16.9	Tramo de inyección zona de la Margen Izquierda P5-P6.....	183

6.17	Análisis de curvas GIN.....	188
6.17.1	Criterio de cierre por Presión Máxima.....	188
6.17.2	Criterio de cierre por intersección de la curva GIN.....	191
6.17.3	Criterio de cierre por Volumen Máximo.....	194
7	CONCLUSIONES.	198
	REFERENCIAS.	200
	APÉNDICE.	203
	Índice de figuras.....	203
	Índice de fotografías.	207
	Índice de gráficos.....	207
	Índice de tablas.	208

1 INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes.

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 (impermeabilización) y en algunos casos incrementar la resistencia y el modulo de deformabilidad del medio en forma significativa (consolidación).

La mayor parte de las inyecciones en roca está relacionada con la construcción y mantenimiento de presas y túneles, aunque también tiene aplicaciones en minería y varios tipos de construcciones subterráneas. En ocasiones es utilizada para el mejoramiento de la roca o para el incremento de su capacidad de carga.

En las inyecciones en roca generalmente se requiere rellenar los planos de fracturas así como las cavidades de disolución y otras oquedades que están asociadas a las discontinuidades del macizo rocoso. Estas representan los principales conductos por los cuales el agua fluye y por lo tanto requieren de ser selladas.

Para llevar a cabo los tratamientos con inyecciones en macizos rocosos se debe de considerar que las propiedades de la roca, especialmente el tamaño, espaciamiento de fracturas, orientación de los planos de discontinuidades y abertura, son muy variables. Los macizos rocosos contienen fracturas, sin embargo muchas de las características de la roca depende de su historia geológica y a los esfuerzos a los que ha estado sometido el macizo rocoso.

Es importante señalar que es muy difícil encontrar macizos rocosos que cumplan con las características requeridas en los proyectos y prácticamente en todos los casos se construyen pantallas de inyecciones para mejorar las condiciones del medio. Es por eso que el proceso de inyección en macizos rocosos ha sido una herramienta eficaz para el mejoramiento del mismo, por tal motivo se considera de vital importancia la evaluación de los métodos que proporcionen soluciones óptimas en este tipo de tratamientos.

Este trabajo pretende evaluar y analizar los procesos de inyección a la roca sobre la base del método GIN (Número de Intensidad de Inyectado), se dará mayor énfasis a las pantallas de inyección para cortinas de presas con la finalidad de demostrar los beneficios y mejoras que se pueden realizar al método, el cual ha sido muy utilizado alrededor del mundo dadas las ventajas que proporciona.

1.2 Objetivos.

El objetivo de este trabajo es realizar una evaluación detallada del método GIN (Número de intensidad de inyectado) en cimentación de presas.

Con base al análisis del método se podrán proponer recomendaciones para la optimización en el diseño de las cortinas de inyecciones y el estudio de la aplicación de presiones de inyección adecuadas de acuerdo al tipo de macizo rocoso.

Se pretende realizar una recopilación de información que ayude a identificar el origen de este tipo de trabajos, la utilización del método GIN para optimizar los tratamientos con inyecciones y las consideraciones que se deben tener para el diseño de una pantalla eficaz; también analizar el comportamiento en la ambigüedad de los resultados de las pruebas de agua, las posibles diferencias entre permeabilidad e inyectabilidad, el hecho de que cada tipo de roca posee su inyectabilidad individual, la limitación de impermeabilizar una roca de poca inyectabilidad, la disminución de la inyectabilidad debido al hidrofracturamiento de discontinuidades, así como la importancia dominante de las condiciones hidrogeológicas que pueden prescindir de la impermeabilización.

En general se pretende que este trabajo pueda ayudar a ofrecer información completa y analizada para el tratamiento de cimentaciones de futuras presas, para optimizar los diseños en lo que a la técnica, seguridad y economía se refiere, así como continuar con los análisis de los diferentes resultados que se obtengan en los proyectos en los que se utilice el método GIN (Número de Intensidad de Inyectado).

1.3 Alcances.

En esta investigación se llevara a cabo un estudio del comportamiento de las inyecciones que se realicen en macizos rocosos para cimentación de presas utilizando el método GIN (Número de Intensidad de Inyectado).

En el Capitulo 2, se exponen los diferentes tipos de inyecciones que se realizan tanto en suelos como en rocas, y se hará una descripción del origen de la inyección como técnica para el mejoramiento de suelos y rocas, al final de este capítulo se describirán los elementos esenciales que se deben considerar para realizar un diseño de un proyecto de inyección.

En el Capitulo 3, se describen las consideraciones Geológicas e hidrogeológicas que se deben tomar en cuenta para un trabajo sobre inyecciones, la revisión de la geología regional, los mapeos geológicos y las investigaciones geológicas y geofísicas.

En el Capitulo 4, se presentan las consideraciones para realizar el diseño de una cortina de inyecciones, las pruebas de inyección como método para definir los parámetros a utilizarse, la profundidad de la cortina de inyecciones, el espaciamiento y orientación de los barrenos de inyección para optimizar el tratamiento.

En el Capitulo 5, se describe el método GIN (Número de Intensidad de Inyectado), se estudia el modelo FES (medio Fisurado, Elástico y Saturado), se revisan los parámetros que deben cumplirse en las mezclas de inyección, las pruebas de presión de agua, la selección de la curva GIN y los criterios de evaluación para saber cuándo se logra un sellado de fisuras en el macizo rocoso.

En el Capitulo 6, se presentan los resultados obtenidos en el proceso de inyección de roca utilizando el método GIN, en el cual se verifica la eficiencia del método, el cual se aplicó a una presa de enrocamiento con cara de concreto, en el P.H. La Yesca en México.

2 HISTORIA DE LA INYECCIÓN.

El origen de la inyección data de los años 1800 en Francia, últimamente se han utilizado mezclas a base de cemento, cal o arcilla en las cimentaciones de presas para reducir las filtraciones de agua, esta práctica involucra el relleno de fracturas o vacíos, las mezclas de inyección deben considerar un tamaño de partícula menor que el espesor de las discontinuidades a tratar.

Debido a que el espacio entre los poros en suelos son generalmente mucho más pequeños que las aberturas típicas en rocas, las partículas para mezclas de inyección ha sido limitada, se desarrollaron mezclas de solución química de baja viscosidad, que pudieran impregnar las formaciones de suelos granulares y que posteriormente se endurezcan rápidamente. En 1887 Jeziorski obtuvo una patente para la utilización de un silicato de sodio el cual podía ser mezclado e inyectado en sitio, sin embargo las mezclas basadas en productos químicos reaccionaban rápidamente después del mezclado, lo que implicaba una inyección muy rápida, ya que de lo contrario las mezclas de inyección basadas en productos químicos se endurecían en la bomba de inyección o en las conducciones, limitando su aplicación.

Los métodos de inyección se han ido perfeccionando desde entonces, pero el mayor impulso fue en la década de 1920 a 1930. Este procedimiento que en su momento fue considerado secundario en las obras hidráulicas, se transformó en una parte esencial en la construcción de presas, haciendo posible la disminución de filtraciones de agua en este tipo de obras. Ningún procedimiento realizado con anterioridad permitió llegar a resultados tan económicos.

En 1925, Hugo Joosten propuso la utilización de un sistema que consistía en la inyección de silicato de sodio seguido de un aditivo (cloruro de calcio) el cual tenía la función de endurecer el silicato, el sistema fue utilizado en inyección de arenas y gravas, esta inyección tenía la función de impermeabilizar al mismo tiempo que consolidar, este procedimiento no tuvo mucho éxito por costo y ser ineficaz en arenas finas, este sistema fue utilizado hasta finales de 1960.

Actualmente el silicato de sodio sigue siendo un componente importante en las mezclas basadas en productos químicos, las limitaciones mencionadas anteriormente han sido superadas con la utilización de aditivos y bombas de inyección de mayor capacidad.

Una de las contribuciones importantes en la inyección de suelos fue el desarrollo del equipo denominado “mudjack” en 1933. El objetivo de este equipo era el rellenar los espacios vacíos por debajo de los pavimentos de concreto. Inicialmente se utilizaba una mezcla de “marga” o suelo arcilloso. Posteriormente se comprobó que la adición de cemento portland daba lugar a una mayor resistencia y mayor durabilidad de la mezcla. Con el paso del tiempo se fueron intentando diferentes formas de estabilización de suelos, incluyendo el bombeo de mezclas relativamente rígidas en barrenos perforados previamente. Aunque los primeros trabajos se llevaron a cabo sobre ensayos de prueba y error, con muy poca aplicación de ingeniería, gracias a eso se obtuvo experiencia y este procedimiento fue el precursor de la “inyección por compactación”.

Algunos otros autores como Glossop (1961) en Europa, menciona que el proceso de inyección fue inventado por Charles Berigny, quien utilizó este método en el año de 1802 para reparar la cimentación de una esclusa en Dieppe, Francia. Glossop indicó que el material de la cimentación era altamente permeable, el cita un informe realizado por Berigny que indica que la inyección fue realizada con un mortero fluido puzolánico y menciona que varias cimentaciones fueron reparadas satisfactoriamente con inyecciones de mortero puzolánico antes de 1809.

En una publicación de Houlsby (1990) indica que se fueron mejorando los equipos de bombeo, esencialmente con cada proyecto en el que se intentaba realizar inyecciones. En 1831, el proceso de inyección fue adaptado subsecuentemente para reparar estructuras de concreto.

Kinnipple llevo a cabo experimentos en Inglaterra durante el periodo de 1856 a 1858 para demostrar la viabilidad de la inyección para sellado de grietas y reparación de estructuras marinas dañadas (Houlsby 1990). Kinnipple se consideraba el inventor de

la lechada de cemento tal vez desconociendo la labor realizada en la Europa continental.

Vertel (1989) reportó que el primer gran proyecto de inyecciones se realizó en Alemania, en la Presa Tambach entre 1902 y 1905. Se llevaron a cabo inyecciones en barrenos perforados a roto-percusión y fueron rellenados con más de 65,000 kg llevando a cabo la perforación e inyección en una secuencia determinada. Una reducción del 58% en el flujo de filtración se logró en las primeras etapas.

(Glossop 1961) documentó que en Francia (a principios de los años noventa), se realizaron inyecciones por etapas hacia aguas arriba y hacia aguas abajo dependiendo de las condiciones, junto con la profundización de barrenos, también se observó la importancia de diseñar los barrenos de inyección para interceptar la mayor parte de fisuras que presentara el macizo rocoso, aunque esta práctica pudo haberse desarrollado simultáneamente en otras partes del mundo.

En tiempos más recientes, se cree que el uso de mezclas de inyección para formar una red de lentes interconectados, incrementa la resistencia del suelo. En la actualidad, con el desarrollo de cementos ultrafinos se pueden fabricar mezclas de inyección que pueden impregnar y fortalecer arenas finas. Las mezclas fabricadas con este tipo de cementos ultrafinos son altamente penetrables y permiten la inyección de fracturas finas, también se obtienen una alta resistencia a la compresión, del orden de 10 MPa (101.97 kg/cm²) es importante mencionar que se puede incrementar esta resistencia con el uso de aditivos.

Finalmente el inyectado de macizos rocosos con mezclas de cemento para mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas es una práctica muy utilizada para la construcción de estructuras en roca. Sin embargo es importante destacar que esta práctica ha sido ejecutada durante muchos años por reglas empíricas y experiencias personales o institucionales que conducen generalmente a aplicaciones poco factibles. En las últimas décadas el proceso de inyección comenzó a ser estudiado de una manera más científica y una serie de resultados obtenidos y bien fundamentados ya están al alcance de nuestra mano.

Sin embargo, las mejoras al método son todavía posibles e incluso necesarias para que se pongan en práctica con la finalidad de optimizar el proceso de inyección en una mejor adaptación a las condiciones reales de la roca, así como a los objetivos de cada proyecto.

A pesar de los logros recientes, se observa que la investigación, los estudios y las nuevas mejoras de la teoría y práctica siguen siendo necesarios y convenientes para satisfacer las necesidades de la ingeniería de presas en mejoramiento de macizos rocosos.

2.1 Inyección en suelos.

La inyección en suelos es utilizada para reforzar la formación de suelos de forma temporal durante la construcción o de forma permanente con el objetivo de aumentar la capacidad de carga y su resistencia. Existen cuatro mecanismos mediante los cuales se logra el reforzamiento de los suelos: la densificación, la cohesión, el reforzamiento y el intercambio químico. Tal como sucede en las rocas, la inyección en suelos a menudo se realiza para reducir la permeabilidad e inhibir el movimiento del agua.

2.1.1 Inyección por compactación.

Este proceso se ha utilizado desde la principios de 1950, se trata de lechadas de baja movilidad inyectadas a altas presiones de bombeo (hasta 600 psi) en patrones predeterminados para aumentar la densidad de suelo blando o suelto, Cuando los materiales y los parámetros de inyección que se seleccionan son los adecuados, la lechada forma volúmenes controlables, centrados en el punto de inyección.

Básicamente es una inyección que se efectúa por desplazamiento del suelo, sin penetración, el propósito principal es que una mezcla muy viscosa se expanda en una cavidad originada por la perforación de un barreno y a su vez el suelo circundante sea densificado.

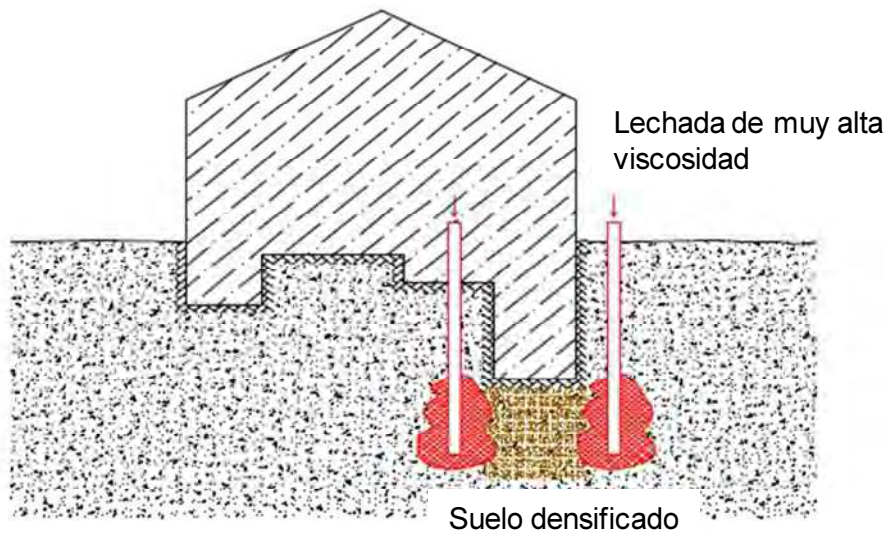


Figura 2.1. Inyección por compactación (Carluccio, 2005).

La inyección por compactación ha sido utilizada en numerosos proyectos para remediar la densificación de los suelos de la cimentación antes de la construcción y para prevenir asentamientos en la ejecución de túneles a través de suelos blandos, mediante la inyección de un mortero de suelo-cemento muy firme para desplazar y compactar el suelo.

Los más recientes campos de aplicación en los que actualmente se utiliza esta técnica son para mitigar el potencial de licuefacción para presas, combatir los daños por hundimiento en las zonas Kársticas de rocas calizas y para estabilización de taludes.

2.1.2 Inyección por impregnación.

En la inyección por impregnación y rotura, la mezcla de inyección impregna los materiales permeables, pero después de cierto tiempo la circulación de la lechada origina una pérdida de carga, la cual se llega a presentar por el fraguado de la misma mezcla de inyección o por distancias considerables durante su recorrido.

De este modo el caudal del equipo de inyección se regulariza hasta el punto en que permanece constante , la presión se incrementa en el barreno hasta alcanzar el valor

requerido para la inyección de los suelos o capas de suelo menos permeables, si la presión se llega a incrementar aparecen roturas.

Para evitar que se presenten roturas se recomienda utilizar mezclas muy fluidas y caudales de inyección bajos, para que la presión de inyección no alcance la presión de rotura. Sin embargo cuando el terreno es heterogéneo es difícil establecer la fluidez de la mezcla, el tiempo de fraguado y el caudal de inyección.

Por el efecto de la presión de inyección se producen fisuras en el suelo las cuales crean vías de recorrido sinuoso, que transportan una suspensión de granos de diversos tamaños. Tal como se muestra en la figura 2.2 a), si la mezcla de inyección tiene una viscosidad adecuada y es estable, va introduciendo la lechada en los vacíos del suelo, produciéndose la colmatación, permaneciendo las partículas hasta que las pérdidas de carga detengan la circulación. El proceso se repite inyectando las zonas que no fueron impregnadas y se obtiene como resultado, una serie de impregnaciones máximas y roturas mínimas.

Sin embargo si los parámetros de viscosidad y estabilidad no son los adecuados (figura 2.2 b)) se producirán grietas o rompimientos iniciales seguido de la formación de conductos que requerirán una fuerte carga para poder inyectarse, lo que ocasionará una deshidratación y un frente densificado en partículas que no penetran la masa de suelo y solo formarán una veta de inyección.

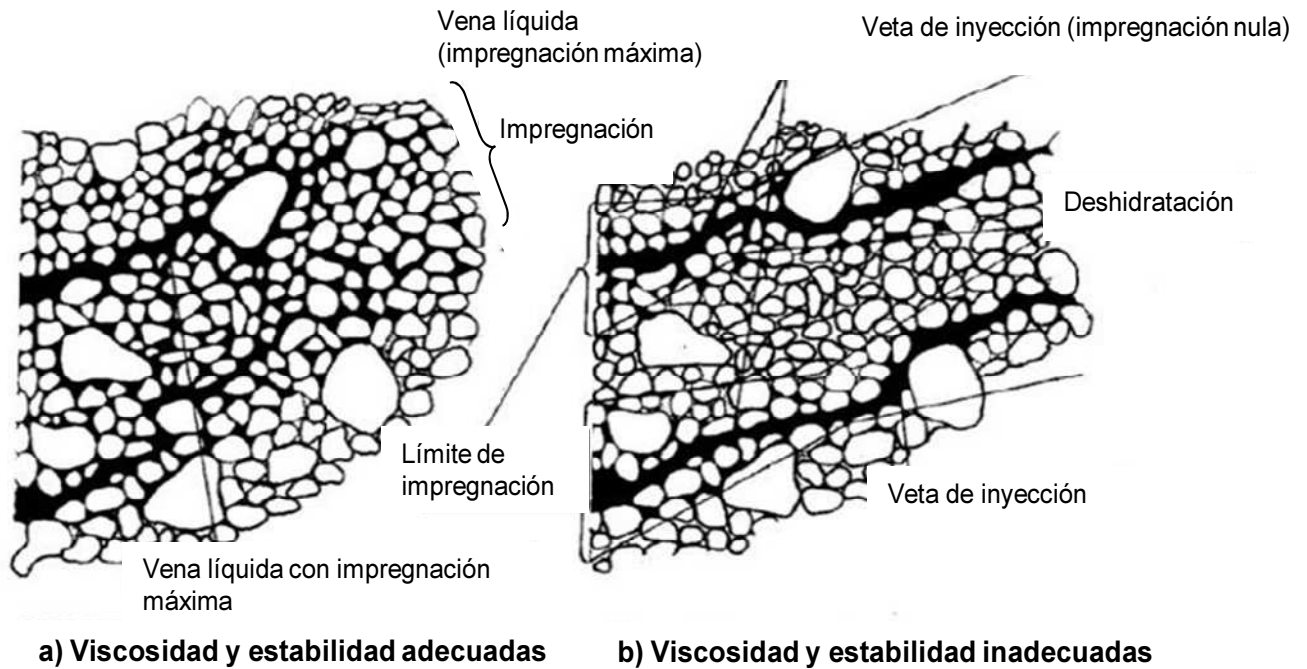


Figura 2.2. Inyección por impregnación (Carluccio, 2005).

2.1.3 Inyección por fracturamiento hidráulico.

La lechada entra en las fisuras naturales del suelo, o produce una serie de fracturas hidráulicas que se rellenan con mortero y rodean a los fragmentos (clastos); o simplemente se extienden como conductos cementicios que al fraguar producen un conjunto suelo – cemento muy resistente.

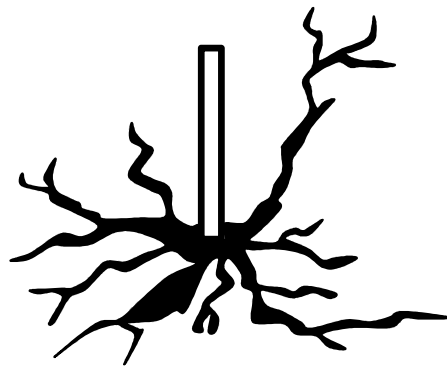


Figura 2.3. Inyección por Fracturamiento Hidráulico. (Hsai-Yang Fang, 1991).

La inyección por fracturamiento Hidráulico implica la inyección de partículas de alta movilidad a velocidades relativamente altas y presiones que provocan el fracturamiento del suelo. Los lentes y masas de lechada formada por la inyección son utilizados para incrementar los esfuerzos totales en la masa del suelo, rellenar los vacíos, consolidar localmente o densificar la masa de suelo y proporcionar un tipo de membrana impermeable. Sin embargo el proceso es difícil de controlar y puede conducir a un comportamiento no deseado del suelo o desperdicios de mezclas de inyección.

2.1.4 Jet Grouting.

El Jet Grouting es un método para mejoramiento del terreno a profundidad, mediante la mezcla de este mismo con una lechada que se introduce en la masa de suelo.

Esta técnica mejora las características mecánicas y el comportamiento hidráulico del terreno, el método consiste en la inyección de un material consolidante, a muy alta velocidad a través de una o más boquillas de diámetro muy pequeño, lo cual permite obtener un tratamiento homogéneo y continuo del terreno, destruyendo su estructura primitiva y creando un nuevo elemento estructural con características determinadas en función del terreno de origen.

Su ejecución se efectúa como se indica en la figura 2.4.

- (1) Fase de perforación por rotación: Se perfora el terreno a tratar con un sistema a rotoperCUSión o por una simple rotación con elementos de corte adecuados.
- (2) Fin de la perforación: Concluyendo la profundidad de perforación establecida se comienza con el proceso de inyección.
- (3) Inicio del proceso: Se inyecta la lechada a alta presión por medio de bombas de inyección a través de las toberas, la presión de inyección produce una elevada energía cinética que ocasiona el corte y amasado del terreno circundante. Al fabricarse las mezclas de la lechada con el terreno, quedan modificadas la estructura y las propiedades mecánicas del terreno original. Las presiones de inyección superan los 150 kg/cm^2 .

- (4) Elevación y rotación a velocidad preestablecida: se va ascendiendo al mismo tiempo que el elemento va girando y realizando la inyección.
- (5) Terminación y repetición del proceso: se llega hasta la superficie con la columna en cuestión y se comienza con la siguiente columna repitiendo nuevamente el proceso.

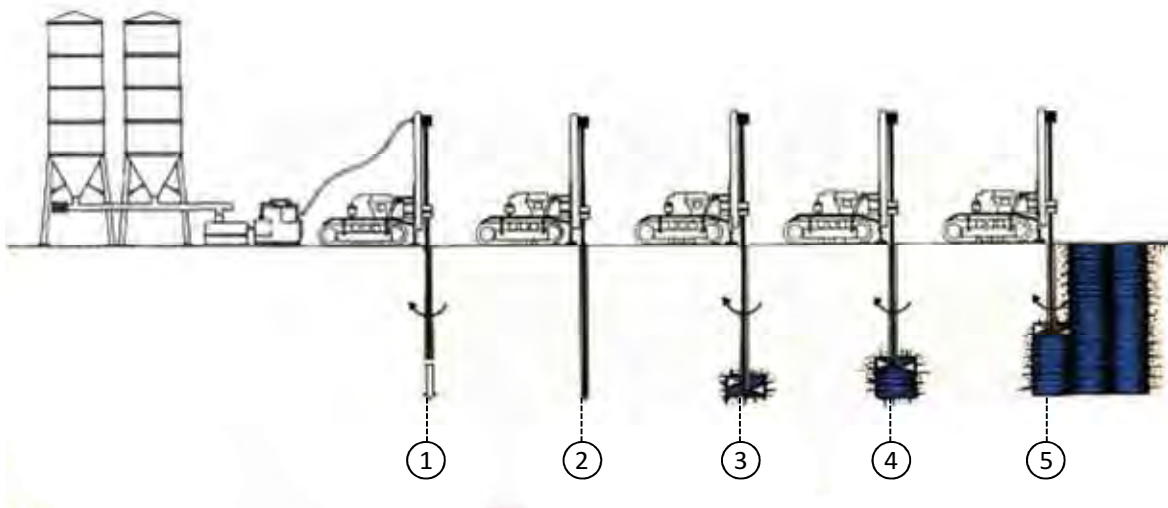


Figura 2.4. Inyección por impregnación (Carluccio, 2005).

Las características principales de este método se mencionan a continuación (ver figura 2.5):

- Permite formar columnas de suelo mejorado con inyección, mediante la introducción a alta velocidad de un material consolidante (normalmente, lechada de cemento) a través de unos pequeños orificios denominados toberas. Esa velocidad se consigue mediante una alta presión de bombeo.
- El diámetro y la resistencia de las columnas dependen del método de ejecución y de las características del terreno.
- Muy adecuado para el recalce de estructuras, sin alterar significativamente el comportamiento de la cimentación original.
- Útil para la construcción de muros de contención y de estanqueidad.

- Las columnas pueden armarse mediante barras de acero, mejorando su resistencia a la flexión.
- Utilizable para la creación de muros de contención y estanqueidad.

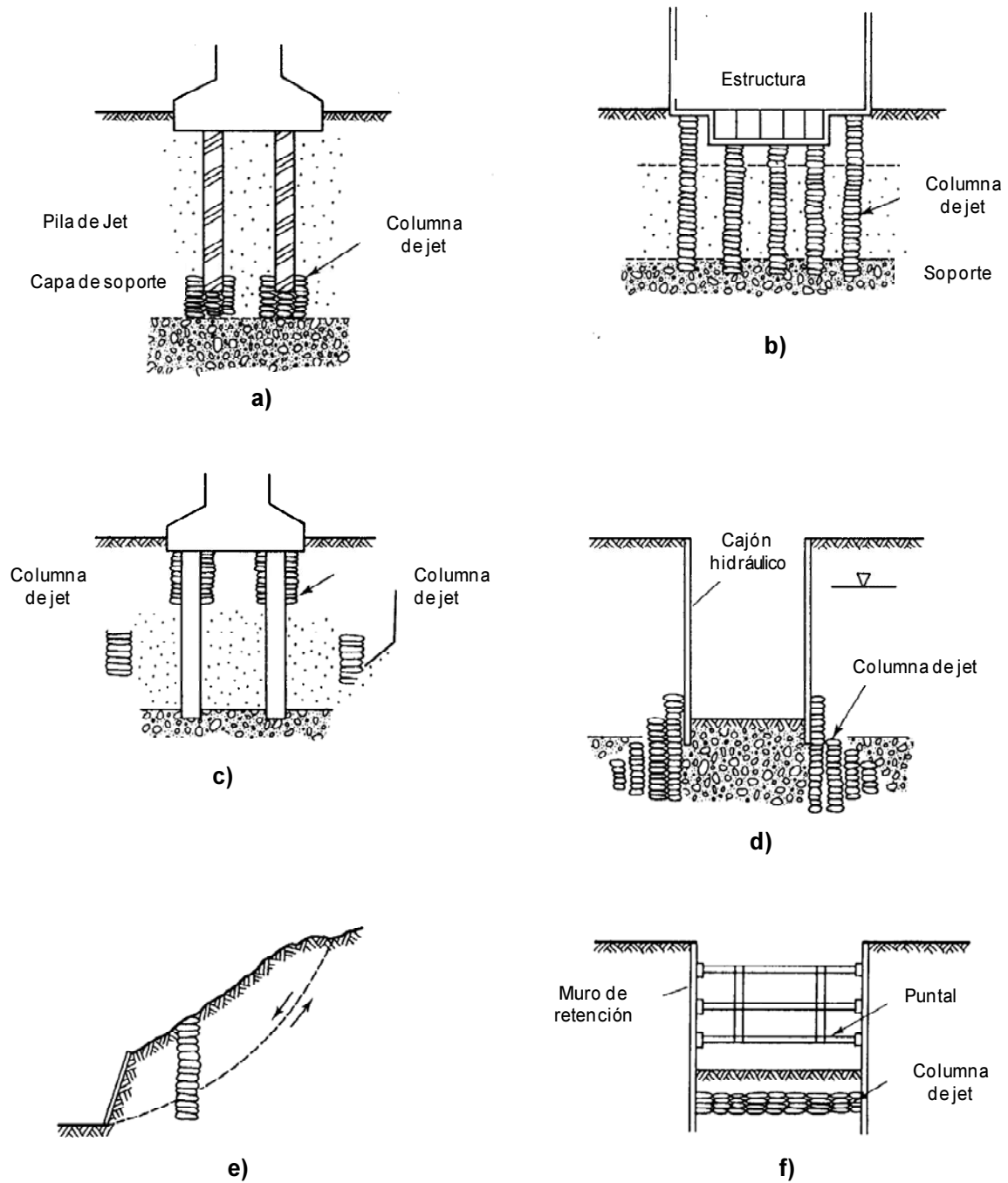


Figura 2.5. Aplicaciones del Jet Grouting (Hsai-Yang Fang, 1991).

2.1.5 Deep Mixing (DMM).

Esta técnica de inyección consiste en mezclar mecánicamente el suelo in situ con un agente cementante en forma de lechada con el objetivo de mejorar las propiedades geomecánicas del suelo. Como resultado se obtienen columnas o muros solidificados con alta resistencia al corte, baja compresibilidad y una permeabilidad muy baja. Es un método de refuerzo masivo de suelos.

Existen dos métodos con los cuales se puede realizar el procedimiento, el ingrediente cementante se puede agregar en forma de polvo, método seco o en lechada, método húmedo.

- Método Seco: Consiste en la penetración del equipo mezclador en la masa de suelo, introduciéndose sin agregar el producto cementante. Al llegar a la profundidad de diseño se inicia la introducción del agente cementante y la extracción de la herramienta. Las herramientas mezcladoras que llevan a cabo este proceso fabrican columnas de un diámetro de 50 a 80 cm otros equipos pueden producir columnas de 1.00 a 1.50 m.

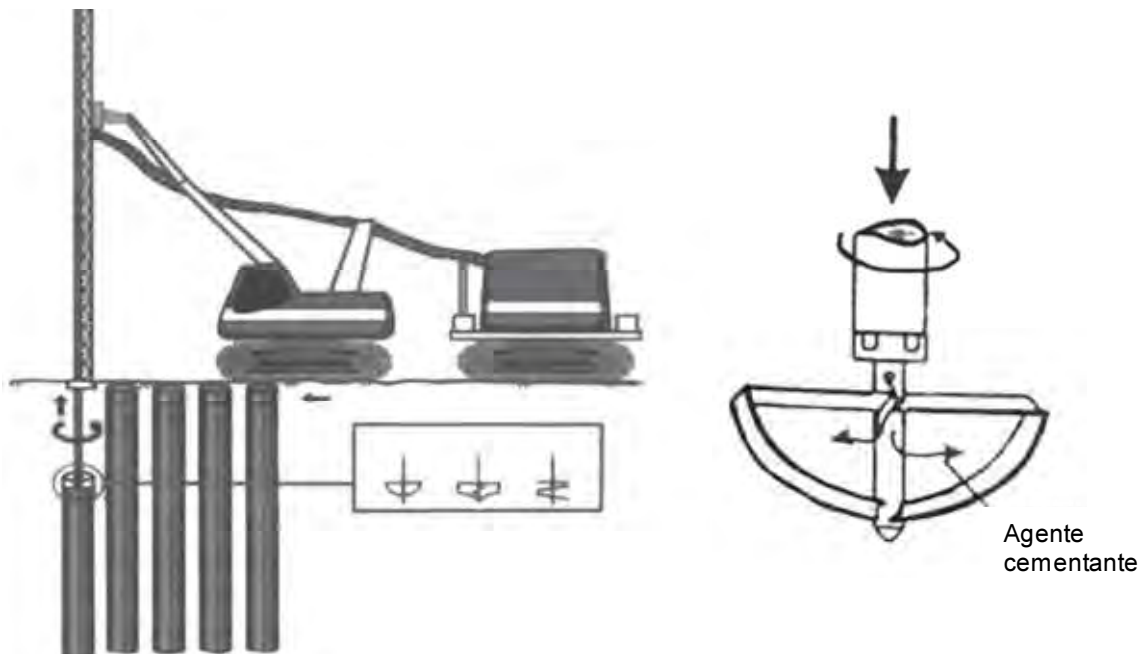


Figura 2.6. Método Seco. (MCG, 2002).

- Método Húmedo: En este caso la herramienta penetra el terreno y de forma simultánea, se introduce lechada a través de una barra hueca de perforación, inyectándose al terreno a través de los orificios que se encuentran en la punta de la herramienta. Este equipo puede producir columnas de hasta 2.4 m de diámetro.

Los equipos con los cuales se producen este tipo de columnas las fabrican de forma individual, las cuales se pueden construir tangencialmente para formar, pantallas, paneles o bloques. Figura 2.7.

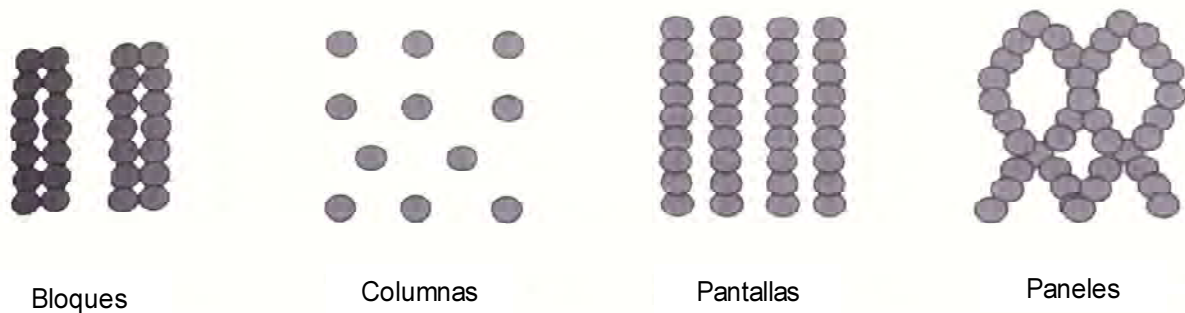


Figura 2.7. Forma de instalación de las columnas utilizando Deep Mixing. (MCG, 2002).

Una de las diferencias entre el Deep Soil Mixing y la técnica del Jet Grouting, es que el material de mejoramiento de suelos (en el caso de Deep Mixing) se introduce en el terreno a bajas presiones, con lo cual se obtienen un rechazo menor y un menor grado de sustitución del suelo de origen. La mezcla utilizada para el mejoramiento de suelos se aplica en suelos blandos, mientras que el Jet Grouting no tiene esa limitación.

La mezcla de mejoramiento se aplica en suelos blandos, mientras que el Jet Grouting no tiene esa limitación. La limitante de utilizar la mezcla de Deep Mixing es que la resistencia obtenida puede desestructurarse con medios mecánicos. El suelo-cemento formado por la mezcla utilizada en el Deep Soil Mixing suele alcanzar resistencias menores que las típicas utilizadas con Jet Grouting. El suelo-cemento

formado por mezcla mecánica suele alcanzar resistencias menores que las típicas en Jet Grouting.

2.2 Inyección en Rocas.

Para llevar a cabo el procedimiento de inyección en rocas es necesario definir el propósito de la inyección, las propiedades de la masa de roca a ser inyectada, las propiedades de los materiales utilizados para las mezclas de inyección y los equipos de perforación e inyección a utilizarse.

Se deben tomar en cuenta las características geotécnicas e investigaciones hidrogeológicas del sitio y si la roca es adecuada para efectuar su tratamiento mediante inyecciones. Además es necesario definir las presiones de inyección a utilizarse, la separación y profundidad de los barrenos, para esto es necesario siempre llevar a cabo pruebas de inyección que permitan definir o ajustar el diseño de la pantalla impermeable.

En la figura 2.8 se presenta una guía para llevar a cabo el diseño y ejecución de un plan de inyecciones.

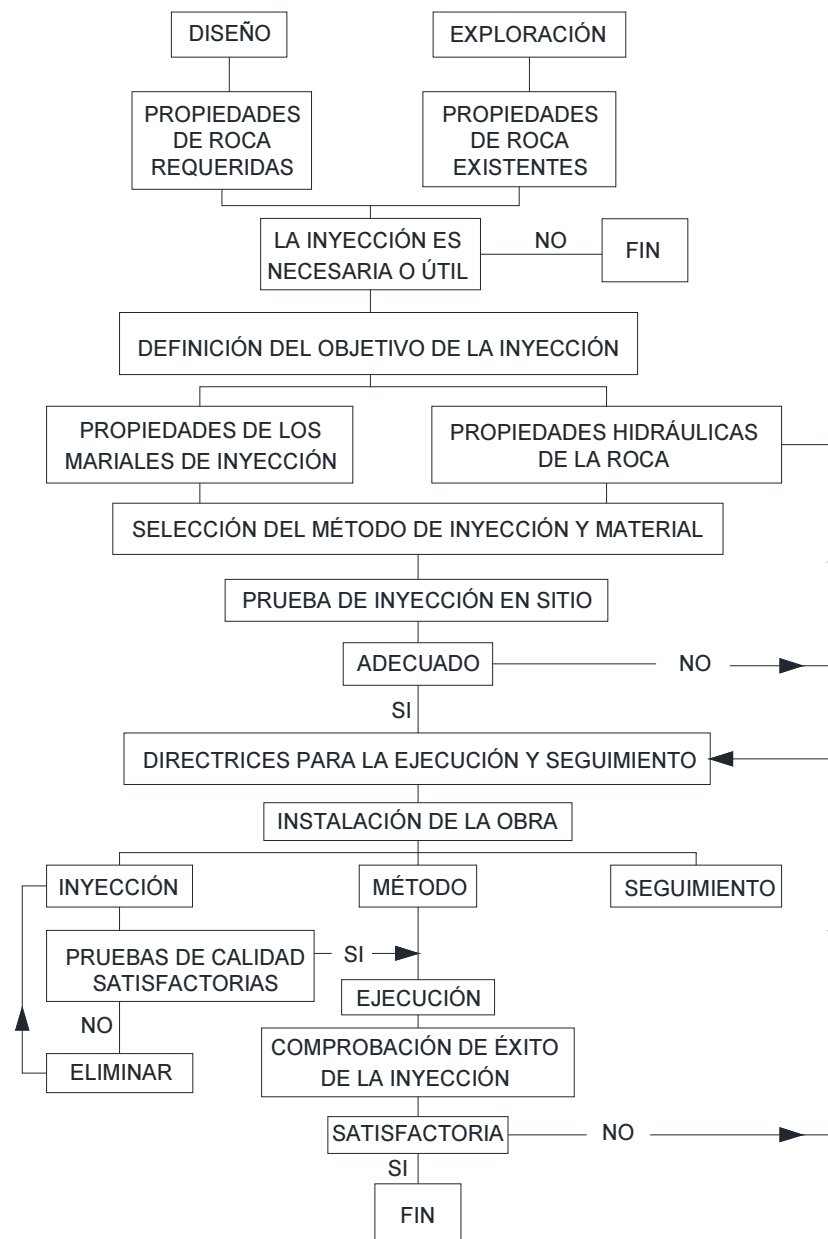


Figura 2.8. Diagrama de Flujo para el diseño y ejecución de los trabajos de inyección (R. Widmann, 1994).

El objetivo principal de la inyección en rocas es reducir o detener el movimiento de agua a través del macizo rocoso, o tiene el objetivo de realizar ambas funciones. La mayoría de las inyecciones en roca están relacionadas con la construcción y mantenimiento de presas y túneles.

Las inyecciones en roca involucran el relleno de grietas, juntas y otros defectos, en la mayoría de las veces se utilizan soluciones fabricadas con cemento aunque también se utilizan soluciones químicas o inyecciones de resina. Esto está muy relacionado al tamaño y distribución de las juntas o defectos del macizo rocoso ya que estas condiciones son muy variables.

Principalmente las inyecciones en roca logran reducir la permeabilidad del macizo satisfactoriamente para esto es importante lograr una resistencia a la erosión o al lavado del material inyectado, la inyección también reduce la compresibilidad bajo cargas externas, es decir es muy útil para reducir posibles asentamientos y además incrementar el modulo de deformación del terreno.

El tamaño y distribución de las fisuras o fracturas aunado con las diferentes propiedades de las rocas varían enormemente. La mayor parte de las fisuras abiertas pueden ser llenadas con las mezcla de inyección sin embargo garantizar un llenado de fisuras finas es más complicado, es necesario para esto tener un entendimiento de las propiedades de la roca, en particular de las juntas y defectos geométricos de cada formación.

2.3 Propiedades de las rocas.

Las propiedades físicas de las rocas son resultado de su historia geológica, deformacional, ambiental y de su composición mineralógica, además de los procesos de alteración y meteorización. Una comprensión de la geología es fundamental para realizar una inyección efectiva de la roca.

Existen parámetros que se utilizan para describir de manera cuantitativa las propiedades de las rocas y establecen una clasificación con fines geotécnicos. Las propiedades índices de las rocas, así como su composición mineralógica y la fábrica determinan inicialmente el comportamiento de la roca intacta.

La descripción geológica de la roca la integran su nombre, mineralogía, textura, tipo de cementación y grado de alteración. La descripción petrográfica se realiza

mediante la observación macroscópica de las muestras, necesaria para conocer la composición, textura, fábrica, grado de alteración, hidrofracturación, porosidad, etc.

En la tabla 2.1 se muestra una lista de los métodos utilizados para determinar las propiedades de la matriz rocosa.

	Propiedades	Métodos de Determinación
Propiedades de identificación y clasificación	Composición mineralógica.	Descripción visual. Microscopía óptica y electrónica. Difracción de rayos X.
	Fábrica y textura.	
	Tamaño de grano.	
	Color.	
	Porosidad (n).	Técnicas de laboratorio.
	Peso específico (γ).	
	Contenido de Agua.	
Permeabilidad (coeficiente de permeabilidad, k).	Ensayo de permeabilidad.	
Durabilidad.	Ensayos de alterabilidad.	
Alterabilidad (índice de alterabilidad).		
Propiedades mecánicas	Resistencia a compresión simple (σ_c).	Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de carga puntual. Martillo Schmidt.
	Resistencia a tracción (σ_t).	Ensayo de tracción directa. Ensayo de tracción indirecta.
	Velocidad de ondas sísmicas (V_p , V_s).	Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio.
	Resistencia (parámetros c y ϕ).	Ensayo de compresión triaxial
	Deformabilidad (módulos de deformación elástica estáticos o dinámicos: E , ν).	Ensayo de compresión triaxial. Ensayo de velocidad sísmica.

Tabla 2.1. Propiedades de la Matriz rocosa y métodos para su determinación. (González 2002).

Se llevan a cabo estudios petrofísicos de la matriz de roca con la finalidad de determinar sus propiedades físicas en función de sus componentes y características petrográficas (poros y fisuras, uniones intergranulares, anisotropías, minerales, composición química, etc.), mediante la descripción de parámetros petrográficos y

procedimientos específicos para su determinación (Montoto y Esbert, 1999). El arreglo preferente de los minerales, la estructura cristalina o la dureza ayudan a determinar la reacción mecánica de la roca con respecto a fuerzas externas.

Las propiedades físicas de las rocas (propiedades índice) son determinadas a través de pruebas de laboratorio, la porosidad, permeabilidad, resistencia a la compresión, peso específico, durabilidad y la velocidad de ondas sónicas tienen influencia en el comportamiento mecánico de la roca.

A continuación se describen las propiedades índice de las rocas:

Porosidad (n): Es la relación entre el volumen ocupado por los vacíos en la roca, V_v y el volumen total V (partículas sólidas + huecos): $n(\%) = V_v/V$. Es la propiedad que más afecta a las características resistentes y mecánicas, siendo inversamente proporcional a la resistencia y a la densidad y directamente proporcional a la deformabilidad, ya que la existencia de huecos puede dar lugar a zonas de debilidad. Los vacíos, en el caso de rocas cristalinas, ígneas o metamórficas, pueden ser microfisuras o grietas en la matriz rocosa. La porosidad, en general, decrece con la profundidad y con la edad de las rocas.

Permeabilidad: Es la capacidad de fluir agua en el interior del macizo rocoso. La mayoría de las rocas presentan permeabilidades muy bajas. La filtración y el flujo del agua a través de la matriz rocosa se lleva a cabo en poros y fisuras, tomando mucha importancia la interconexión entre ellos.

El grado de meteorización, la anisotropía y el estado de esfuerzos al que está sometido el macizo rocoso son factores que también afectan la permeabilidad.

La permeabilidad de una roca se mide por el coeficiente de conductividad hidráulica k que se expresa en m/s, cm/s o m/día.

$$k = K \left(\frac{\gamma_w}{\mu} \right) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

K: Permeabilidad intrínseca que depende de las características del medio físico.

γ_w : Peso específico del agua.

μ : Viscosidad dinámica del agua.

Resistencia a la compresión simple o resistencia uniaxial: es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica sin confinar en el laboratorio y está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} = \frac{\text{Fuerza compresiva aplicada}}{\text{Area de aplicación}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

El valor de la resistencia a la compresión aporta información referente a las propiedades de las rocas.

En la tabla 2.2 se incluyen algunos valores de resistencia a la compresión simple para diferentes tipos de rocas.

Roca sana	Resistencia a la compresión simple (kg/cm ²)		Resistencia a la tracción (kg/cm ²)
	Valores Promedio	Rango de Valores	
Andesita	2.100-3.200	1.000-5.000	70
Anfibolita	2.800	2.100-5.300	230
Anhidrita	900	800-1.300	60-120
Arenisca	550-1.400	300-2.350	50-200
Basalto	800-2.000	600-3.500	50-250
Caliza	600-1.400	500-2.000	40-300
Cuarcita	2.000-3.200	1.000-5.000	100-300
Diabasa	2.400-3.500	1.300-3.650	550
Diorita	1.800-2.450	1.200-3.350	80-300
Dolerita	2.000-3.000	1.000-3.500	150-350

Tabla 2.2. Continúa página siguiente....

Roca sana	Resistencia a la compresión simple (kg/cm ²)		Resistencia a la tracción (kg/cm ²)
	Valores Promedio	Rango de Valores	
Dolomía	600-2.000	500-3.500	50-250
Esquisto	300-600	200- 1.600	20-55
Gabro	2.1 00-2.800	1.800-3.000	140-300
Gneiss	600-2.000	500-2.500	50-200
Granito	700-2.000	500-3.000	70-250
Grauvaca	1.000-1.500	800-2.200	55-150
Limolita		350-2.500	27
Lutita	200-400	100-900	15-100
			5-10*
Marga	300-700	200-900	
Mármol	1.200-2.000	600-2.500	65-200
Pizarra	400-1.500	300-2.000	70-200
Sal	120	50-300	
Toba		100-460	10-40
Yeso	250	100-400	1 0-25

Tabla 2.2. Valores de resistencia de la roca intacta. Datos obtenidos a partir de Rhan (1986), Walthan (1999), Obert y Duvall (1967), Farmer (1968).

El valor de la resistencia a la compresión simple puede determinarse a través de pruebas efectuadas en campo con martillo Schmidt, y a partir de este tipo de medición se pueden obtener estimaciones aproximadas y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas. Los índices de campo permiten una aproximación del valor de la resistencia de la roca, los criterios para su clasificación se muestran en la tabla 2.3, así como su valor de resistencia de cada índice determinado.

Clase	Descripción	Identificación de campo	Aproximación al rango de resistencia a compresión simple (MPa)
S ₁	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	< 0,025
S ₂	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,025-0,05
S ₃	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0,05-0, 1
S ₄	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0,1 -0,25
S ₅	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0,25-0,5
S ₆	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	> 0,5
R ₀	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25 - 1 ,0
R ₁	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente.	1 ,0-5,0
R ₂	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0-25
R ₃	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25-50
R ₄	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.	50-100
R ₅	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100-250
R ₆	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

Tabla 2.3. Clasificación según la resistencia a la compresión simple de suelos y rocas (ISRM, 1981)

Peso específico o peso unitario de la roca: Es el peso por unidad de volumen que tiene un material. Las rocas a diferencia de los suelos presentan una importante variación de valores de peso específico. En la tabla 2.4 se presentan los valores medios de algunos tipos de rocas.

Roca	Peso específico (g/cm ³)	Porosidad (%)
Andesita	2,2-2,35	10- 15
Anfibolita	2,9-3,0	-
Arenisca	2,3-2,6	5-25 (16,0)
Basalto	2,7-2,9	0, 1-2
Caliza	2,3-2,6	5-20 (11 ,0)
Carbón	1,0-2,0	10
Cuarcita	2,6-2,7	0, 1 -0,5
Creta	1 ,7-2,3	30
Diabasa	2.9	0, 1
Diorita	2,7-2,85	-
Dolomía	2,5-2,6	0,5-10
Esquisto	2,5-2,8	3
Gabro	3,0-3,1	0, 1-0,2
Gneiss	2,7-3,0	0,5-1,5
Granito	2,6-2,7	0,5- 1 ,5 (0,9)
Grauvaca	2,8	3
Mármol	2,6-2.8	0,3-2 (0,6)
Lutita	2,2-2,6	2-15
Pizarra	2,5-2,7	0, 1 - 1
Riolita	2,4-2,6	4-16
Sal	2,1-2,2	5
Toba	1,9-2,3	14-40
Yeso	2,3	5

Tabla 2.4 Valores típicos de peso específico y porosidad de las rocas, entre paréntesis algunos valores medios de porosidad eficaz, datos seleccionados a partir de Goodman (1989), Rhan (1986), Walthan (1999), Farmer (1968).

Durabilidad: En ocasiones también llamada alterabilidad, es la resistencia que presenta una roca ante procesos de alteración y desintegración. Procesos como la oxidación e hidratación modifican las propiedades del material rocoso. La durabilidad de la roca aumenta con la densidad y se reduce con el contenido de agua.

El índice de durabilidad I_D , representa el porcentaje de roca, en peso seco, que queda retenido en el dispositivo de prueba (tambor) después de uno o dos ciclos de desmoronamiento (I_{D1} , I_{D2}) y varía entre 0% y 100%.

$$I_D(\%) = \frac{\text{Peso seco después de uno o dos ciclos}}{\text{Peso inicial de la muestra}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

La clasificación del índice de durabilidad basado en el valor de I_{D2} se establece en la tabla 2.5. Para el caso de rocas arcillosas muy débiles en las que se obtienen valores de I_{D2} menores del 10% después del segundo ciclo, se recomienda emplear el índice correspondiente al primer ciclo I_{D1} . (Ver tabla 2.6).

Durabilidad	% peso retenido después de 2 ciclos
Muy alta	> 98
Alta	95-98
Media-alta	85-95
Media	60-85
Baja	30-60
Muy baja	< 30

Tabla 2.5. Clasificación de durabilidad en base al índice I_{D2} .

Durabilidad	% peso retenido después de 1 ciclo	
	(1)	(2)
Extremadamente alta	-	>95
Muy alta	> 99	90-95
Alta	98-99	75-90
Media-alta	95-98	-
Media	85-95	50-75
Baja	60-85	25-50
Muy baja	<60	< 25

Tabla 2.6. Clasificación de durabilidad en base al índice I_{D1} .

La velocidad de propagación de las ondas elásticas: Este valor dependerá de la densidad de las propiedades elásticas del material y la determinación de su valor aporta información importante como la porosidad.

La velocidad de ondas longitudinales o de compresión, V_p , se utiliza como índice de clasificación y su valor es indicativo de la calidad de la roca, correlacionándose linealmente con la resistencia a la compresión simple σ_c . Para rocas de buena calidad la velocidad de onda elástica varía de 1000 a 6 000 m/s, por el contrario para rocas alteradas y meteorizadas los valores de propagación de onda elástica regularmente son menores de 900 m/s. En la tabla 2.7 se presentan algunos valores de propagación de ondas elásticas de compresión.

Roca sana	Velocidad de propagación de las ondas V_p (m/s)
Arenisca	1.400-4,200
Basalto	4,500-6,500
Caliza	2.500-6,000
Conglomerado	2,500-5,000
Cuarcita	5.000-6,500
Diabasa	5.500-7.000
Dolerita	4.500-6.500
Dolomía	5,000-6,000
Gabro	4.500-6.500
Gneiss	3,100-5,500
Granito sano	4.500-6,000
Lutita	1.400-3.000
Marga	1.800-3,200
Mármol	3.500-6.000
Pizarra	3,500-5,000
Sal	4,500-6.000
Yeso	3.000-4.000

Tabla 2.7. Velocidad de propagación de las Ondas V_p (m/s).

2.3.1 Influencia de las Discontinuidades.

El macizo rocoso es un conjunto de bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan el medio rocoso. Mecánicamente los macizos rocosos son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos.

Las discontinuidades y los bloques, constituyen el macizo rocoso y gobiernan su comportamiento global, también existen otros factores que afectan su comportamiento mecánico, como son:

- Estructuras tectónicas y sedimentarias no discontinuas en el macizo rocoso como los pliegues.
- El estado de esfuerzos in situ.
- Las condiciones hidrogeológicas y los factores geoambientales.

Las características litológicas y estructurales además de las condiciones ambientales, determinan la gran diversidad de las propiedades físicas y mecánicas de los macizos rocosos.

El tipo de roca y su grado de alteración determinan las propiedades resistentes de la matriz rocosa. La estructura geológica del macizo rocoso define concentración de esfuerzos, zonas y planos de debilidad, zonas sensibles a la meteorización y caminos de flujo de agua.

Los planos de discontinuidad de los macizos rocosos condicionan de una forma definitiva sus propiedades y comportamiento resistente, deformacional e hidráulico. Las discontinuidades le dan una característica discontinua y anisótropa a los macizos rocosos, haciéndolos más deformables y débiles.

Las discontinuidades representan planos preferentes de alteración, meteorización y fractura y permiten el flujo del agua, la detección, descripción y caracterización es fundamental para el estudio del comportamiento mecánico e hidrogeológico del macizo rocoso.

Es importante describir las discontinuidades presentes en el macizo rocoso a inyectarse, ya que de un conocimiento adecuado de estas podrá optimizarse el diseño de la pantalla de inyecciones.

La descripción de las discontinuidades está basada principalmente a parámetros geométricos, en la figura 2.9, se muestran las características principales a considerar para la descripción de discontinuidades.

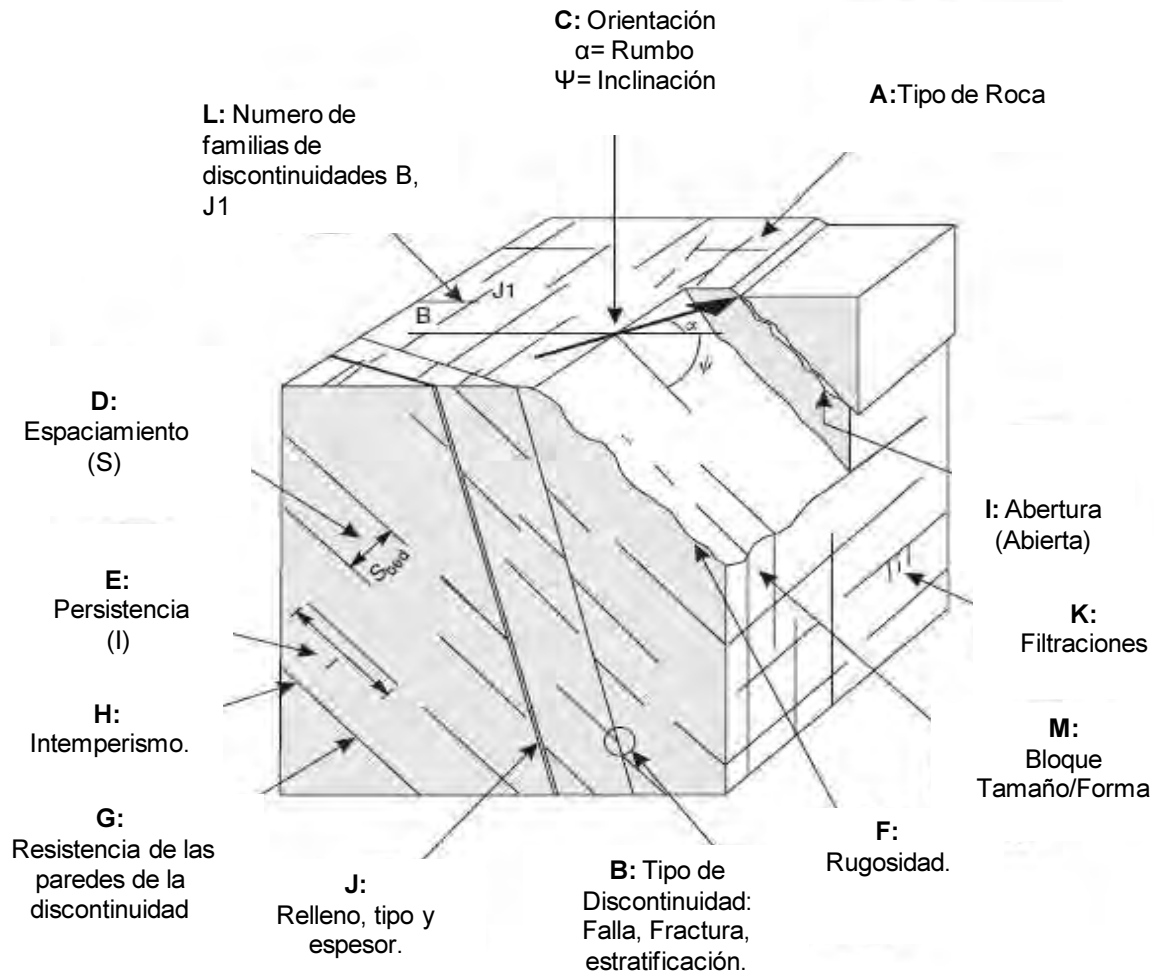


Figura 2.9. Características de las discontinuidades en macizos rocosos. (Wyllie, 1999).

La siguiente lista hace referencia a la figura 2.9 en donde se mencionan los parámetros a medir para la descripción de discontinuidades y las características principales a considerar para la descripción de en un macizo rocoso.

- A. Tipo de roca: El tipo de roca está definido por la origen de la misma (por ejemplo si es ígnea, sedimentaria o metamórfica), también por la mineralogía,

el color y tamaño de grano (Deere and Miller, 1966). El conocimiento del tipo de roca proporciona información muy útil para predecir el probable comportamiento de la roca.

- B. Tipo de discontinuidad: Es la diferente clasificación de las discontinuidades, regularmente tiene que ver con la forma en cómo estas se formaron, los principales tipos de discontinuidades son: Fallas, estratificación, fracturas o juntas, planos de esquistocidad.
- C. Orientación de las discontinuidades: La orientación de la superficie de las discontinuidades es expresada por su rumbo e inclinación. La representación gráfica de las discontinuidades o de su orientación permite una visión general de la geometría del macizo rocoso.
- D. Espaciamiento: Es la distancia media perpendicular entre los planos de discontinuidad de una misma familia. El espaciamiento entre discontinuidades juega un papel importante en la permeabilidad del macizo rocoso. La conductividad hidráulica referida a una determinada familia de discontinuidades es inversamente proporcional a su espaciado, siempre y cuando que la abertura de las discontinuidades individuales sea comparable.
- E. Continuidad o Persistencia: Es la extensión superficial del plano de discontinuidad, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Es importante destacar las familias más continuas, ya que por lo general serán éstas las que condicionen la conductividad hidráulica del macizo.
- F. Rugosidad: La rugosidad de un plano de discontinuidad determina su resistencia al corte, a mayor rugosidad mayor resistencia.
- G. Resistencia de las paredes de la discontinuidad.
- H. Intemperismo o meteorización. La meteorización reduce la resistencia al corte de las discontinuidades.
- I. Abertura: Es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno.

- J. Relleno: Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de una material de naturaleza distinta a la roca de las paredes. Las características principales del relleno son su naturaleza, espesor, resistencia al corte y permeabilidad.
- K. Filtraciones: La localización de las filtraciones en las discontinuidades proporciona información sobre la apertura, porque el flujo de agua subterránea se limita casi en su totalidad en las discontinuidades (permeabilidad secundaria). La determinación de las cantidades de flujo de agua ayuda a prevenir condiciones de construcción.
- L. Número de familias de discontinuidades: El número de familias de discontinuidades que se unen entre sí influye en la deformabilidad de la roca y el tamaño de bloques a formarse.
- M. Tamaño de bloque: Se refiere al tamaño de bloque que se forma por el espaciamiento y continuidad de los diferentes sistemas de discontinuidades.

El conocimiento de los temas señalados en este inciso ayudaran a caracterizar de mejor manera el macizo rocoso y la forma en cómo las condiciones geológicas afectan directamente los diseños tanto de las pantallas de impermeabilización como las mezclas de inyección a utilizar.

2.4 Inyección para el control de filtraciones.

Los trabajos que se realizan para restringir el flujo de agua bajo una presa implica la creación de un plano vertical impermeable, conocida como una pantalla o cortina de inyecciones. Cuando la roca inmediatamente debajo de una estructura está muy fracturada, la capa superficial regularmente es tratada hasta una profundidad de aproximadamente de 6 a 10 m. A este tratamiento se le conoce como inyección de consolidación.

Los trabajos que se realizan de forma similar en torno a la sección de un túnel o sobre su eje, se denomina encapsulación y el sellado de la parte superior de un túnel se le conoce como inyección de contacto. La intención es lograr la penetración de la lechada para el relleno de los vacíos existentes. La inyección con mezclas a base de

cemento se utilizan para disminuir el flujo de agua. Fracturas continuas y con defectos geológicos que facilitan el flujo de grandes cantidades de agua pueden ser rellenadas con un mínimo número de barrenos de inyección espaciados estratégicamente.

Sin embargo las fisuras con aberturas estrechas, aunque son capaces de permitir el paso el agua a una baja velocidad, puede ser muy difícil de inyectar y normalmente requieren un gran número de barrenos estrechamente espaciados.

La inyección de mezclas a base de cemento pueden ser fácilmente inyectadas en las discontinuidades que presenten aberturas grandes sin embargo para discontinuidades estrechas se requieren flujos de inyección más bajos y algunos constituyentes de la mezcla de menor tamaño de partícula como lo son cementos ultrafinos o soluciones químicas.

En el caso de construcción de presas es importante considerar los efectos de las filtraciones de agua y la presión que presentan. Esto regularmente es un problema de seguridad importante y si no se controla adecuadamente puede producir fallas catastróficas.

2.5 Pruebas de agua.

La capacidad para medir la cantidad de filtraciones una vez terminado el tratamiento con inyecciones es necesaria para evaluar la eficiencia de los trabajos. Lo ideal sería que se pudiera establecer la cantidad total de filtraciones o fugas de agua a través de un área determinada del macizo rocoso, pero esto es difícil de determinarse. La mayoría de presas son provistas de un sistema de drenaje aguas abajo y la medición de ese sistema puede revelar la cantidad total de filtraciones, aunque el origen y la ruta precisa del flujo de las mismas es muy difícil de determinar.

Las pruebas de agua son una herramienta útil, pero es importante tener una adecuada evaluación para cada proyecto e inclusive para cada barreno.

La facilidad de flujo del agua o la resistencia del mismo, durante una prueba de agua puede proporcionar una medida aproximada de la permeabilidad de la roca a inyectar. Las pruebas de agua pueden proporcionar un guía para la selección de la mezcla de inyección, se debe reconocer ante todo que las reologías de agua y mezclas de inyección son muy diferentes.

En la perforación de barrenos el agua es empleada para lavar las paredes de los mismos y para expulsar del interior del barreno los recortes de la perforación, esto debe realizarse en todos los pozos realizados. Es frecuente en la ejecución de estos trabajos que una gran parte o la totalidad del agua inyectada durante la prueba no retorne a la superficie, esto implicaría un defecto geológico importante, en estos casos se esperarían consumos de mezcla de inyección considerables y el beneficio de las pruebas de agua no contribuyen a dar información detallada de las condiciones del macizo rocoso. Por el contrario, si no hay pérdidas de agua durante la ejecución de las pruebas de inyección de agua, puede sugerir barrenos con fisuras estrechas y en este caso las pruebas de inyección de agua pueden proporcionar información valiosa. Algunas veces las pruebas de inyección de agua revelan condiciones del macizo rocoso favorables en donde el tratamiento con inyección no se justificaría.

La consistencia en los consumos de lechada entre barrenos y entre las diferentes etapas de inyección es variable. Las variaciones dependen de las propiedades de cada macizo rocoso en particular. Los patrones de comportamiento se establecen con el tiempo, proporcionando la base de las decisiones con relación a las pruebas de agua previamente realizadas.

Regularmente existen rocas con un tipo de discontinuidades casi o completamente abiertas, mientras que otras permanecen cerradas. En la figura 2.10 se ilustra esquemáticamente la variación de las vías de agua que aparecen con mayor frecuencia.

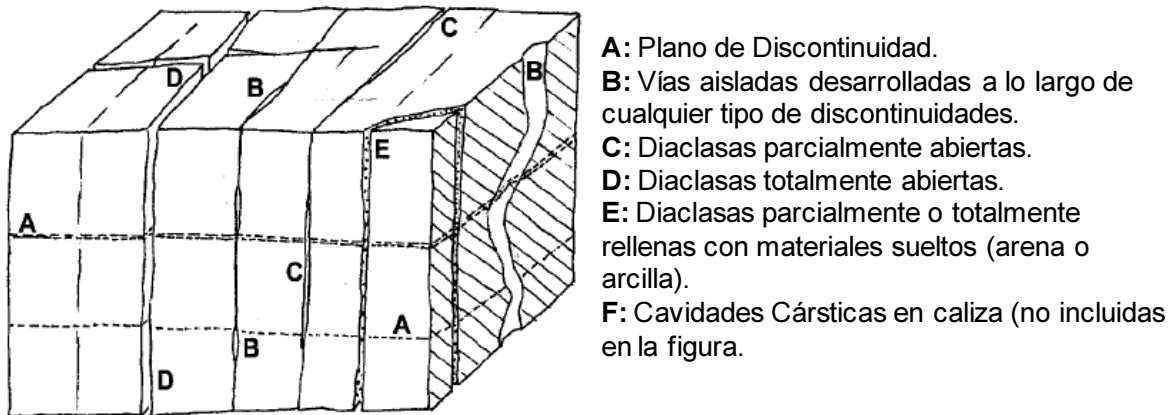


Figura 2.10. Ilustración esquemática de las vías de agua según su grado de apertura (Ewert.2009).

La figura 2.10 demuestra que en todos los macizos rocosos existe una variedad infinita de las vías que recorre el agua. De ser posible siempre se deberán examinar las vías de agua para conocer sus tipos y el ancho de las diaclasas por las cuales se desarrollan.

2.5.1 Unidad Lugeon.

Maurice Lugeon implemento la prueba o ensayo de agua como método para examinar y determinar la permeabilidad de un macizo rocoso. En 1933, clasificó una roca como prácticamente impermeable cuando absorbe en una prueba de agua menos de 1 l/m²·min a una presión de 10 bar. Desde entonces se utilizó el criterio Lugeon para decidir sobre la ejecución de inyecciones porque el método suponía que las absorciones mayores a la cantidad mencionada identificarían una roca permeable. Por tal motivo es de bastante interés determinar la geometría de las vías de agua que se desarrollan durante la ejecución de las pruebas Lugeon.

Después de examinarse y determinarse las formas más comunes de las vías de agua que se llegan a presentar en macizos rocosos, se elaboraron modelos de vías pequeñas en forma de tubos redondeados y diaclasas estrechas (Ewert, 1985). El diámetro mínimo de los tubos era de 1 mm y la fisura más fina tenía una apertura de 0.2 mm y un ancho de 20.8 mm. Ambas piezas tenían una longitud de 300 mm.

Tanto el tubo como la diaclasa finas absorbieron en los experimentos 1 l/min a una presión de 10 bar, es decir la cantidad que corresponde a la Unidad Lugeon. Con base a los resultados obtenidos por Ewert en 1985 se concluyó lo siguiente:

- Cantidades bajas de unidades Lugeon ≤ 5 UL, son absorbidas por vías aisladas diminutas.
- Cantidades altas son ambiguas ya que pueden ser absorbidas por una multitud de fisuras muy pequeñas, conductos aislados grandes o fisuras alargadas.

Es importante señalar que las absorciones grandes pueden ser causadas por una multitud de combinaciones de vías de agua interceptadas a lo largo de un tramo ensayado y por lo tanto la obtención de Unidades Lugeon altas no caracterizan con claridad la geometría de las discontinuidades.

La figura 2.11 confirma la ambigüedad de los resultados Lugeon altos. En donde se ejemplifica:

- Que 6 conductos de 1 mm absorben la misma cantidad de agua que un conducto de 2 mm.
- 10 a 2 mm producen el mismo valor Lugeon que 3 a 4 mm o 1 a 8 mm.

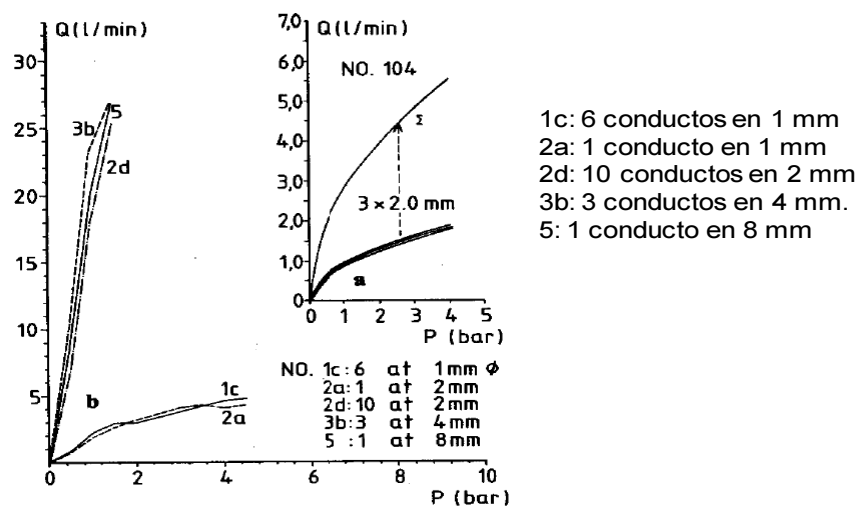


Figura 2.11. Ambigüedad de resultados en pruebas Lugeon (Ewert, 1985).

Con los resultados experimentales se comprueba que muchas diaclasas diminutas en conjunto pueden absorber la misma cantidad de agua que una grieta amplia.

El ensayo Lugeon se realiza en el interior de sondeos o perforaciones y permite calcular semicuantitativamente la permeabilidad de los macizos rocosos, en cualquier litología y estado de fracturación. El ensayo consiste en introducir a presión constante (10 kg/cm^2) en el sondeo, midiendo el consumo de agua durante un periodo de 10 min. Generalmente se ensayan tramos de 5 m de barreno, aislando el tramo de ensayo del resto de la perforación. El ensayo se puede realizar mediante dos obturadores; en este caso el ensayo se conoce también como packer test.

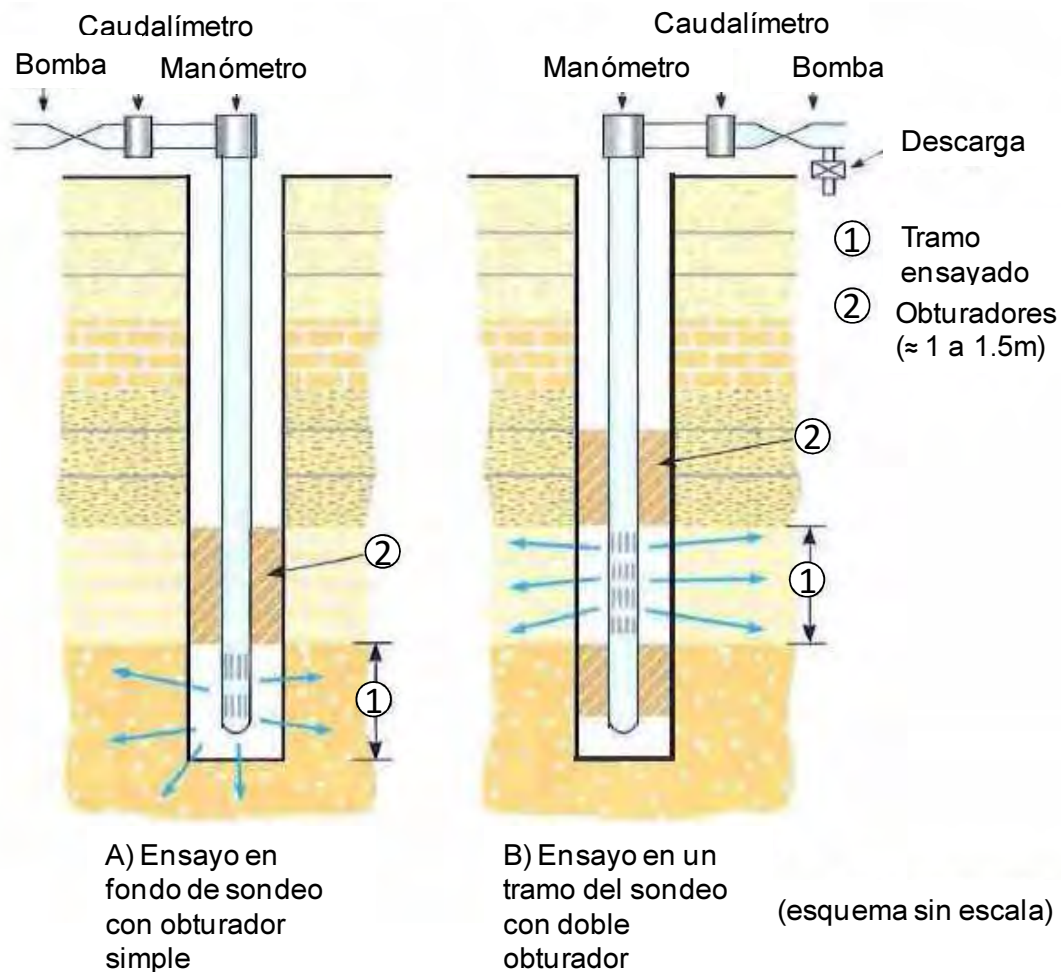


Figura 2.12. Ensayo Lugeon. A): Obturador Simple B): Obturador doble (González 2002).

La presión se aplica en escalones sucesivos de carga y descarga de 0, 1, 2, 5 y 10 kg/cm² respectivamente, manteniendo la presión en cada escalón durante 10 minutos. Siempre deben alcanzarse los 10 kg/cm², excepto en rocas blandas en las que se puede producir fracturación hidráulica antes de llegar a dicha presión. Los valores de permeabilidad obtenidos a 5 y 10 kg/cm² no pueden extrapolarse linealmente para presiones mayores.

La unidad de medida del ensayo es el Lugeon que corresponde a una absorción de agua de 1 litro por metro de sondeo y por minuto, realizando el ensayo a 10 atmosferas de presión durante 10 minutos. Una Unidad Lugeon equivale aproximadamente a un coeficiente de permeabilidad de 10⁻⁵ cm/s (U.L. = 1 l/m x min = 10⁻⁵ cm/s).

Los resultados de esta prueba se presentan en función de la profundidad figura 2.13, en unidades Lugeon o en consumo en l/m x min en función de la presión ensayada.

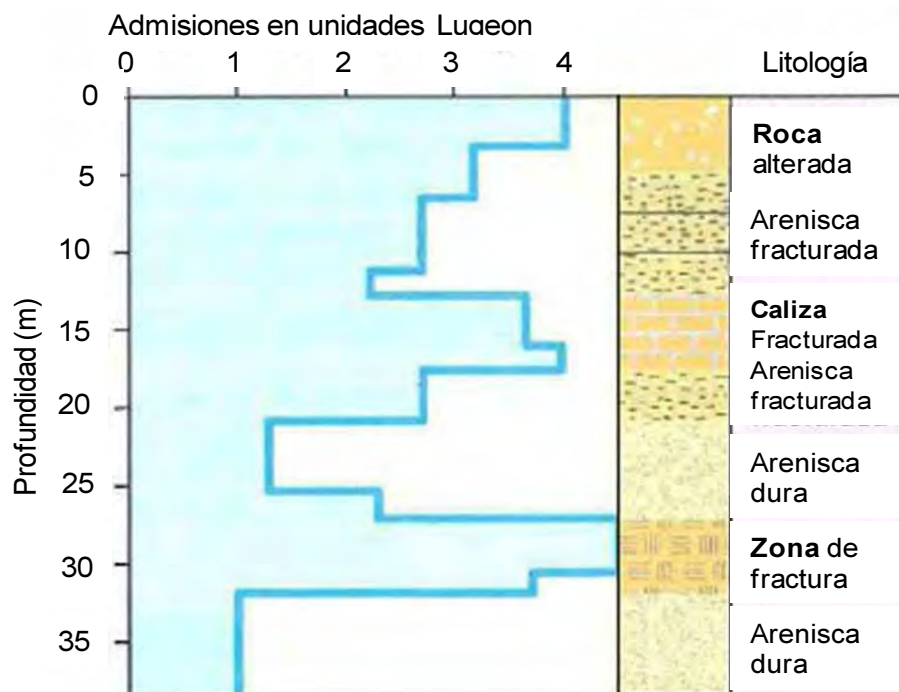


Figura 2.13. Ejemplo de representación de Ensayo Lugeon en un sondeo. (González 2002).

La forma de las curvas de gastos de absorción en función de la presión de inyección es muy variable. En la figura 2.14 se muestran varias curvas presión- caudal y en la tabla 2.8 se incluye una clasificación de los tipos de macizos rocosos según su permeabilidad.

Debido a que la relación entre gastos y presiones no es lineal, resulta inadmisibles extrapolar los datos obtenidos, por lo que en los casos en donde no se alcancen presiones de 10 kg/cm^2 no deben de extrapolarse los valores.

A través de los gráficos indicados en la figura 2.14 puede hacerse la predicción teórica del proceso de apertura y cierre de las fisuras por efecto de las presiones de inyección cuando el proceso se esté realizando.

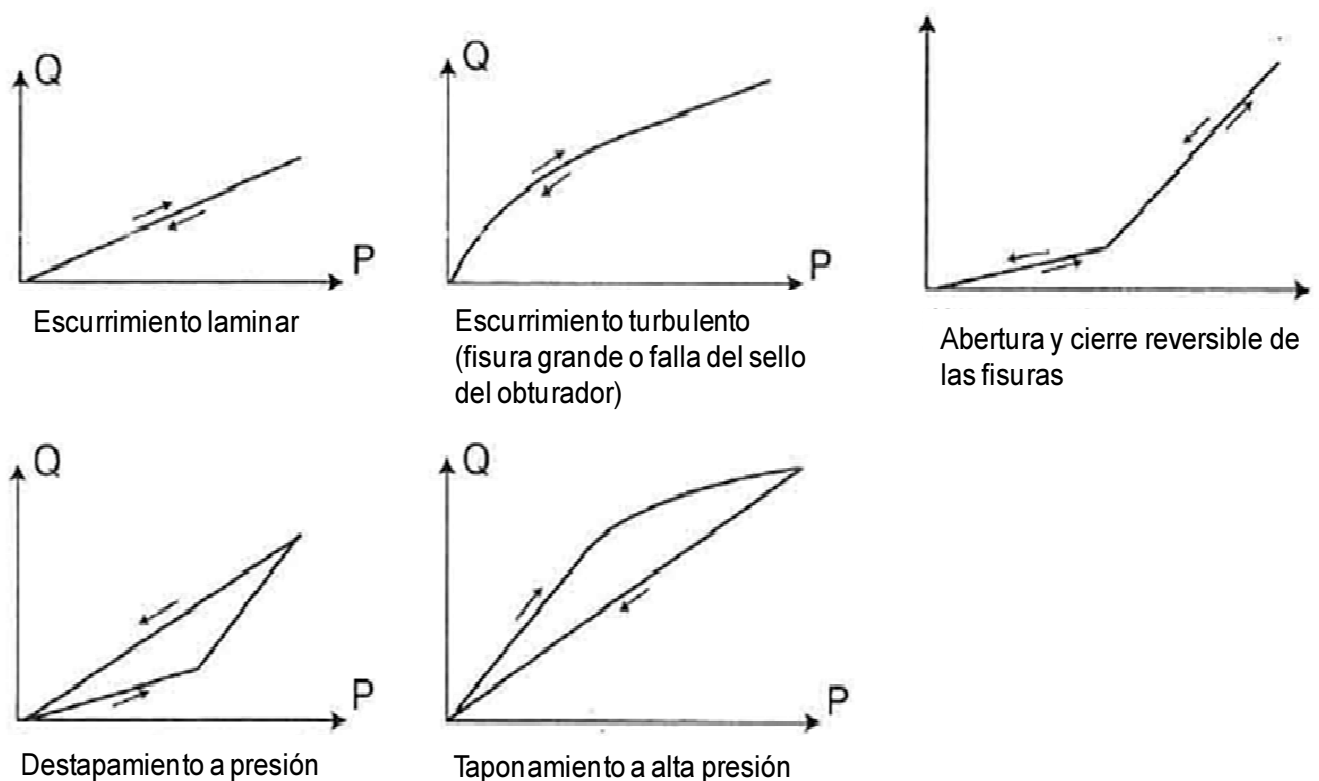


Figura 2.14. Relaciones Presión-Caudal en Ensayo Lugeon (Marsal y Resendiz 1975).

Tipo de Macizo	Unidades Lugeon	Presión (Kg/cm ²)
Muy Impermeable	0-1	10
Prácticamente Impermeable	1-3	10
Permeable	>3	10
	1.5-6	5
Muy Permeable	>3	10
	>6	5

Tabla 2.8. Clasificación de Macizos rocosos en función de la permeabilidad (Olalla y Sopeña 1991).

2.6 Inyecciones de consolidación.

Las inyecciones de consolidación se realizan en rocas débiles o altamente fracturadas cerca de la superficie del suelo. El objetivo principal es consolidar la roca superficial en una masa monolítica, capaz de proporcionar una mejor condición del macizo rocoso para la implementación de la pantalla impermeable. En la cimentación de presas, la inyección de consolidación se realiza para “sellar” cualquier defecto del macizo rocoso y fortalece la roca de cimentación para la presa u otras estructuras.

2.7 Metodologías de inyección.

Existen tres metodologías establecidas para la construcción de pantallas impermeables. Aunque existen una controversia entre cual de los 3 métodos es el mejor en la práctica de la inyección, la realidad es que cada uno tiene sus ventajas y limitaciones, sin embargo cualquiera puede realizar un trabajo de calidad aplicado a las condiciones que se requieran en cada caso.

2.7.1 Tecnología Convencional.

La tecnología de la inyección convencional utiliza un sistema de inyección circulante, un límite de presión y una lechada a base de cemento y agua. Sin embargo se ha registrado el uso de lechadas de cemento con una relación agua/peso de cemento por arriba de 10:1, en este tipo de mezclas no se utilizan aditivos y son mezclas considerablemente inestables. Este efecto debe ser eliminado durante la inyección para lograr resultados satisfactorios.

La inyección convencional contempla mezclas finas para el inicio de la inyección e inyectadas lentamente en el barreno, la velocidad de la inyección es aumentada de forma constante hasta que la presión máxima determinada se alcanza. Esta presión se mantiene durante todo el proceso de inyección, primero variando la velocidad de la inyección y después se va espesando la mezcla cuando sea necesario. El espesamiento de la mezcla de inyección se basa en la velocidad de la inyección y el ajuste de la mezcla consiste simplemente en aumentar o disminuir la relación agua-cemento.

Una de las desventajas de este método es que los ajustes a las mezclas son difíciles de realizar, ya que se desconocen las condiciones de la mezcla que se encuentra en el agitador y que es necesario saber para agregar la cantidad de cemento necesaria para lograr la consistencia deseada. Esto es difícil de realizar en campo, por lo que el uso de tablas con dosificaciones establecidas se vuelve una necesidad importante para la toma de decisiones. Refiriéndose a la importancia de estos ajustes Houslby (1990) proporcionó gran cantidad de tablas con diferentes dosificaciones para realizar el engrosamiento o adelgazamiento de lechadas. Desafortunadamente puede pasar mucho tiempo entre decidir la modificación de la mezcla utilizada registrándose consumos considerables durante el periodo de indecisión.

Algunos Ingenieros consideran que es preferible inyectar mezclas delgadas ya que la utilización de mezclas viscosas impide que sean inyectadas con facilidad, pero esto se ha comprobado que no es así. La penetración de la lechada depende más del tamaño de grano de cemento y de la ausencia de las partículas floculadas. La

inyección de una menor cantidad de lechada que lleva una cantidad de cemento considerable es mejor que la inyección de una mayor cantidad de mezcla compuesta principalmente de agua.

Por tal motivo el uso de mezclas inestables es discutible y cuestionado por muchos y esta práctica se utiliza solo en casos muy específicos ya que implica costos altos en su aplicación.

2.7.2 Teoría de la viabilidad.

Aceptando que la penetrabilidad del agua en una formación rocosa puede ser muy diferente con respecto a la penetración de la lechada de cemento, Naudts (1995) propuso que la viabilidad de una lechada de cemento determinada con respecto a una determinada roca es importante. Debido a que una lechada de cemento dada es fácilmente inyectada en una formación litológica no significa que funciona para todas las formaciones litológicas. Por tal motivo, la información geológica y la información de la lechada de inyección deben ser combinadas.

Debido a que es imposible cambiar de formación litológica una vez que se ha establecido la ubicación del proyecto a ejecutarse, se debe ajustar la mezcla de inyección para proporcionar propiedades más viables a la penetración en un macizo rocoso en particular.

Viabilidad es la capacidad que tiene una lechada en particular de penetrar en las discontinuidades y otros defectos geológicos impregnados con agua. La viabilidad está definida por el coeficiente de viabilidad (A_c) de la lechada, que se expresa de la siguiente manera:

$$A_c = \frac{Lu_{gr}}{Lu_{wa}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

A_c : Coeficiente de viabilidad.

Lu_{gr} : Permeabilidad Lugeon con la mezcla de inyección.

Lu_{wa} : Permeabilidad Lugeon con agua.

La reología de la lechada de inyección se debe de ajustar a fin de mantener tan alto como sea posible el coeficiente de viabilidad. Esto debe ser mayor a un 75%, el monitoreo en tiempo real mediante equipos de computo es necesario para evaluar en todo momento la viabilidad en curso. Si el coeficiente desciende a un nivel inaceptable, se deberá realizar un cambio a una mezcla más favorable.

Naudts pone gran énfasis en la reología de la lechada y recomienda mezclas estables, para una inyección óptima. Seis o más componentes pueden ser incluidos, junto con uno o más aditivos fluidificantes. Las mezclas deben evaluarse con pruebas exhaustivas, incluyendo, como mínimo, viscosidad en el cono Marsh, y las propiedades de coeficiente de filtrado.

Se cree que el porcentaje de permeabilidad al agua por encima de la permeabilidad medida con mezcla de cemento revela discontinuidades no inyectadas, lo que resulta en una permeabilidad secundaria. Aunque esto puede ser racional, existe la posibilidad de que muchas de las aberturas originalmente abiertas por la filtración de agua estén aisladas o bloqueadas por la lechada de cemento, a pesar de no estar la abertura completamente llena. Es común encontrar discontinuidades más grandes conectadas a discontinuidades más finas que son penetradas por el agua. Sin embargo tales discontinuidades pudieron haber sido selladas fácilmente por la inyección de lechada de cemento.

Este método al tener varias combinaciones de lechadas de inyección diferentes, presenta complicaciones en las obras, es posible tratar de llevar a cabo el método, pero muchas veces es contraproducente y puede complicar un trabajo más de lo necesario.

Debido a que el uso de las mezclas de inyección estables y equipo de monitoreo en tiempo real son herramientas que proporcionan ventajas muy rentables, estas herramientas deben de ser ampliamente utilizadas. Sin embargo, debe reconocerse la enorme heterogeneidad de la roca en la que se realiza la inyección y por lo tanto el uso de soluciones para todo tipo de inyecciones del tipo "cookbook" (receta de cocina) debe ser cuestionado. El mejoramiento de la tecnología es necesario, el

conocimiento, la historia y el comportamiento del macizo rocoso que se esté particularmente tratando es necesario, por lo que el buen criterio seguirá siendo una parte esencial de todos los procesos de inyección.

2.7.3 Numero de intensidad de Inyectado (GIN).

El concepto de intensidad de inyectado fue propuesto por Lombardi y Deere (1993). Ellos reconocieron que la presión de inyección puede ser utilizada de manera segura sin hidrofracturar o dañar el macizo rocoso. El número de intensidad de inyectado (Grout Intensity Number) se establece como el producto del volumen inyectado por la presión de inyección en un instante de tiempo.

El uso del método GIN involucra:

- El uso de una mezcla única estable.
- Una constante y uniforme velocidad de inyección.
- Una continua evaluación de los parámetros durante el proceso de inyección.
- Limitación de volumen cuando se registren presiones bajas.
- Volúmenes de inyección bajos cuando se registran presiones altas.
- Incrementos de presión conforme la roca mejora.
- Prevención de daños originados por la combinación de una presión alta con un volumen alto.

En el capítulo 5 se abordará con mayor detalle este proceso de inyección y se indicarán las ventajas que tiene la aplicación de esta metodología.

3 CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOHIDROLÓGICAS.

Como se ha mencionado, el objetivo de una cortina de inyecciones regularmente es reducir las filtraciones a través de la cimentación de la presa, en algunos casos, mediante el sellado de discontinuidades. Las inyecciones de consolidación en la cimentación de presas pueden ser realizadas para complementar el efecto de la pantalla de inyecciones en la zona de desplante, pero más comúnmente para consolidar y fortalecer la cimentación mediante inyecciones, al rellenar fracturas abiertas y de este modo prevenir los movimientos relativos entre las juntas bajo la acción de cargas estructurales.

En cualquiera de estas aplicaciones, un entendimiento de las condiciones geológicas e hidrogeológicas es esencial para el diseño de un programa de inyecciones ya que se podrá optimizar el diseño para identificar e interceptar las posibles fugas de agua, tratarlas apropiada y eficazmente.

Una comprensión de las condiciones geológicas del sitio y sus implicaciones en la ingeniería puede ser una parte esencial de un proceso en el que se decide realizar algún tratamiento correctivo o un tratamiento con inyecciones. El entendimiento inicial o la interpretación de las condiciones geológicas debe ser continuamente actualizado durante el curso de los trabajos y el programa de inyecciones debe ser revisado en consecuencia.

Un diseño adecuado de los tratamientos con inyección es una extensión de los programas de exploración ya que cada barreno exploratorio tiene el potencial para generar información crítica acerca de las condiciones del macizo rocoso.

3.1 Revisión de la Geología Regional.

Como se ha comentado antes, un entendimiento de la geología regional en el que el sitio de la presa es localizado, tal como se obtiene a través de una revisión de los mapas y reportes geológicos disponibles puede ser muy importante para el diseño de los programas de inyección tal como el diseño de la presa misma.

Este entendimiento allanará la manera de anticipar que tipo de permeabilidad, discontinuidades geológicas o defectos geológicos pueden existir en el sitio de construcción propuesto. Cada tipo de ambiente geológico posee su propio conjunto de problemas. Ambientes geológicos complejos, pueden ser un desafío para el diseñador de la cortina de inyecciones.

La revisión geológica regional puede revelar la existencia de una o más particularidades en la misma formación geológica, dentro del cual el sitio de presa se encuentra. En este caso el equipo de diseño debe tener todos los datos disponibles de las condiciones de cimentación, tratamiento de la cimentación y problemas de filtraciones bajo condiciones de operación.

3.2 Fotointerpretación.

Estudios de fotografías aéreas bajo un escaneo de estereoscopios pueden revelar la evidencia de patrones de fracturas regionales que pueden controlar el movimiento de agua subterránea bajo condiciones naturales y que pueden proporcionar vías por las cuales se pierda el agua del embalse siguiendo la construcción de la presa.

Estos estudios pueden además revelar estratigrafía o geología estructural que pueden tender a tener un potencial para contribuir a la pérdida de agua desde el embalse a través de la cimentación de la presa.

3.3 Mapeo Geológico.

3.3.1 Mapeo Geológico antes de la construcción.

El mapeo geológico ordinariamente se realiza como parte del diseño de los programas de exploración para una presa. La escala del mapeo del sitio de presa debe ser lo suficientemente amplia para mostrar la localización y contornos de todos los afloramientos cerca de la zona de cimentación y en la zona de cimentación. Debido a que las juntas son la contribución universal para potenciales filtraciones de

agua en la cimentación de la presa, anotaciones de las mediciones comunes en las líneas de contorno pueden ser muy importantes para el diseño de un programa de inyecciones. La localización y descripción de cualquier brote de agua en el área que está siendo mapeada deberá ser anotada en el mapa geológico porque puede ser necesario para indicar un tratamiento especial para el control de flujo durante la construcción. Un buen mapeo geológico del área de fundación planeada es esencial para la selección de localizaciones apropiadas para investigaciones exploratorias. A falta de suficientes afloramientos de roca el desarrollo de un buen mapeo geológico puede ser necesario para crear exposiciones de roca por medio de trincheras exploratorias.

3.3.2 Mapeo Geológico durante la construcción.

El mapeo geológico del área de la presa debe realizarse después de que se ha realizado la excavación y limpieza. Preferiblemente a una escala adecuada.

La localización de fallas, fracturas, zonas de deformación, contactos, cavidades, filtraciones y juntas prominentes deben ser identificadas en un mapa geológico.

El mapa geológico deberá ser usado para ayudar a sectorizar zonas de tratamiento especial, se deben realizar también secciones geológicas, esto ayuda a identificar áreas que requieran tratamiento, tales como concreto lanzado, concreto dental, o concreto de reposición o regularización.

3.4 Investigación Geofísica.

Las investigaciones geofísicas como la refracción sísmica, son y deben de ser usadas para presentar una cierta configuración de la superficie de cimentación y la localización de barrenos. En muchos casos un perfil bastante detallado puede ser obtenido mediante el uso de geófonos de espaciamiento cerrado. Este perfil puede ser importante para diseñar el tratamiento con inyecciones porque topografías complejas en los sitios del proyecto requieren equipo especial para su descripción.

Métodos geofísicos han sido utilizados exitosamente para localizar fracturas, zonas acuíferas en el sitio de presa, entre ellos, investigación por conductividad eléctrica, investigaciones poco profundas de reflexión sísmica y radares.

Investigaciones con Cross Hole o Down Hole pueden dar datos valiosos para el diseño de la cortina de inyección en algunos sitios.

3.5 Investigaciones Directas.

3.5.1 Trincheras de exploración.

La exposición de la superficie de cimentación por la realización de trincheras exploratorias es muy útil para el mapeo de las discontinuidades geológicas y para definir la orientación y realizar una descripción más adecuada. Además pueden proporcionar una base parcial para la evaluación de la inyectabilidad cerca de la superficie de roca. Inclusive en caso de que la roca no se observe inyectable puede continuarse excavando hasta encontrar la roca que sea inyectable.

3.5.2 Barrenos de exploración.

Los barrenos de exploración es la característica más importante de la exploración a superficie para el diseño de un programa de inyecciones en un sitio de presa.

La profundidad de los barrenos de exploración no debe basarse en una relación preconcebida a la altura de la estructura prevista, sino que su objetivo debe ser el llegar a un horizonte relativamente impermeable. (En algunos casos, como en terreno cárstico, tal horizonte puede que no exista).

Es importante señalar que la orientación e inclinación de los barrenos juega un papel fundamental para determinar la caracterización geológica con mayor precisión, es un error realizar únicamente perforaciones verticales ya que se pueden realizar proyecciones erróneas o determinar contactos litológicos de forma inadecuada.

3.5.3 Exploración por socavones o galerías de exploración.

Son túneles de sección reducida excavada generalmente en sentido horizontal. La profundidad del socavón depende de los objetivos geológicos y las dimensiones de la sección del tipo de pruebas que se realizarán dentro de ellos, cuando solo se emplean para reconocimiento geológico son de 1.5 m a 2 m de ancho por 1.5 m a 2.5 m de altura.

3.6 Estudios Geohidrológicos.

Los estudios Geohidrológicos deben ser conducidos a donde los resultados de los estudios geológicos preliminares indicaron presencia de condiciones geológicas potencialmente conductivas, para condiciones de alta permeabilidad en el sitio de presa o en el área de embalse. En general los estudios hidrogeológicos deben ser conducidos para responder las siguientes preguntas:

- ¿La superficie del río o arroyo alimenta la capa freática en condiciones naturales?
- ¿Existe una condición relativamente superficial del agua subterránea?
- ¿Cuál es la relación de la superficie piezométrica con respecto a la superficie del terreno natural en el sitio propuesto de la presa?
- ¿Cuáles son los niveles piezométricos por debajo de la presa y por debajo del área de embalse?
- ¿Cuál es la variación estacional de los niveles piezométricos por debajo de la presa?
- ¿Cuál es la dirección y la velocidad del flujo subterráneo?
- ¿La elevación máxima del embalse prevista será mayor que la superficie piezométrica en cualquier época del año?

Las investigaciones para responder estas preguntas pueden ser las siguientes:

- Mediciones del flujo en superficie en sitios localizados dentro del área de embalse y aguas abajo del sitio de presa propuesto.

- Delimitación de las depresiones cerradas en canales de intermitente o efímera corriente dentro de la zona de embalse.
- Mapeo geológico regional para determinar las zonas de afloramiento potencialmente permeables, unidades geológicas o discontinuidades que subyacen en el sitio de presa o área de embalse.
- Inyección de trazadores (colorantes) en los barrenos de exploración perforados en el sitio de presa y en una localización determinada dentro del área de embalse para determinar en donde el agua subterránea que contiene los trazadores fluye de los manantiales.
- Pruebas de permeabilidad Lugeon en barrenos exploratorios.

La importancia de la geohidrología influye en el diseño de la pantalla de inyecciones, ya que se puede analizar si la cortina de inyecciones reducirá el potencial de filtraciones a un nivel tolerable, saber si es necesario realizar un tratamiento con inyecciones en la cimentación de la presa, si se puede ejecutar el tratamiento de impermeabilización desde la superficie de desplante o es necesario excavar galerías de inyección, saber si la longitud total de la cortina de inyecciones es la adecuada para alcanzar los objetivos del diseño evitando con esto efectos adversos inaceptables e identificar si será necesario utilizar materiales o técnicas de inyección especiales.

La importancia esencial de las condiciones hidrogeológicas es identificar las siguientes condiciones relevantes:

- Intercalación de capas de menos permeabilidad que puede permitir limitar la extensión de una pantalla de inyecciones hasta eliminarla.
- La existencia de suelos aluviales de menor permeabilidad que participa en la reducción de la subpresión.
- La existencia de zonas individuales de menor permeabilidad, como fallas, por ejemplo, que pueden asumir la función de la pantalla.
- La morfología del agua subterránea que quizás funcione como barrera hidráulica.

4 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UNA CORTINA DE INYECCIONES.

La mayoría de los macizos rocosos se encuentran fracturados y las diaclasas están más o menos abiertas. El embalse de una presa provoca a través de la cortina un gradiente hidráulico que inicia un flujo de agua desde el embalse hacia aguas abajo. Tal flujo puede dar como resultado:

- Perdida de agua del embalse.
- Riesgo de erosiones y tubificaciones en el subsuelo.
- Una posible subpresión.

Cada uno de los factores señalados y la combinación de los mismos pueden perjudicar el funcionamiento de la presa, que en la mayoría de ocasiones requiere de una impermeabilización. Con base a los resultados de las pruebas de agua realizados durante las etapas de exploración se determina que tratamiento será necesario realizar, que en la mayoría de los casos son inyecciones de mezclas a base de cemento.

En este punto tenemos dos situaciones a considerar:

- El grado de impermeabilización depende de la inyectabilidad individual.
- La geometría de los vacíos en el macizo rocoso que requieren un tratamiento bien adaptado.

4.1 Pruebas de inyección.

Regularmente es necesario realizar pruebas de inyección en el sitio antes de finalizar el diseño de la cortina de inyecciones y de la presa. Entre los más importantes parámetros de diseño que pueden determinarse, únicamente mediante el programa de pruebas, es la permeabilidad promedio del macizo rocoso que puede ser alcanzada por la inyección. La información obtenida, además de ayudar a definir el diseño de la cortina de inyección y el procedimiento para su ejecución, comúnmente

dará las bases para evaluación de los equipos y mano de obra a utilizar. Los resultados, además, ayudarán a estimar las cantidades de perforación e inyección a realizarse.

El procedimiento convencional para una prueba de inyección consiste en efectuar un segmento de una pantalla de inyección, usando un método de espaciamiento dividido (Nonveiller, 1970). El espaciamiento primario se elige de manera que las inyecciones realizadas en los primeros barrenos no se superpongan o se traslapen. Los barrenos primarios son perforados, probados con agua e inyectados a una profundidad en que la permeabilidad es más baja que la máxima pre-establecida, comúnmente a permeabilidades en el rango de 1 a 10 Unidades Lugeon (UL). La distancia entre los barrenos de inyección se reduce en pasos sucesivos hasta que el consumo esperado o deseado es alcanzado antes de llegar a la inyección de los barrenos de la secuencia final. Puede darse el caso que no hay reducción en la permeabilidad o toma de inyección en la primera serie de barrenos intermedios, en este caso, estos barrenos representan una etapa primaria, en lugar de un espaciamiento secundario. Nonveiller, (1970) indica que de los ensayos de inyectabilidad deben derivarse los siguientes resultados:

- Reducción del coeficiente de consumo o relación del promedio de consumos antes de la prueba de inyección y después de cada etapa de la prueba de inyección.
- El consumo promedio de inyección para cada etapa en la secuencia de inyección.
- El espaciamiento máximo entre los centros de los barrenos inyectados.

La utilidad de los resultados de las pruebas de inyección dependerá en parte de la complejidad geológica del sitio. Nonveiller (1970) señaló que en las condiciones geológicas más complejas puede ser apropiado realizar varias pruebas de inyección sobre la ubicación de condiciones típicas con la finalidad de disponer de datos confiables para el diseño de la cortina en todos los diferentes tipos de roca en un sitio.

4.2 Profundidad de la cortina de inyecciones.

La profundidad de una pantalla de inyecciones en Estados Unidos está basada en la geometría y una fórmula que considera la carga hidráulica prevista, generando una pantalla menos profunda que la considerada en la práctica europea la cual contempla que la profundidad de la pantalla de inyecciones debe ser igual a la altura de la Presa, Ewert (2003).

El objetivo principal de la fórmula es alargar el conducto de filtración a un valor compatible con el ancho de la presa o el ancho del núcleo. Sin embargo aunque esta determinación puede proteger a la presa de los efectos de filtración, la cantidad de filtración no necesariamente será eliminada. Sin embargo si el agua puede provocar el desarrollo de erosión interna a una profundidad mayor que lo que indica la fórmula para la determinación de la profundidad de la cortina de inyecciones, se deberá profundizar la pantalla hasta una zona relativamente impermeable.

Sin embargo, para evitar la construcción de una pantalla de inyección parcial o totalmente "colgada", las condiciones geológicas en lugar de la geometría y la carga nominal desde la superficie a la base, debe ser el principal factor en la selección de la profundidad de la pantalla de inyecciones en todos los casos. Esta consideración, puede conducir a un diseño de una pantalla de inyecciones asimétrica.

La desviación de barrenos puede ser un importante control a verificar ya que a grandes profundidades los barrenos pueden presentar desviaciones excesivas y pueden dejar "ventanas" entre barrenos. La magnitud de la desviación dependerá de las condiciones geológicas, del equipo de perforación utilizado y del cuidado con el que la perforación se realiza.

Ewert recomienda que la profundidad debe ser función de las condiciones hidrogeológicas del sitio, el factor esencial de este concepto es la profundidad donde empieza la zona de la misma impermeabilidad de la pantalla instalada. El concepto impermeabilidad debe ser comprendido en un sentido relativo – Por ejemplo: la permeabilidad de 1×10^{-5} m/s será demasiado permeable para las condiciones de una

cierta cortina, mientras que 1×10^{-7} m/s será suficientemente impermeable para reducir las pérdidas de agua y la velocidad de percolación.

4.3 Longitud y espaciamiento de los barrenos de inyección.

Para prevenir las filtraciones alrededor de la presa, la pantalla de inyecciones se debe extender sobre las márgenes a una distancia apropiada.

Regularmente no se conocen los lugares específicos de las fisuras, grietas o conductos, por tal motivo se desarrolló la idea de inyectar por etapas:

- Se perforan barrenos de primera etapa con suficiente distancia entre ellos, regularmente la distancia varía entre 8 y 12 m.
- Después se realizan los barrenos secundarios intermedios a los primarios.

En la figura 4.1 se ilustra este sistema, el método de inyecciones entre series controla las cantidades inyectadas entre cada etapa, para verificar si existe una disminución de los consumos de inyección lo que indica un cierre progresivo de fisuras.

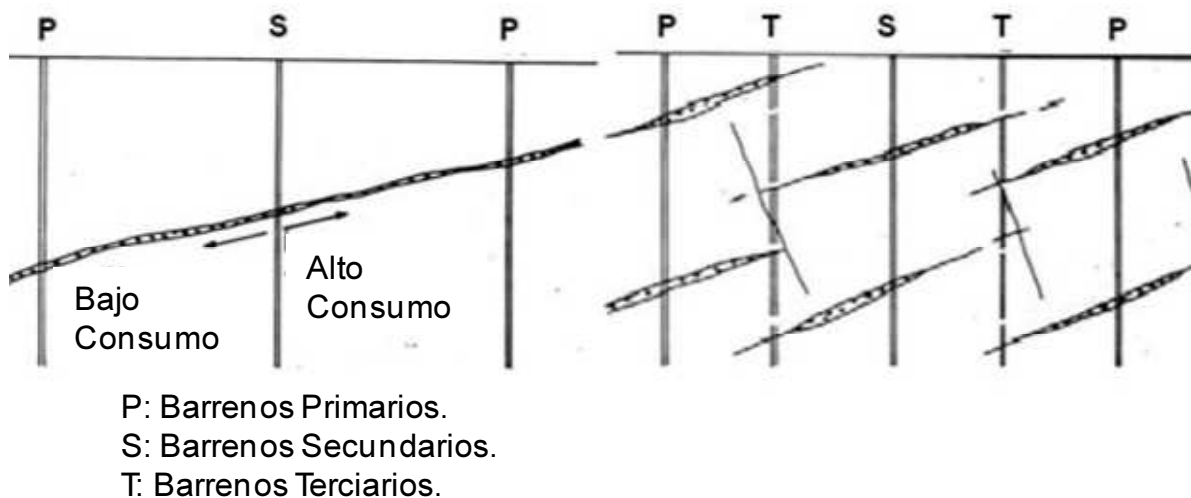


Figura 4.1. Relación entre la geometría de las diaclasas y el espaciamiento entre barrenos. (Ewert, 2009).

La geometría de las diaclasas determina la distancia requerida entre barrenos, el número de etapas y las cantidades absorbidas por etapas sucesivas.

Para economizar un programa de inyección se practica para barrenos de etapas sucesivas el sistema de “profundidades escalonadas”, en combinación con incremento de presiones. Los barrenos primarios se realizan hasta la profundidad de proyecto, mientras que los barrenos de las etapas siguientes se utilizan profundidades más cortas.

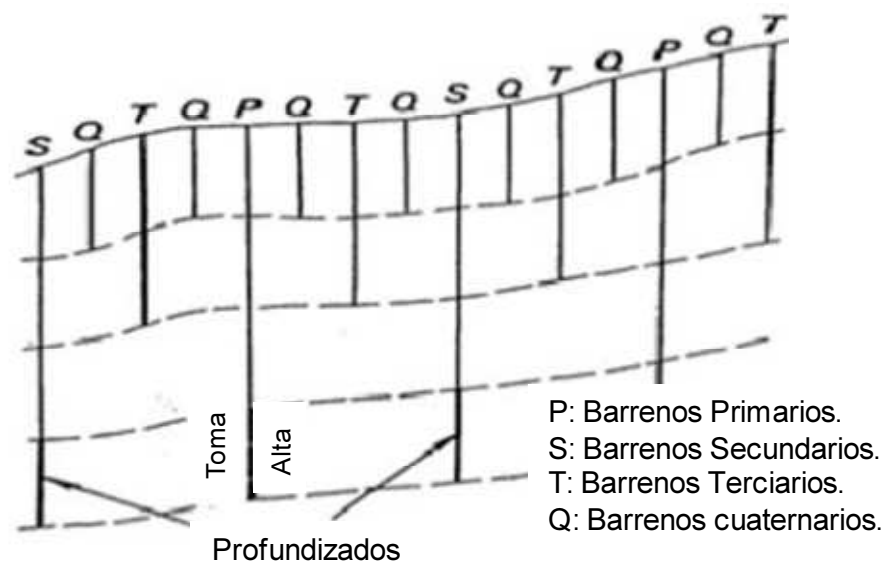


Figura 4.2. Agrupación de los barrenos de las etapas sucesivas en el concepto de profundidades escalonadas (Ewert, 2009).

Este concepto sirve solo para una roca con discontinuidades que no son susceptibles al hidrofracturamiento y que poseen una extensión que es mayor que la distancia entre los barrenos vecinos. Las rocas que son susceptibles al hidrofracturamiento no soportan presiones altas. Tampoco es apropiado el concepto para macizos rocosos con diaclasas cortas porque los barrenos secundarios y terciarios no las interceptarían y por lo tanto resultaría una pantalla con ventanas abiertas.

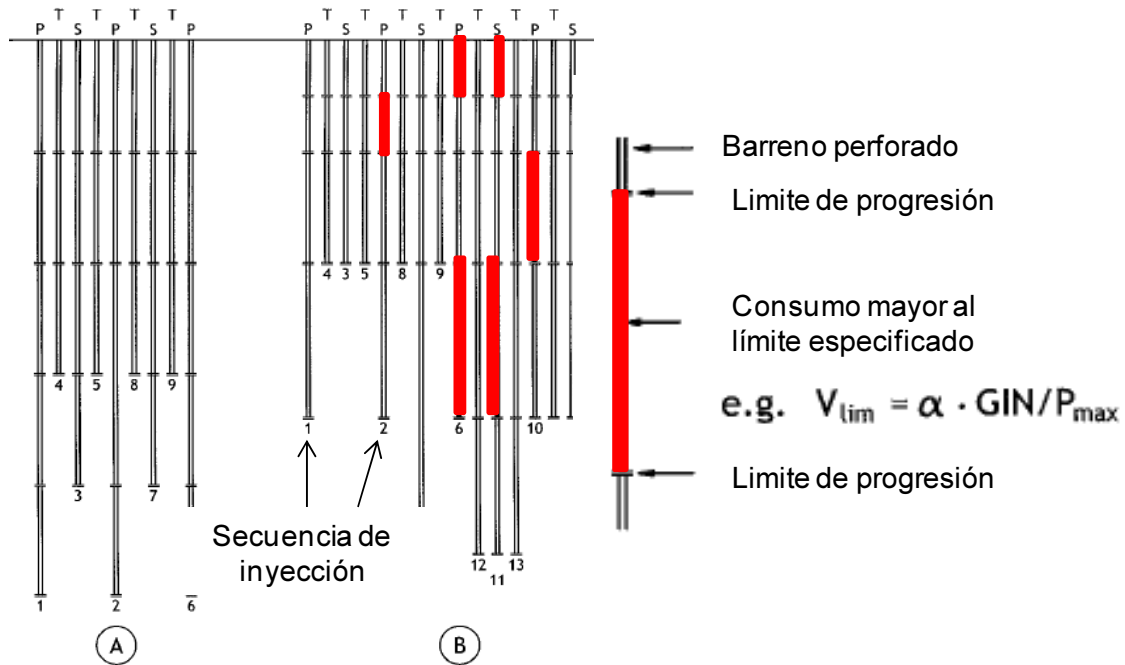


Figura 4.3. Diseño de una cortina de inyecciones (A) Diseño tradicional, (B) Diseño adaptado en cada etapa basado en el consumo obtenido en los barrenos cercanos de etapas inyectadas previamente. (Lombardi, 2003).

En conclusión la distancia entre los barrenos de perforación así como la longitud de los barrenos de inyección y las presiones de inyección pueden ser utilizadas para optimizar el diseño.

Con respecto al ancho de la pantalla de inyecciones existen dos factores que determinan la dimensión apropiada:

- La extensión y la amplitud de las fisuras.
- El gradiente hidráulico máximo.

En el caso de fisuras de extensión moderada (pocos metros) y de poca amplitud (< 1 cm), que además son aproximadamente iguales, se logra una pantalla traslapada que funciona como pared impermeable por medio de una fila de barrenos. Para que este caso se cumpla será necesario:

- Que el macizo rocoso no sea susceptible al hidrofracturamiento, esto implica que el macizo rocoso puede permitir presiones de inyección altas.
- No contempla grietas amplias que contengan materiales erosionables debido a que no soportarían gradientes hidráulicos altos.

Para el caso de grietas amplias y largas con combinación con diaclasas cortas o para el caso de la presencia de grietas amplias rellenas de materiales sueltos, una pantalla de una sola fila no basta y el número de filas dependerá de los defectos geológicos y el máximo gradiente hidráulico aceptable.

Generalmente se utilizan tres líneas de inyección, se empiezan los trabajos en la fila de aguas arriba, después se ejecuta la fila de aguas abajo y se termina con la impermeabilización de la fila central. En cada fila se aplica la misma secuencia de barrenos primarios, secundarios, terciarios, etc.

4.4 Orientación de los barrenos.

Estas características de la pantalla dependen de la densidad, rumbo y echado de las discontinuidades. La dirección de las perforaciones se proyecta de tal forma que éstas crucen el mayor número de discontinuidades y en la forma más adecuada para que la mezcla de inyección penetre con facilidad. Lo ideal sería que las perforaciones atravesaran los planos en forma normal, lo cual es poco factible de lograr en todos los casos, pero algunos autores aclaran que son aceptables ángulos hasta de 60° entre el plano inyectado y el barreno.

Los barrenos verticales son los más fáciles de perforar porque minimizan el riesgo de “caídos” dentro del barreno y que de este modo bloqueen el varillaje de perforación. La probabilidad de falla en los barrenos perforados aumenta con el grado de fracturamiento y en los barrenos inclinados se presenta con mayor frecuencia. Sin embargo, en relación con la ejecución de las pruebas de agua y pruebas de inyecciones prevalece como factor más importante y decisivo la necesidad de interceptar las diaclasas o vías de agua lo más perpendicular posible para facilitar la penetración de los materiales inyectables.

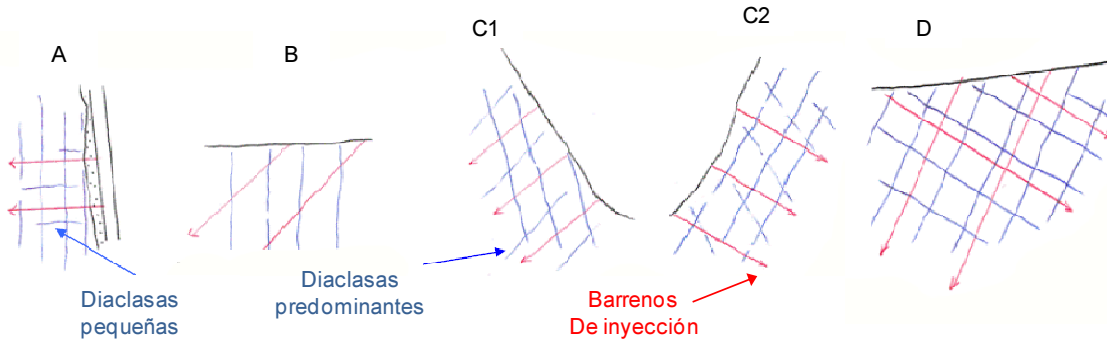


Figura 4.4. Orientación esquemática de la relación entre las orientaciones de las diaclasas y la dirección de los barrenos.

En la figura 4.4 se presentan las diferentes orientaciones de diaclasas las cuales describimos a continuación:

Diaclasas A: Las diaclasas verticales no se pueden perforar con barrenos horizontales, excepto que estén detrás de una pared de roca más o menos vertical o en caso de existir una galería.

Diaclasas B: En casos comunes de diaclasas verticales no se puede alcanzar una intersección perpendicular, hay que aceptar barrenos inclinados. Los barrenos deberían ser lo menos inclinados posibles, quizás 45° .

Diaclasas C: La relajación de la roca en la zona baja de los taludes abre las diaclasas, sobre todo las diaclasas que son paralelas a la cara del talud. Ese efecto resulta en que las diaclasas abiertas debajo de los taludes opuestos tengan inclinaciones contrarias, o sea hacia el valle. En ambos casos los barrenos deberán dirigirse hacia dentro de cada ladera.

Diaclasas D: La dirección paralela de los barrenos es apropiada solamente en caso de que haya un grupo de diaclasas paralelas que domine, mientras que las diaclasas en otra orientación no contribuyen a la permeabilidad y por lo tanto son desatendidas. Hay tales condiciones, pero también existen tipos de rocas con diferentes grupos de diaclasas en direcciones opuestas. Tales condiciones exigen barrenos por lo menos en dos direcciones opuestas.

5 EL MÉTODO GIN (GROUT INTENSITY NUMBER).

El Número de Intensidad de Inyectado conocido como método GIN, fue desarrollado por el Dr. Giovanni Lombardi y D. Deere en 1993, el método toma en cuenta la energía específica expandida durante el proceso de inyección y asume que para cualquier intervalo dado, la energía expandida es aproximadamente igual al producto de la presión final de inyección (P) y el volumen de mezcla que es inyectado (V). El valor numérico de este producto es el número de intensidad de inyectado (GIN).

Dependiendo de las unidades utilizadas, este valor puede ser expresado en bares-litro por metro. Lombardi y Deere recomiendan tomar en cuenta los factores específicos de cada sitio de inyección, como son: la carga del embalse, las características de las discontinuidades en la cimentación, estratificación, zonas de roca débil, la meteorización y el estado de esfuerzos in situ para seleccionar el número GIN, que en conjunto con los valores límites de volumen y presión se utilizan para inyectar las fisuras.

Lombardi y Deere (1993) analizaron que debido a que la presión disminuye rápidamente tan pronto como la mezcla se aleja del barreno en las fisuras cerradas, el total de la subpresión incluso en presiones de inyección altas será mucho más baja que el peso del embalse, excepto en los tramos superiores de la cimentación, es decir en los primeros 5 a 10 m de profundidad.

El uso del método GIN involucra:

- Una única mezcla estable para todo el proceso con un aditivo superplastificante para incrementar la penetrabilidad.
- Una velocidad de bombeo constante (baja a mediana) y uniforme a una presión que se incrementa gradualmente conforme la lechada penetra en las fracturas de la roca.
- Una evaluación continua de los parámetros de la mezcla durante la inyección, como lo son la presión, velocidad de flujo, el volumen inyectado y la

penetrabilidad contra el tiempo, en tiempo real, por medio de gráficos emitidos por un equipo automatizado.

- Limitación del volumen de inyección a bajas presiones.
- Presión progresivamente alta aplicada en rocas con fisuras estrechas.
- Prevención del daño de alta presión combinado con alto volumen.
- La finalización de la inyección en función de la trayectoria de inyectado registrada sobre el diagrama presión-volumen total (por metro de tramo inyectado) de acuerdo con la curva hiperbólica GIN seleccionada (es decir, una medida de la energía que está en función de una curva de un valor constante de $P \cdot V$, presión x volumen).

La información obtenida por estudios de laboratorio de los parámetros de las mezclas de inyección como son la cohesión o resistencia a la fluencia y la viscosidad dinámica de diferentes mezclas de inyectado, por medio de estudios de flujo y penetración de lechadas, y por el monitoreo de los procesos de inyección realizados in situ, ha conducido al concepto del Número de Intensidad de Inyectado (GIN).

Los principios esenciales del método GIN se indican a continuación:

- a) Definir específicamente los trabajos de inyección a realizarse.
- b) Diseñar el proceso de inyección con base a los factores que presente el macizo rocoso y en función de las pruebas de inyectabilidad que se realicen previamente.
- c) Diseñar una mezcla de inyección basada en pruebas de laboratorio para encontrar la mezcla que sea técnica y económicamente óptima. Únicamente deben utilizarse mezclas estables, en muchas ocasiones es necesario utilizar un aditivo superplastificante para mantener sus condiciones de estabilidad y penetrabilidad.
- d) Utilizar una única mezcla estable para todas las etapas de inyección con la finalidad de garantizar la calidad de los resultados y simplificar el proceso.
- e) Definir los parámetros de la curva GIN límite, presión máxima P_{max} , volumen máximo V_{max} y valor $GIN = P \cdot V$, tomando en cuenta los parámetros mecánicos

de la roca, la geología del macizo rocoso y los objetivos a cumplirse en el proyecto.

- f) Confirmar los estudios mediante pruebas de campo y comprobar los trabajos realizados con pruebas de inyección adicionales.
- g) Se debe evitar realizar pruebas de inyección de agua a presión durante los trabajos de inyección, ya que pueden provocar daños a los tramos ya inyectados.
- h) La distribución y separación de los barrenos de inyección en el método GIN es un procedimiento autoadaptable.
- i) La longitud de los barrenos aumenta con la profundidad de desplante de la cimentación esto se realiza con la finalidad de acelerar los trabajos de inyección y economizar los trabajos.
- j) Realizar la saturación del terreno por encima del nivel freático poco antes de que se realice el proceso de inyección, para evitar una obstrucción repentina durante el proceso debido a la pérdida de agua de la mezcla durante la inyección.
- k) La decisión de realizar un nuevo barreno así como la longitud del mismo, está en función del consumo de volumen de mezcla absorbido por los barrenos cercanos.
- l) Es importante el control del proceso mediante equipos automatizados para generar los gráficos necesarios y el análisis estadístico para la evaluación de los resultados.

5.1 El modelo FES del macizo rocoso.

Para entender correctamente el proceso de inyección, es necesario un modelo para el macizo rocoso. (Hässler, 1992). En tiempos recientes se han creado una serie de estos modelos, pero el método llamado FES (Modelo de Roca Fisurado Elástico y Saturado) parece ser todavía muy útil para resolver diferentes problemas en el campo de la mecánica de rocas (Asentamientos, inyecciones, túneles, etc.).

Un análisis profundo del comportamiento de una masa de roca saturada hizo posible establecer el llamado modelo FES (Modelo de Roca Fisurado Elástico y Saturado), este modelo permite interpretar el comportamiento del macizo rocoso de manera más precisa que la usual hipótesis lineal elástica, aún en el caso de un comportamiento perfectamente elástico de la matriz rocosa.

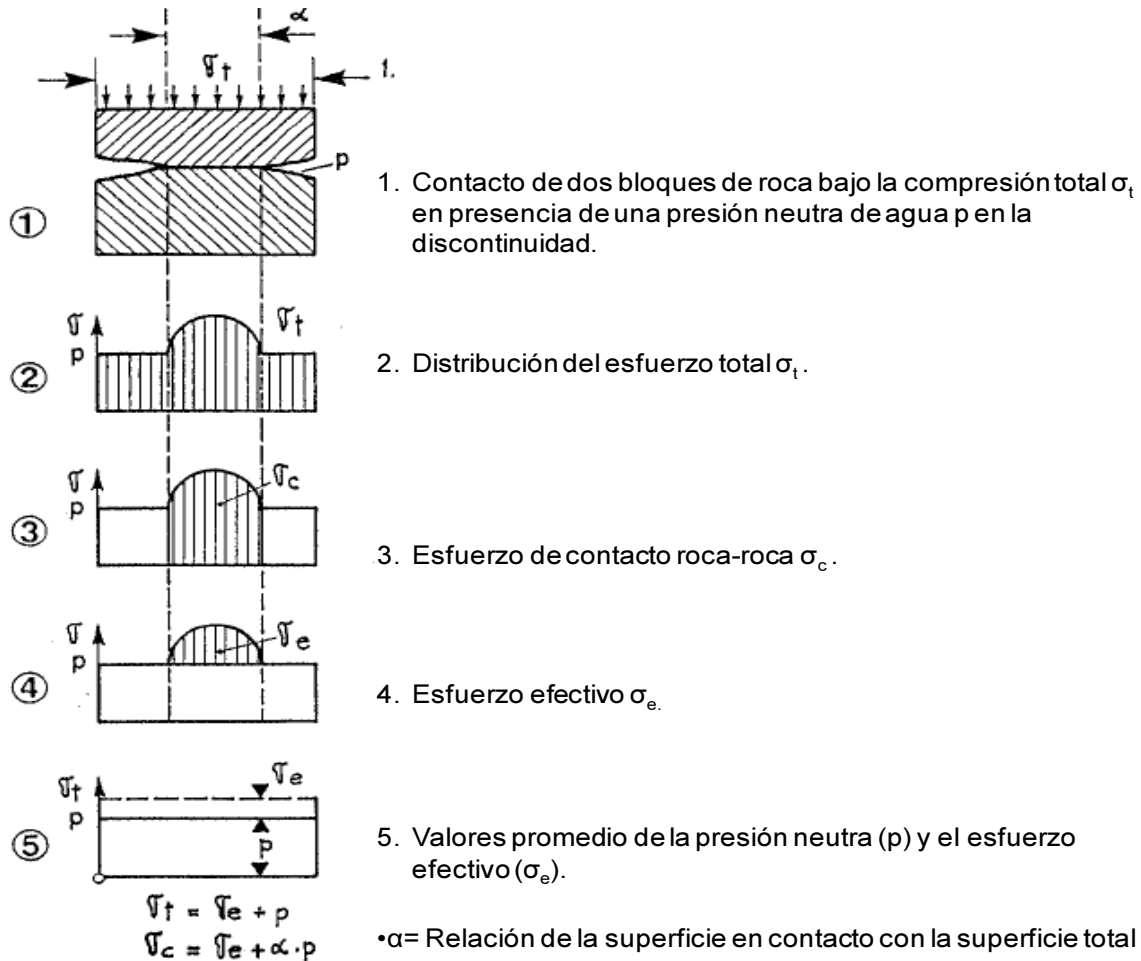


Figura 5.1. Conceptos fundamentales del modelo FES.

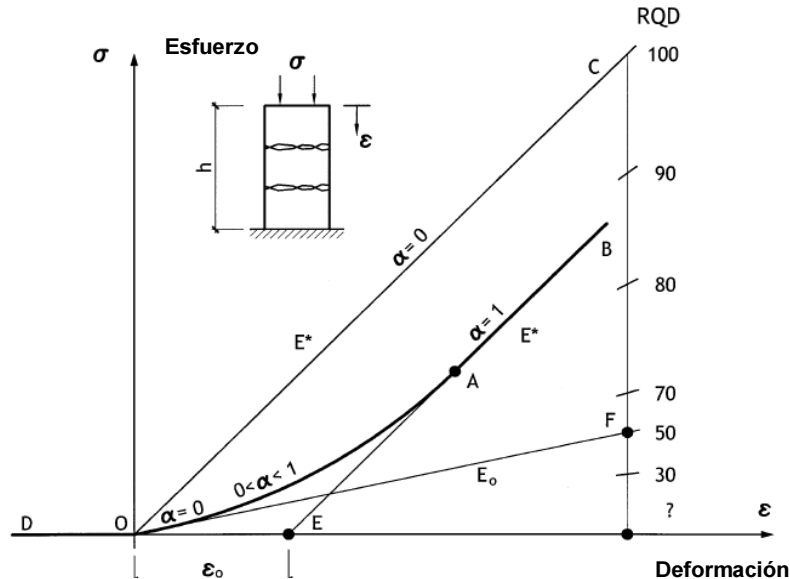
El principio sobre el cual se basa el modelo consiste en considerar que las superficies o paredes de una discontinuidad no son lisas ni planas, más bien son onduladas en ambos sentidos.

Existen puntos de contacto distribuidos de manera más o menos uniforme a lo largo de una discontinuidad. Las cargas llamadas cargas de contacto, se transmiten

pasando por los puntos de contacto. Se trata de protuberancias que se comprimen progresivamente al aumentar la fuerza de compresión en la superficie de la discontinuidad. En cierto instante las deformaciones permanecen reversibles, y también se producen deformaciones plásticas.

En los espacios vacíos entre discontinuidades hay presencia de agua, por lo tanto se demuestra que la porosidad y la permeabilidad varían en función de los esfuerzos que actúan y también de la presión del agua en las discontinuidades.

Para un ensayo de compresión simple sobre una muestra de roca seca cargada perpendicularmente a las fracturas la relación presentada en la figura 5.2 indica:



OC: Deformación Elástica de la matriz $E^* = \frac{E*(1-\zeta)}{1-2\zeta^2-\zeta}$

OD: Sin tensión (Junta abierta).

OF: Modulo de compresión inicial E_0 para un RQD=50.

OA: Cierre real progresivo de las fracturas. (α =Relación de cierre).

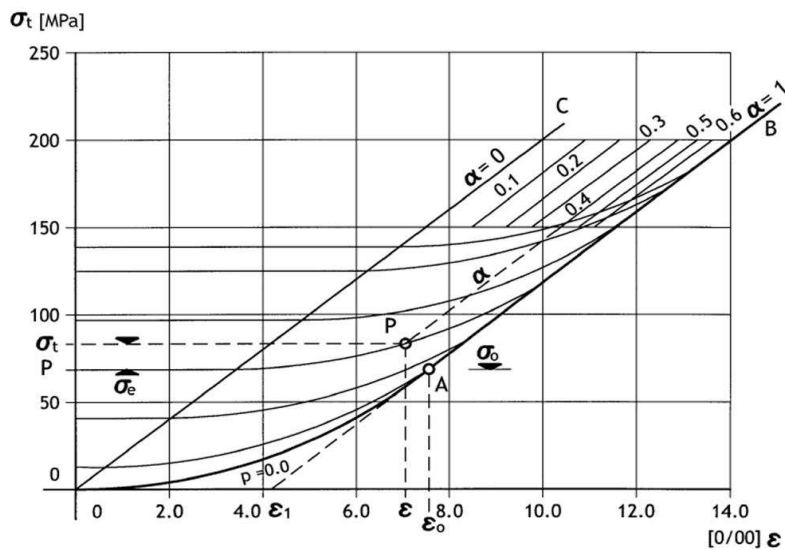
AB: Posible deformación elástica después del cierre completo de juntas.

ϵ_0 : Cierre total de las juntas en contacto (o posible apertura de juntas hasta que el contacto se pierda) referido a la altura de la muestra (h).

Figura 5.2. Relación esfuerzo-deformación para una muestra de roca seca fracturada cargada perpendicularmente a las juntas. ("Grouting of rock masses" Lombardi, 2003).

Si se considera una presión de agua intersticial, el modelo FES puede ser completado como se presenta en la figura 5.3 un punto P en el gráfico corresponde a un esfuerzo total dado, a una cierta presión de agua intersticial y para un grado de apertura de las juntas.

Esta simple representación considera un caso de carga homogénea uniaxial, pero mientras tanto, el método ha sido desarrollado para un completo análisis de elementos finitos, en el cual se incluyen el número de sistemas de discontinuidades deseado, orientación y propiedades, para resolver todos los problemas que puedan ser de interés en la ingeniería civil.



ϵ : Deformación Específica.

σ_t : Esfuerzo total.

p : Presión Neutra.

α : Grado de apertura.

$\alpha=1$ Discontinuidad totalmente cerrada.

$\alpha=0$ Fisura totalmente abierta (primer contacto)

$A(\epsilon_0, \sigma_0)$: Punto de cierre total de la discontinuidad, en ausencia de la presencia de agua.

σ_e : Esfuerzo efectivo.

σ_c : Esfuerzo de contacto.

Figura 5.3. Relación esfuerzo-deformación para una muestra de roca seca fracturada cargada perpendicularmente a las juntas. ("Grouting of rock masses" Lombardi, 2003).

5.2 Mezclas de inyección.

El agua que es un componente básico para la elaboración de las mezclas de inyección, es un cuerpo Newtoniano es decir presenta únicamente propiedades de viscosidad. Ver figura 5.4.

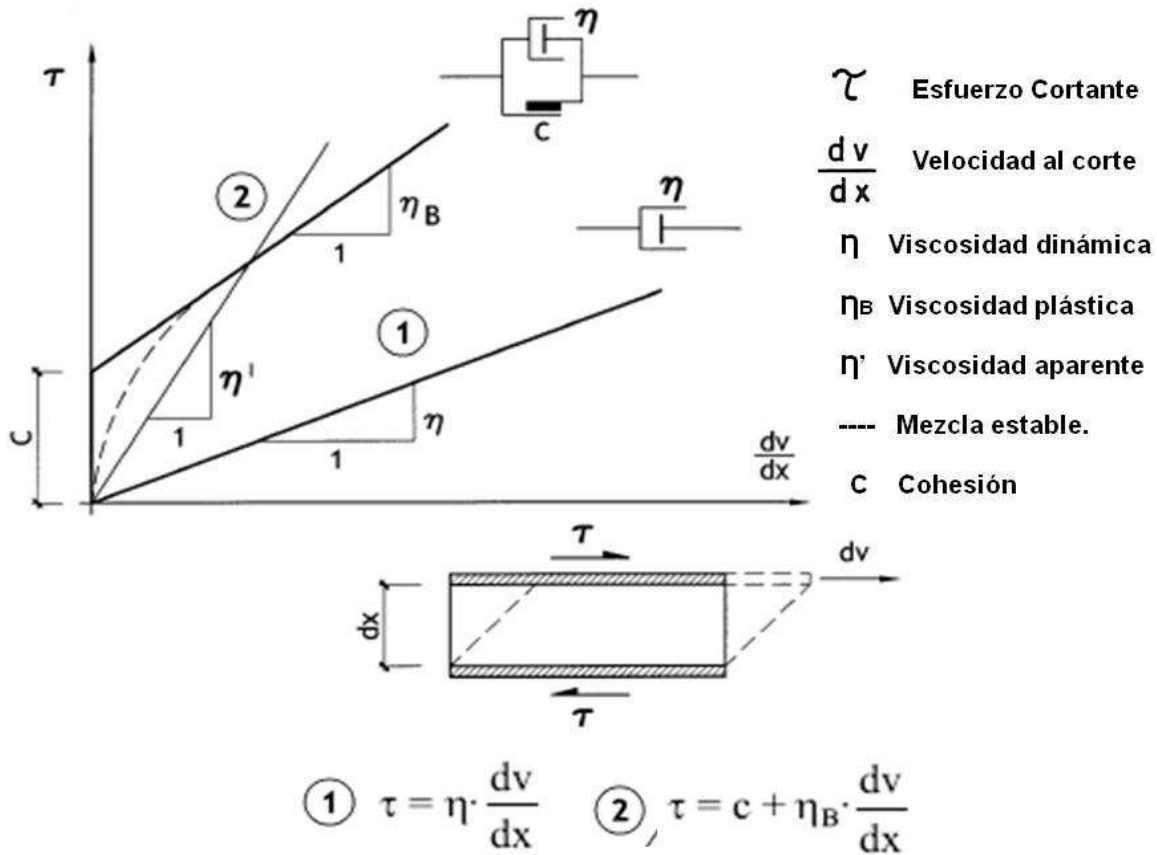


Figura 5.4. Leyes reológicas de las mezclas de inyección, (1) Fluido Newtoniano ej. el agua (2) Fluido Binghamiano ej. La mezcla de inyección. (“Grouting of rock masses” Lombardi, 2003).

Una mezcla de inyección que sea “estable”, se comporta como un fluido Binghamiano durante el flujo, teniendo Viscosidad y cohesión, ambos parámetros tienen resistencia a fluir. Una mezcla estable es aquella que no presenta sedimentación o su sedimentación es de menos del 5% durante un periodo de 2 horas. La viscosidad rige la velocidad del flujo y la cohesión la distancia máxima de

penetración (dependiendo de la presión de la presión de inyectado aplicada y a las aberturas que se presenten en la roca).

En una mezcla inestable las partículas de cemento y el agua se separaran, así que su comportamiento será impredecible ya que puede ser alternativamente un cuerpo Newtoniano o Binghamiano.

Siguiendo las leyes reológicas, el comportamiento de una mezcla estable está definido por dos propiedades físicas:

- La viscosidad η
- La cohesión C

Para aplicaciones prácticas es necesario considerar además de las dos propiedades físicas señaladas anteriormente el peso específico de la mezcla (γ). Estos parámetros son suficientes para definir las condiciones de flujo en el interior de la masa líquida.

Las condiciones límite del flujo están influenciadas por la rugosidad de las paredes de las discontinuidades del macizo rocoso. Este efecto puede ser tomado en cuenta por un factor (α) que reduce los coeficientes de cohesión y viscosidad de un fluido en una capa de espesor límite (δ). Con paredes rugosas el esfuerzo cortante de la adherencia con la pared es igual a la cohesión.

Por supuesto que las leyes reológicas o modelos son solo una aproximación de la realidad, pero en general son muy útiles. Un factor limitante es que el cemento tiene un cierto tamaño de partícula. Una mezcla de inyección no puede penetrar muchas fracturas estrechas que son incluso más pequeñas que los granos de cemento. Los modelos reológicos pierden validez en este caso. Otro factor límite es la condición de altas velocidades de flujo, cuando el flujo deja de ser flujo laminar y llega a convertirse en flujo turbulento, en este caso aplican otras leyes de flujo.

Existen ecuaciones que se han desarrollado con la finalidad de calcular la distancia máxima de penetración, el volumen máximo de lechada inyectada y la fuerza máxima total de levantamiento (hidrojacking o hidrogateo) ejercida sobre el área de inyección.

La distancia máxima de penetración lograda por una lechada de inyección es directamente proporcional a la presión aplicada y a la apertura de fisuras y es inversamente proporcional a la cohesión de la lechada de inyección. Conociendo esta regla, se sabe que para mejorar la penetración de la mezcla en las fisuras de roca muy finas, es necesario incrementar la presión de inyectado o reducir la cohesión de la lechada o posiblemente ambas.

Posiblemente el mayor beneficio de las ecuaciones de flujo Binghamiano consiste en proporcionar una visión del proceso de inyectado con relación a los factores que influyen la penetración de la mezcla en las fisuras del macizo rocoso y la extensión de las fuerzas de levantamiento (hidrojacking) creadas por el proceso de inyección.

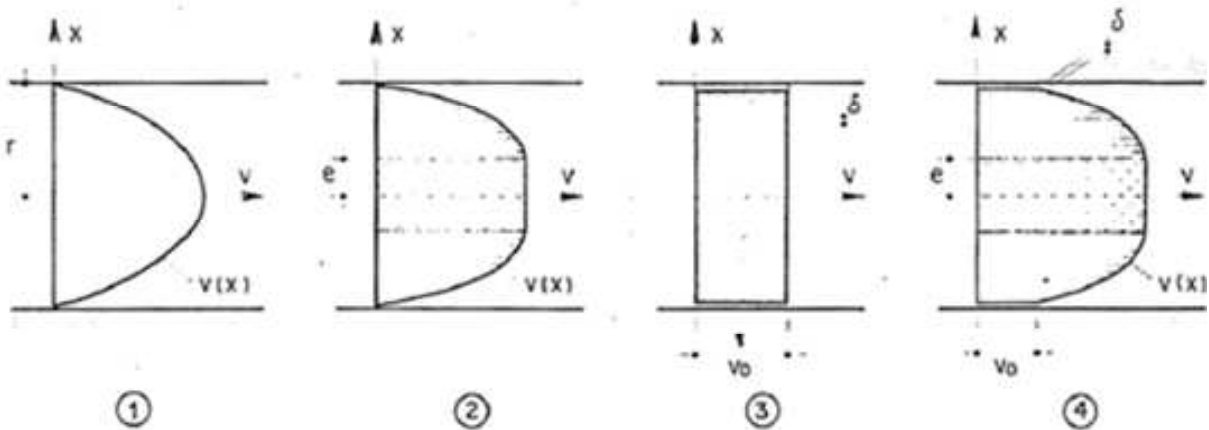
Las mezclas estables pueden aproximarse al comportamiento de un fluido Binghamiano y por tal motivo no es adecuado aplicar las ecuaciones a lechadas muy delgadas o acuosas debido a que las mezclas delgadas son suspensiones inestables de partículas de cemento en agua, que durante el flujo de lechada a través de las fisuras de roca pueden presentar un comportamiento de sedimentación errática; erosión, re-suspensión y re-sedimentación, su comportamiento es difícil de predecir y caracterizar con las ecuaciones de flujo Binghamianas.

Investigaciones teóricas demuestran que tan pronto como la fricción interna aparece en la mezcla, la inyección no es posible. Existe un límite inferior o factor de la relación agua/cemento en el cual los granos de cemento entran en contacto entre sí generándose una fricción interna. Este fenómeno toma lugar cuando durante el proceso de inyección parte del agua de la mezcla es absorbida por la roca o se escapa a través de las fisuras delgadas, en este caso el proceso de inyección deberá detenerse inmediatamente.

5.3 Conceptos teóricos del flujo de lechada y su penetración.

5.3.1 Formulas básicas para un flujo visco-plástico.

El flujo de un fluido Binghamiano o líquido es de tipo visco-plástico, mientras que la de un líquido Newtoniano es puramente viscoso. En la figura 5.5, ilustra los perfiles de velocidad de flujos viscosos y flujos visco-plásticos en un tubo circular.



1. Puro (Clásico) Flujo viscoso: **Newton**.
2. Flujo Visco-plástico (e =radio de núcleo rígido): **Binghamiano**.
3. Extrusión – paredes lisas (desplazamiento de cuerpo rígido); δ =espesor de la capa deslizante.
4. Caso general.

Figura 5.5. Perfiles de velocidad de flujos viscosos y viscoplásticos en un tubo circular ("The role of cohesion in cement grouting of rock", Lombardi, 1985)

Las distribuciones de velocidad son similares además para el flujo que se presente en una junta plana abierta. Las formulas correspondientes se presentan en la tabla 5.1.

Caso	Fórmulas
1 Newton	$J_{min} > 0$ $V(x) = \frac{\gamma J}{4\eta} r^2 \left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right)$ $V_{max} = \frac{\gamma J}{4\eta} r^2$
2 Bingham	$e = \frac{2C}{\gamma J}; J_{min} = \frac{2C}{\gamma r}; 0 < e < r$ $x \leq e: v(x) = v_{max} = \frac{\gamma J}{4\eta} r^2 \left(1 - \frac{e}{r}\right)^2$ $x \geq e: v(x) = \frac{\gamma J}{4\eta} r^2 \left[\left(1 - \frac{e}{r}\right)^2 - \frac{e^2}{r^2} \left(1 - \frac{x}{e}\right)^2 \right]$
3 Extrusión	$e > r; e < \frac{r}{\alpha}; J_{min} = \frac{2C}{\gamma r} \alpha$ $v(x) = v_0 = v_{max} = \frac{\gamma J}{2\eta} r^2 \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{e}{r}\right) \frac{\delta}{r}$
4 General	$e = \frac{2C}{\gamma J}; J_{min} = \frac{2C}{\gamma r}; 0 < e < r$ $x \leq e: v(x) = v_{max} = \frac{\gamma J}{4\eta} r^2 \left[\left(1 - \frac{e}{r}\right)^2 + \frac{2\delta}{r} \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{e}{r}\right) \right]$ $x \geq e: v(x) = \frac{\gamma J}{4\eta} r^2 \left[\left(1 - \frac{e}{r}\right)^2 + \frac{2\delta}{r} \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{e}{r}\right) - \frac{e^2}{r^2} \left(1 - \frac{x}{e}\right)^2 \right]$
<p>Nota: Esfuerzo cortante en el plano de deslizamiento δ (definición de α)</p> $\tau_w = \alpha \left(C + \eta \frac{dv}{dx} \right); \alpha < 1$	

Tabla 5.1. Fórmulas para Perfiles de velocidad de flujos viscosos y viscoplásticos en un tubo circular ("The role of cohesion in cement grouting of rock", Lombardi, 1985).

Cabe destacar que el núcleo duro se mueve con máxima velocidad en el centro del tubo. La relación depende de la cohesión del líquido:

$$e = \frac{2C}{\delta J} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

El núcleo rígido existe, pero solo para cuerpos Binghamianos. Cuando $e \geq r$, el flujo se detiene si las paredes son rugosas; pero si las paredes son muy lisas, la extrusión de la mezcla puede ocurrir.

En el caso de un flujo puramente viscoso cualquier gradiente de presión desplazará al líquido; En el caso de un fluido visco-plástico un mínimo gradiente, como una función de la cohesión, es necesario para iniciar el flujo. Este hecho es de gran importancia en la teoría de la inyección en rocas. La tabla 5.2 proporciona las fórmulas más importantes para flujos viscosos en tuberías y juntas.

Caso	Tubo Circular	Junta Plana (t=mitad de la discontinuidad)
General	$Q = \frac{\gamma J r^4 \pi}{8\eta}$ $V_{max} = \frac{\gamma J}{4\eta} r^2$	$q = \frac{2\gamma J t^2}{3\eta}$ $V_{max} = \frac{\gamma J}{2\eta}$
Pared Rugosa	$e = \frac{2C}{\gamma J}; J_{min} = \frac{2C}{\gamma r}; 0 < e < r$ $Q = \frac{\gamma J r^4 \pi}{8\eta} \left[1 - \frac{4e}{3r} + \frac{1}{3} \left(\frac{e}{r} \right)^4 \right]$ $V_{max} = \frac{\gamma J}{4\eta} r^2 \left(1 - \frac{e}{r} \right)^2$	$e = \frac{C}{\gamma J}; J_{min} = \frac{C}{\gamma r}; 0 < e < t$ $q = \frac{2\gamma J t^3}{3\eta} \left[1 - \frac{3e}{2t} + \frac{1}{2} \left(\frac{e}{t} \right)^3 \right]$ $V_{max} = \frac{\gamma J t^2}{2\eta} \left(1 - \frac{e}{t} \right)^2$

Tabla 5.2. Continúa página siguiente....

Caso	Tubo Circular	Junta Plana (t=mitad de la discontinuidad)
	$\alpha < 1; J_{min} = \frac{2C}{\gamma r}; \frac{e}{r} < \frac{1}{\alpha}$	$\alpha < 1; J_{min} = \frac{C}{\gamma t}; \frac{e}{t} < \frac{1}{\alpha}$
Pared	$\frac{2C}{\gamma r} \alpha < J < \frac{2C}{\gamma r}$ Extrusión.	$\frac{C}{\gamma t} \alpha < J < \frac{C}{\gamma t}$ Extrusión.
Lisa	$Q = \frac{\gamma J r^4 \pi}{8\eta} \left[1 - \frac{4e}{3r} + \frac{1}{3} \left(\frac{e}{r} \right)^4 + \frac{4\delta}{r} \left(\frac{1}{a} - \frac{e}{r} \right) \right]$	$q = \frac{2\gamma J t^3 \pi}{3\eta} \left[1 - \frac{3e}{2t} + \frac{1}{2} \left(\frac{e}{t} \right)^3 + \frac{3\delta}{2t} \left(\frac{1}{a} - \frac{e}{t} \right) \right]$
	$V_{max} = \frac{\gamma J}{4\eta} r^2 \left[\left(1 - \frac{e}{r} \right)^2 + \frac{2\delta}{r} \left(\frac{1}{a} - \frac{e}{r} \right) \right]$	$V_{max} = \frac{\gamma J t^2}{2\eta} \left[\left(1 - \frac{e}{t} \right)^2 + \frac{2\delta}{t} \left(\frac{1}{a} - \frac{e}{t} \right) \right]$

Tabla 5.2. Fórmulas para flujos viscosos en un tubo circular y juntas (“The role of cohesion in cement grouting of rock”, Lombardi, 1985).

Con base a lo anterior nosotros podemos definir que en un diseño de mezcla debemos:

- Indicar un valor límite inferior en la relación A/C (agua/ peso de cemento) para evitar que el factor de fricción se produzca y la inyección se interrumpa.
- Indicar un límite superior en la cual la mezcla de inyección sea inestable y su comportamiento sea impredecible.

En cualquier caso la mezcla de inyección necesita un poco de exceso de agua con respecto a la mínima cantidad estrictamente requerida por unidad de cemento.

Una buena recomendación es tomar como límites superior e inferior lo siguiente:

- A/C_{min} (Agua/Cemento)=0.4 en peso.
- A/C_{max} (Agua/Cemento)=1.0 en peso.

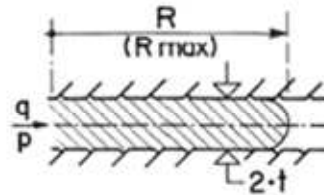
Ambos límites pueden estar influenciados en cierta medida por los aditivos.

5.3.2 Investigaciones Teóricas.

En el proceso de inyección de una mezcla estable siguiendo las leyes de un cuerpo Binghamiano se obtienen los siguientes resultados.

En la inyección de una sola fisura la distancia de recorrido máxima está en función únicamente de la presión final aplicada, el espesor de la fisura y la cohesión de la mezcla. El principal efecto de la cohesión es limitar la extensión de la zona de inyección y para evitar hasta cierto punto, consumos innecesarios de lechada. Tabla 5.3.

Inyección de una discontinuidad



$$R_{\max} = \frac{P_{\max} \cdot t}{C} = h \cdot \frac{t}{C_r} \quad \text{Donde} \quad C_r = \frac{C}{\bar{\rho}}$$

$$h = \frac{P}{\bar{\rho}}$$

$$P_{\text{need.}} = \frac{R \cdot C}{t} = \frac{2 \cdot C}{2 \cdot t_{\min.}} \cdot R$$

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

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

$$R_{\text{eff.}} = R_{\max} \cdot k \quad C \rightarrow 0; F \rightarrow \infty$$

P= Presión.

$\bar{\rho}$ = Densidad

q= Flujo.

V= Volumen inyectado

R=Recorrido alcanzado. (radio de penetración.)

F= Fuerza de levantamiento.

2t= Espesor de la discontinuidad.

k= Eficiencia

C= Cohesión.

Tabla 5.3. Fórmulas para inyección de una sola fisura ("Some theoretical consideration on cement grouting", Lombardi, 1985).

La relación entre la presión de inyección, espesor de la fisura y la distancia efectiva de recorrido es presentado en la figura 5.7.

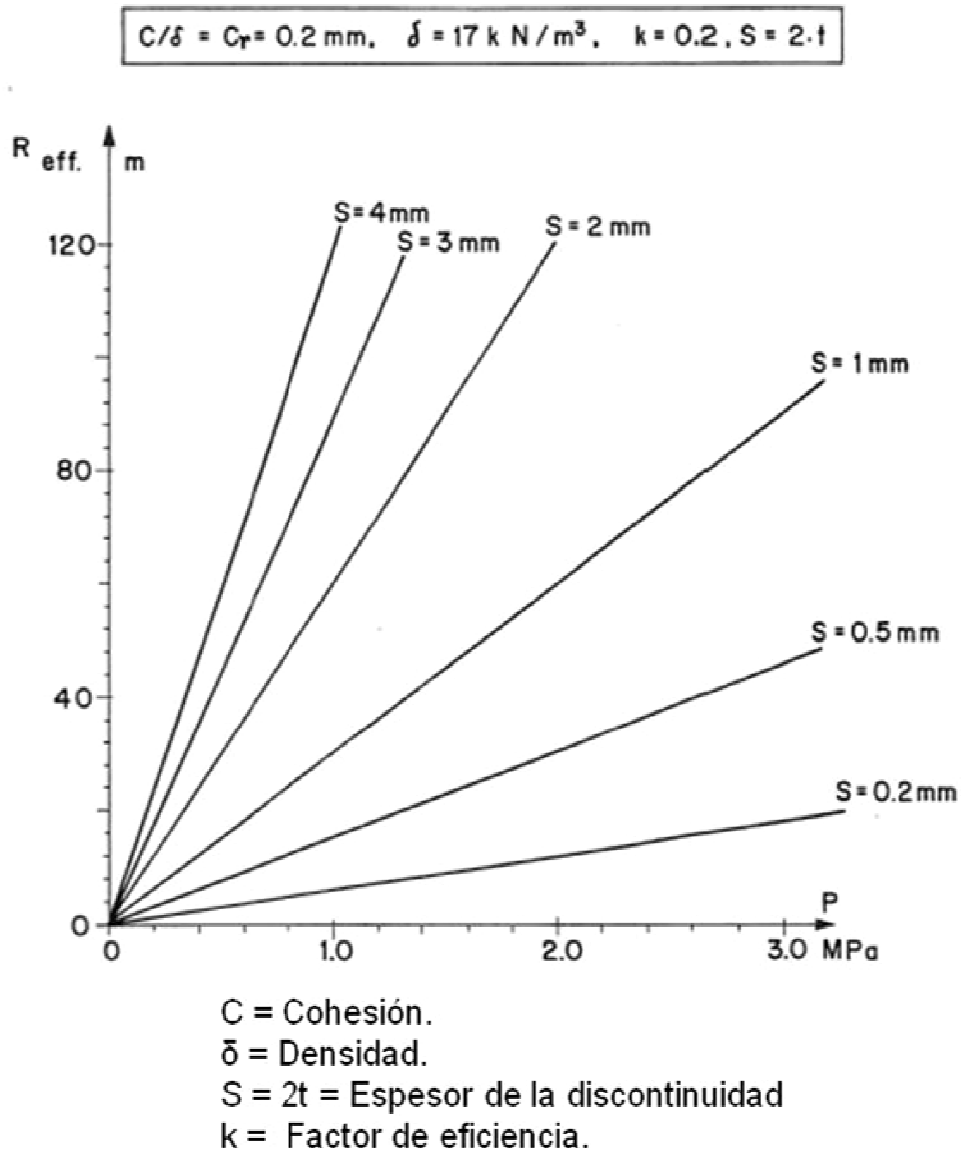


Figura 5.7. Viaje de la inyección en función de la distancia recorrida por la mezcla ("Some theoretical consideration on cement grouting", Lombardi, 1985).

La distancia efectiva de recorrido de la mezcla fue determinada a partir de la distancia de recorrido teórica utilizando un factor K de eficiencia igual a 0.2 ($K=0.2$).

Este factor toma en cuenta los siguientes factores:

- La fisura o discontinuidad no es totalmente plana.
- La fisura o discontinuidad no está completamente abierta así que la inyección tienen algunos obstáculos alrededor de la fisura.
- El espesor de la fisura no es constante, de modo que la sección de control para la existencia del flujo produce pérdidas de carga.
- La fisura no se encuentra limpia, de manera que algunos rellenos en las juntas pueden perturbar el flujo.
- El proceso de inyección siempre será interrumpido antes de que la inyección teórica termine.

Es importante señalar que el factor de eficiencia K, siempre debe ser revisado en cada caso.

Hay un límite inferior en el uso de la figura 5.7 debido a que los granos de cemento no pueden entrar en las fisuras que son muy delgadas (dependiendo del tipo de cemento utilizado).

Mientras que la cohesión limita la distancia de viaje y limita el consumo de la mezcla inyectada a una presión constante, el tiempo necesario para alcanzar la distancia teórica aún no tiene límite. Esto significa que es un proceso asintótico.

Si se utiliza una presión constante en el proceso de inyectado una detención del proceso de inyectado puede no presentarse y alguna decisión tiene que tomarse para detener el proceso de inyección en el sitio de trabajo. Esta determinación difiere del pensamiento tradicional de inyección.

La tabla 5.3 señala que la fuerza de inyección necesaria está limitada por la cohesión de la mezcla. En inyección con agua (o mezcla inestable) la fuerza de inyección puede alcanzar valores altos debido a que la cohesión es nula. La cohesión

determina la presión mínima necesaria para poner y mantener en movimiento una cantidad de mezcla ya introducida en una discontinuidad.

Con respecto a la viscosidad, esta propiedad tiene una gran influencia con respecto a la velocidad de flujo de la inyección a una presión dada y determinará el tiempo necesario de relleno de una fisura en un proceso de inyección.

La figura 5.8 muestra la ley de flujo visco-plástico en un tubo o una junta para un fluido Binghamiano. Se observa el núcleo rígido de la inyección viajando a través de la junta. Esta dimensión disminuye con el gradiente de presión. Al final del proceso de inyección, el núcleo rellena el volumen de la junta, esta es la razón por la cual el flujo se detiene.

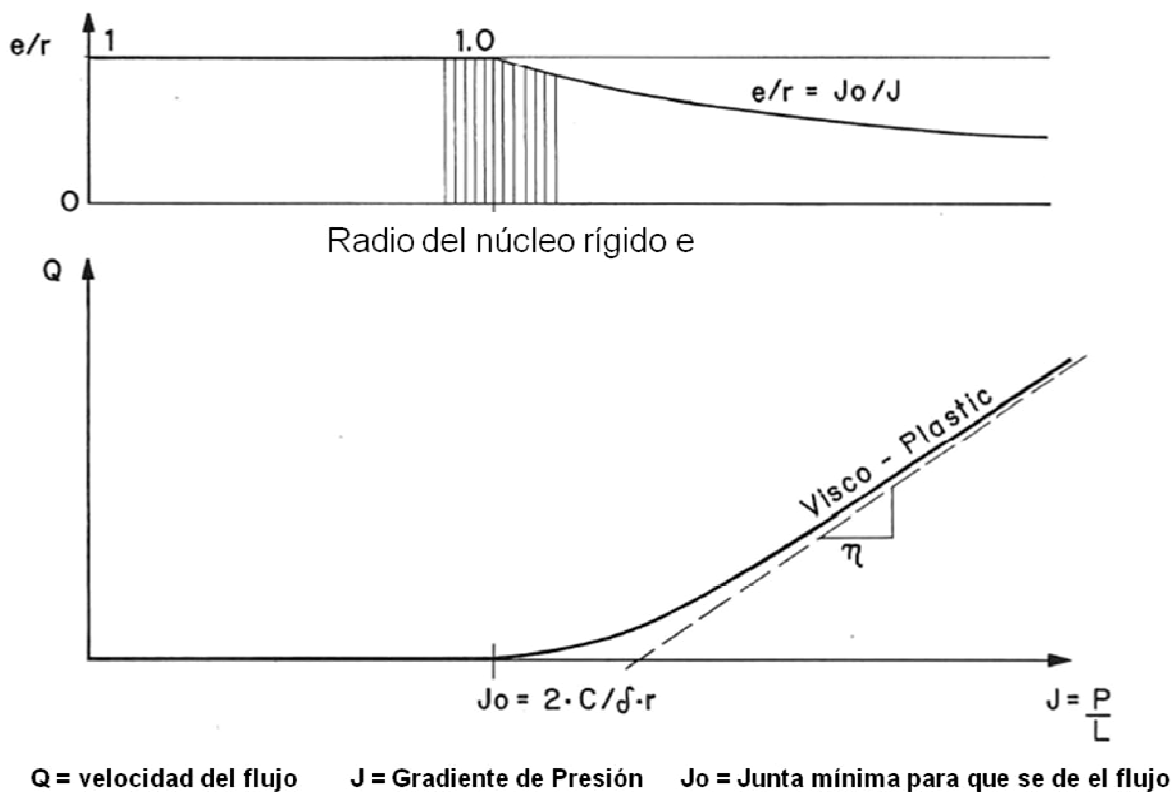


Figura 5.8. Ley de Flujo en un tubo o junta para un cuerpo Binghamiano. ("Some theorethical consideration on cement grouting", Lombardi, 1985).

Para evaluar el proceso de inyección es necesario conocer viscosidad y cohesión de la mezcla. Generalmente se utiliza la prueba de cono Marsh, esta prueba proporciona un valor denominado tiempo de flujo (viscosidad aparente). En la figura 5.9 se presenta la relación tiempo de flujo con respecto a la viscosidad y cohesión.

Para determinar los valores de viscosidad y cohesión de una mezcla de inyección, se utiliza un viscosímetro coaxial. Sin embargo, se ha desarrollado un cohesímetro de placa que es un dispositivo más simple que determina el valor de la cohesión. El dispositivo consiste en una placa de metal con superficies rugosas y de geometría rectangular de 100 mm x 100 mm de área por 1.5 mm de espesor, que es introducida en la mezcla de inyección, se extrae y se permite que la mezcla gotee. La cantidad de mezcla adherente a las superficies es determinada por la diferencia de pesos entre la placa seca y la placa que se introdujo en la mezcla. De este modo se determina el parámetro de cohesión en unidades de resistencia al esfuerzo cortante.

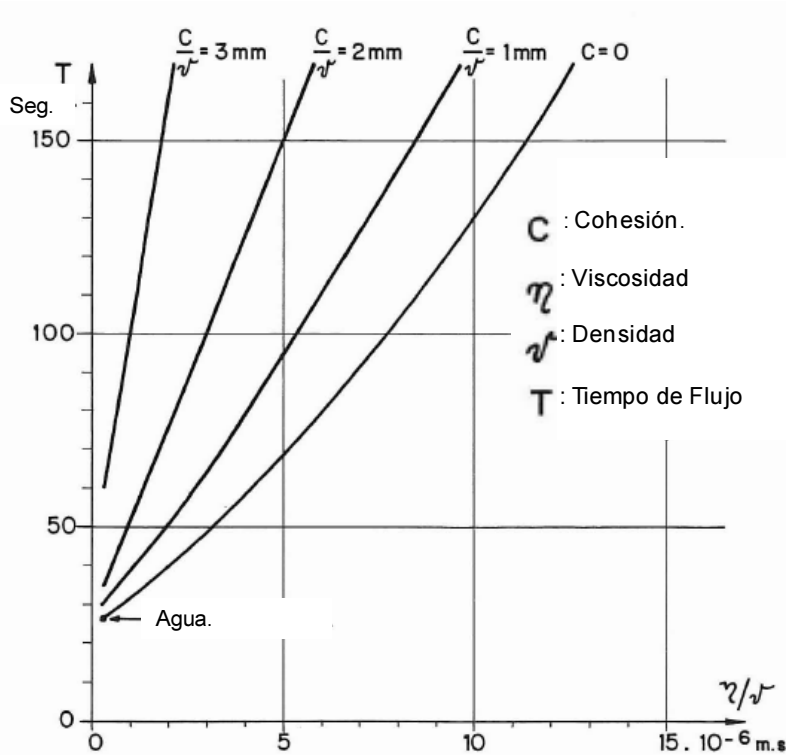


Figura 5.9. Ley de Flujo en un tubo o junta para un cuerpo Binghamiano. ("Some theorethical consideration on cement grouting", Lombardi, 1985).

5.4 Selección de la mezcla de inyectado.

Entre los diferentes asunto relacionados con la inyección de macizos rocosos en presas se encuentra en discusión la viscosidad de la mezcla de inyección. Algunos autores que proponen mezclas muy fluidas creen que fisuras finas pueden ser inyectadas y se pueden tener mejores penetraciones con una mezcla de estas características.

Otros autores mencionan que las inyecciones con mezclas muy viscosas son más fuertes, uniformes y químicamente más resistentes y que con una presión suficientemente alta, las fisuras finas también pueden ser penetradas.

Tradicionalmente, los que están a favor de mezclas espesas han indicado varias ventajas ya sea durante el proceso de inyectado o durante la vida útil del macizo rocoso inyectado una vez endurecida la mezcla.

Algunas ventajas de las mezclas espesas o muy viscosas con respecto a las mezclas fluidas son:

- Menor sedimentación de los granos de cemento durante condiciones de flujo lento.
- Menos agua libre en la mezcla a inyectar como resultado del exprimido o filtración en zonas estrechas de las trayectorias de flujo que ocasionen una obstrucción o bloqueo prematuro de inyección en las fisuras.
- Mayor estabilidad en el tiempo y distancia como un fluido predecible (Fluido Bighamiano con cohesión y viscosidad dinámica dada).
- Menor riesgo de hidrofracturamiento o levantamiento de los estratos geológicos, debido a una caída rápida de presión alejada de la perforación de inyectado por la influencia de la cohesión de la mezcla de inyección y el llenado de la fractura de una mezcla de alta calidad en caso de que ocurra el hidrofracturamiento.

Durante la vida útil de la mezcla una vez endurecida en el interior de las fisuras de roca, la lechada espesa o viscosa tiene las siguientes ventajas en comparación con la lechada delgada o muy fluida:

- Menor contracción de la mezcla durante el fraguado y una mayor unión a lo largo de las paredes de la discontinuidad del macizo rocoso y menos riesgo de una reapertura.
- Mayor densidad y mayor resistencia mecánica, debido al mayor contenido de cemento y también una mayor resistencia a la erosión y tubificación.
- Menor porosidad, menor permeabilidad, mayor unión entre las juntas y con esto una resistencia química contra la lixiviación y una mayor durabilidad de la pantalla durante la vida útil de la presa.

La lechada espesa, debido a su cohesión, requiere presiones de inyectado mayores para alcanzar la misma distancia de penetración comparada con una mezcla delgada. Sin embargo, por medio del empleo de de una pequeña cantidad de aditivo superplastificante, ambos parámetros, su cohesión y su viscosidad, pueden reducirse sustancialmente.

La practica actual en una serie de proyectos es la de emplear una relación de mezcla agua/cemento (a/c) de 0.6:1 a 0.9:1 (agua por peso de cemento) para obtener mayor densidad y resistencia deseables de la lechada una vez fraguada y un superplastificante para reducir la cohesión y viscosidad durante la inyección de la lechada. Se emplean las pruebas de laboratorio indicadas en el inciso 5.3 para determinar las propiedades de flujo, sedimentación, fraguado y de resistencia de diferentes mezclas de inyectado para diferentes cementos y diferentes aditivos superplastificantes.

Es conveniente dividir la cohesión C entre el peso unitario de la lechada γ , expresando la cohesión relativa como:

$$C_r = \frac{C}{\gamma} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Que es la que normalmente se utiliza. Se da generalmente en mm, y los valores típicos son de 0.902 a 0.35 mm para lechadas espesas sin aditivo superplastificante. Con aditivos, la cohesión aparente, baja a valores de 0.08 a 0.15 mm, para el rango recomendado.

Es importante hacer notar que el valor de C_r , es de hecho el espesor de la lechada de cemento, que se adhiere a cada lado de la placa de cohesión. La placa de cohesión debe ser suficientemente rugosa, cortando pequeñas ranuras que se interceptan sobre su superficie, 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; de otra manera la lechada se deslizará de la placa.

Otros valores típicos de laboratorio son:

- Peso específico de la lechada: 1.59 a 1.67 t/m³ (99.2 a 104.2 lb/ft³).
- Viscosidad en el Cono Marsh: 29 a 32 seg.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días: 15 a 20 MPa (2250 a 3000 lb/in²).

Otro punto que deberá mantenerse en mente, es la pérdida potencial de agua al inyectar roca seca, arriba del nivel de agua subterránea o freática (proceso de saturación). En el caso de que se espesara la lechada por esta razón, se incrementaría su cohesión (se aumentaría la fricción interna) al grado que ya no se podría inyectar más lechada. Una práctica prudente es la de inyectar agua por un periodo de tiempo (saturación) para obtener una saturación parcial de la masa rocosa, precisamente antes del inyectado, también se pueden emplear aditivos retenedores de agua en la lechada.

Por tal motivo es importante que la roca se encuentre saturada al momento de la inyección, esto solo se aplica a los tramos de inyección que se encuentren por encima de la capa freática.

Al inyectar fisuras finas en roca, deberá recordarse que la penetración de la lechada depende más del tamaño de los granos de cemento y partículas de cemento

aglutinadas, que de la dilución de la mezcla con exceso de agua. De esta manera, en vez de tratar de obtener una penetración mayor, diluyendo la mezcla, debería emplearse un cemento más fino con aditivo superplastificante junto con presiones de inyectado mayor.

Una vez que se haya determinado una mezcla aceptable, por medio de pruebas de laboratorio, con sus propiedades mecánicas en los rangos deseables, esta mezcla deberá emplearse para todo el inyectado en el proyecto: el empleo de una sola mezcla simplifica de manera sustancial el procedimiento de inyectado.

5.5 Diseño de obras de Inyectado.

El diseño de una pantalla de inyectado incluye la selección de las siguientes características principales:

- Mezcla de inyección.
- Espaciamiento y profundidad de los barrenos de inyección.
- Secuencia de inyección por etapa.
- Procedimiento de inyectado. (Incluyendo la limitación de presión y volumen).
- Estricto control de campo.

Se requiere un buen conocimiento de la geología del sitio al seleccionar algunos de estos parámetros, en especial, las características físicas de las discontinuidades de la masa de roca que deberá inyectarse (tipos, frecuencia, abertura de fisura, rugosidad, alteración o relleno, y continuidad). También deberá considerarse el estado de esfuerzos in situ y las condiciones del agua subterránea existentes.

Además de un conocimiento de las condiciones geológicas y geotécnicas existentes, deberán tomarse en cuenta los cambios inducidos por el estado de esfuerzos del proyecto, las presiones hidráulicas y su variación en el tiempo (durante el llenado y abatimiento del vaso). Finalmente, deberá definirse de una mejor manera el objetivo que deberá lograrse en términos de consolidación o efectos de impermeabilización.

5.6 Inyección de Fisuras.

5.6.1 Inyectado de Fisuras abiertas.

Las observaciones de campo y los estudios teóricos, indican que las fisuras más amplias y/o abiertas en un macizo rocoso son aquellas que se inyectan más fácilmente. La penetración de la lechada también puede ser importante (inclusive a algunas decenas de metros).

Por lo tanto, existen tanto razones prácticas como económicas para reducir la penetración de la lechada y el volumen de lechada inyectada. Hay tres maneras de lograr esta reducción:

- Empleando una lechada menos penetrante (más espesa con mayor cohesión).
- Limitando la presión de inyectado.
- Limitando el volumen de inyección.

Antes de seleccionar el criterio limitante, deberá considerarse que también pueden existir fisuras más finas en la zona que se está inyectando. Estas son más difíciles de inyectar y probablemente no se inyectarán bien hasta una etapa posterior, cuando ya se hayan rellenado las fisuras más abiertas.

Sin embargo, durante la primera etapa de inyectado, es deseable lograr un llenado sustancial de las fisuras finas. De esta manera, la mezcla de inyección no deberá espesarse, pero deberá permanecer una lechada moderadamente espesa estable con un aditivo superplastificante. La alternativa de limitar la presión tampoco es muy deseable, ya que esto reduciría el inyectado de las fisuras finas. Por lo tanto la alternativa de colocar una limitación de volumen puede ser lo más adecuado.

5.6.2 Inyectado de Fisuras Finas.

Después de que se hayan inyectado las fisuras más abiertas, o si no existieron originalmente en la zona por inyectar fisuras abiertas de abertura amplia, el inyectado de las fisuras finas se hace una prioridad. El inyectado puede realizarse, ya sea utilizando una mezcla más delgada con una cohesión menor, o inyectando a presiones mayores.

Es más conveniente elevar la presión y mantener la mezcla moderadamente espesa de alta calidad con el aditivo superplastificante. En vista de que las fisuras más finas tendrán una menor penetración de lechada, y ya que la presión de inyección se reduce rápidamente conforme se aleja de la perforación, la fuerza total de levantamiento aún a presiones de inyectado elevadas será, como regla, mucho más baja que el peso de la sobrecarga, el hidrofracturamiento de las juntas y planos de estratificación en la roca se presenta muy pocas veces (con excepción de los 5 a 10 m superiores). Consecuentemente, son aceptables presiones de inyectado bastante elevadas, de hasta 30 a 40 bar, es decir, de 3 a 4 MPa (425 a 570 lb/in²) calculados en el intervalo de inyectado en el caso de que la toma de lechada sea pequeña.

Al considerar estos factores, se sugiere un límite máximo para la presión de inyectado, cuando las tomas de lechada son pequeñas en el rango de 30 a 50 bar (3 a 5 MPa) de presión, todo dependerá de la geología (intemperización, estratificación, zonas débiles, estado de esfuerzos in situ, etc.), la presión del embalse a presentarse y la intensidad deseada del inyectado.

De esta manera, están empezando a emerger los primeros dos elementos del principio GIN: una limitación de volumen, cuando la lechada entra fácilmente a bajas presiones, y una limitación de presión cuando la lechada penetra únicamente con dificultad. Queda por enfocarse a los rangos intermedios. Sin embargo, antes de continuar con este rango intermedio es conveniente revisar otras consideraciones sobre el inyectado.

5.6.3 Inyectado de una discontinuidad única.

Basándose en las propiedades reológicas de la mezcla, es posible analizar el proceso de inyección con una mezcla estable de una discontinuidad única horizontal plana y abierta. Se asume que las paredes de la discontinuidad son rugosas que corresponde probablemente a la mayoría de las condiciones que presentan las discontinuidades en el macizo rocoso.

El proceso de inyección es una complicada función de la geometría del barreno y de la discontinuidad, de las propiedades de la mezcla (cohesión y viscosidad) y de las características de la bomba de inyección.

Se asume que la discontinuidad está seca. La figura 5.10 presenta la configuración utilizada para el análisis.

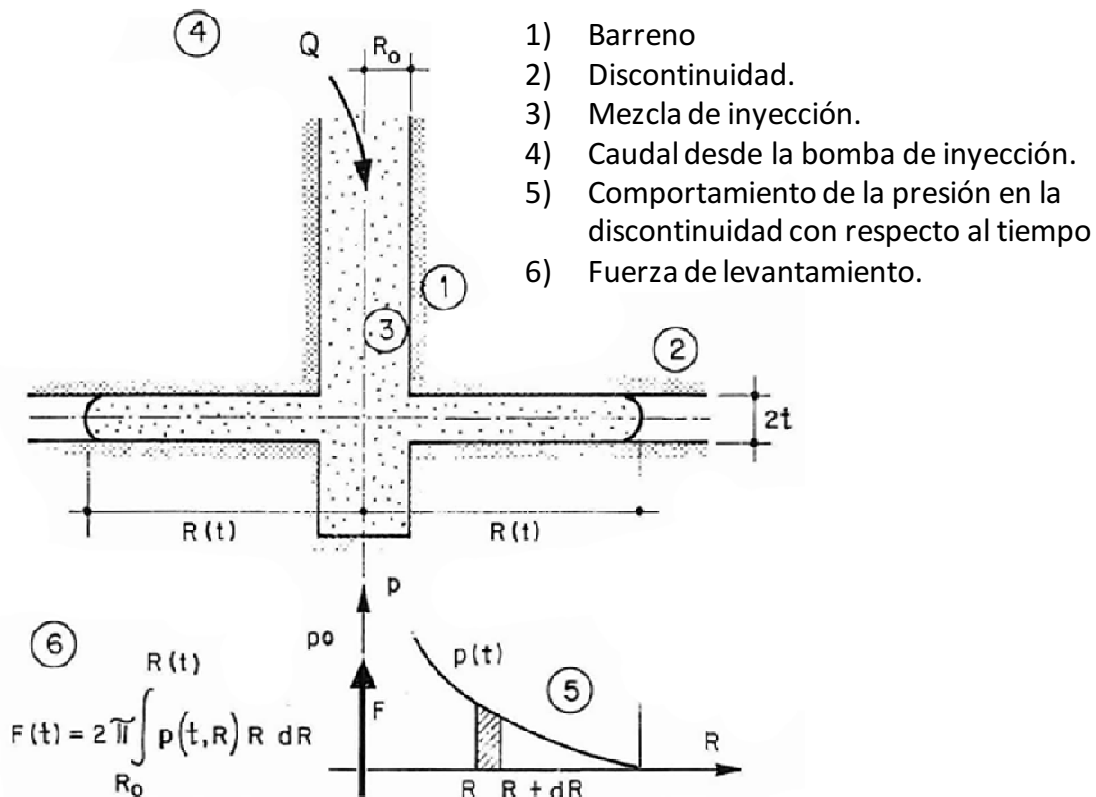


Figura 5.10. Esquema utilizado para la representación de la inyección de una discontinuidad simple. ("Some theoretical consideration on cement grouting", Lombardi, 1985).

En la figura 5.11 se muestran los resultados de los cálculos para un ejemplo dado representando el incremento de la presión de inyección (p) (en términos de carga estática), el radio de penetración (R), la fuerza de levantamiento (F) y la disminución del flujo de inyección con respecto al tiempo (Q).

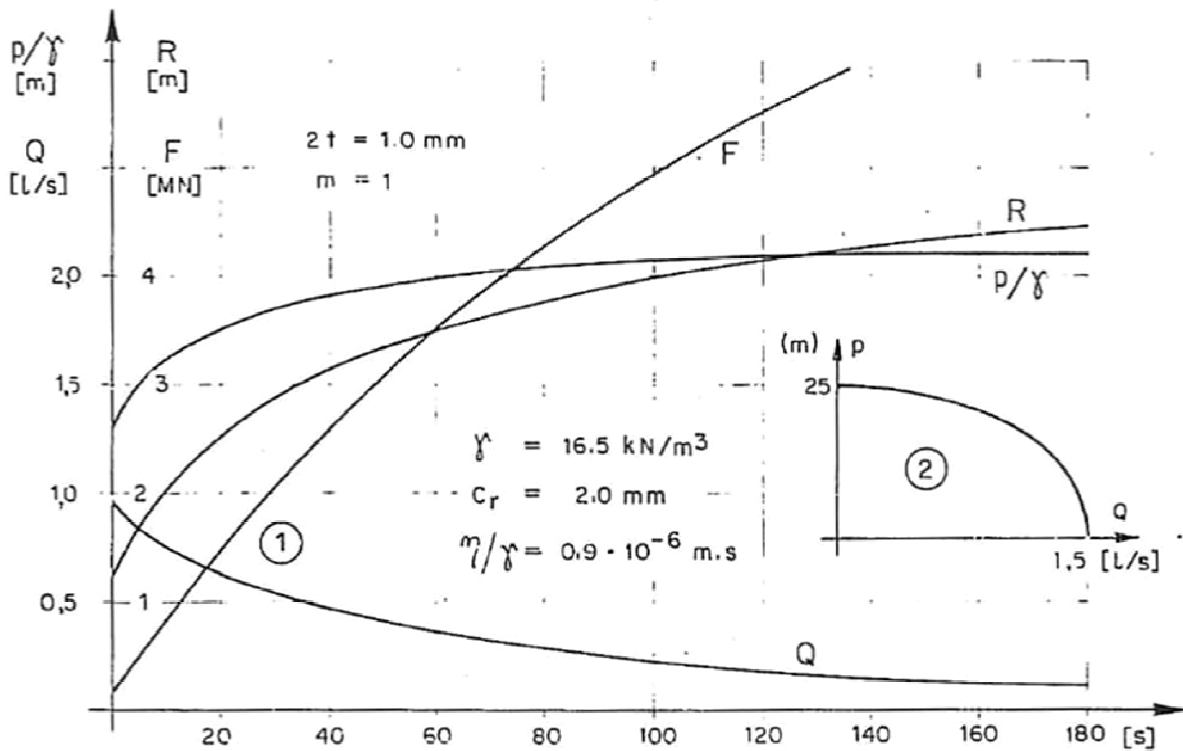


Figura 5.11. Ejemplo de cálculo de la inyección en una discontinuidad 1) Inyección vs tiempo 2) Características de la bomba de inyección. ("Some theoretical consideration on cement grouting", Lombardi, 1985).

La variación de la carga de presión a lo largo de la discontinuidad en diferentes intervalos de tiempo se muestra en la figura 5.12. Es de gran interés el hecho de que la distribución de presión a lo largo de una discontinuidad tiende a ser lineal conforme el tiempo aumenta. En algún punto, definido por R_{\max} , el flujo siempre se detendrá en la discontinuidad. Cuando el flujo de inyección se detiene la fuerza de viscosidad resistente es cero y solo la fuerza de cohesión está presente. Esto puede

ser presentado por el equilibrio de fuerzas en el máximo recorrido R_{max} , de la inyección en una junta de espesor $2t$, como a continuación se presenta:

$$R_{max} = \frac{P_{max} * t}{C} = h * \frac{t}{C_r} = h * f \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Donde:

$$C_r = \frac{C}{\delta} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

$$h = \frac{P_{max}}{\delta} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

$$f = \frac{t}{C_r} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Donde:

R_{max} : Recorrido alcanzado. (Radio de penetración).

P_{max} : Presión máxima.

$2t$: Espesor de la discontinuidad.

C : Cohesión.

C_r : Cohesión normalizada.

Por lo tanto R_{max} depende únicamente de:

- La aplicación de la presión final.
- El espesor de la discontinuidad.
- La cohesión por unidad de peso de la mezcla.

En realidad la extensión (R_{max}) de la zona inyectada es menor que la distancia de recorrido teóricamente calculada ya que las discontinuidades no son completamente

planas, su espesor es variable y porque la inyección es detenida por razones prácticas antes de que el límite teórico sea alcanzado. Por otra parte las discontinuidades no son continuas y se presentan muchos obstáculos durante el proceso de inyección.

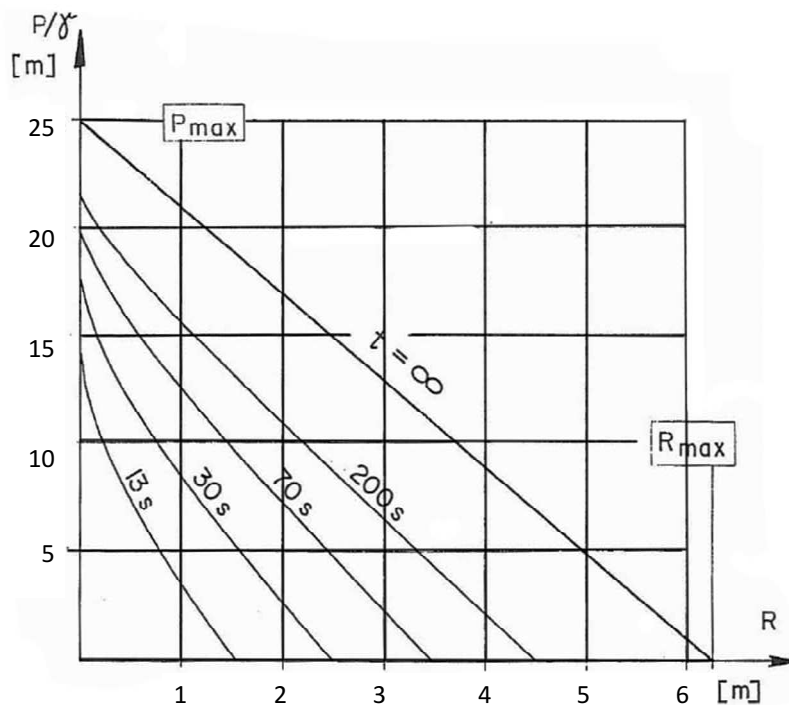


Figura 5.12. Distribución de la presión a lo largo de una discontinuidad en diferentes intervalos de tiempo durante el proceso de inyección. ("Some theorethical consideration on cement grouting", Lombardi, 1985).

En la ecuación 5.7 se proporciona el valor de la presión necesaria para que la inyección penetre en todas las discontinuidades gruesas con un cierto valor $2t_{min}$ en el interior de la roca a una distancia dada.

$$P_{nec} = \frac{2C * R}{2t_{min}} = \frac{2C * \delta * R}{2t_{min}} \quad (\text{Ec. 5.7})$$

Por ejemplo para:

$$2t_{min} = 0.2 \text{ mm}$$

$$C_r = \frac{C}{\delta} = 1 \text{ mm}$$

$$\delta = 16 \text{ kN/m}^3$$

$$R = 5 \text{ m}$$

Se determina un valor de $P_{nec} = 0.8 \text{ MPa}$. (8 kg/cm^2).

La duración de un proceso de inyección está determinada por la viscosidad de la mezcla de inyección y por las características de la bomba. Teóricamente la duración de la inyección puede ser infinita pero el volumen de inyección es siempre finito dependiendo que tan alto sea el valor de la cohesión de la lechada utilizada. La absorción máxima de la inyección está dado por:

$$V_{\max} = \pi R_{\max}^2 * 2t = \frac{2\pi P_{\max}^2 t^3}{C^2} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

Utilizando un método simplificado de cálculo, Cambefort encontró años atrás, que el proceso de inyección no debe parar. Este descubrimiento ha sido ahora corregido con las ecuaciones anteriores, siempre y cuando la mezcla tenga al menos un mínimo de cohesión.

Considerando la distribución lineal de presión como se presenta en la figura 5.12, la máxima fuerza de levantamiento en el final de la inyección de la discontinuidad puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$F_{\max} = \frac{\pi R_{\max}^2 * P_{\max}}{3} = \frac{\pi P_{\max}^3 t^2}{3C^2} \quad (\text{Ec. 5.9})$$

Con la ecuación 5.8 se puede decir:

$$F_{\max} = \frac{V_{\max} * P_{\max}}{6t} \quad (\text{Ec. 5.10})$$

Ó:

$$F_{\max} = 0.31 \frac{P_{\max}^{5/3} * V_{\max}^{2/3}}{C^{2/3}} \quad (\text{Ec. 5.11})$$

Las ecuaciones 5.10 y 5.11 presentan la relación entre el volumen inyectado, la presión final y la máxima fuerza de levantamiento como una función del espesor de la discontinuidad y la cohesión de la mezcla de inyección. Estas relaciones corresponden a hallazgos empíricos efectuados en trabajos de inyección.

Debido a que el agua no tiene cohesión y además puede entrar en fisuras muy finas, la fuerza de levantamiento puede ser muy grande incluso para volúmenes de inyección limitados en el caso del agua bajo presiones de roca. La misma condición se presenta con una mezcla inestable, debido a que el agua se separa de la mezcla y entra en las fisuras finas limitando la penetrabilidad de los granos de cemento.

5.7 Reducción del espaciamiento de las perforaciones (Inyecciones por etapas).

En la práctica usual, se inyectan las perforaciones primarias, con un espaciamiento bastante abierto (tal como 10 a 12 m) de manera que el inyectado en el primer barreno primario no interfiera con el siguiente. Frecuentemente se especifica que se perfore e inyecte, cada tercer o cuarto barreno primario antes de los demás primarios, para servir como perforaciones primarias "exploratorias". Estas perforaciones serán frecuentemente perforaciones con recuperación de núcleos de roca y se deberán realizar con pruebas de agua a presión hasta una profundidad total de $0.75 \times H$ (en donde H es la altura del vaso futuro en el punto en cuestión). El resto de las perforaciones primarias podrá ajustarse en profundidad de acuerdo a los resultados de las perforaciones exploratorias primarias.

En la siguiente serie (etapa) de perforación, los denominados barrenos secundarios, se encuentran en una localización intermedia de espaciamiento entre los primarios. Debido a que estas perforaciones se encuentran únicamente alejadas 5 o 6 m de las perforaciones primarias, encontrarán con frecuencia lechada endurecida en algunas de las fisuras más amplias. En general, sus "consumos" serán más bajas que las de las primarias. Frecuentemente se requieren perforaciones terciarias, nuevamente a

un espaciamiento intermedio (2.5 a 3 m), generalmente con tomas aún menores; eventualmente se podrán requerir aún perforaciones cuaternarias (de 1.25 a 1.5 m de cada perforación terciaria), resultando generalmente en una absorción aceptablemente baja de lechada.

Debido a que el macizo rocoso se hace más cerrado con cada fase o etapa de inyección, las fisuras no inyectadas encontradas en perforaciones generalmente serán más finas; por lo tanto, utilizar presiones altas serían benéficas y producirían una operación de inyectado más eficiente.

De esta manera, se identifica el tercer factor de importancia del procedimiento GIN: una presión progresivamente más elevada conforme se consolida la roca, de manera de que se inyecten progresivamente fisuras más finas.

5.8 Pruebas de presión de agua (Lugeon).

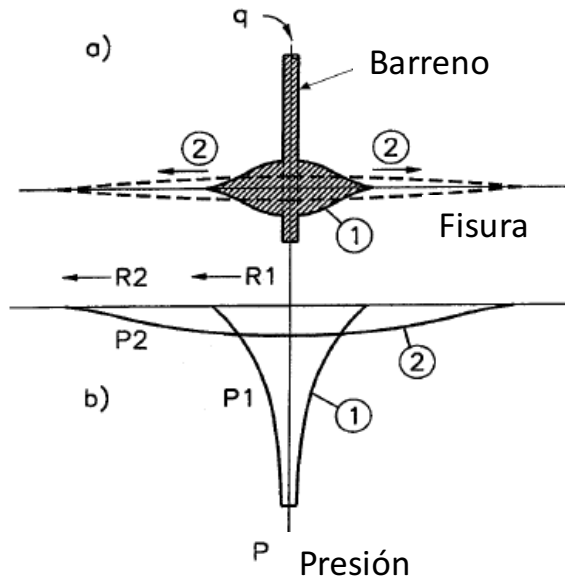
Se han empleado frecuentemente pruebas de presión de agua (pruebas Lugeon) en cada intervalo de inyectado para ayudar a seleccionar la mezcla de inyectado. Sin embargo, la experiencia y la teoría han indicado una correlación muy pobre de los valores Lugeon con las absorciones de lechada. Sin embargo, todavía se podrán emplear las pruebas Lugeon o similares en las perforaciones exploratorias primarias, para obtener una imagen general de la permeabilidad a través del empotramiento y el área de cimentación de la cortina principal. En el capítulo 2.5 se presentaron más detalles de este tipo de pruebas.

5.9 Hidrogateo (Hidrojetting) e Hidrofracturamiento.

Es importante entender estos dos conceptos ya que en muchas ocasiones causan confusiones erróneas.

Regularmente se piensa que los hidrogateos deben hacer referencia a la apertura por la inyección de juntas preexistentes en el macizo rocoso, mientras que hidrofracturamiento describe la formación de nuevas grietas debido a un aumento de la

presión de agua o de la mezcla de inyección. De hecho un hidrofracturamiento es un evento relativamente raro. No todas las disminuciones de presión durante el proceso de inyección deben ser interpretadas como un hidrofracturamiento, de hecho las fracturas pueden abrirse de forma repentina. De acuerdo con la figura 5.13 un tipo de inestabilidad elástica ocurre. El verdadero hidrofracturamiento está principalmente relacionado con fracturas potenciales como los planos de estratificación débiles. La apertura de ambos planos, es debida a los esfuerzos de tensión inducidos en la roca compacta por la cercanía de la presión de inyección de agua.



- a) Extensión repentina del tramo abierto de una fisura en el proceso de inyección.
- b) Propagación de la presión.

Para a) y b)

(1) Antes del hidrogateo.

(2) Después del hidrogateo.

q Velocidad del flujo de inyección

P presión.

R Alcance desde el pozo.

Figura 5.13. Hidrogateo o distensión como un tipo de inestabilidad elástica o bifurcación ("Grouting of Rock Masses", Lombardi, 2003).

Esto ocurre con frecuencia cuando el barreno es paralelo a los planos de debilidad, mientras el hidrogateo suceda más o menos de la misma manera sin importar ángulo entre el barreno y la discontinuidad.

Las combinaciones de hidrogateo e hidrofracturamiento son posibles, como se muestra en la figura 5.14, Sin embargo el riesgo es mayor cuando el agua o una

mezcla fina actúa presionando a las discontinuidades potencialmente delgadas donde la mezcla espesa no puede penetrar.

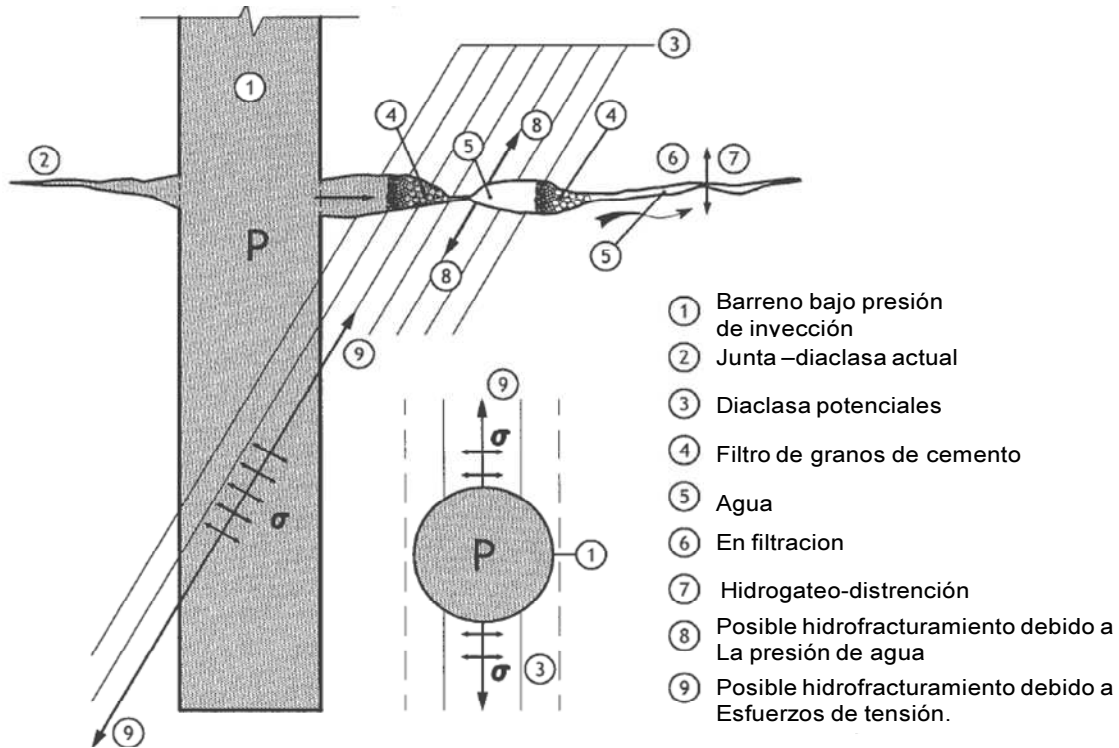


Figura 5.14. Penetración de una mezcla delgada a presión en una discontinuidad (“Grouting of Rock Masses”, Lombardi, 2003).

Si se utiliza una mezcla con buenas propiedades para la inyección de rocas, un hidrofracturamiento es rara vez perjudicial, excepto si se produce un levantamiento vertical a poca profundidad. Sin embargo si se producen continuamente efectos de hidrofracturamiento, se presentarán pérdidas de lechada y por lo tanto costos adicionales, lo mismo se puede decir si se presentan distensiones o hidrogateos en las discontinuidades existentes.

5.10 Energía Específica Empleada.

Para inyectar una zona de roca en forma más intensiva, se requiere emplear más energía. En un intervalo o progresión de inyectado dado, la energía empleada es aproximadamente proporcional al producto de la presión (P) del inyectado final y del

volumen de inyectado (V), dando un producto de $P \cdot V$. Este número $P \cdot V$ se llama el número de intensidad de inyectado o GIN. El volumen puede normalizarse con la longitud del intervalo de inyectado como litros/m (o en forma intercambiable por peso de cemento inyectado en kg/m, ya que para mezclas moderadamente espesas los valores numéricos son similares dentro de un 5 al 10%).

La presión ha utilizado tradicionalmente la unidad bar, y el volumen en litros, por lo tanto las unidades $P \cdot V$ o número GIN son bar-litros/m, de cualquier manera pueden utilizarse unidades equivalentes haciendo las conversiones adecuadas.

El método GIN requiere que, una vez que se haya seleccionado el número de intensidad de inyectado (por ejemplo una intensidad alta GIN de 2000 bar · l/m), este valor deberá utilizarse, tanto para las fisuras fácilmente inyectables con grandes volúmenes de absorción inyectadas a baja presión, como para las fisuras más finas con tomas bajas pero con presiones considerablemente más elevadas. De esta manera, se mantiene un valor constante de GIN.

Al mantener un valor constante de energía de inyectado GIN durante el proceso de inyección para todas las progresiones, se obtiene una penetración casi constante de la lechada y se limita casi automáticamente el volumen en una fisura abierta amplia, pero se permite incrementos de presión en zonas más cerradas y fisuras menos inyectables.

Con el método GIN, se eliminan las combinaciones de presión elevada y volumen de inyección alto, una condición que conduciría a esfuerzos considerables de hidrogateo o de hidrofracturación. De una manera similar, se eliminan las combinaciones de presión baja con una toma baja, las cuales inyectarían las fisuras finas de una manera inadecuada.

Un valor constante de GIN, cuando se dibuja en una gráfica de presión contra volumen, forma una curva hiperbólica: mientras más elevada la intensidad de inyectado o el valor GIN, más grande es la distancia del origen a la curva. De esta manera la curva GIN completa el ingrediente faltante para juntar los otros dos límites discutidos en párrafos anteriores:

- Volumen límite.
- Presión Límite.
- Curva de intensidad de inyectado que limita el volumen de inyección.

5.11 Envoltentes limitantes.

En la figura 5.15 se muestran las trayectorias P-V de cuatro tipos de fisuras. Una fisura abierta con abertura amplia se representa en la curva 1, que demuestra un volumen creciente de lechada inyectada con solo un incremento ligero de la presión. La curva 2 representa una fisura promedio, en donde la presión se incrementa gradualmente conforme el volumen de lechada inyectada aumenta; únicamente en el punto a' se eleva rápidamente la presión conforme la resistencia a la penetración de la lechada se incrementa en una forma desproporcionada. La curva 3 representa una fisura cerrada, en donde la presión de inyectado se eleva rápidamente con tomas de lechada pequeñas. De una manera similar, la curva 4 representa una fisura extremadamente cerrada con una toma de lechada muy pequeña y una presión elevada de rechazo.

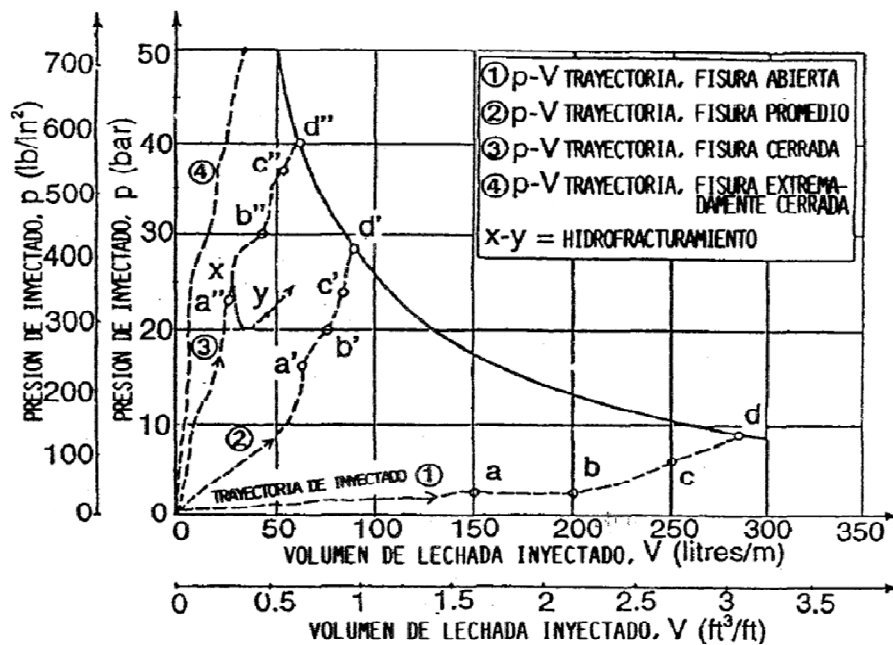


Figura 5.15. Curvas de trayectoria de inyectado (Lombardi & Deere, 1993).

La figura 5.16 ilustra cinco envolventes limitantes propuestas para diferentes intensidades de inyectado. El valor GIN, la presión límite y el volumen límite; son los tres parámetros, que definen la curva envolvente límite para el inyectado. La envolvente superior representa un inyectado de muy alta intensidad, con un valor, GIN de 2500 bar- l/m, una presión límite muy elevada de 50 bar y un volumen límite muy elevado de 300 l/m. La envolvente más baja representa una intensidad muy baja con un valor GIN de 500 bar-l/m, una presión máxima de 15 bar y un volumen límite de 100 l/m. Para la mayoría de las condiciones, los autores recomendarían la envolvente de intensidad moderada con un valor dado de 1500 bar- l/m, una presión límite de 30 bar y un volumen límite de 200 l/m.

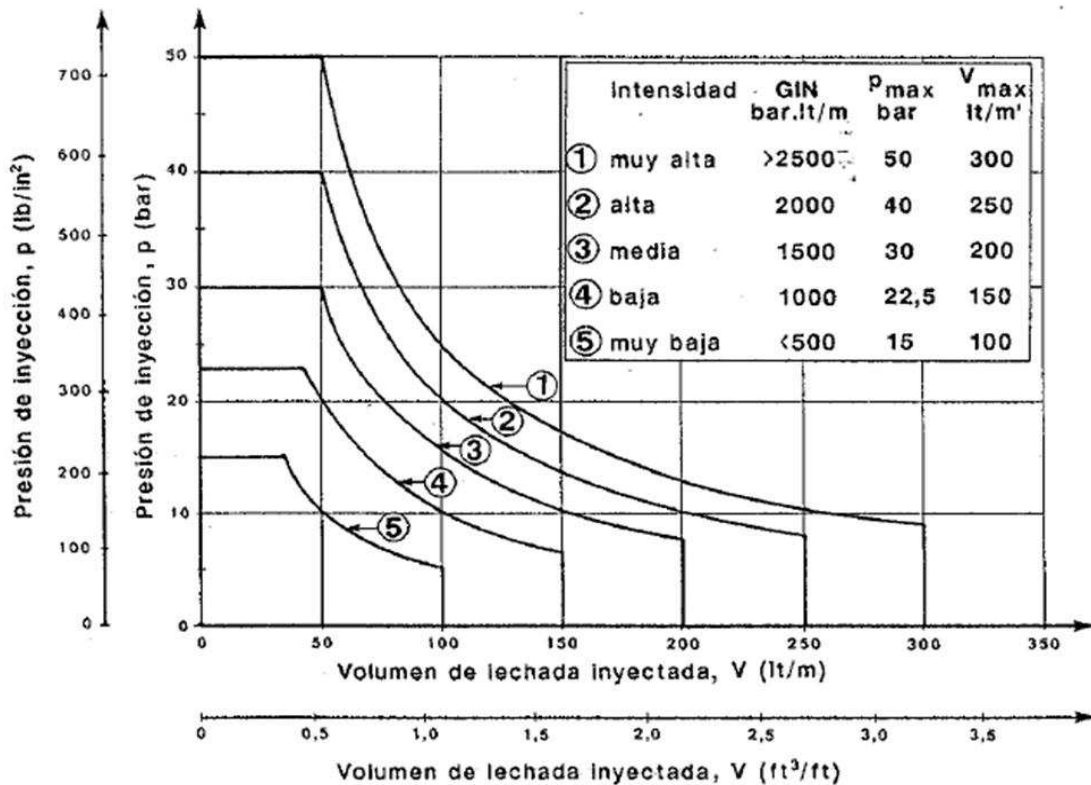


Figura 5.16. Curvas GIN límite para diferentes intensidades de inyectado (Lombardi & Deere, 1993).

Para áreas geológicamente críticas (cerca de la superficie o sobre taludes con una pendiente muy pronunciada), sería aplicable la curva muy baja. Se comprende

fácilmente, de la combinación de las figuras 5.15 y 5.16, que el proceso de inyectado se detendrá en diferentes puntos dependiendo del valor seleccionado para la envolvente de inyectado.

A continuación se analizaran los procesos de inyección de la figura 5.15.

Analizando la curva 1 de la figura 5.15 el proceso de inyección se terminaría en a) para un inyectado de baja intensidad, es decir considerando una envolvente límite de intensidad baja. Sin embargo si se especificó una envolvente de intensidad media (curva 3 de la figura 5.16) el proceso de inyección continuaría hasta el punto b) de la figura 5.15, con un volumen máximo de 200 l/m y una presión final de inyección de 3 bar. Por el contrario si se hubiera seleccionado una envolvente de energía de alta intensidad, la inyección continuaría hasta el punto c, el volumen límite sería de 250 l/m y la presión final de inyección estaría en el orden de 6 bar. Finalmente si se selecciona una envolvente de energía de inyección de intensidad muy elevada, el proceso de inyección terminaría en el punto d, en este último caso, la inyección no terminaría por el volumen límite especificado, sino más bien por la intersección de la curva GIN de 2500. Para el caso del punto d, el volumen total de inyectado sería de 285 l/m y la presión final de inyectado sería de 9 bar.

En la tabla siguiente se presentan las condiciones generadas en el proceso de inyección de la curva 1 de la figura 5.15.

Curva 1	GIN 500		GIN 1000		GIN 1500		GIN 2000		GIN 2500	
	Vmax	Pmax	Vmax	Pmax	Vmax	Pmax	Vmax	Pmax	Vmax	Pmax
	100	15	150	22.5	200	30	250	40	300	50
Punto a			150	3						
Punto b					200	3				
Punto c							250	6		
Punto d									285	9

Nota: Unidades Vmax: l/m y Pmax: bar.

Tabla 5.4. Valores de la curva 1 según la intersección de cada envolvente GIN.

Para la curva 2 de la figura 5.15, el volumen inyectado en el punto a', sería del orden de los 60 l/m y la presión final de inyección sería de 13 bar, si el proceso de inyección se continuara hasta el punto d', que sería la envolvente de energía de inyección más elevada $P \cdot V = 2500$, el consumo de inyección se hubiera incrementado hasta 90 l/m y la presión máxima de inyección alcanzaría los 28 bar.

Para la curva 3, el proceso de inyección se detendría entre los puntos a" y d", dependiendo de las envolventes GIN utilizadas y de la presión límite seleccionada. La porción x-y de la curva 3, representa un ejemplo de hidrofracturamiento, en donde la discontinuidad o plano de estratificación presenta una pérdida de presión y un incremento en el caudal de inyección. En este caso se puede continuar el proceso de inyección a velocidades bajas para tratar de alcanzar la envolvente GIN seleccionada, ya que si se realiza un incremento de presión probablemente se presente otro caso de hidrofracturamiento, ya sea en el mismo valor de presión o en un valor relativamente mayor. Es cuestionable el hecho de seguir el proceso de inyección en estas condiciones, sin embargo, muchas veces se ha realizado este proceso, ya que tarde o temprano se alcanza la curva límite y el inyectado se detiene.

5.12 Selección de la energía específica o Curva GIN.

Lombardi y Deere recomiendan el valor de GIN moderado de 1500 bar- l/m, como un inicio, deberán tomarse en cuenta las condiciones geológicas, el valor de las futuras pérdidas de agua y las presiones de subpresión después del llenado. Los límites máximos de presión y los límites máximos de volumen también pueden ser modificados por los proyectistas y los ingenieros de control de campo para casos especiales. El mejor procedimiento es el de llevar a cabo uno o dos tramos de pantalla impermeable de prueba, antes de seleccionar la envolvente limitante de inyectado.

El límite máximo de presión puede ser menor en los empotramientos (márgenes) de la presa que aquel seleccionado para el fondo de la cimentación, debido a

diferencias en la carga del embalse. Un valor adecuado de presión máxima, es aproximadamente dos veces la carga hidráulica de un embalse, pero puede ser difícil lograr esto sin inducir un hidrofracturamiento no deseable. Por lo que continuamente se debe monitorear el comportamiento de la presión durante los procesos de inyección.

5.13 Inyección con equipo automatizado.

Actualmente se pueden instalar y operar computadoras fácilmente en el sitio en donde se llevan a cabo las inyecciones, existe ahora la posibilidad de un control continuo, en tiempo real, del proceso de inyectado. Solamente se deberán leer de una manera continua dos valores por medio del sistema: la presión actual (p) y la velocidad de flujo (q), la cual se puede obtener por medio de integración del volumen acumulado V por unidad de longitud. Si se desea, puede medirse directamente el volumen V de lechada inyectada; y la velocidad de flujo se podrá obtener por el volumen inyectado en un periodo de tiempo.

Empezando desde los valores medidos de p y q , se pueden mostrar y graficar una serie de esquemas de tiempo sobre la pantalla del monitor (por ejemplo presión, velocidad de flujo, volumen acumulado y penetrabilidad contra el tiempo). La figura 5.17 muestra tal serie de gráficas. Llama la atención la curva (d), que representa el flujo específico (q/p) o penetrabilidad (es decir, la velocidad de flujo dividida entre la presión) contra el tiempo. Esta curva muestra claramente el llenado progresivo de los huecos y fisuras y el crecimiento de la resistencia al inyectado, causada en primer lugar por el incremento de la fuerza total cohesiva, conforme se extiende el flujo de lechada más adelante a lo largo de las fisuras de la roca. Se observa fácilmente un evento de hidrofracturamiento o hidroelevación por la presencia de un pico en la gráfica.

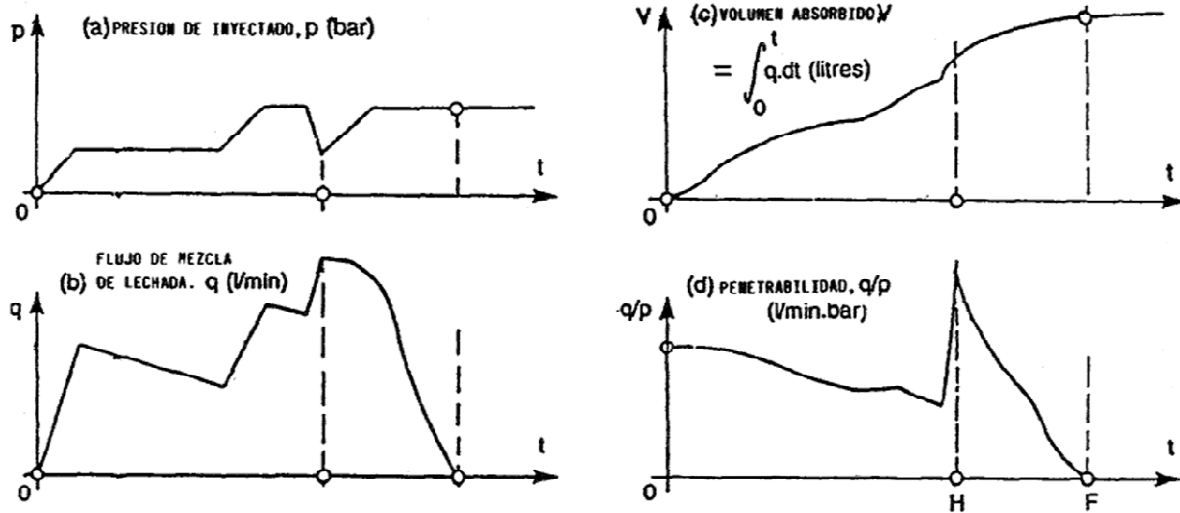


Figura 5.17. Proceso de inyectado en una progresión, (a) Presión de Inyectado, (b) Flujo de Mezcla de Lechada, (c) Volumen Absorbido, (d) Penetrabilidad. 0: Inicio de la inyección H: Hidrofracturamiento y F: Finalización de la Inyección.

5.14 Gráficas de monitoreo en el proceso de inyección.

La figura 5.18 representa las gráficas principales de control que pueden presentarse en un equipo automatizado. Estas curvas pueden utilizarse para controlar el proceso de inyectado. La figura 5.18 a) muestra la envolvente limitante de inyectado que ha sido seleccionada para el proyecto (o para una zona dada del proyecto), incluyendo la presión límite P_{max} , el volumen límite de V_{max} por unidad de longitud y la envolvente GIN seleccionada.

La curva (2) mostrada en la figura 5.18 a) representa la trayectoria real del inyectado graficada en pequeños incrementos de tiempo, de la presión instantánea de inyectado contra el volumen acumulado de inyección de lechada por unidad de longitud. La curva irregular (2) de la trayectoria de inyección intercepta la curva GIN en el punto F, y el inyectado se detiene a una velocidad de flujo "cero", con una presión final P_F y un volumen total unitario acumulado de lechada inyectada V_F .

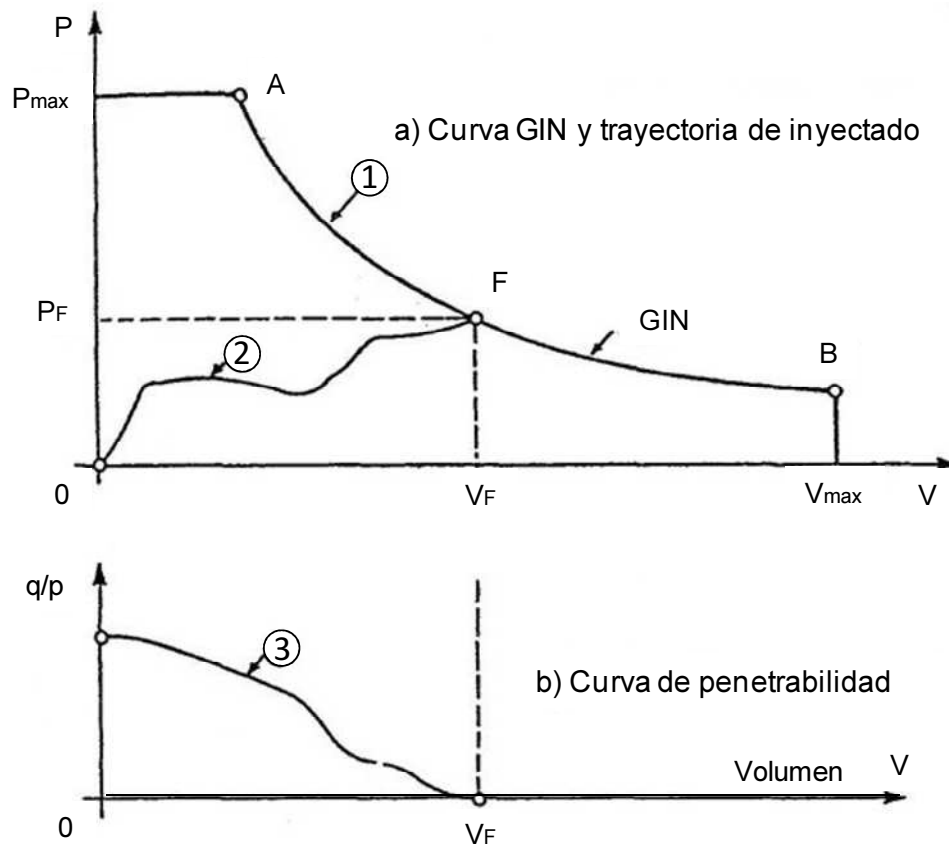


Figura 5.18. Proceso de inyectado en una progresión.

En donde: (1): Curva límite presión contra toma de lechada; (2): Trayectoria real de inyectado presión contra toma de lechada; (3): Penetrabilidad (q/p) contra toma de lechada; F: Punto Final del inyectado; P_F : Presión Final de Inyectado y V_F : Toma real de lechada.

La figura 5.18 b) también es una curva importante de monitoreo en tiempo real. La penetrabilidad q/p se gráfica contra el volumen acumulado de lechada inyectada en vez de, contra el tiempo, como en la figura 5.18 a) dando curvas similares.

Conforme se desarrolla la curva, se observa normalmente un descenso en la penetrabilidad, lo que indica que la eficiencia del inyectado está disminuyendo. De esta manera, a una presión constante de inyectado, la velocidad de flujo va disminuyendo o bien, si se mantiene una velocidad constante de flujo (casi al final), la presión de inyectado va creciendo. La decisión de cuál de estas combinaciones es

aplicable, depende de ambos, el tipo de bomba y los detalles de la operación de inyectado (tuberías, válvulas).

El descenso de la curva de penetrabilidad-volumen indica que el proceso de inyectado está caminando normalmente. Deberá monitorearse y controlarse la presión de inyectado para detener el proceso en los límites de inyectado sobre la curva GIN.

Como se indicó en la sección anterior, la trayectoria de inyectado llegará a la curva GIN en diferentes puntos, en función de la abertura de las fisuras de roca (fisura amplia cerca del punto B y fisuras finas cerca del punto A; figura 5.18). Conforme avance la trayectoria de inyectado hacia la curva GIN, las velocidades de bombeo deberían ser tan bajas como sea posible, mientras se logre una penetración de lechada (por ejemplo 500 l/h es decir 17.6 ft³/h o 2.2 gals/min). La experiencia ha demostrado que estas diferentes gráficas ayudan a controlar el proceso de inyectado de una manera efectiva y continua.

5.15 Cortina de Inyección.

El método es aplicable a todos los intervalos o progresiones de una perforación de inyectado y a todas las perforaciones primarias y con etapas intermedias. El procedimiento de reducción de etapas en una pantalla de una línea, es un método comprobado eficiente basado en un razonamiento teórico fundamentado.

En ciertas rocas altamente permeables o cavernosas (flujos de lavas, algunas calizas, areniscas fracturadas), se han construido pantallas de tres líneas. Generalmente se inyecta primero la línea de aguas abajo, seguido por la línea de aguas arriba y finalmente por la línea central. Se considera que las dos líneas exteriores se comportan como líneas de barrera (confinamiento) y con frecuencia se inyectan únicamente las perforaciones primarias y secundarias, con la intención de rellenar la mayoría de las fisuras o huecos mayores. La línea central puede tratarse entonces como una pantalla normal de una sola línea con perforaciones primarias hasta terciarias y cuaternarias o de quinta etapa, si se requiere.

En el método de reducción de espaciamientos, las perforaciones primarias rellenarán parcial o totalmente e inyectarán únicamente las fisuras más amplias de la roca. Las etapas de perforación siguientes (secundarias) nuevamente inyectarán únicamente las fisuras más amplias, que no se hayan logrado inyectar en la primera etapa, y así sucesivamente.

En la figura 5.19 se grafican las posiciones finales probables de las perforaciones primarias, secundarias, terciarias y adicionales (cuaternarias o perforaciones de comprobación) sobre la curva GIN. El volumen promedio de lechada absorbida disminuirá de una serie a la siguiente, mientras que la presión final de inyectado se incrementará de una manera correspondiente de una etapa a otra. Esto sucede en forma automática cuando se sigue el procedimiento GIN.

Con un espaciamiento de perforaciones primarias de 10 a 12 m, es probable que se requieran etapas secundarias y terciarias. Las perforaciones terciarias estarían a una distancia de 2.5 a 3 m de la perforación adyacente más cercana; estas perforaciones podrían ser más cortas, dependiendo de la geología y de los resultados de las perforaciones secundarias.

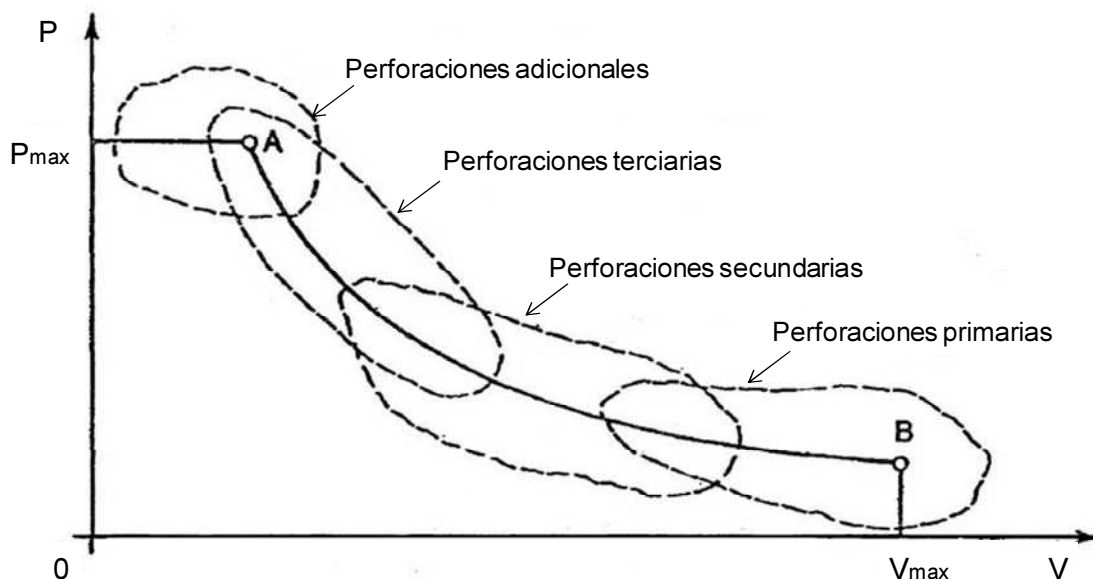


Figura 5.19. Ejemplo de resultados del inyectado para una pantalla de inyecciones. Puntos finales de las trayectorias de todas las progresiones de inyectado (Típico) (Lombardi, 1993).

Es posible que se requieran perforaciones cuaternarias y es buena práctica utilizar barrenos de exploración dirigidos a zonas que hayan mostrado defectos en el macizo rocoso en etapas previas.

5.16 Relación barrenos de inyección y la energía específica de inyectado GIN.

Es obvio que debe existir una relación entre el espaciamiento de las perforaciones y el GIN requerido. Por ejemplo, si el espaciamiento primario es demasiado amplio y el GIN seleccionado demasiado bajo, no resultará ningún decremento significativo de los consumos de lechada de la serie primaria a la secundaria, o aún hasta la terciaria. En tal caso, no se puede dar ninguna garantía para una pantalla exitosa, aunque se hayan efectuado gastos considerables de perforación e inyectado.

Si el espaciamiento primario es demasiado cercano o el GIN es demasiado elevado, las tomas de lechada serán muy bajas después de las primeras dos series y las perforaciones terciarias serían esencialmente un desperdicio. El GIN también está relacionado con la distancia que viaja la lechada y por lo tanto, con el espesor de la pantalla en roca.

Una regla empírica, que funciona, es el seleccionar los valores de GIN y el espaciamiento de tal manera, que el volumen inyectado por metro de progresión de inyectado se reduzca de una serie de perforaciones a la otra en alrededor del 50% (de una manera realista en el rango del 25 al 75%). Tal comportamiento daría confianza de que está ocurriendo un cierre progresivo en la pantalla. Se podrán emplear uno o más tramos de inyectado de prueba durante la fase de diseño o en la primera parte de los trabajos de inyección, para definir mejor el espaciamiento óptimo de las perforaciones primarias y el valor de GIN.

5.17 Criterios de evaluación.

Si las trayectorias de inyectado de las perforaciones de la última serie (digamos la serie terciaria) no alcanzan la línea de la presión límite superior del GIN seleccionado

(y preferentemente en la mitad izquierda de la línea), se deberán inyectar perforaciones adicionales en ambos lados de estas perforaciones que no cumplan estos criterios. De esta manera, todas las partes de la pantalla (aunque no todas las perforaciones primarias, secundarias y terciarias), se habrán inyectado a la presión límite máxima de inyectado con absorciones de lechada razonablemente bajas (menos de 25 kg/m o 0.18 sacos/ft, por ejemplo).

En conclusión se cree que, si uno sigue los conceptos y reglas presentadas, se puede lograr una distribución bastante óptima del volumen total inyectado a lo largo de la pantalla. El procedimiento toma en cuenta, casi en forma automática, las irregularidades reales de las condiciones geológicas en la masa de roca. Al hacer esto, se puede maximizar la relación beneficio costo de la pantalla de inyectado.

5.18 Análisis de resultados.

La optimización del proyecto requiere un registro muy cuidadoso de todos los eventos ocurridos durante la construcción así como una interpretación permanente de los datos. Las condiciones mejores se obtienen hoy en día de manera muy sencilla y eficaz con un seguimiento continuo de la inyección sobre la pantalla de una computadora y con una adecuada programación de las inyecciones, así como con un procesamiento electrónico de los datos en tiempo real.

La realización de una cortina (o fila de inyecciones) puede considerarse exitosa si se produce una clara disminución de la toma de mezcla de los taladros de una serie a los de la serie siguiente. Una reducción de 25% a 75% corresponde a un buen valor promedio.

En el análisis de los resultados de la inyección de la pantalla es sumamente recomendable no limitar el estudio a los valores de las tomas por metro de taladro (lts/m) sino de analizar también las tomas totales de lechada por unidad de superficie de pantalla.

Con este objetivo se subdivide la superficie de la pantalla en elementos de 100m^2 (y hasta de 200 m^2) evaluando la toma de todos los tramos de los taladros que interesan a cada superficie unitaria.

Cuando este valor (consumo promedio en dicha superficie) sobrepasa un cierto límite (de por ejemplo 100 lts/m^2 o hasta de 200 lts/m^2), debe investigarse cuál es la razón de esta situación y deben ser tomadas las decisiones que le corresponda.

Las razones más frecuentes son: fugas de lechadas al exterior (hacia aguas arriba o aguas abajo), fugas hacia galerías o cavernas, razones geológicas como fallas, carsticidad y presencia de zonas de roca muy fracturada.

Obviamente lo antedicho se refiere esencialmente a la pantalla en sí misma y menos al caso de consolidación de volúmenes de roca.

6 PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA JALISCO-NAYARIT MÉXICO.

6.1 Datos generales.

El P. H. La Yesca, se localiza en las coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator): 2 344 050 N, 292 815 E y a una elevación promedio de 400 msnm, sobre el Río Grande de Santiago a 105 km al NW de la Ciudad de Guadalajara y a 22 km al NW de la población de Hostotipaquillo, cabecera municipal en esta zona del estado de Jalisco.

Se localiza entre el límite de los estados de Nayarit y Jalisco, constituido por el cauce del Río Grande de Santiago. La boquilla del P. H. La Yesca se localiza a 90 km, en línea recta, al noroeste de la ciudad de Guadalajara, aproximadamente a 3,50 Km aguas abajo de la confluencia de los ríos Bolaños y del Río Grande de Santiago, sobre el cauce de este último. El P. H. "La Yesca" forma parte del Plan de aprovechamiento integral del Río Lerma-Santiago. La obra de contención se encuentra emplazada en el cauce y en ambas márgenes del Río Grande de Santiago. En la figura 6.1 se presenta el Croquis de localización del sitio.

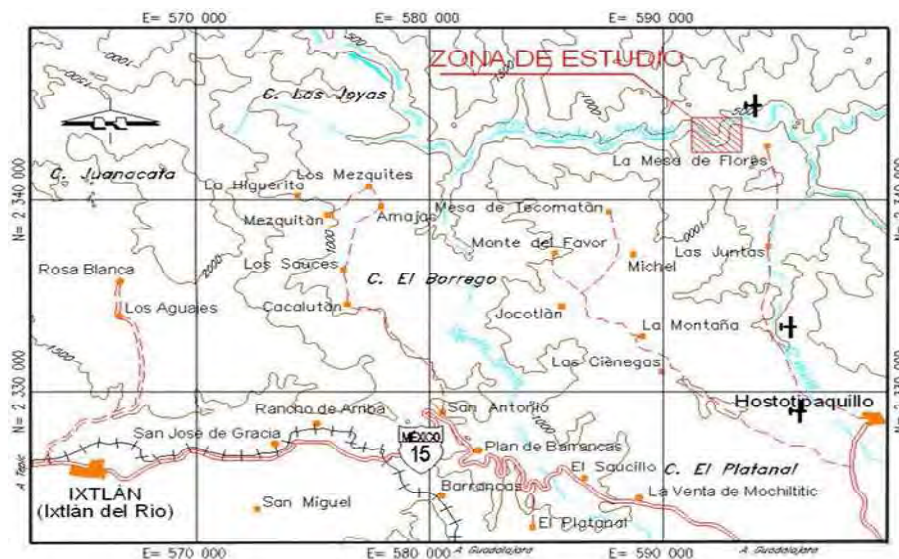


Figura 6.1. Croquis de localización del sitio.

El P. H. La Yesca, consta de una obra de contención de tipo enrocamiento con cara de concreto de 210 m de altura, medidos desde el desplante del Plinto hasta el parapeto; obra de desvío con 2 túneles de sección portal de 14,00 m de alto en la MI; una ataguía aguas arriba de 40 m de altura y ataguía aguas abajo de 22,00 m de altura; vertedor a cielo abierto con 6 vanos para compuertas en la zona de control localizado en margen izquierda y planta hidroeléctrica subterránea con casa de máquinas en caverna en la MD que aloja 2 unidades turbogeneradoras de 375 MW cada una.

La Obra de contención para el P. H. La Yesca es de tipo enrocamiento con cara de concreto (ECC), con altura total al desplante del Plinto de 210 m. La losa de concreto se une a la cimentación mediante la losa del Plinto, el cual se desarrolla en la traza de aguas arriba de la cortina.

Para lograr un adecuado desplante en la cimentación se construyó el Plinto, el cual corre a todo lo largo del contacto de la losa de concreto con la roca. El objetivo del Plinto es el de trabajar como una cimentación de la losa y como un elemento que permita realizar barrenos inyectados para el control de filtraciones, las inyecciones son realizadas con mezclas de cemento y aditivos.

A través de la losa del Plinto se realizaron los tratamientos de consolidación e impermeabilización, complementándose desde las galerías que fueron excavadas en ambas laderas adyacentes al empotramiento de la cortina, formando de esta manera el plano de estanqueidad.

6.2 Estudios Realizados.

En el año 2004 se realizaron estudios consistentes en levantamientos geológicos y se identificaron afloramientos de diques andesíticos en la margen izquierda y baja calidad en la roca hacia aguas arriba debido a alteraciones de tipo hidrotermal. En 2006 se realizaron barrenos exploratorios en la zona donde se desplantaría el Plinto.

Se llevaron a cabo estudios de campo con la finalidad de determinar las condiciones geológico-geotécnicas de la zona del Plinto. Los estudios básicamente consistieron en levantamientos geológicos, topográficos, exploración indirecta mediante pruebas geofísicas y exploración directa mediante barrenos con recuperación de núcleos en diámetro NQ (47 mm) y pruebas de permeabilidad tipo Lugeon.

Mediante los estudios realizados se permitió caracterizar el macizo rocoso sobre el cual se fundó el Plinto.

6.3 Geología del Sitio.

En el sitio a lo largo del cual se presentó la traza del Plinto de él P. H. La Yesca se presentaron diversas unidades litológicas, principalmente:

- Ignimbritas de composición dacítica y riódacítica.
- Tobas líticas.
- Diques de composición andesítica y diabásica.
- Aluvión.
- Depósitos de talud.
- Depósitos de paleocauce.
- Depósitos lacustres.
- Depósitos pumicíticos.

En la figura 6.2 y 6.3 se presenta la geología a lo largo de la traza del Plinto en la etapa de exploración.

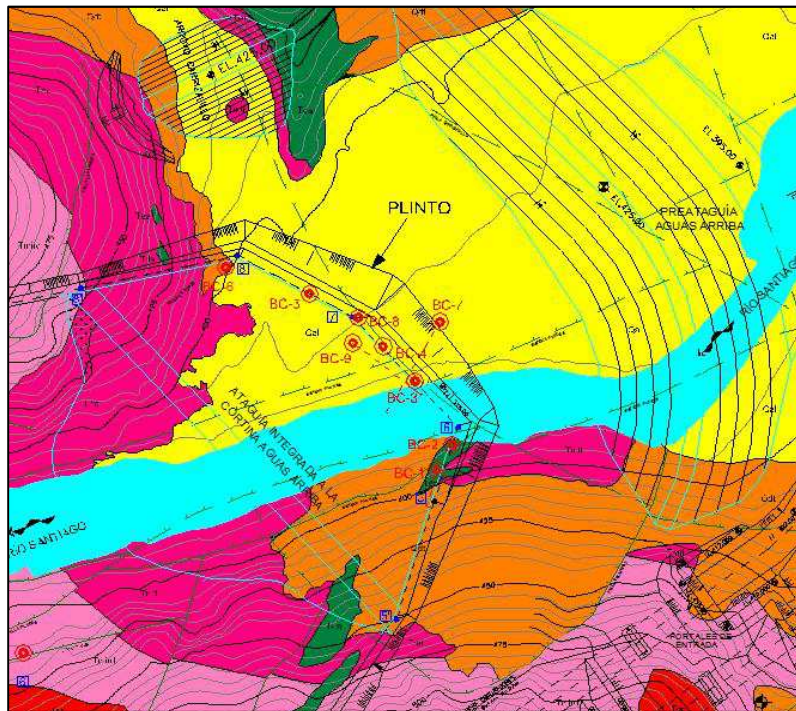


Figura 6.2. Geología superficial en la zona del Plinto-Cauce.

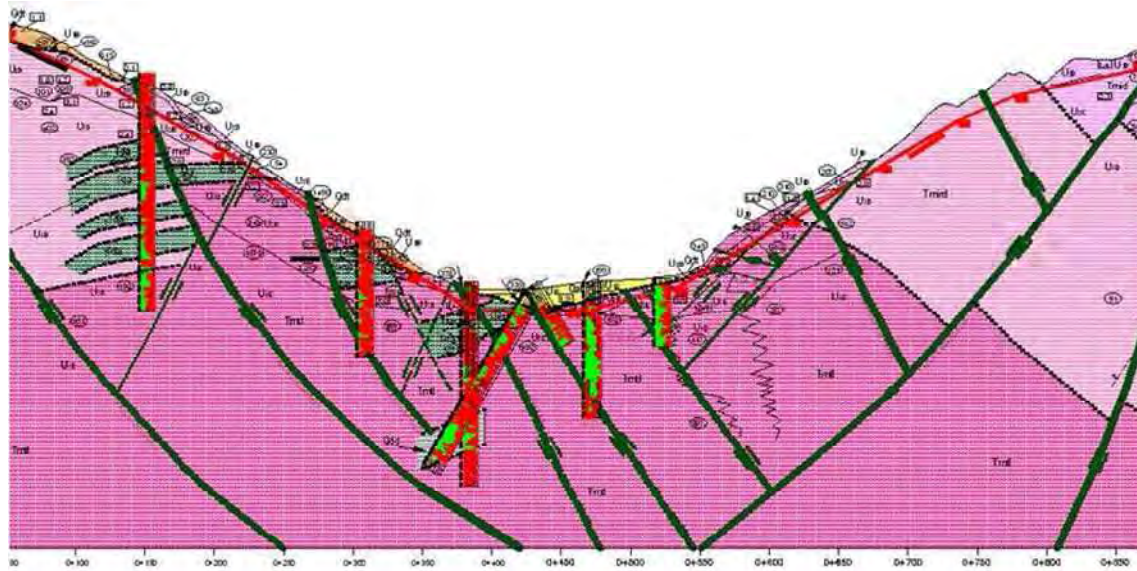


Figura 6.3. Sección geológica-geofísica a lo largo del eje del Plinto.

Se determinó que el macizo rocoso se encuentra afectado por fallas regionales escalonadas, que por lo general delimitan bloques, se identificaron dos sistemas de fallas geológicas orientados al NE-SW y N-S. Las fallas más importantes que afectan

las obras de la Margen izquierda son las fallas Vertedor 1 y Vertedor 2, Mogote, Mirador, Socavón y Olga; en tanto que las obras localizadas en la margen derecha están afectadas por las fallas Pilar, Crucero-Pitatyo y Esperanza.

Durante la excavación para la cimentación del Plinto se cortaron diques andesíticos (Tda), además, en ambas márgenes se presentó un sistema de fallamiento asociado a la Falla Pilares que tiene una orientación N-S/50°-75° W.

En la margen Derecha se identificó una ignimbrita Fluidal, que se presenta fracturada y descomprimida por la confluencia de fallas importantes, el macizo rocoso en esta margen presenta sistemas de fracturas N28°/59°NE, N41°E/69°SE y N83°E/64°NW que se conjugan con la seudoestratificación.

Los contactos litológicos entre las unidades de la toba lítica con la riodacita fluidal y esta última con la dacita porfídica, en ambas márgenes se encuentran en contacto roca a roca.

En la zona del cauce los espesores promedio del material aluvial fueron del orden de 15 m. Por debajo del aluvión se presentó un cuerpo de pórfido andesítico el cual se encuentra muy fallado debido a estructuras asociadas con la Falla Pilares.

En la margen izquierda se presentan cuatro sistemas de fracturas preferentes N50°-54°W/69°NE-72°SW (f1), N35°E/81°NW (f2); N75°-79°E/50°SE-66°NW (f3); y N02°E/61°SE (f4). En la margen derecha se presentan los sistemas N28°W/59°NE (f1); N41°E/69°SE (f2); N83°E/64°NW (f3) y N22°W/53°SW (f4).

El macizo rocoso en general está afectado por cuatro sistemas de fracturamiento, uno de ellos correspondiendo a los planos de seudoestratificación. Las estructuras geológicas más importantes desde el punto de vista de la estanquidad de la ladera son las que siguen una orientación sensiblemente paralelas a la dirección del cauce del río Santiago en esa zona y que comunicarán el embalse con la zona de aguas abajo.

La margen izquierda del sitio del proyecto está afectada por dos fallas importantes denominadas Vertedor 2 y Falla Colapso las cuales delimitan diferentes calidades de

la masa rocosa y fueron consideradas para emitir las recomendaciones para la estanqueidad del terreno.

6.4 Aspectos Geológico-estructurales.

Las excavaciones a cielo abierto que se realizaron en ambas márgenes para la cimentación del Plinto, se efectuaron en las siguientes unidades Litológicas:

Unidad Litológica	Siglas
Tobas Líticas cristalinas.	(Tmtl)
Ignimbritas riodacíticas fluidales	(Tmird)
Ignimbritas dacíticas porfídicas	(Tmid)
Cuerpos intrusivos de andesita porfídica	(Tda)

Tala 6.1. Unidades litológicas encontradas en la zona donde se desplantó el Plinto.

Sobre la geometría del Plinto se presentaron estructuras geológicas y discontinuidades que afectaron en mayor o menor grado al macizo de roca, originando disminución en su calidad, algunas importantes por su continuidad, otras por su abundancia, unas más por su persistencia y en ocasiones por el material de relleno que contienen; entre estas, destacan las fallas, las fracturas, la pseudostratificación y los diques.

En la margen izquierda las Fallas de Colapso 1 y 2 y el sistema de la Falla Pilares, se encuentran relacionadas a los sistemas de fracturas que prevalecen en esta margen.

En ambas márgenes del río, se observa un patrón preferencial que obedece a la orientación de la Falla Pilares (E-W/50°-75°N).

En la margen derecha las fallas se rigen bajo cuatro patrones estructurales preferentes, cuyas orientaciones preferentes son: N28°W/59°NE, N41°E/69°SE, N83°E/64°NW y N22°W/53°SW.

En la tabla 6.2 se describen las fallas más importantes a lo largo de la geometría del Plinto.

Falla	Orientación	Ubicación (cad.)	Continuidad (m)	Observaciones
COLAPSO 1	N05–15°W/42–75°NE	0+106,5	300,00	Estructura de tipo lítrico con numerosos planos de falla de 0,20 a 0,70 m de espesor. Rellenos de brecha con arcilla y amplias zonas de fracturamiento intenso asociadas.
COLAPSO 2	N45–75°E/75–85°SE; N55°-85°W / 72°NE	0+253	250,00	Presenta una amplia zona de cizalla en donde se observa el relajamiento de la roca y la formación de bloques de roca con salida hacia el río.
PILARES	EW/50°-75° N	0+358	> 600,0 m	Roca muy fracturada, brechada y silicificada. Numerosos planos de falla. La zona de influencia de la falla se muestra a lo ancho del cauce del río.
EL SALTO	N05°W/61° NE	0+172	70,0 m.	Espesor de 1,20 m con una roca muy fracturada y brecha de falla bien cementada.
PLD -05	N75°E/54°NW	0+538	100,0m	Espesor de 1,0 m, alabeada y contiene brecha de falla con espesor de 0,30 a 0,70 m,
LA HORMIGA	N41°E/44°-55°NW	0+565,0	30,0 m	Su espesor no fue definido.
LA ESPINADA	N34°E/42°-56°NW	0+623,50	> 200,0 m	Espesor de 1,20 a 1,50 m con relleno de brecha de falla en un espacio de 0,10 a 0,15 m; Zona de cizalla de hasta 2,0 m.
SOCAVÓN	N22-33°W/50°NE	0+671,0	90,0 m	Espesor de 2,0 m con relleno de roca muy fracturada, superficies ligeramente abiertas.
SOCAVÓN 1	N85°W/66°NE	Paralela a la traza del Plinto	110,0 m	Tiene 1,0 m de espesor con 0,40 a 1,0 de roca muy fracturada y en partes silicificada, su traza es ondulada.
LA PALOMA	N-S / 5 9° W	0+722	70,0 m	Su espesor no fue definido, presenta roca muy fracturada y brecha de falla.
EL CUERVO	N04°W/49°SW N23°W/50°SW	0+759	100,0 m	Tiene un salto de 0,15 m, abierta con espacio de 0,10 m, zona de cizalla de casi 2,0 m.
PLD-03	N03°W/56°SW N23°W/46°SW	0+774	70,0 m	Espesor de 0,20 a 0,30 m con relleno de brecha de falla muy alterada y arena, se observa abierta hasta por espacio de 0,25 m, su plano es ondulado.

Tabla 6.2. Continúa página siguiente....

Falla	Orientación	Ubicación (cad.)	Continuidad (m)	Observaciones
PLD-04	N46°W/41°NE	0+803	65,0 m	Espesor de 1,40 m con relleno de brecha de falla y cizalla,
EL ESCARPE	N74-83°E/59° NW	0+744	80,0 m	Espesor es de 0,40 a 0,60 m con relleno de brecha de falla bien cementada y silicificada.
EL CHIVO	N62°E/64°NW	0+740	160,0 m	Espesor de 1,40 m con brecha de falla muy bien cementada.
MURCIÉLAGO	N15-25°W/72- 88°NE	0+910	170,0 m	Espesor de 5,0 a 6,0 m con roca densamente fracturada (brechada y cizallada), relleno silicificado. Afectará a la cortina y la excavación del Plinto en su parte superior. Espacios abiertos, hacia la parte alta la zona de cizalla se cierra hasta el contacto roca a roca.
LA RODILLA	N20°E/61°SE	0+874	170,0 m	Espesor de 0,60 m con brecha de falla y arcilla Esta discontinuidad impactara en la cortina en la excavación del Plinto. Su traza en superficie diseña la morfología de la margen derecha.

Tabla 6.2. Características de las principales fallas de la zona del Plinto del PH la Yesca.

De la información geológica obtenida en la etapa de exploración se realizaron pruebas de absorción de agua a 20 kg/cm^2 , con la finalidad de establecer la presión que ejercería el embalse sobre la cimentación de la presa, en función de los ensayos se determinó que a presiones menores de 20 kg/cm^2 es posible llegar a la presión crítica en una franja de 35 m a partir de la superficie hacia el interior del macizo rocoso.

En las zonas de roca descomprimida las presiones críticas oscilaron entre 9 y 13 kg/cm^2 .

6.5 Parámetros del macizo rocoso.

La clasificación geomecánica: RMR (Rock Mass Rating) desarrollada por Bieniawski, Z. T en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de

clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo rocoso, así como de la excavación o del sostenimiento en túneles por realizarse. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa por ensayo de compresión simple o de carga puntual.
- Grado de fracturación en términos del RQD (Rock Quality Designation).
- Espaciado o separación de las discontinuidades.
- Condiciones o estado de las discontinuidades; en donde se califica su longitud, abertura, rugosidad, relleno y alteración.
- Condiciones hidrogeológicas en el macizo rocoso.
- Se realiza además una corrección por la orientación de las discontinuidades (dirección y buzamiento) con respecto a la excavación, dependiendo del tipo de obra que se realizará en el macizo; túnel, cimentación o talud.

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad RMR (Rock Mass Rating), que varía de 0 y 100, correspondiendo la puntuación de 0 a una roca de calidad muy mala (clase V) y la de 100 a una roca de calidad muy buena (clase I).

En la tabla 6.3 se presenta la determinación del RMR para los materiales bajo el Plinto en la Margen Izquierda y en la Margen Derecha de la P. H. La Yesca, resultando para la Ignimbrita Dacítica (Tmid) un valor de RMR = 59 (Clase III, Calidad Media). Para la Ignimbrita Riodacítica (Tmird) un valor de RMR = 64 (Clase II, Calidad Buena). Para la Toba Lítica (Tmtl) un valor de RMR = 64 (Clase II, Calidad Buena). Para el Dique Andesítico (Tda) un valor de RMR = 35 (Clase IV, Calidad Mala).

Parámetros promedio de roca intacta y clasificación del macizo rocoso MI y MD			
Ignimbrita dacítica (Tmid)		Ignimbrita riódacítica (Tmird)	
Parámetros de clasificación	Punt.	Parámetros de clasificación	Punt.
1 Resistencia de la matriz rocosa Compresión simple Rc (Mpa) <i>RC = 76 Mpa</i>	7	1 Resistencia de la matriz rocosa Compresión simple Rc (Mpa) <i>RC = 124Mpa</i>	12
2 RQD <i>RQD=40%</i>	6	2 RQD <i>RQD=40%</i>	6
3 Separación entre diaclasas <i>(0.2-0.6m)</i>	10	3 Separación entre diaclasas <i>(0.2-0.6m)</i>	10
4 Estado de las discontinuidades		4 Estado de las discontinuidades	
<i>Longitud (>1m)</i>	6	<i>Longitud (>1m)</i>	6
<i>Abertura (0.1 a 1mm)</i>	4	<i>Abertura (0.1 a 1mm)</i>	4
<i>Rugosidad (muy Rugosa)</i>	6	<i>Rugosidad (muy Rugosa)</i>	6
<i>Relleno (ninguno)</i>	6	<i>Relleno (ninguno)</i>	6
<i>Alteración (inalterada)</i>	6	<i>Alteración (inalterada)</i>	6
	28		28
5 Agua Freática <i>Seco</i>	15	5 Agua Freática <i>Seco</i>	15
corrección (Media)	-7	corrección (Media)	-7
RMR= 59		RMR= 64	
CALIDAD MEDIA		BUENA CALIDAD	
Toba lítica (Tmtl)		Dique andesítico (Tda)	
Parámetros de clasificación	Punt.	Parámetros de clasificación	Punt.
1 Resistencia de la matriz rocosa Compresión simple Rc (Mpa) <i>RC = 122Mpa</i>	12	1 Resistencia de la matriz rocosa Compresión simple Rc (Mpa) <i>RC = 76 Mpa</i>	7
2 RQD <i>RQD=40%</i>	6	2 RQD <i>RQD=20%</i>	3
3 Separación entre diaclasas <i>(0.2-0.6m)</i>	10	3 Separación entre diaclasas <i>(<0.06m)</i>	5
4 Estado de las discontinuidades		4 Estado de las discontinuidades	
<i>Longitud (>1m)</i>	6	<i>Longitud (3 a 10)</i>	2
<i>Abertura (0.1 a 1mm)</i>	4	<i>Abertura (0.1 a 1mm)</i>	4
<i>Rugosidad (muy Rugosa)</i>	6	<i>Rugosidad (ondulada)</i>	1
<i>Relleno (ninguno)</i>	6	<i>Relleno (duro) <5mm</i>	4
<i>Alteración (inalterada)</i>	6	<i>Alteración (Muy alterada)</i>	1
	28		12
5 Agua Freática <i>Seco</i>	15	5 Agua Freática <i>Seco</i>	15
corrección (Media)	-7	corrección (Media)	-7
RMR= 64		RMR= 35	
BUENA CALIDAD		MALA CALIDAD	

Tabla 6.3. Determinación del RMR para los materiales bajo el Plinto en la MI y MD.

En la tabla 6.4 se presenta la determinación del RMR para los materiales bajo el Plinto en el cauce de la P. H. La Yesca, resultando para la Toba Lítica (Tmtl) un valor de RMR = 56 (Clase III, Calidad Media). Para el Dique Andesítico (Tda) un valor de RMR = 32 (Clase IV, Calidad Mala). Para el Dique Diabásico (Qdd) un valor de RMR = 30 (Clase IV, Calidad Mala).

Tomando en cuenta todo lo anterior se obtuvo que la clasificación de las rocas que se localizan bajo el Plinto para la P. H. La Yesca, son de Clase II a IV, correspondiendo a una calidad de roca de Buena a Mala (RMR de 64 a 30).

Parámetros promedio de roca intacta y clasificación del macizo rocoso. CAUCE		
Toba lítica (Tmtl)	Dique andesítico (Tda)	Dique diabásico (Qdd)
Parámetros de clasificación Punt.	Parámetros de clasificación Punt.	Parámetros de clasificación Punt.
1 Resistencia de la matriz rocosa compresión simple Rc (Mpa) <i>Rc=122 MPa</i> 12	1 Resistencia de la matriz rocosa compresión simple Rc (Mpa) <i>Rc=103 MPa</i> 12	1 Resistencia de la matriz rocosa compresión simple Rc (Mpa) <i>Rc=64 MPa</i> 7
2 RQD <i>RQD=26%</i> 6	2 RQD <i>RQD=10%</i> 3	2 RQD <i>RQD=45%</i> 6
3 Separación entre diaclasas (0.2-0.6m) 10	3 Separación entre diaclasas (<0.06m) 5	3 Separación entre diaclasas (<0.06m) 5
4 Estado de las discontinuidades <i>Longitud (> 1m)</i> 6 <i>Abertura (0.1 a 1mm)</i> 4 <i>Rugosidad (Muy Rugosa)</i> 6 <i>Relleno (ninguno)</i> 6 <i>Alteración (inalterada)</i> 6 28	4 Estado de las discontinuidades <i>Longitud (3 a 10)</i> 2 <i>Abertura (0.1 a 1mm)</i> 4 <i>Rugosidad (ondulada)</i> 1 <i>Relleno (duro) <5mm</i> 4 <i>Alteración (Muy alterada)</i> 1 12	4 Estado de las discontinuidades <i>Longitud (3 a 10)</i> 2 <i>Abertura (0.1 a 1mm)</i> 4 <i>Rugosidad (ondulada)</i> 1 <i>Relleno (duro) <5mm</i> 4 <i>Alteración (Muy alterada)</i> 1 12
5 Agua Freática <i>Húmedo</i> 7 corrección (Media) -7	5 Agua Freática <i>Húmedo</i> 7 corrección (Media) -7	5 Agua Freática <i>Húmedo</i> 7 corrección (Media) -7
RMR= 56	RMR= 32	RMR= 30
CALIDAD MEDIA	MALA CALIDAD	MALA CALIDAD

Tabla 6.4. Determinación del RMR para los materiales bajo el Plinto en el Cauce. P. H. La Yesca.

6.6 Pruebas Lugeon.

En la tabla 6.5 se presenta un resumen de los resultados de las pruebas Lugeon de todos los barrenos realizados en la margen derecha e izquierda así como en el cauce, tanto de la campaña de exploración 2006 como de los barrenos adicionales en la zona del cauce en el 2007. En esta tabla se definen además la Recuperación (REC) y el RQD para cada material. Respecto a las Unidades Lugeon la más alta le corresponde a la Ignimbrita Riodacítica (Tmird) de la Margen Izquierda (U. L. = 16 l/min/m) y la más baja corresponde a la Ignimbrita Riodacítica (Tmird) de la Margen Derecha (U. L. = 1,5 l/min/m). Es necesario aclarar que la estadística presentada en la tabla 6.5 sólo pudo considerar un Barreno para la Margen Derecha.

Zona	Material	Recuperación Promedio Rec (%)	Calidad de la Roca Promedio RQD (%)	Unidades Lugeon Promedio U.L. (l/min/m)
Margen Izquierda	Ignimbrita Riodacítica (Tmird)	99	42	16
	Toba Lítica (Tmtl)	78	29	9.6
	Dique Andesítico (Tda)	91	25	2.8
Cauce	Toba Lítica (Tmtl)	80	22	6.7
	Dique Andesítico (Tda)	58	5	6.3
	Dique Diabásico (Qdd)	95	58	3.8
Margen Derecha	Ignimbrita Dacítica (Tmid)	67	9	2.1
	Ignimbrita Riodacítica (Tmird)	97	82	1.5

Tabla 6.5. Resumen de los resultados de las Pruebas Lugeon de los barrenos en la zona del Plinto.

6.7 Pruebas de Inyectabilidad.

Se realizaron pruebas in situ para determinar parámetros de inyectabilidad del terreno. Los ensayos se realizaron en la margen izquierda, cauce y margen derecha de la presa. En la figura 6.4 se presentan los sitios en donde se realizaron las pruebas.

- Consumos de mezclas para establecer la curva Presión-Volumen (P x V).
- Reducción de la permeabilidad después del inyectado.
- Parámetros que sirven para afinar el diseño del tratamiento en general y que permiten detallar las especificaciones para la construcción.

En la figura 6.4a se presentan los resultados de las pruebas de inyecciones realizadas para la determinación de los parámetros de inyección.

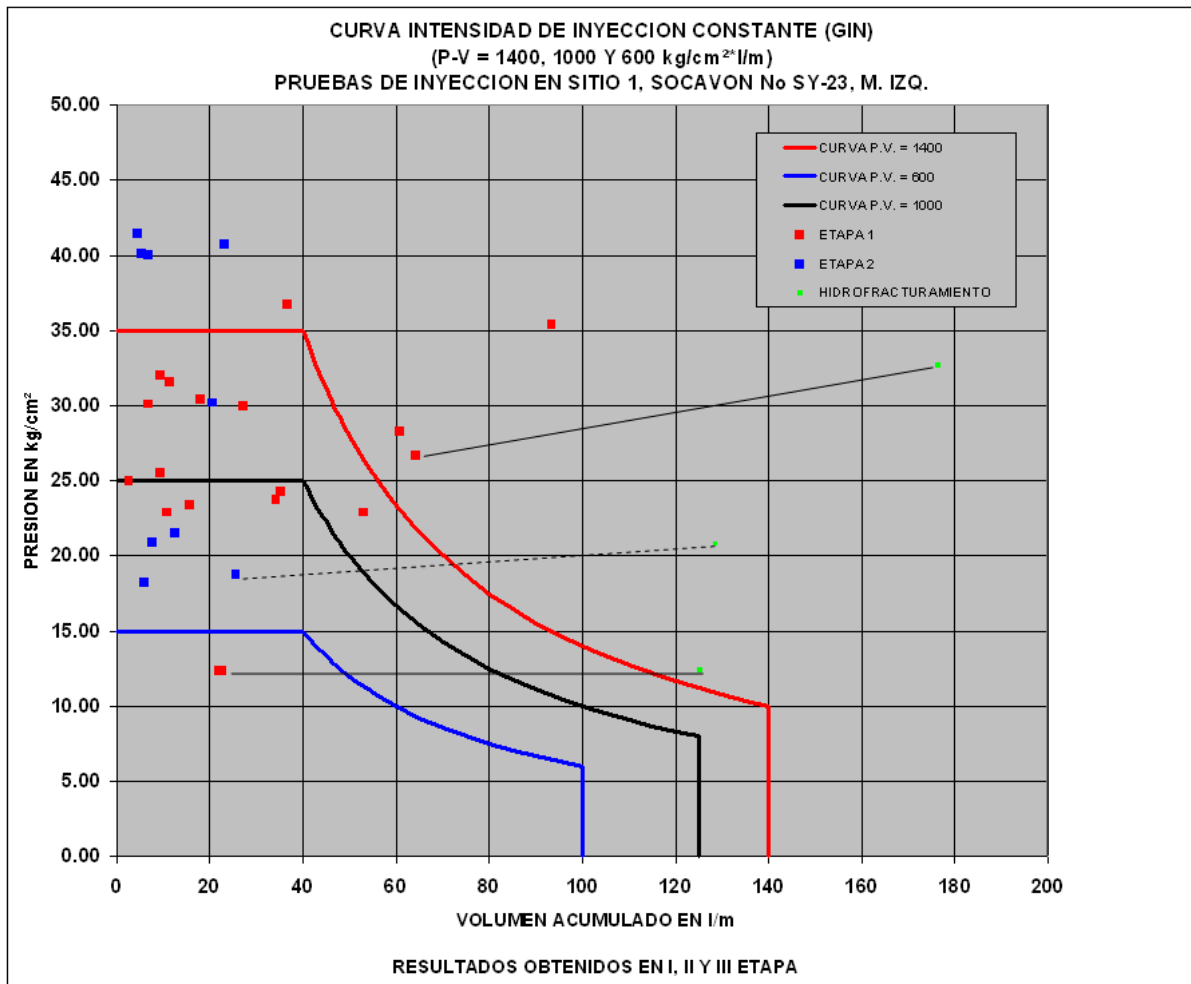


Figura 6.4a. Localización de los sitios en donde se realizaron pruebas de Inyección.

6.8 Diseño de la cortina de inyecciones.

Para el diseño de la cortina de inyecciones se lleva a cabo un análisis consistente principalmente en:

- Análisis de la información topográfica y geológica.
- Visitas al sitio de obra para conocer las condiciones del terreno.
- Revisión de los núcleos de roca obtenidos de los barrenos de exploración, para corroborar el modelo geológico-geotécnico.
- Intercambio de opiniones con personal de experiencia en diseños de pantallas de impermeabilización.

De acuerdo con la caracterización del macizo rocoso se elaboró el proyecto para el tratamiento de cimentación para conformar el plano de estanqueidad. La pantalla de inyecciones fue extendida hacia ambas laderas a través de las galerías de inyección y drenaje, por medio de barrenos ascendentes, descendentes y en abanico en el fondo de las mismas.

La presa construida del P.H. La Yesca es de tipo enrocamiento con cara de concreto (ECC), y para lograr un adecuado desplante se construye un Plinto (zapata corrida) a todo lo largo del contacto de la losa de la cara de concreto y la roca.

El objetivo del Plinto es trabajar como una cimentación de la losa de la cara de concreto y como un elemento que permite controlar filtraciones. Este control se logra definiendo un ancho de zapata o Plinto y un tratamiento que generalmente es a base de inyecciones de la roca con lechadas de cemento para consolidar el macizo rocoso y disminuir las posibles filtraciones que se presenten.

Se construyeron aguas abajo de la losa de la cara de concreto y en el interior del macizo rocoso de las márgenes, 8 galerías de inspección a diferentes niveles, con el objeto de verificar las filtraciones de agua que se presenten una vez puesta en operación la presa y durante su vida útil, si se llegan a presentar filtraciones importantes, estas galerías sirven para realizar tratamientos de inyección para mitigar las fugas de agua que se presenten.

Es importante señalar que en las galerías se realizan barrenos de inyección, barrenos de drenaje, y barrenos perforados generalmente de forma ascendente, estos últimos con el objetivo de captar el agua de filtraciones que se produzcan a través de estructuras geológicas importantes como fallas, fracturas o contactos litológicos continuos y/o detectar zonas que requieran un tratamiento de reinyección.

La pantalla de impermeabilización y consolidación bajo el Plinto se diseña considerando los siguientes aspectos:

- Características geológicas del terreno.
- Geometría de la pantalla.
- Inclinación del plano de pantalla.
- Profundidad.
- Separación entre barrenos de inyección.
- Secuencia de perforación y etapas de inyección.
- Saturación previa del terreno.
- Procedimiento de inyección (ascendente y/o descendente).
- Presiones de inyección.
- Metodología de inyección.
- Prolongación del plano de pantalla en las laderas.

La pantalla desde el Plinto de la cortina se prolonga dentro de las laderas con el objeto de proteger las estructuras que se localizan en la zona, tal es el caso de las obras de excedencias, obras de generación y obras de desvío. El sistema de impermeabilización y drenaje se ejecuta a través de galerías que permiten el acceso a distintos niveles donde se requiere tratamiento. La definición de la extensión del tratamiento tanto de forma lateral como la profundidad depende de las características geológicas, mecánicas y de permeabilidad del terreno.

Se recomienda que el Plinto debe desplantarse sobre material competente y poco deformable, lo que se puede lograr considerando el criterio de seleccionar aquellos depósitos con velocidad de onda compresional mayor a 2,0 km/s, para lo cual es

necesario contar con la sección Geológico-Geofísica a lo largo del eje del Plinto propuesto y además con secciones transversales Geológico-Geofísicas a éste, debido a que es necesario ajustar al definir su nivel de rasante.

Para el diseño de los anchos del Plinto se utiliza el criterio de B. Materon, en función de la calificación de la roca mediante el RMR y de la carga hidráulica media en cada segmento para el P. H. La Yesca.

Para establecer la mejor geometría de la pantalla de impermeabilización bajo el Plinto y considerando la altura que tendrá el embalse desde la cota 375 hasta la cota del NAME 578, aproximadamente, se zonificaron las laderas de la forma como se señala en la tabla 6.6.

Zona	Elevaciones	Profundidad de pantalla (m)	Profundidad de exploración (m)
Z-1	375 a 430	50	70
Z-2	430 a 500	40	60
Z-3	500 a 580	40	60

Tabla 6.6. Zonificación de la pantalla por elevaciones.

La zona Z-1 corresponde con la porción más profunda del cauce, donde se tendrá la presión hidrostática más alta actuando sobre el terreno.

Las zonas Z-2 y Z-3 desde el punto de vista geológico y de la permeabilidad del terreno son bastante similares.

En los extremos del Plinto la pantalla de impermeabilización ejecutada desde el Plinto se conectó a profundidad con la pantalla ejecutada desde las galerías ubicadas en las laderas, para lograr con ello la profundidad de pantalla necesaria y no dejar ventanas sin tratamiento en el terreno, en la figura 6.5 se muestra el arreglo de la pantalla de impermeabilización profunda.

El diseño de estos tratamientos, contempló en forma general, la ejecución de tres etapas de inyección, iniciando por la Etapa I con separación de barrenos @ 12 m, la Etapa II @ 6 m y la Etapa III @ 3 m. La profundidad de la pantalla de inyecciones estuvo entre 40 y 70 m de profundidad.

En el Plinto, los barrenos de primera etapa que se localizaron @ 24 m de separación se profundizaron hasta 70 m en la zona del cauce y hasta 60 m en la porción media a alta de ambas laderas, como se muestra en el plano de proyecto, esto se realizó con el fin de explorar las condiciones de la roca a profundidad y confirmar el límite de la pantalla bajo el Plinto. Con este mismo propósito, para el caso de las galerías inferiores de ambas márgenes, se consideró de manera selectiva la profundización de barrenos de primera etapa que se ubicaron @ 48 m.

El procedimiento de inyección se realizó generalmente de forma ascendente y de forma descendente en el caso en el que se interceptaron fallas importantes.

6.9 Inyecciones en la roca para consolidación y/o impermeabilización.

En este inciso se explicará de manera general la metodología empleada en la ejecución de los tratamientos a la roca por medio de inyecciones.

En el P.H. La Yesca se realizaron los siguientes tratamientos:

- Tratamientos desde el Plinto (tapete de consolidación y pantalla de impermeabilización).
- Tratamientos en superficie en ambas márgenes para dar continuidad al plano de estanqueidad (pantalla de impermeabilización).
- Tratamientos desde galerías (pantalla de impermeabilización, consolidación y conexión).
- Tratamientos en tuberías a presión (consolidación de la roca y liga con pantalla de impermeabilización).
- Tratamientos en los tapones de concreto de túneles de desvío (consolidación de la roca y liga con pantalla de impermeabilización).

- Tratamientos bajo las ataguías (pantallas de inyección).
- Tratamiento de estructuras geológicas en las diferentes obras del proyecto (costureo de fallas).

En este trabajo analizaremos la ejecución de los tratamientos del tapete de consolidación y de la pantalla de impermeabilización desde el Plinto.

Con la finalidad de lograr una inyección que abarque únicamente la zona de interés, se llevo a cabo un orden de ejecución específico en el proceso de inyectado de acuerdo a la secuencia siguiente:

- En primer lugar se realizó la inyección de las líneas de consolidación localizadas aguas arriba del eje de la pantalla impermeable del Plinto.
- En segundo lugar se ejecutó la segunda línea de consolidación localizada aguas abajo del eje de la pantalla central (Principal) o pantalla de impermeabilización profunda.
- Se realizó el tratamiento de impermeabilización profunda.

6.10 Tratamientos mediante inyecciones de consolidación bajo el Plinto.

Con la finalidad de reducir la deformabilidad del terreno a lo largo del macizo rocoso sobre el cual se desplantaría el Plinto, se ejecutaron barrenos de consolidación con la misma distancia de separación entre perforaciones indicada para los barrenos de impermeabilización profunda. La distancia que existe entre líneas de consolidación y la pantalla central es de 1.50 m hacia aguas arriba y la misma distancia hacia aguas abajo.

La metodología de inyección en el caso de los barrenos de consolidación siempre se efectuó de las líneas exteriores hacia líneas interiores (en el caso de existir más de dos líneas de consolidación como es el caso de la zona del cauce) con la finalidad de lograr un mejor confinamiento de la pantalla de inyecciones.

Para ligar la Pantalla de Impermeabilización Profunda desde el Plinto con la pantalla ejecutada desde las galerías se realizaron barrenos llamados barrenos de conexión,

cuya función es conectar todo el sistema de barrenos de impermeabilización evitando dejar algunas ventanas en el macizo rocoso que pudieran generar grandes filtraciones de agua.

6.11 Tratamientos mediante inyecciones de la Pantalla de Impermeabilización Profunda.

Se proyectaron perforaciones sistemáticas a cada 1.50 m de longitud sobre el desarrollo longitudinal del Plinto, considerándose la colocación de tubos guía (tubos de PVC) con la orientación e inclinación de los barrenos indicados en los planos de proyecto y únicamente cruzando los armados del Plinto, con la finalidad de evitar que durante el proceso de perforación se presente la intersección con las varillas de acero.

Previamente al tratamiento con inyecciones se efectuaron pruebas de permeabilidad tipo Lugeon con la finalidad de conocer la permeabilidad del macizo rocoso en la zona.

6.12 Tratamientos mediante inyecciones del contacto concreto-roca del Plinto.

Este tratamiento forma parte de las de consolidación y pantalla impermeable y se ejecuta en los mismos barrenos, la finalidad de este tratamiento es lograr llenar los espacios existentes entre el contacto concreto-roca, este mismo sistema se utilizó en las zonas revestidas con concreto en las galerías de inyección y drenaje.

6.13 Metodología de Inyección.

La metodología utilizada en el proceso de inyección se basó en la metodología GIN (Grout Intensity Number) que considera un proceso de inyección con presión y volumen variables a lo largo del proceso de inyección, aunque con límites máximos establecidos.

La inyección se realizó en tramos o progresiones de 5 metros, monitoreándose la evolución de la presión y del volumen de mezcla inyectada por metro (l/m) hasta interceptar la curva GIN seleccionada, tal como lo indica el método la intersección con la curva GIN correspondiente se da por las siguientes condiciones:

- Presión máxima especificada.
- Intersección de la curva GIN correspondiente con gasto o caudal nulo.
- Alcanzando un volumen máximo establecido.

Tal como se analizó en capítulos anteriores la evaluación de cada proceso de inyección realizado en el macizo rocoso, se evalúa tomando en cuenta la presión de inyección, el volumen de mezcla inyectado y el tiempo utilizado en el proceso, con los parámetros señalados se realizan las gráficas de control siguientes:

- Presión efectiva (MPa) vs Volumen acumulado.
- Presión efectiva (MPa) vs Tiempo.
- Gasto o caudal (l/min) vs Tiempo.
- Volumen Acumulado (l/m) vs Tiempo.
- Gasto Presión (l/m /MPa) vs Tiempo (min) Penetrabilidad.
- Gasto Presión (l/m /MPa) vs Volumen acumulado (l/m) Penetrabilidad.

Con base a los resultados obtenidos en las pruebas de inyección realizadas inicialmente se propusieron los valores GIN indicados en la tabla 6.7 siguiente:

Zona	Elevación (msnm)	Envolvente GIN		Presión Máxima		Volumen Máximo (l/m)
		MPa(l/m)	Kg/cm ² (l/m)	MPa	Kg/cm ²	
Alta	580 a 495	58.8	600	1.47	15.0	100
Media	495 a 410	98.1	1000	2.45	25.0	125
Baja	410 a 325	137.3	1400	3.43	35.0	140

Tabla 6.7. Zonificación por elevación para la ejecución de los tratamientos.

En la figura 6.7 se representan las envolventes GIN señaladas en la tabla 6.7 y que fueron contempladas inicialmente para la ejecución de los tratamientos.

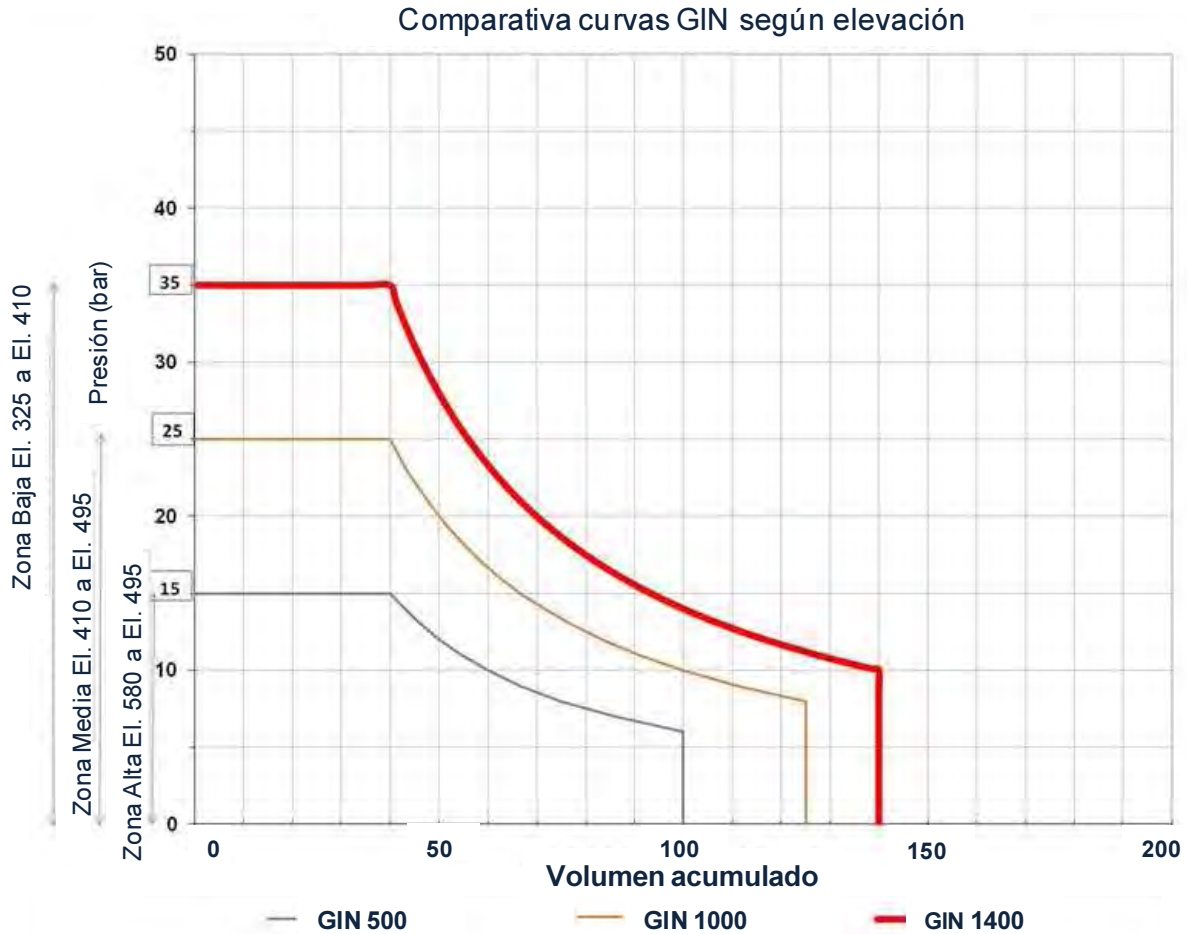


Figura 6.7. Curvas GIN propuestas inicialmente de acuerdo a la elevación (msnm).

Es importante señalar que en el P.H. La Yesca se utilizaron diferentes envolventes de energía, en función de los consumos de inyección obtenidos en las primeras etapas y con base a las condiciones del macizo rocoso presentadas.

6.14 Materiales y equipo.

6.14.1 Equipos de perforación.

Se emplearon equipos de perforación del tipo “Trackdrill” con martillo neumático, con diámetro de broca de 2 ¾” a 3”, también se utilizaron equipos de perforación con recuperación de testigos de roca para los barrenos exploratorios.

A continuación se presentan algunos de los equipos de perforación utilizados en el proceso de perforación.



Fotografías 6.1 y 6.2. Equipos de perforación tipo Track Drill con martillo de fondo.



Fotografía 6.3. Equipo de perforación y plataforma utilizada para realizar los barrenos de inyección en el Plinto Margen izquierda.

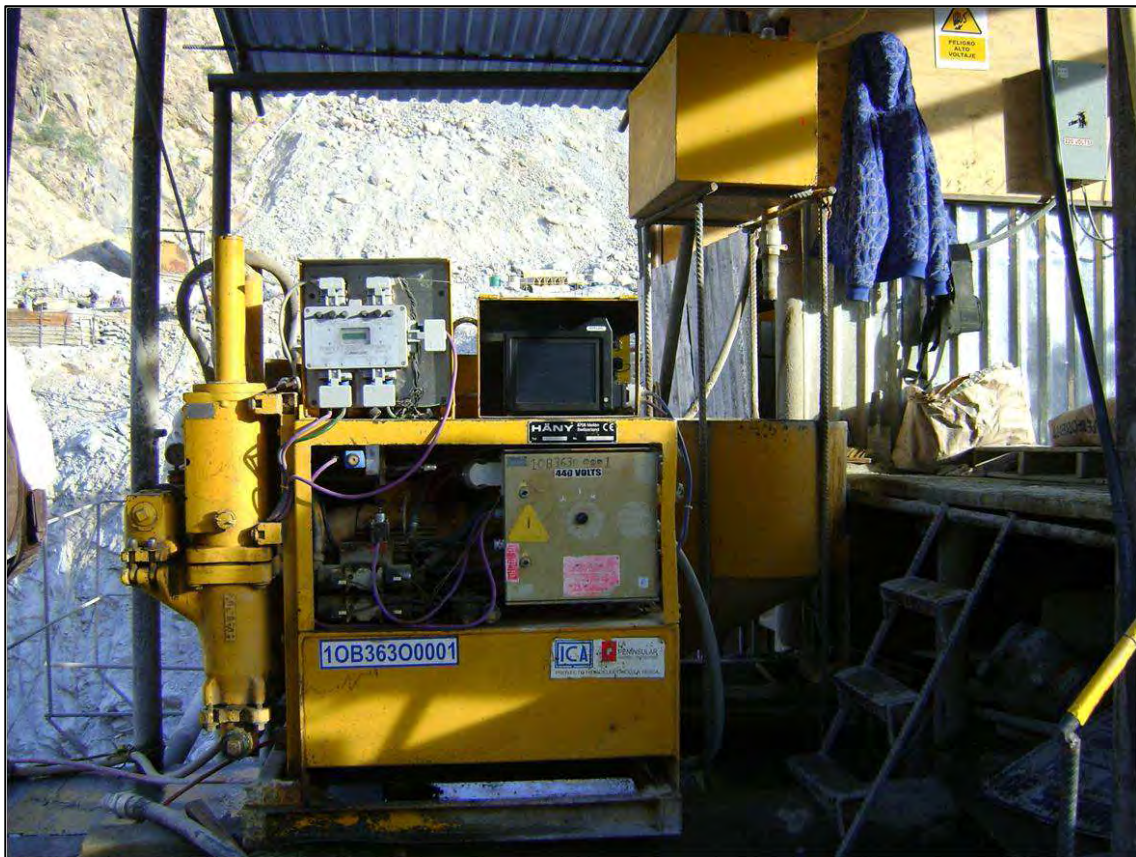


Fotografía 6.4. Equipo de perforación y plataforma utilizada para realizar los barrenos de inyección en el Plinto Margen Derecha.

6.14.2 Equipos de inyección.

Se emplearon bombas de inyección tipo Häny y tipo Clivio, con equipo turbomezclador de altas revoluciones, 1250 rpm, del tipo bomba centrífuga, para la fabricación de la lechada. Agitador o mezclador de bajas revoluciones (60 rpm) se utilizó para mantener en suspensión las partículas de la mezcla, de tal manera que la operación o proceso de inyectado fuera continuo.

A continuación se presentan algunos de los equipos de inyección utilizados en el proceso de Inyección.



Fotografía 6.5. Equipo de inyección tipo Häny con turbo mezclador de altas revoluciones.



Fotografía 6.6. Equipo de inyección tipo Clivio con turbo mezclado de altas revoluciones.

6.15 Mezclas de inyección.

Las mezclas utilizadas para la inyección de la Pantalla de Impermeabilización Profunda fueron fabricadas con la dosificación siguiente:

MATERIAL	CANTIDAD	DENSIDAD (g/cm ³)	TOTAL (l)
Cemento CPP 30 R (kg)	50	2.90	17.24
Agua (l)	47		47.00
Bentonita(Kg)	1.2	2.65	0.45
Rheobuild 716 (l)	0.4		0.40
Volumen total de mezcla			65.09 l

Tabla 6.8. Dosificación de la Mezcla 1.

MATERIAL	CANTIDAD	DENSIDAD (g/cm ³)	TOTAL (l)
Cemento CPP 30 R (kg)	50	2.90	17.24
Agua (l)	38		38.00
Rheobuild 716 (l)	0.6		0.60
Volumen total de mezcla			55.84 l

Tabla 6.9. Dosificación de la Mezcla 2.

Mezcla	Relación a/c	Fluidificante*	Estabilizador*
1	0.94/1	2.3%	Bentonita 2.4%
2	0.76/1	1.43%	47.00

*El porcentaje indicado toma como referencia el peso del cemento.

Tabla 6.10. Características de las mezclas utilizadas.

En la tabla 6.10 se indica que inicialmente se utilizó una mezcla utilizando la bentonita como un aditivo estabilizador, sin embargo esa situación se mejoró utilizando una mezcla (mezcla 2) a base de un aditivo fluidificante y con una relación agua cemento (a/c) de 0.76/1 sin el uso de bentonita, tal como es recomendado en el método GIN.

En los casos de alto consumo fue necesario utilizar acelerantes de fraguado en la mezcla, el aditivo acelerante de fraguado utilizado fue silicato de sodio con una concentración o densidad de 40° baumé.

Los parámetros a cumplir fueron los siguientes:

Parámetro a medir	Unidad	Rango
Viscosidad con cono Marsh.	seg	29-33
Densidad o peso volumétrico	g/cm ³	1.49-1.55
Decantación (sedimentación en 2 hrs)	%	4%
Cohesión (con placa)	g/cm ² ó mm	≤ 0.03 gr/cm ² o 0.2 mm
Coeficiente de filtrado	-	≤ 0.6
Cake obtenido de la prueba de filtrado	mm	≤ 15 mm
Resistencia a compresión simple (28 días)	kg/cm ²	≥ 9.8 MPa (100 kg/cm ²)

Tabla 6.11. Características de las mezclas de inyección.

A continuación se describe la forma de cómo se determina y obtiene cada uno de los parámetros de medición.

Viscosidad con cono Marsh: La viscosidad es el tiempo en segundos que tardan en fluir 946 ml de mezcla, en un embudo de dimensiones establecidas con una capacidad de 1500 ml de mezcla depositada en el embudo.

Densidad: Esta medición se obtiene mediante la utilización de una balanza de lodos y consiste en llenar con mezcla la copa de la balanza de una capacidad de 200 ml golpeándola ligeramente para eliminar burbujas de aire, en seguida se tapa y se da un ligero movimiento de rotación para homogeneizar la mezcla. Se coloca la balanza sobre una base plana y se equilibra obteniéndose el valor medido en la escala de la balanza correspondiente.

Decantación o sedimentación: Consiste en vaciar 200 ml de mezcla en una probeta de vidrio de 250 ml colocándola en una superficie lisa y nivelada, anotando las lecturas del nivel de sólidos, obteniéndose el porcentaje de Decantación y tiempo de estabilización de la mezcal.

Cohesión: La cohesión se obtiene por medio de una placa de acero inoxidable de 100 x 100 mm y un espesor de 1.5 mm, la placa debe estar rayada por ambas caras en una cuadrícula de 5 mm x 5 mm.

El ensaye consiste en pesar primero la placa de acero en una balanza de precisión, posteriormente se debe sumergir la placa en la mezcla dejándola escurrir libremente y pesarla nuevamente, la diferencia obtenida se divide entre el área de ambas caras de la placa y se obtiene la cohesión en g/cm^2 , dividiendo el valor obtenido entre la densidad de la mezcla se obtiene la cohesión en mm, que sería el espesor de la película de mezcla adherida a la placa.

Coefficiente de filtrado: Este parámetro se obtiene mediante el aparato llamado filtro-prensa y consiste en determinar la cantidad de líquido que se extrae de un volumen determinado de mezcla (200 ml), a presiones de 0.2, 0.4, y 0.7 MPa, durante 30 minutos o en el momento en que empiece a salir aire exclusivamente.

Se obtiene el volumen de agua filtrada, espesor del “cake” (sólidos retenidos), observándose la dureza, textura y flexibilidad de los sólidos.

El valor del coeficiente de filtrado se obtiene con la fórmula siguiente:

$$\text{Coeficiente de filtrado} = \frac{\text{Volumen de agua filtrada} \times (\text{tiempo en minutos})^{-0.5}}{\text{Volumen total inicial}} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

Resistencia a la compresión simple: Es el esfuerzo máximo que se aplica a una muestra cilíndrica o cúbica con una relación de esbeltez (H/D) de 2.5 a 3.0, aplicándose incrementos de carga constante de 200 kg/min, hasta llegar a la ruptura de la probeta. Las probetas deben ensayarse a edades de 7, 14 y 28 días.

Previo al ensaye se verifica que las caras de la probeta estén completamente paralelas, en caso de existir alguna desviación se deben pulir las superficies en un vidrio utilizando polvos abrasivos.

6.16 Análisis resultados.

Se analizarán los estadísticos de cada tramo de inyección, identificando la eficiencia del tratamiento, así mismo los tramos más representativos serán presentados con la teoría GIN para identificar los diferentes comportamientos durante el proceso de inyección, a continuación se muestran los resultados para cada tramo del Plinto estos resultados sirvieron de base para finalizar o realizar tratamiento adicional, se realiza el análisis de consumos de inyección comenzando desde la zona del cauce.

Se presenta la sección general del Plinto en el cual se señalizara la zona en la que se realiza el análisis estadístico.

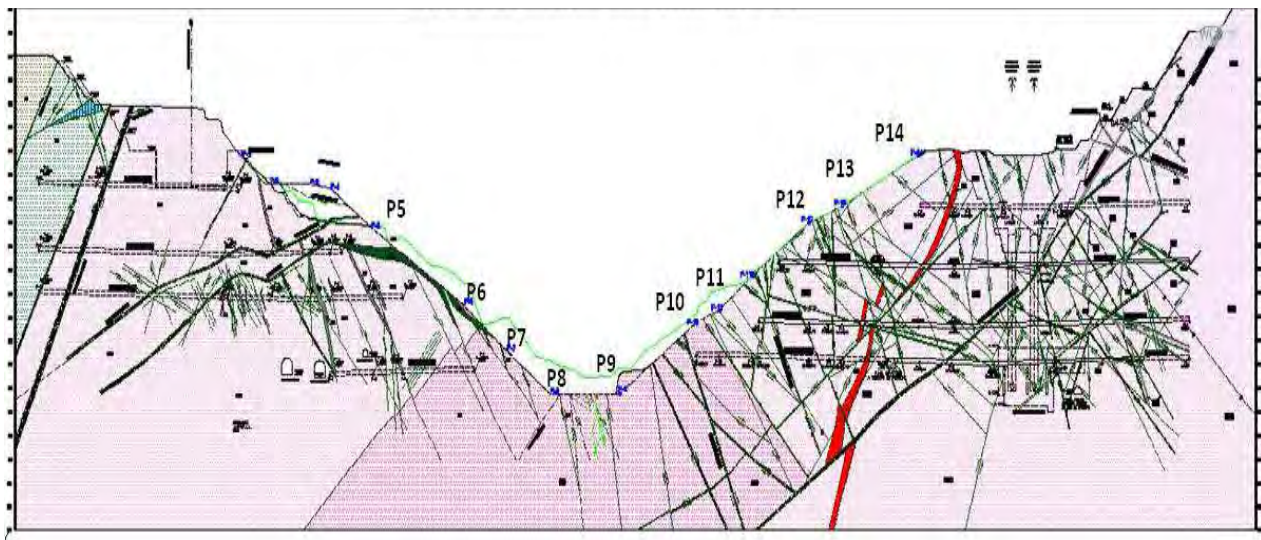


Figura 6.8. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca.

6.16.1 Tramo de inyección zona del cauce.

Se revisan los consumos efectuados en el tramo del cauce, en el cual se efectuaron 186 barrenos de inyección. En la figura 6.9 se indica la sección analizada.

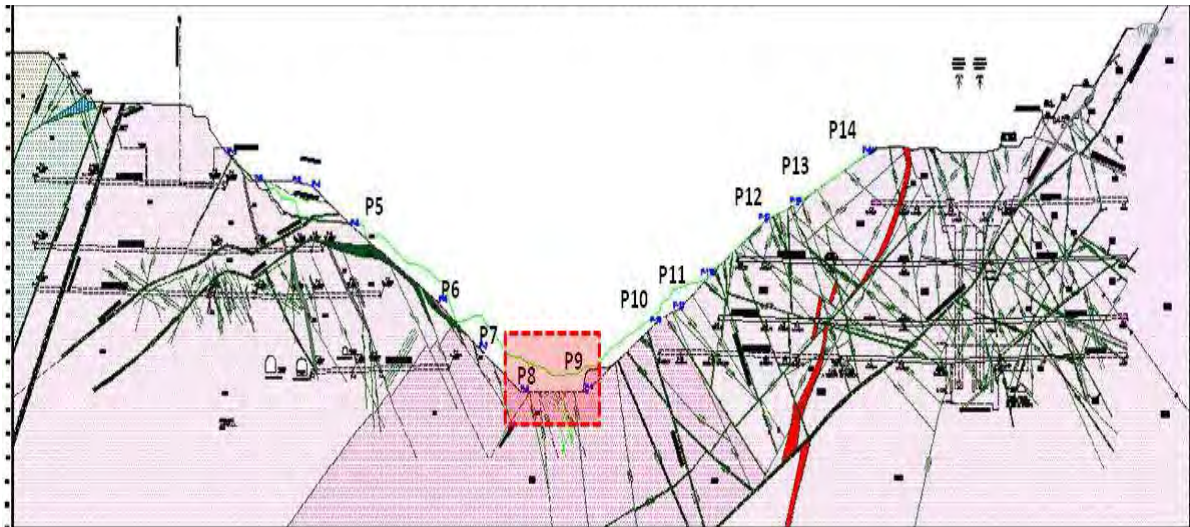


Figura 6.9. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P8-P9.

En la figura 6.10 se señala la distribución de los barrenos de Pantalla de Impermeabilización Profunda en los cuales se identifica la representación de los consumos (por medio de colores) de inyección realizados. Como parte importante del proceso de inyección se superpone la geología proyectada con los valores de inyección efectuados con la finalidad de identificar zona de altos consumos, en los cuales fuera necesaria una mayor vigilancia en el proceso.

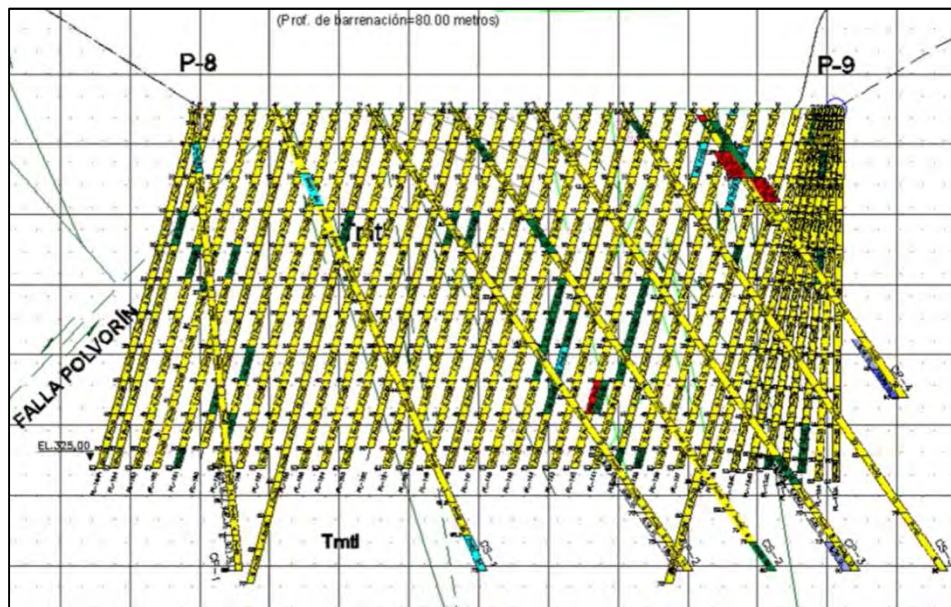


Figura 6.10. Inyecciones efectuadas en Plinto P8-P9, P.H. La Yesca.

En la figura 6.11 se presentan las diferentes tonalidades utilizadas para la representación de los consumos durante los tratamientos. La idea de utilizar una gama de colores distinta permite analizar de manera rápida las zonas que requirieron mayor vigilancia en el proceso.

SIMBOLOGÍA DE CONSUMOS EN INYECCIÓN	
CLAVES POR CONSUMO	
	< 23 kg cemento/m
	> 23-35 kg cemento/m
	> 35-50 kg cemento/m
	> 50-75 kg cemento/m
	> 75 kg cemento/m

Figura 6.11. Convención de colores para identificar zonas de consumo.

La distribución en planta y sección típica en este tramo del Plinto es la presentada en la figura 6.12, como se puede observar la zona del cauce tuvo 4 líneas de consolidación y una línea central que indica la pantalla de impermeabilización profunda.

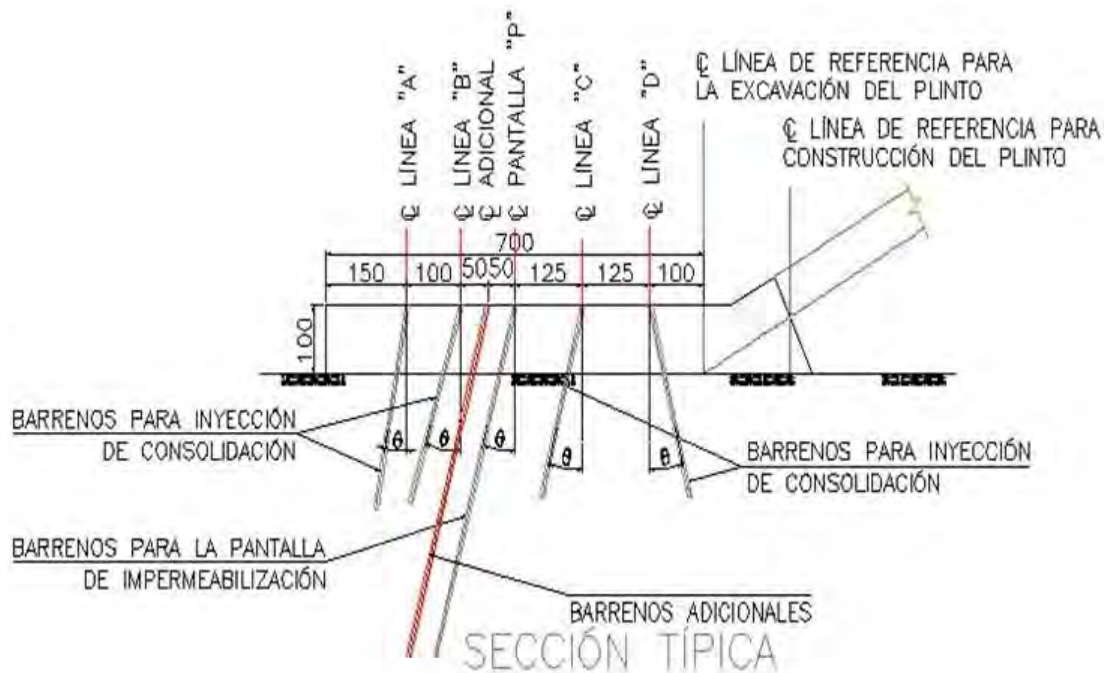
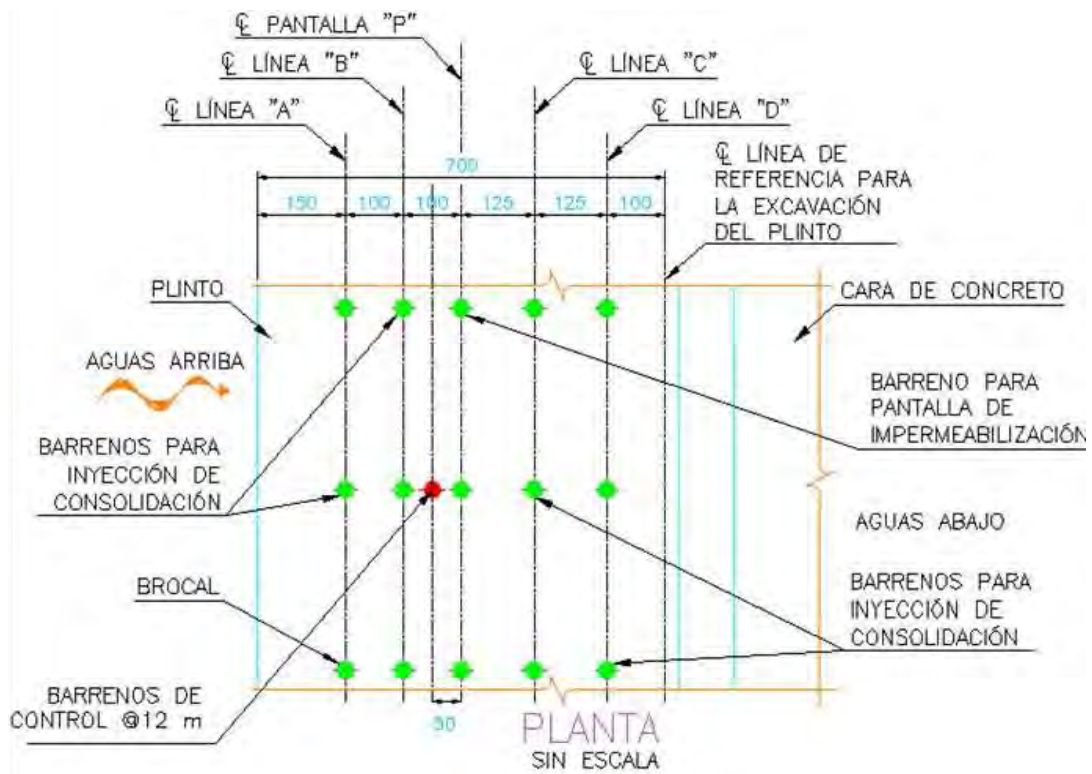


Figura 6.12. Planta y sección de la distribución de los barrenos de inyección en el tramo P8-P9.

Se analizarán los valores estadísticos como sigue:

Se analizaron 1297 tramos de inyección, cada tramo o progresión tiene una longitud de 5 m, se realizaron 129 barrenos de consolidación (10 y 30 m de profundidad), 38 barrenos de pantalla impermeable (50 m de longitud), 7 barrenos de control (60 m y 80 m de longitud), 9 barrenos adicionales (20 m) y 3 barrenos con recuperación de núcleos (50 m de profundidad), en las tablas 6.12 y 6.13 se presenta el resumen de consumos de inyección obtenidos por línea de tratamiento y en el gráfico 6.1 se presenta la distribución gráfica de los resultados.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento			Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III		
A	Consolidación	13	8	20	14	-54%
B	Consolidación	9	16	10	12	-11%
C	Consolidación	10	12	10	11	0%
D	Consolidación	8	12	7	9	13%

Tabla 6.12. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P8-P9.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento						% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Control	Adicional	Recuperación	
P	Pantalla	12	12	11	23	34	22	35%*

*El porcentaje de reducción se obtuvo solo considerando la etapa de Control y Recuperación que fueron las etapas utilizadas para evaluar el comportamiento final de los tratamientos.

Tabla 6.13. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P8-P9.

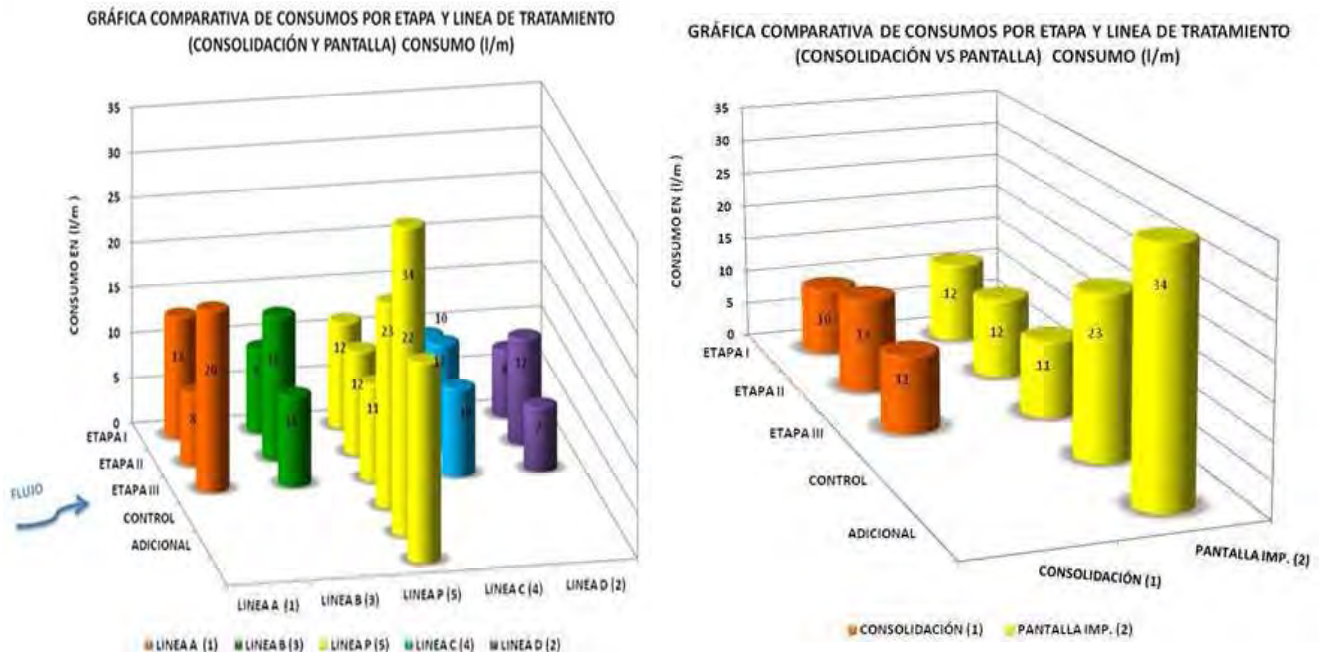


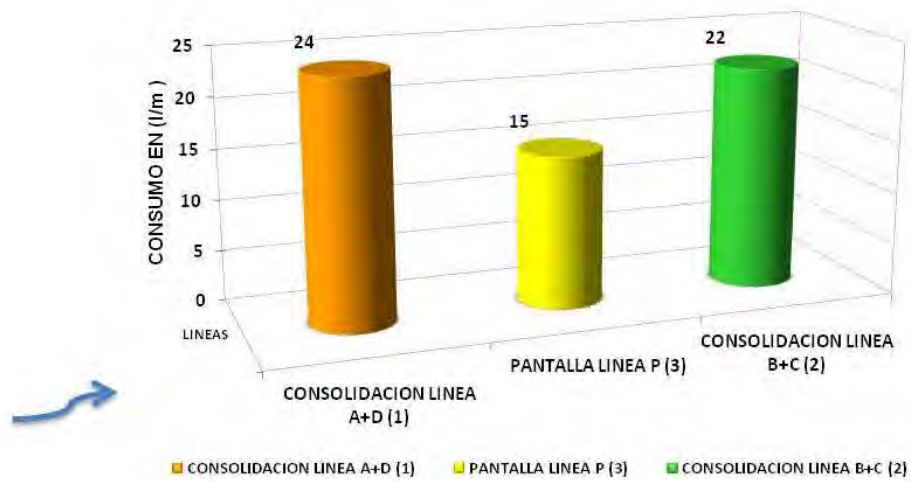
Gráfico 6.1. Consumo de barrenos por línea de inyección en zona del cauce, Plinto P8-P9, en (lts/m).

Se observa que no se presentó una mejora sustancial en las líneas de consolidación, parte de este resultado se debió a un ajuste en el equipo automatizado de inyección y al ajuste de los parámetros GIN en este tramo de Plinto.

Esta situación fue corregida en la realización de los barrenos de pantalla, por tal motivo fue necesario realizar barrenos adicionales en la zona, cuyo objetivo principal fue verificar las zonas inyectadas, tratando de evitar una posible zona con un tratamiento inadecuado.

Si se analizan los promedios de los tratamientos con inyección, considerando la secuencia de ejecución entre líneas y tomando en cuenta su separación indicada en la figura 6.12 obtenemos los siguientes resultados:

GRÁFICA COMPARATIVA DE CONSUMOS POR LINEA DE TRATAMIENTO CONSUMO (l/m)



Línea	Tratamiento	Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
A+D	Consolidación	24	38%
C+B	Consolidación	22	
P	Pantalla Impermeable	15	

Gráfico 6.2. Consumo de barrenos por línea de inyección en zona del cauce, Plinto P8-P9, en (lts/m).

Tal como se observa en el gráfico 6.2 las primeras líneas inyectadas (Líneas A y D) presentan mayores consumos de inyección que las líneas B y C, del mismo modo la Pantalla de Impermeabilización Profunda tiene un consumo de mezcla menor que las líneas precedentes, lo cual indica una disminución en el volumen inyectado del orden del 38% aceptable para este tramo.

6.16.2 Tramo de inyección zona de la Margen Derecha P9-P10.

Se revisan los consumos efectuados en el primer tramo de Plinto en la Margen Derecha, en el cual se efectuaron 149 barrenos de inyección. En la figura 6.13 se indica la sección analizada y el tramo en estudio, la figura 6.14 representa los consumos de inyección registrados y la clave de consumos utilizada.

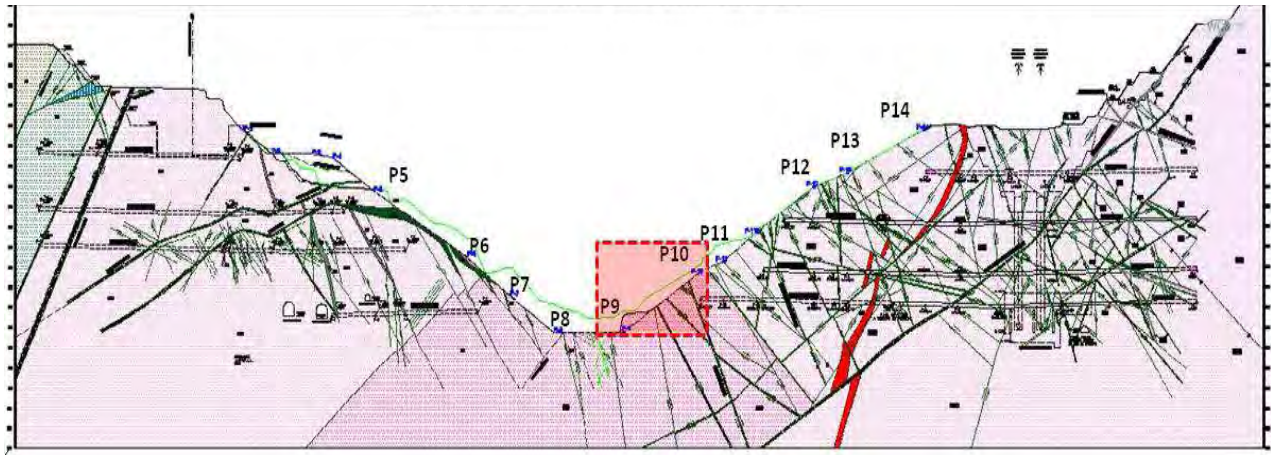


Figura 6.13. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P9-P10.

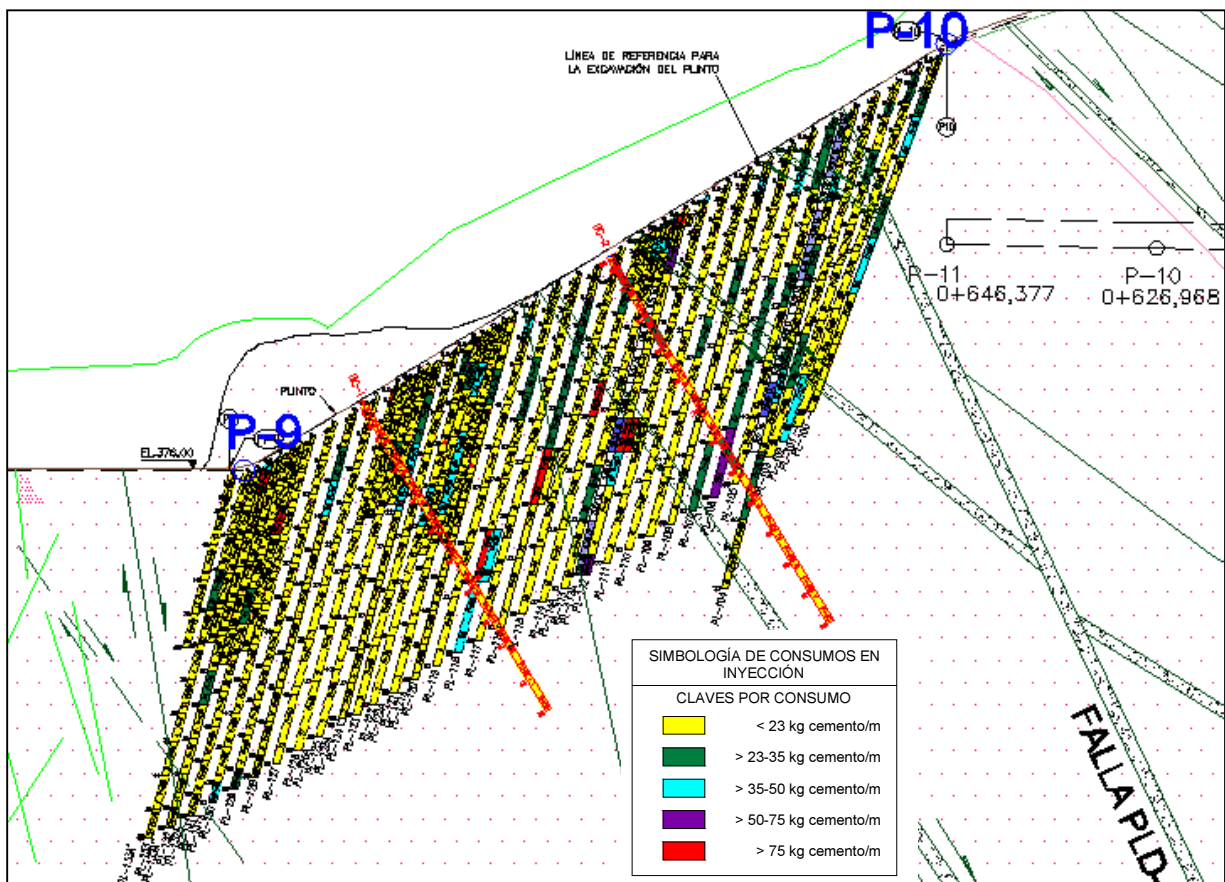


Figura 6.14. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Derecha P9-P10 P.H. La Yesca.

En la figura 6.15 se presenta la sección típica y la distribución en planta de los barrenos de inyección en el tramo del Plinto P9-P10, en esta zona se realizaron solo 2 líneas de consolidación y una línea de pantalla de impermeabilización localizada en el centro.

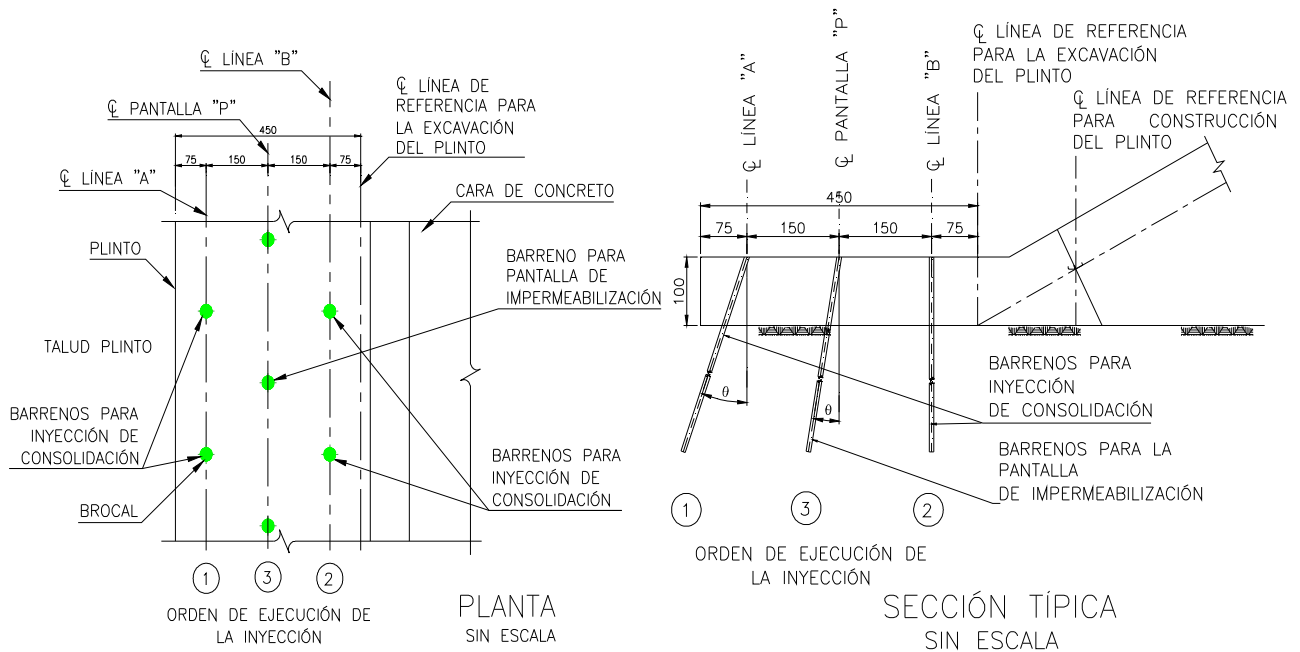


Figura 6.15. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P9-P10.

A continuación se analizan los valores estadísticos del Plinto tramo P9 a P10 como sigue:

Se analizaron 902 tramos de inyección, cada tramo o progresión tiene una longitud de 5 m, se realizaron 103 barrenos de consolidación (10 y 20 m de profundidad), 46 barrenos de pantalla impermeable (50 m de longitud), 2 barrenos de control (50 m y 60 m de longitud), en las tablas 6.14 y 6.15 se presenta el resumen de consumos de inyección obtenidos por línea de tratamiento y en el gráfico 6.3 se presenta la distribución gráfica de los resultados.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento					Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Etapa V		
A	Consolidación	29	32	32	22	11	28	62%
B	Consolidación	46	27	31	6		27	87%

Tabla 6.14. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P9-P10.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento					Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Control		
P	Pantalla	32	29	12	12	12	20	63%

*El porcentaje de reducción se obtuvo solo considerando la etapa I y etapa de Control.

Tabla 6.15. Consumos de barrenos de Pantalla de Impermeabilización Profunda, Plinto P9-P10.

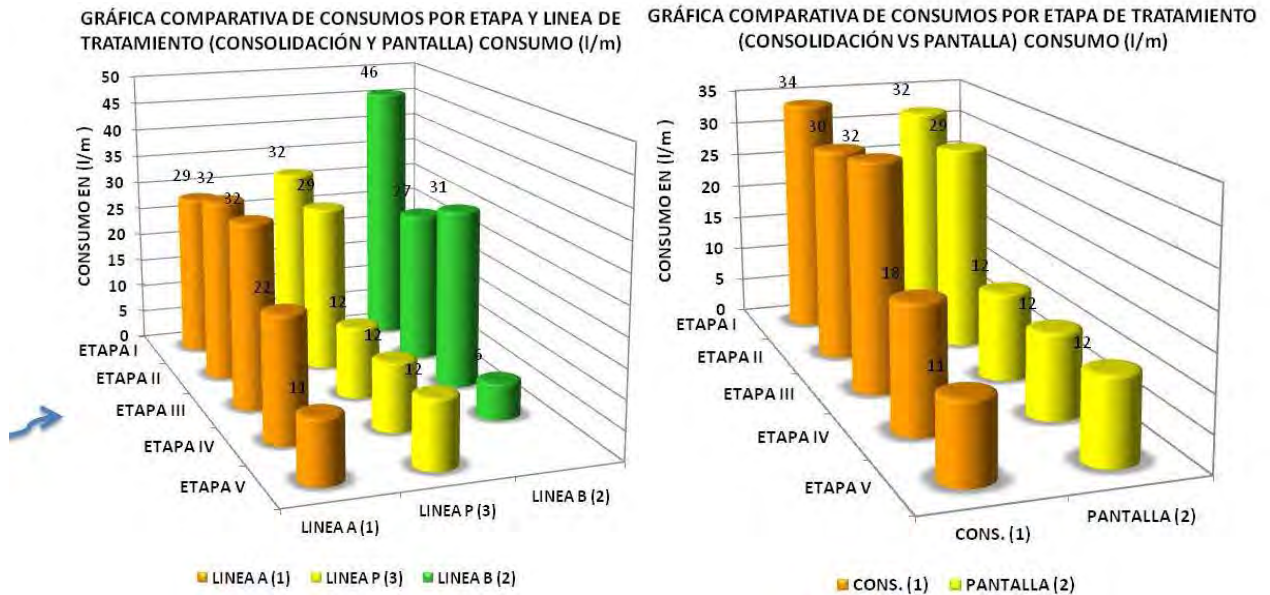


Gráfico 6.3. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto Margen Derecha P9-P10 en (lts/m).

Con los ajustes realizados a la aplicación de la metodología GIN se observa que se presentó una mejora sustancial en las líneas de consolidación. Obteniéndose reducciones entre la etapa I y Etapa última del 60 al 80%.

Si se analizan los promedios de los tratamientos con inyección, considerando la secuencia de ejecución entre líneas y tomando en cuenta su separación indicada en la figura 6.15 obtenemos los siguientes resultados:



Línea	Tratamiento	Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
A	Consolidación	28	29%
B	Consolidación	27	
P	Pantalla Impermeable	20	

Gráfico 6.4. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto Margen Derecha P9–P10 en (lts/m).

Tal como se observa en el gráfico 6.4 las primeras líneas inyectadas (Líneas A y B) presentan mayores consumos de inyección que la línea P, esto señala una disminución en el volumen inyectado del orden del 29%, aceptable para este tramo.

6.16.3 Tramo de inyección zona de la Margen Derecha P10-P11'.

Se revisan los consumos efectuados en el segundo y tercer tramo de Plinto de la Margen Derecha, en el cual se efectuaron 35 barrenos de inyección puntos P10 a P11 y 61 barrenos de inyección entre los puntos P11 a P11'. En la figura 6.13 se indica la sección analizada y el tramo en estudio, la figura 6.16 representa los consumos de inyección registrados y la clave de consumos utilizada.

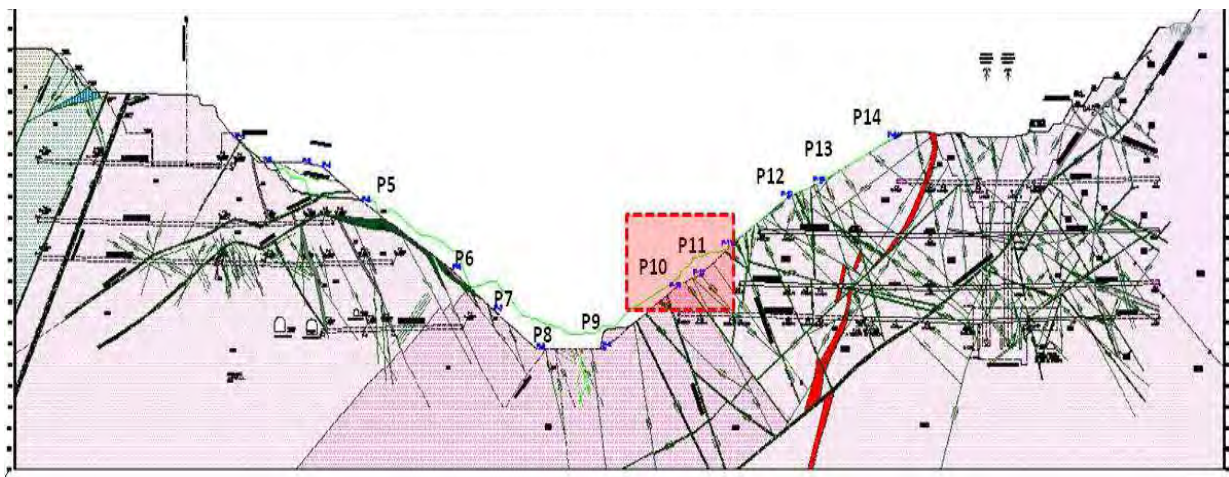


Figura 6.16. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P10-P11'.

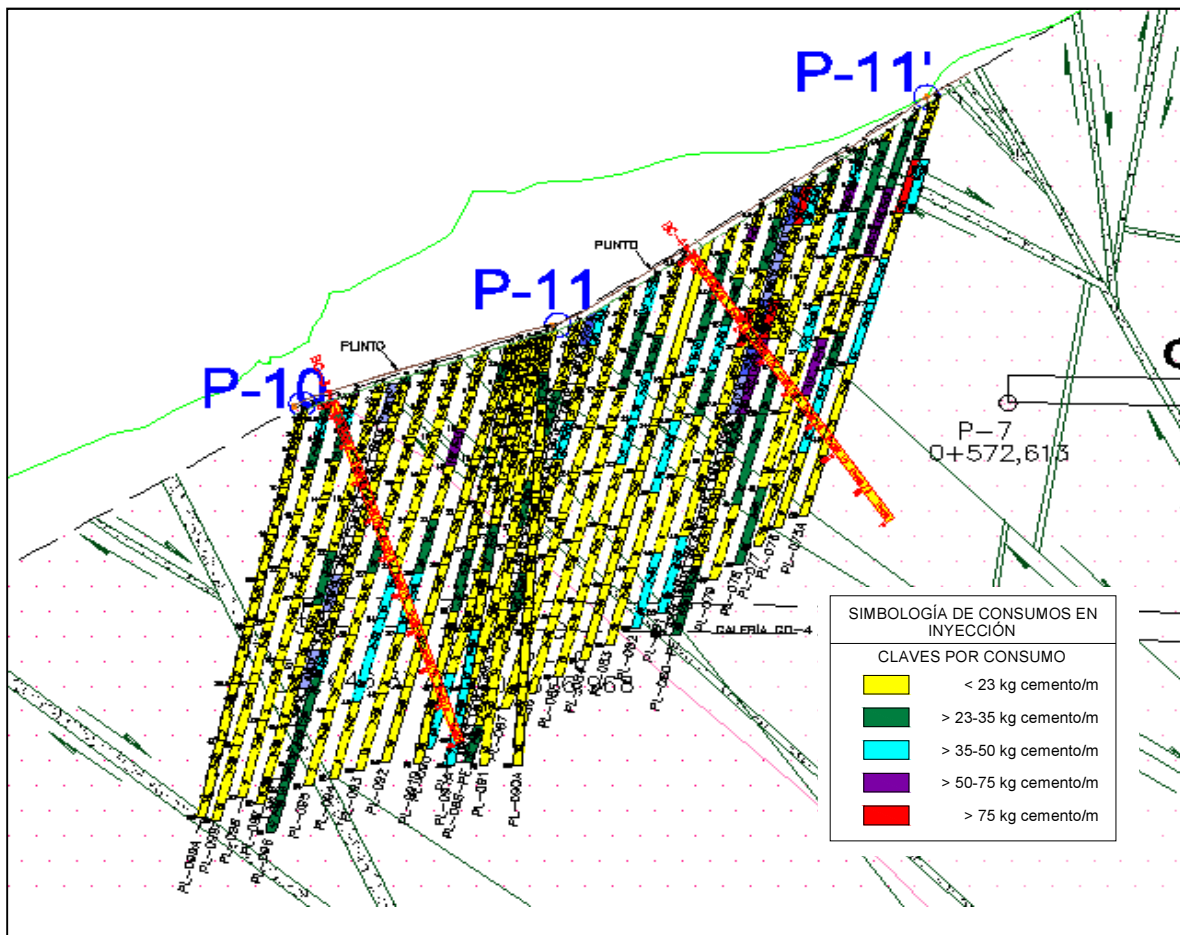


Figura 6.17. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Derecha P10-P11' P.H. La Yesca.

En la figura 6.18 se presenta la sección típica y la distribución en planta de los barrenos de inyección en el tramo del Plinto P10-P11', en esta zona se realizaron solo 2 líneas de consolidación y una línea de pantalla de impermeabilización localizada en la parte central.

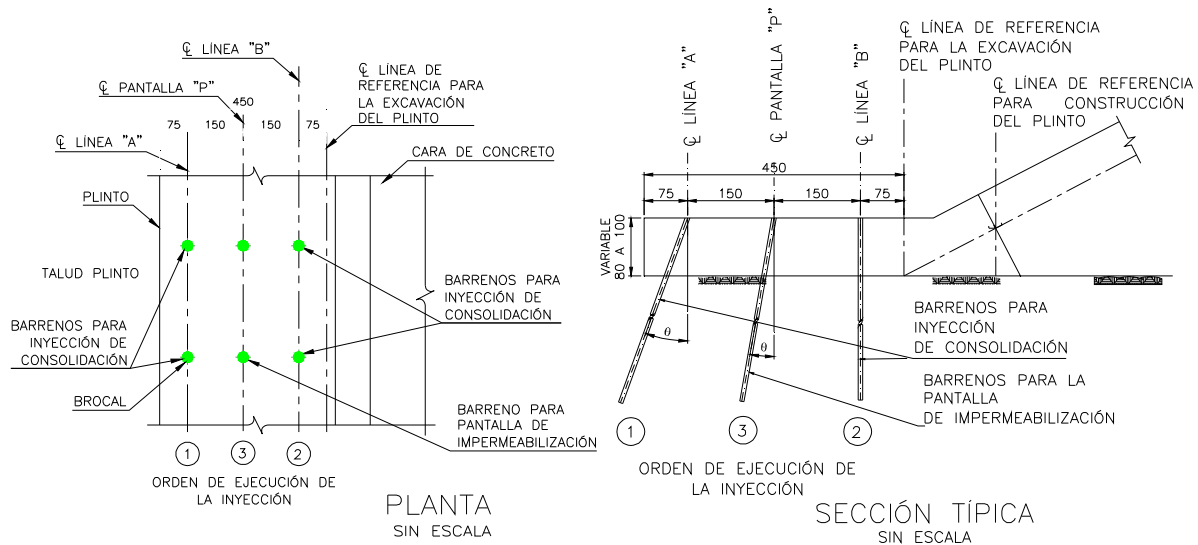


Figura 6.18. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P10-P11’.

A continuación se analizan los valores estadísticos del Plinto tramo P10 a P11’ como sigue:

Se analizaron 625 tramos de inyección, (246 barrenos del punto P10 a P11 y 379 entre los puntos P11 a P11’) cada tramo o progresión tiene una longitud de 5 m, se realizaron 65 barrenos de consolidación (10 y 20 m de profundidad), 31 barrenos de pantalla impermeable (60 m de longitud), 2 barreno de control (45 m), en las tablas 6.16 a 6.19 se presenta el resumen de consumos de inyección obtenidos por línea de tratamiento y en los gráficos 6.5 y 6.6 se presenta la distribución gráfica de los resultados.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento				Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV		
A	Consolidación	31	21	16	NA	22	48%
B	Consolidación	38	48	28	NA	35	26%

Tabla 6.16. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P10-P11.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento				Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV		
A	Consolidación	105	75	70	33	69	69%
B	Consolidación	128	158	95	84	108	34%

Tabla 6.17. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P11- P11'.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento				Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Control		
P	Pantalla	24	15	20	9	19	63%

*El porcentaje de reducción se obtuvo considerando la etapa I y la etapa de para evaluar el comportamiento final de los tratamientos.

Tabla 6.18. Consumos de barrenos de Pantalla de Impermeabilización Profunda, Plinto P10-P11.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento				Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Control		
P	Pantalla	45	27	30	9	32	80%

*El porcentaje de reducción se obtuvo solo considerando la etapa de Control y Recuperación que fueron las etapas utilizadas para evaluar el comportamiento final de los tratamientos.

Tabla 6.19. Consumos de barrenos de Pantalla de Impermeabilización Profunda, Plinto P11-P11'.

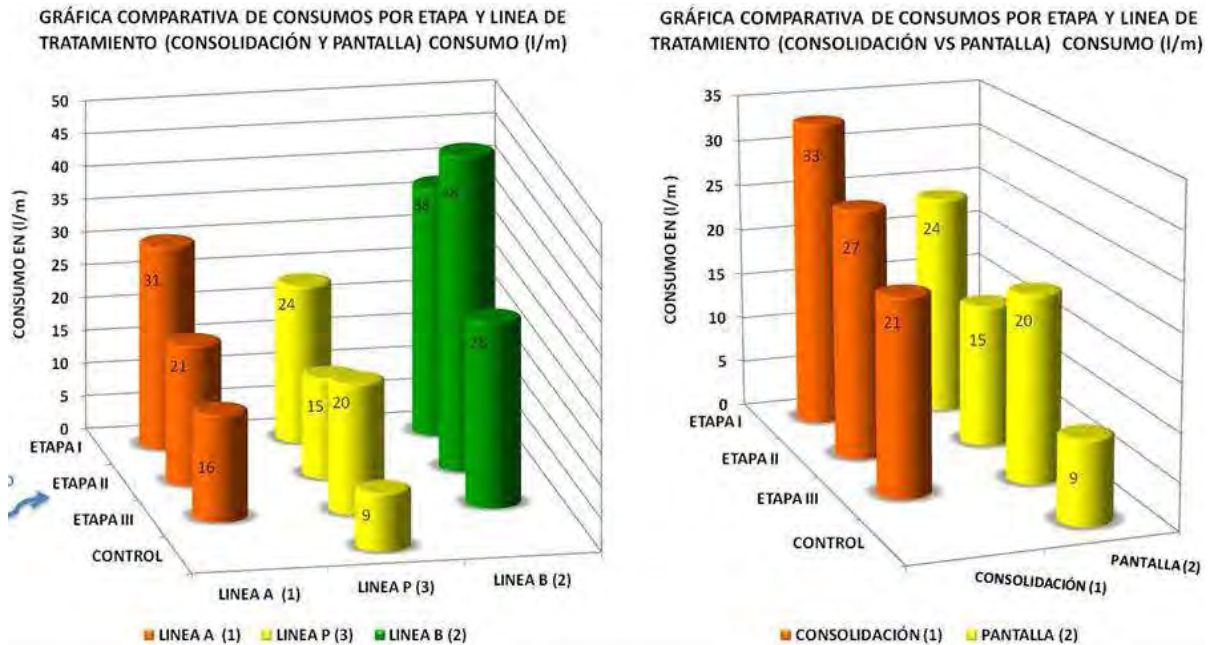


Gráfico 6.5. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P10-P11 (lts/m).

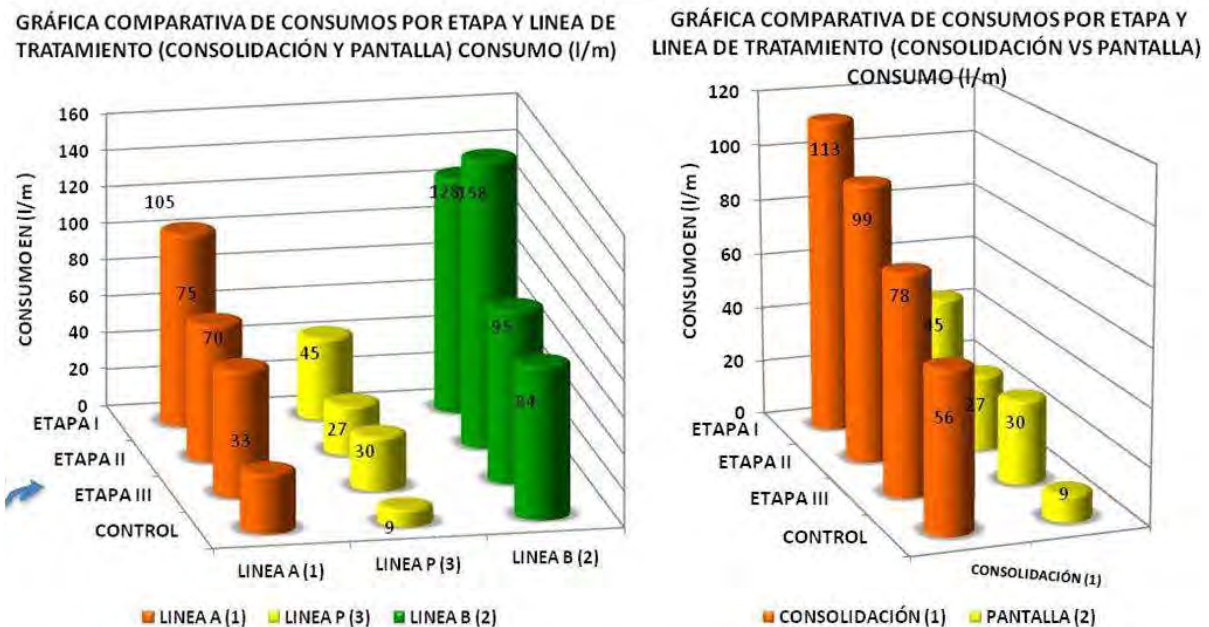


Gráfico 6.6. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P11-P11' (lts/m).

Analizando los dos tramos de Plinto señalados se observa también una disminución importante en los volúmenes de inyección entre las líneas de consolidación y la pantalla impermeable, en las líneas de consolidación se observa disminución de consumos de un 26% a un 48% para el tramo P10 a P11', y para el tramo P11 a P11' una disminución en el consumo del 34 al 69% entre barrenos de primera etapa comparado con la última etapa ejecutada.

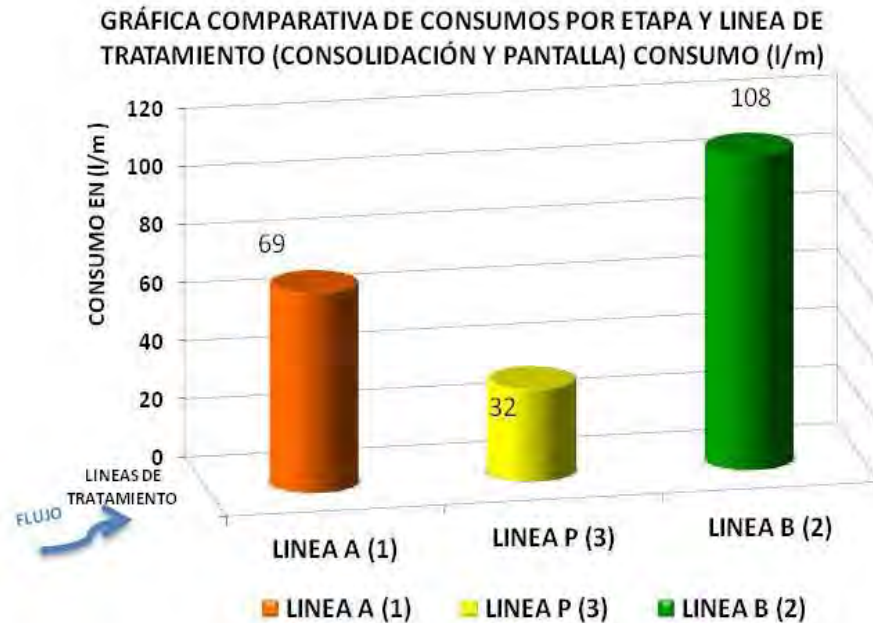
Para el caso de la Pantalla de Impermeabilización Profunda se observan disminuciones de consumo del orden de 63% en el tramo P10 a P11 y una disminución del 80% entre el tramo P11 y P11'.

Analizando los consumos de mezcla inyectada tomando en cuenta la secuencia de ejecución entre líneas y tomando en cuenta la geometría del tramo indicado en las figuras 6.18 se obtienen los siguientes resultados:



Línea	Tratamiento	Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
A	Consolidación	22	33%
B	Consolidación	35	
P	Pantalla Impermeable	19	

Gráfico 6.7. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P10-P11 en (lts/m).



Linea	Tratamiento	Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
A	Consolidación	69	64%
B	Consolidación	108	
P	Pantalla Impermeable	32	

Gráfico 6.8. Consumo de barrenos por línea de inyección, Plinto P11-P11' en (lts/m).

Tal como se observa en los gráficos 6.7 y 6.8 las primeras líneas inyectadas (Líneas A y B) presentan mayores consumos de inyección que la línea P. Esto señala una disminución en el volumen inyectado del orden del 33% para el tramo P10 a P11' y para el tramo P11 a P11' una disminución en el consumo de un 64%, aceptable para ambos tramos.

6.16.4 Tramo de inyección zona de la Margen Derecha P11'-P12.

Se revisan los consumos efectuados en el cuarto tramo de Plinto de la Margen Derecha, en el cual se efectuaron 121 barrenos de inyección puntos P11' a P12. En la figura 6.19 se indica la sección analizada y el tramo en estudio.

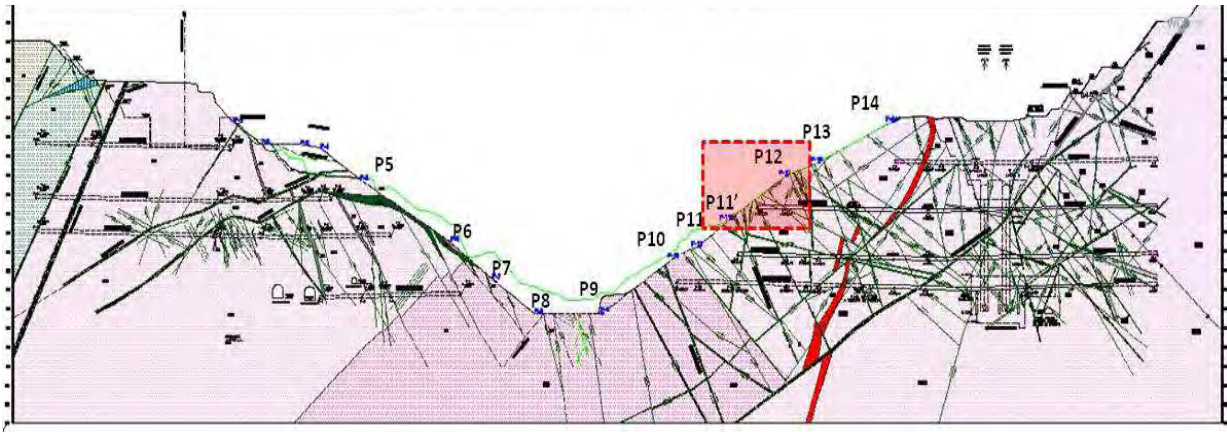


Figura 6.19. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P11'-P12.

En la figura 6.20 se presenta la sección típica y la distribución en planta de los barrenos de inyección así como el orden de ejecución de líneas de inyección en el tramo del Plinto P11'-P12, en esta zona se realizaron 2 líneas de consolidación y una línea de pantalla de impermeabilización localizada en la parte central. Además de un tratamiento especial por la identificación de zonas de falla importantes.

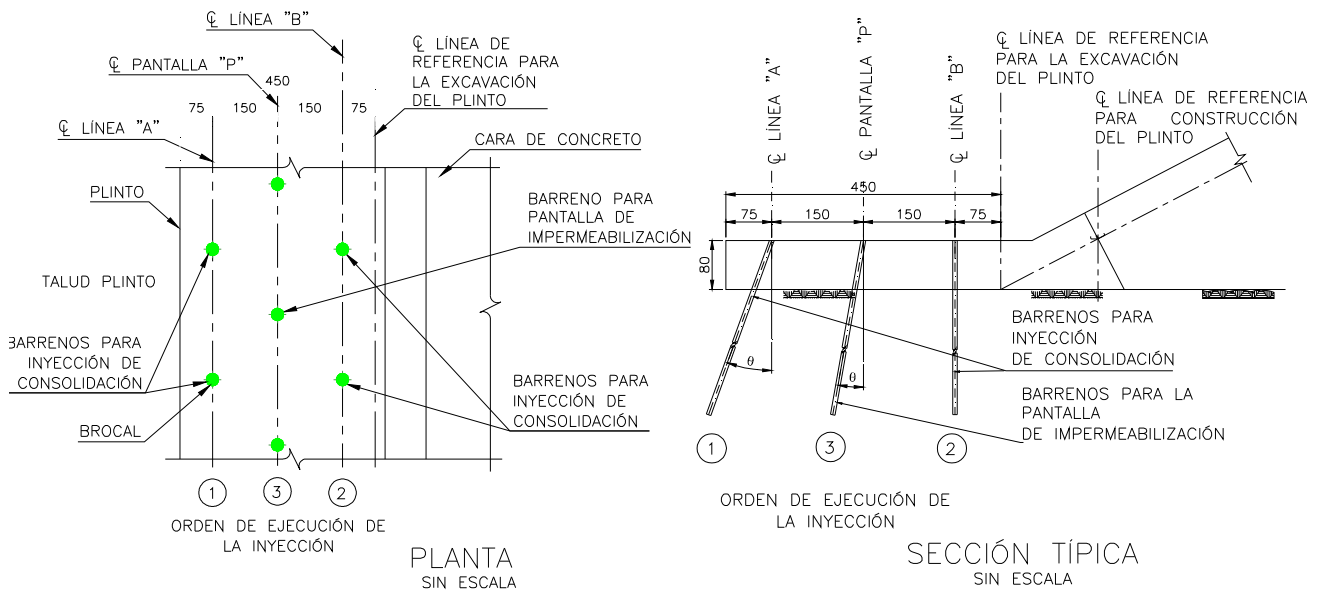


Figura 6.20. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P11'-P12.

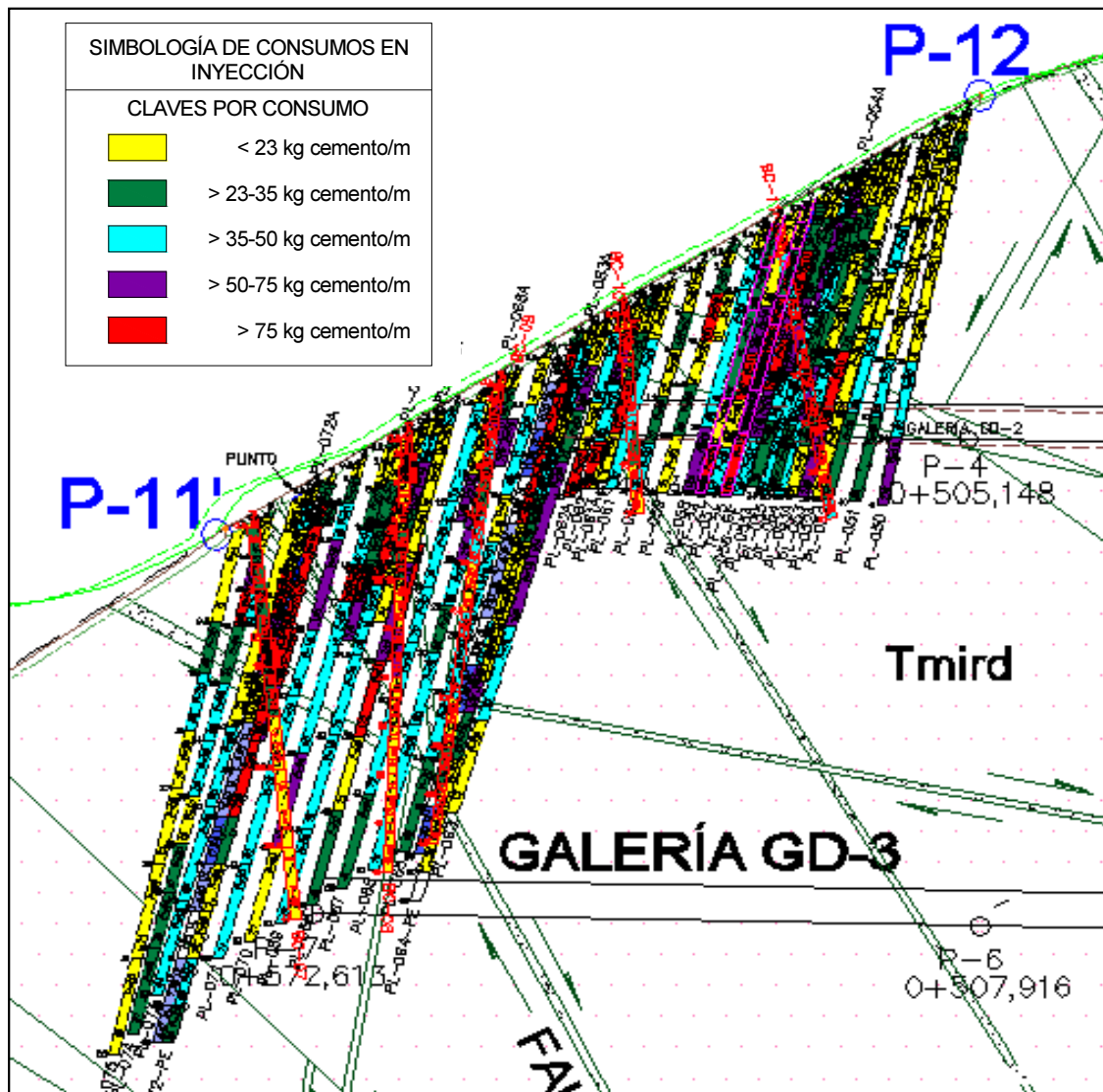


Figura 6.21. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Derecha P11'-P12 P.H. La Yesca.

Se analizaron 1059 tramos de inyección, cada tramo o progresión tiene una longitud de 5 m, se realizaron 57 barrenos de consolidación (20 m de profundidad), 37 barrenos de pantalla impermeable (50 m a 60 m de longitud), 5 barrenos de control (20 m y 40 m de longitud), y adicionalmente se realizaron 22 barrenos para tratamiento de fallas, en las tablas 6.20 y 6.21 se presenta el resumen de consumos de inyección obtenidos por línea de tratamiento y en el gráfico 6.9 se presenta la distribución gráfica de los resultados.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento					Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Control		
A	Consolidación	132	98	84	92	NA	99	30%
B	Consolidación	231	135	132	135	NA	154	42%

Tabla 6.20. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P11'-P12.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento					Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Control		
P	Pantalla	117	78	77	55	47	76	60%

*El porcentaje de reducción se obtuvo solo considerando la etapa de I y la etapa de Control que fueron las etapas utilizadas para evaluar el comportamiento final de los tratamientos.

Tabla 6.21. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P11'-P12.

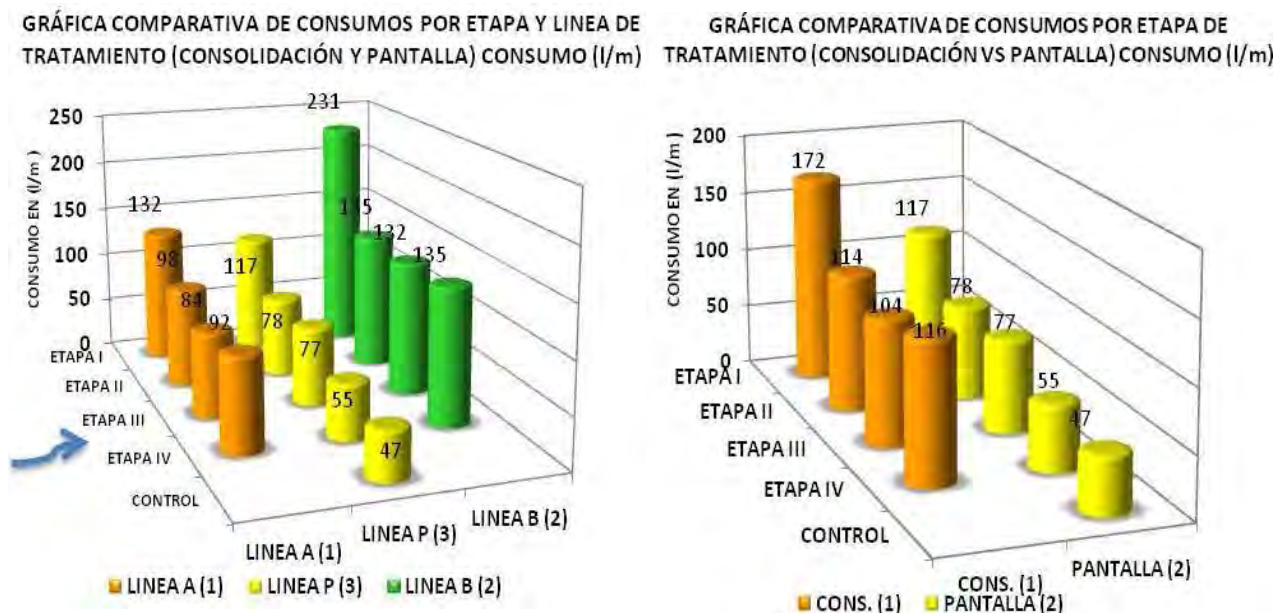


Gráfico 6.9. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P11'- P12 (lts/m).

Con la aplicación de la metodología GIN se observa que se presentó una mejora sustancial en las líneas de consolidación. Obteniéndose reducciones entre la primera etapa y etapa última del 30 al 42% y una reducción del 60% entre etapa uno y última etapa realizada en los barrenos de pantalla impermeable.

Si se analizan los promedios de los tratamientos con inyección, considerando la secuencia de ejecución entre líneas y tomando en cuenta su separación indicada en la figura 6.20 obtenemos los siguientes resultados:

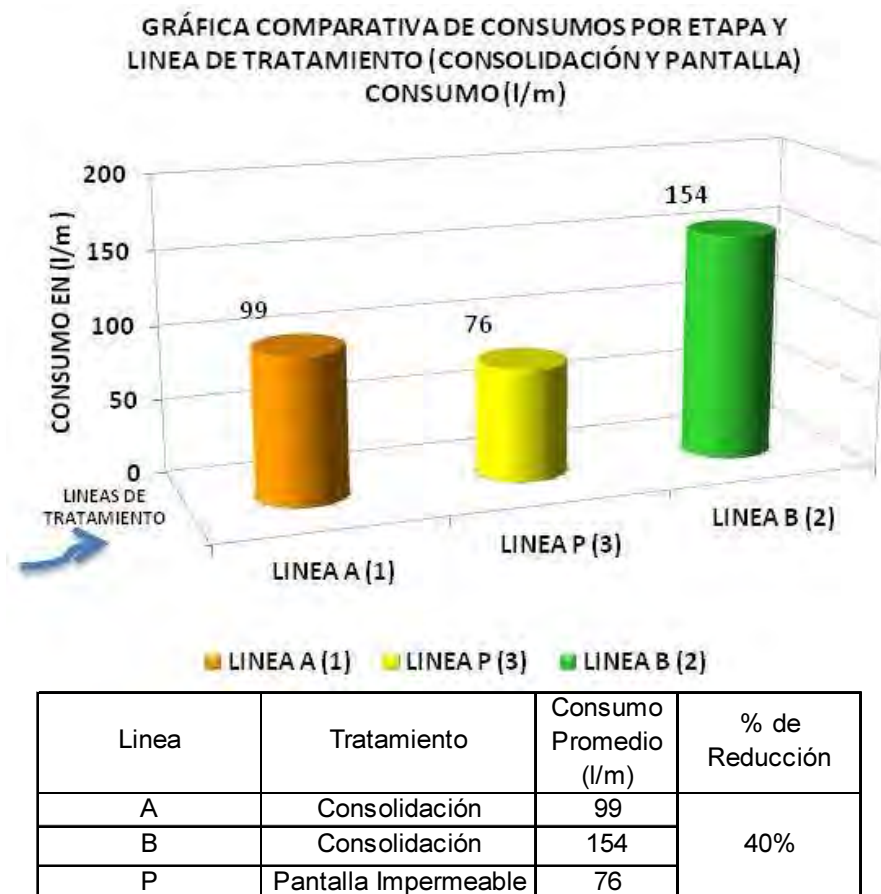


Gráfico 6.10. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P11'- P12 en (lts/m).

Tal como se observa en el gráfico 6.10 las primeras líneas inyectadas (Líneas A y B) presentan mayores consumos de inyección que la línea P esto señala una disminución en el volumen inyectado del orden del 40%, aceptable para este tramo.

6.16.5 Tramo de inyección zona de la Margen Derecha P12-P13.

Se revisan los consumos efectuados en el quinto tramo del Plinto de la Margen Derecha, en el cual se efectuaron 62 barrenos de inyección puntos P12 a P13. En la figura 6.22 se indica la sección analizada y el tramo en estudio.

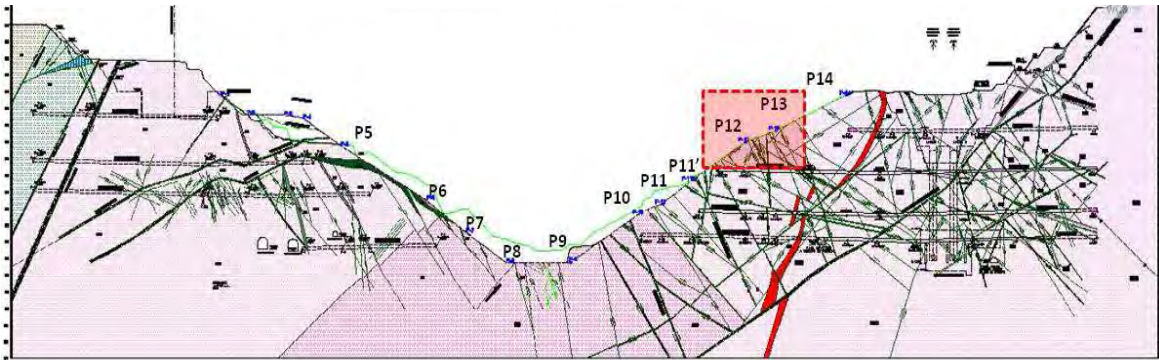


Figura 6.22. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P12-P13.

En la figura 6.23 se presenta la sección típica y la distribución en planta de los barrenos de inyección así como el orden de ejecución de líneas de inyección en el tramo del Plinto P12-P13, en esta zona se realizaron 2 líneas de consolidación y una línea de pantalla de impermeabilización localizada en la parte central. Además de un tratamiento especial por la identificación de zonas de falla importantes.

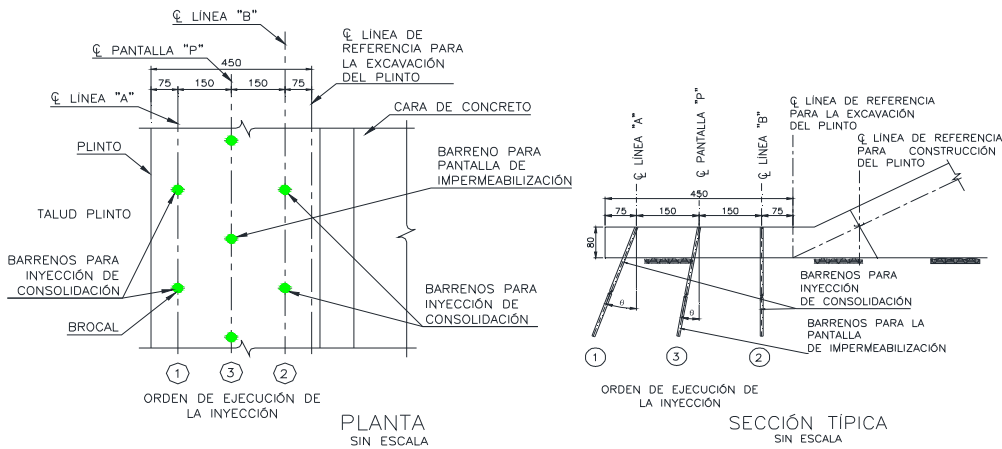


Figura 6.23. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P12-P13.

La figura 6.24 representa los consumos de inyección registrados y la clave de consumos utilizada.

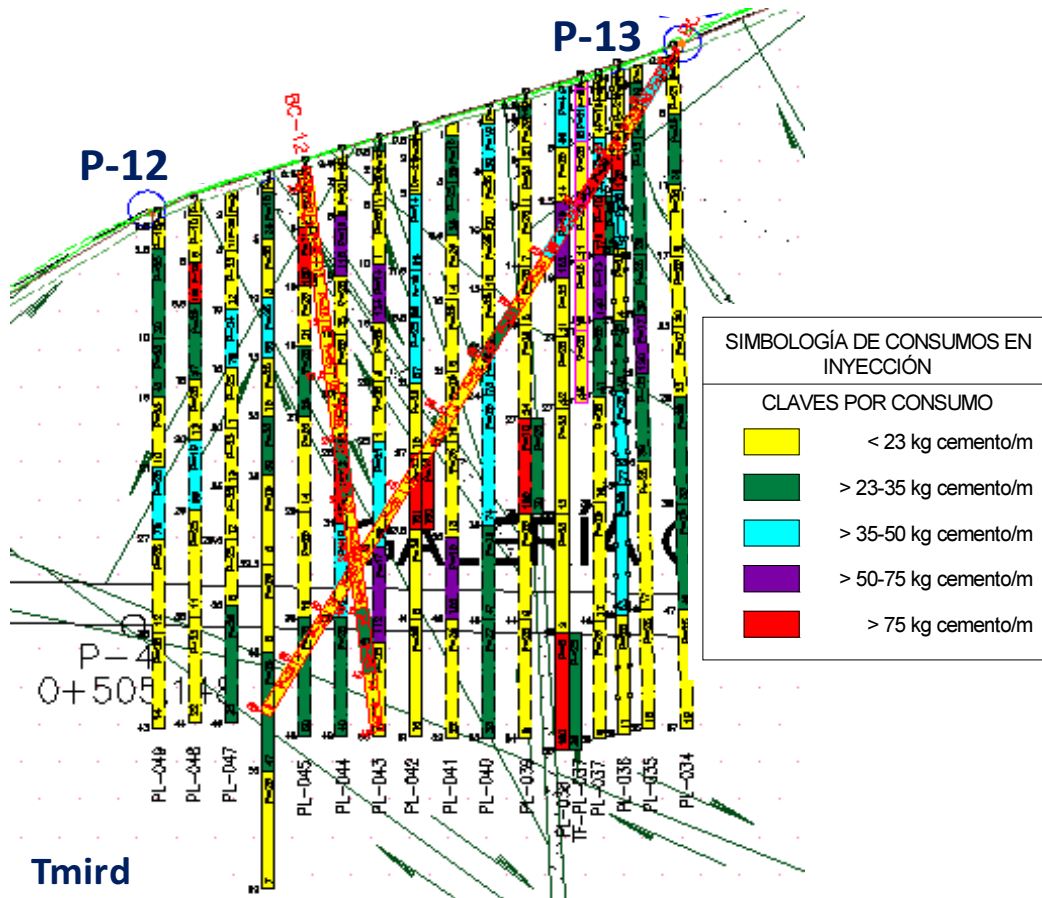


Figura 6.24. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Derecha P12-P13 P.H. La Yesca.

Se analizaron 329 tramos de inyección, cada tramo o progresión tiene una longitud de 5 m, se realizaron 43 barrenos de consolidación (20 m de profundidad), 37 barrenos de pantalla impermeable (48 m a 60 m de longitud), 2 barrenos de control (20 m y 40 m de longitud), y adicionalmente se realizaron 2 barrenos para tratamiento de fallas en la Línea de consolidación A, en las tablas 6.22 y 6.23 se presenta el resumen de consumos de inyección obtenidos por línea de tratamiento y en el gráfico 6.11 se presenta la distribución gráfica de los resultados.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento					Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Tratamiento Fallas		
A	Consolidación	160	131	102	88	20	104	45%
B	Consolidación	41	90	51	73	NA	60	-78%

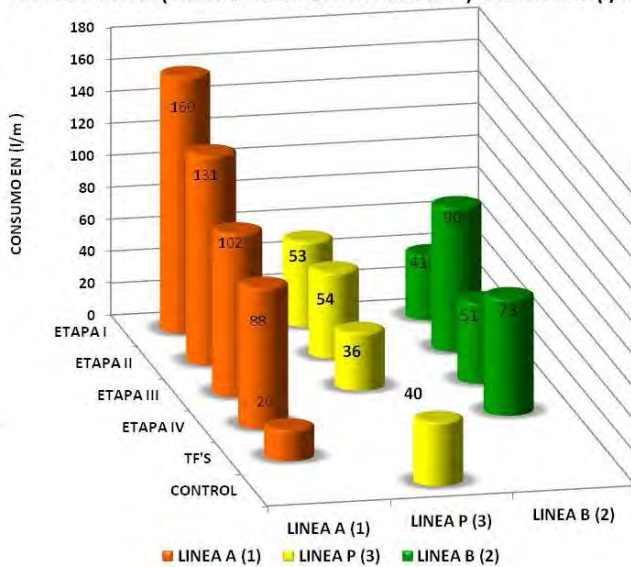
Tabla 6.22. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P12-P13.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento					Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Control		
P	Pantalla	53	54	36		40	44	25%

*El porcentaje de reducción se obtuvo solo considerando la etapa I y etapa de Control.

Tabla 6.23. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P12-P13.

GRÁFICA COMPARATIVA DE CONSUMOS POR ETAPA Y LINEA DE TRATAMIENTO (CONSOLIDACIÓN Y PANTALLA) CONSUMO (l/m)



GRÁFICA COMPARATIVA DE CONSUMOS POR ETAPA Y LINEA DE TRATAMIENTO (CONSOLIDACIÓN VS PANTALLA) CONSUMO (l/m)

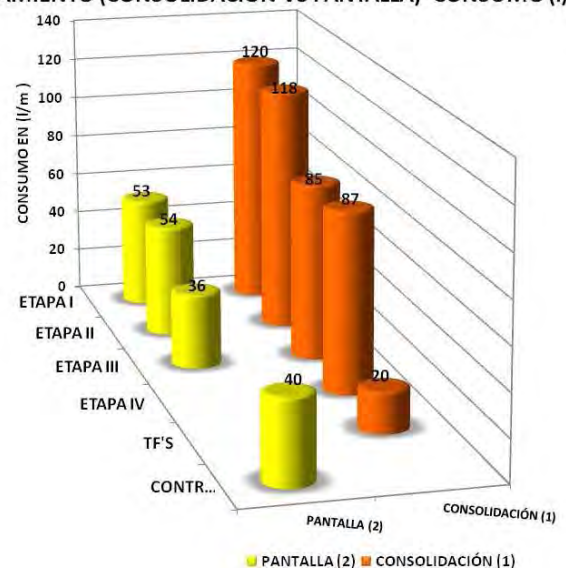


Gráfico 6.11. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P12-P13 (lts/m).

Con la aplicación de la metodología GIN se observa que se presentó una mejora sustancial en las líneas de consolidación. Obteniéndose reducciones entre la primera etapa y etapa última del 45% y una reducción del 25% entre etapa uno y última etapa realizada en los barrenos de pantalla impermeable.

Se observaron resultados sin un cierre progresivo entre etapas en la Línea B, cabe destacar que se supone que parte de la mezcla inyectada tuvo comunicación con el cuerpo de cortina dada la cercanía de la Línea B con la Ladera natural y a su vez con el material de la presa.

Si se analizan los promedios de los tratamientos con inyección, considerando la secuencia de ejecución entre líneas y tomando en cuenta su separación indicada en la figura 6.23 obtenemos los siguientes resultados:

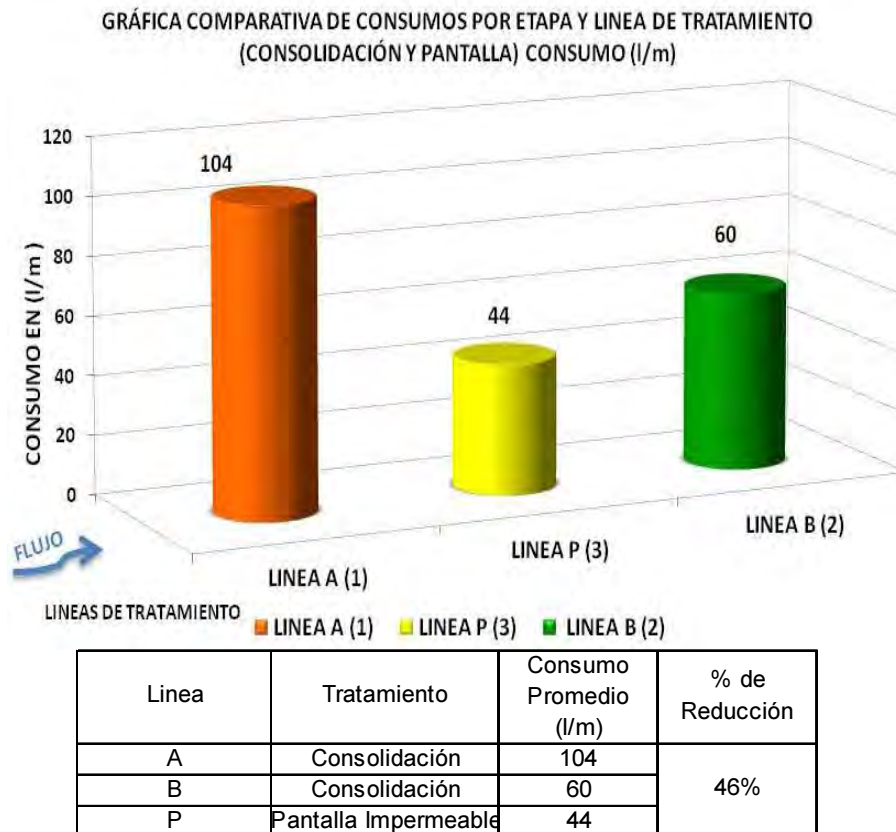


Gráfico 6.12. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P12-P13 en (lts/m).

Tal como se observa en el gráfico 6.12 las primeras líneas inyectadas (Líneas A y B) presentan mayores consumos de inyección que la línea P esto señala una disminución en el volumen inyectado del orden del 46%, aceptable para este tramo.

6.16.6 Tramo de inyección zona de la Margen Derecha P13-P14.

Se revisan los consumos efectuados en el sexto tramo de Plinto y último de la Margen Derecha, en el cual se efectuaron 106 barrenos de inyección puntos P13 a P14.

En la figura 6.25 se indica la sección analizada y el tramo en estudio.

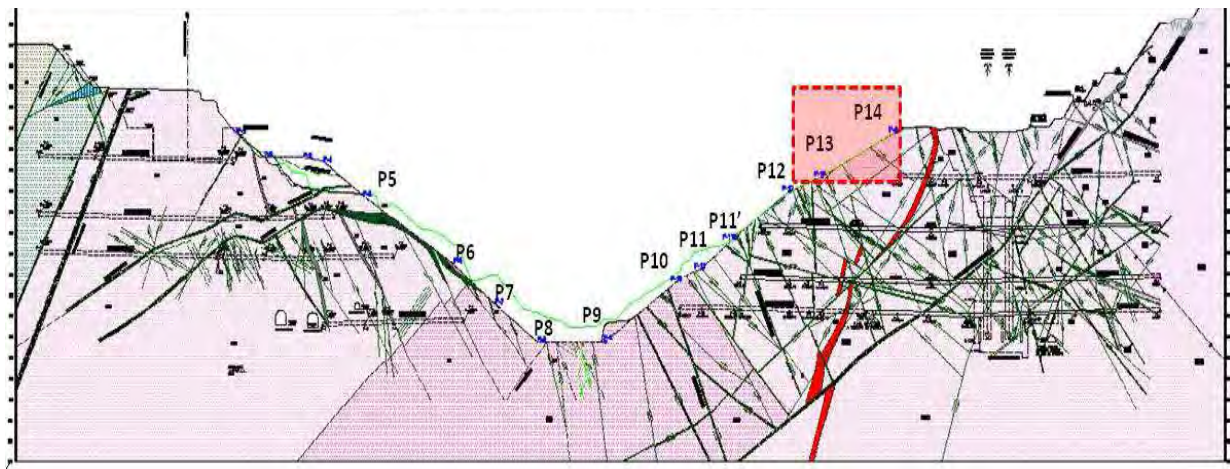


Figura 6.25. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P13-P14.

En la figura 6.26 se presenta la sección típica y la distribución en planta de los barrenos de inyección así como el orden de ejecución de líneas de inyección en el tramo del Plinto P13-P14, en esta zona se realizaron 2 líneas de consolidación y una línea de pantalla de impermeabilización localizada en la parte central.

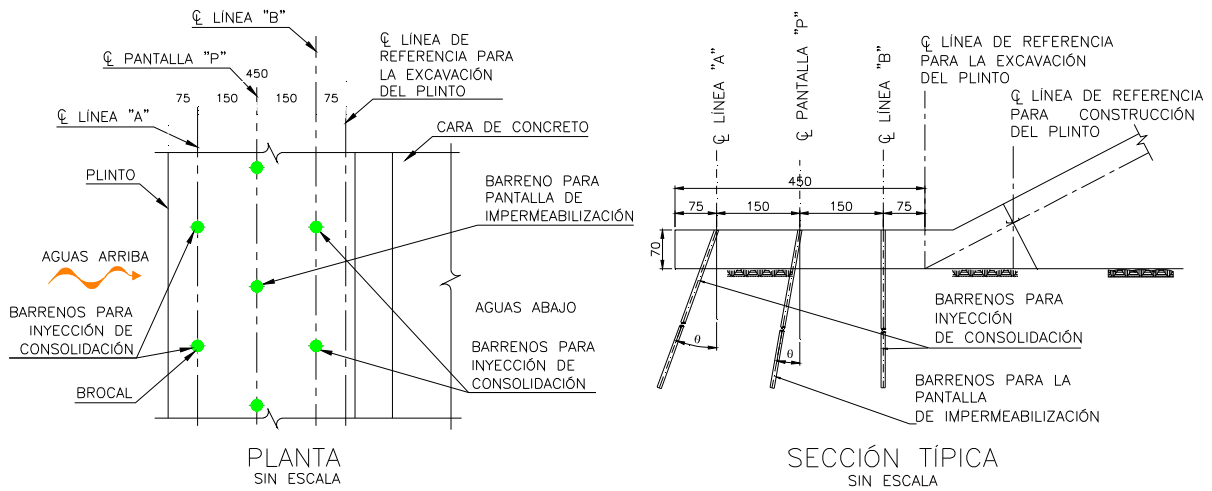


Figura 6.26. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P13-P14.

La figura 6.27 representa los consumos de inyección registrados y la clave de consumos utilizada.

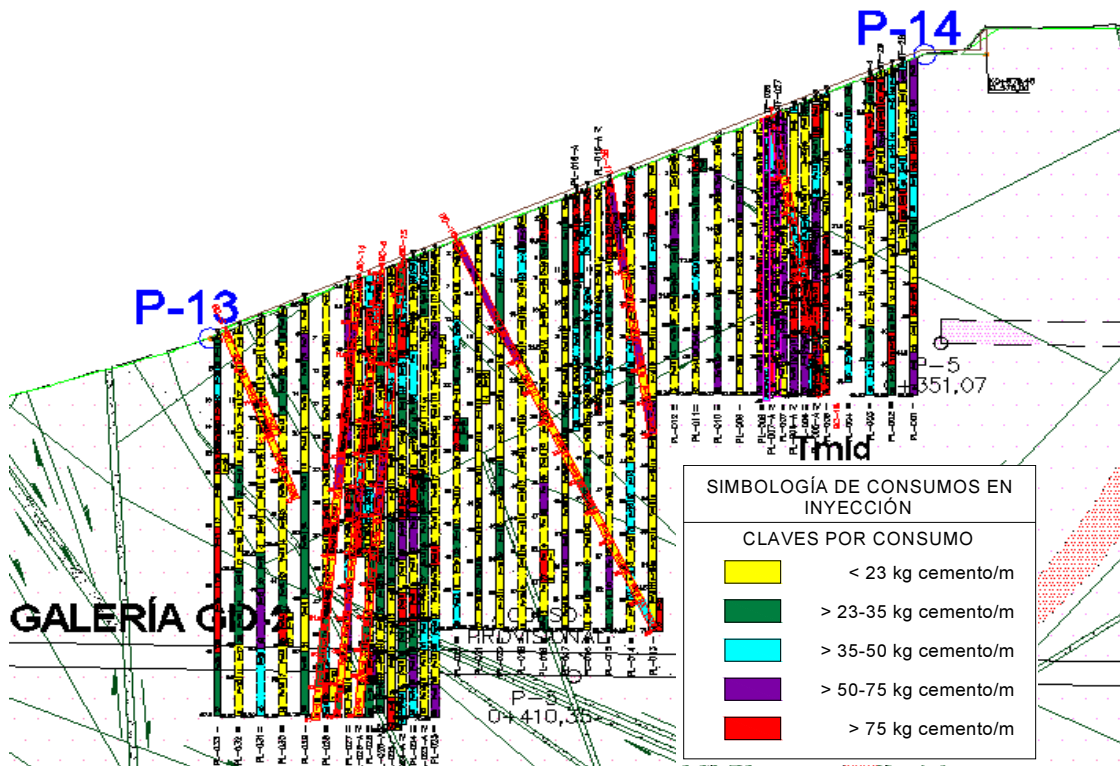


Figura 6.27. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Derecha P13-P14 P.H. La Yesca.

Se analizaron 711 tramos de inyección, cada tramo o progresión tiene una longitud de 5 m, se realizaron 64 barrenos de consolidación (10 y 20 m de profundidad), 49 barrenos de pantalla impermeable (40 m a 70 m de longitud), 7 barrenos de control (20 m y 70 m de longitud), en las tablas 6.24 y 6.25 se presenta el resumen de consumos de inyección obtenidos por línea de tratamiento y en el gráfico 6.13 se presenta la distribución gráfica de los resultados.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento			Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III		
A	Consolidación	41	51	41	43	20%
B	Consolidación	46	64	52	54	19%

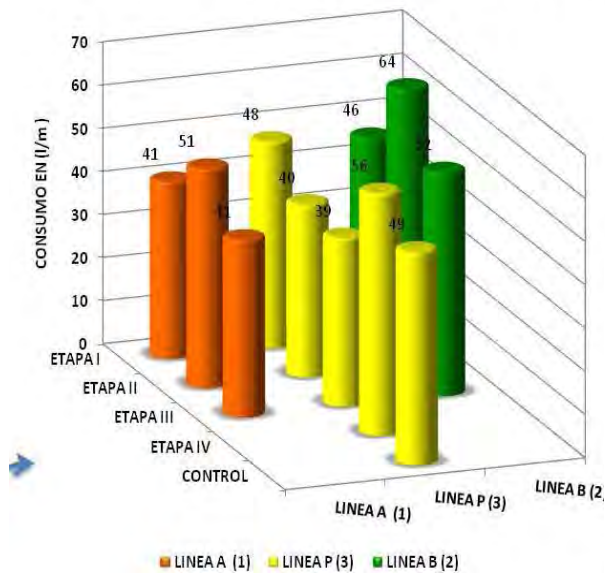
Tabla 6.24. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P13-P14.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento					Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Control		
P	Pantalla	48	40	39	56	49	44	13%

*El porcentaje de reducción se obtuvo solo considerando la etapa de IV de Control que fueron las etapas utilizadas para evaluar el comportamiento final de los tratamientos.

Tabla 6.25. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P13-P14.

GRÁFICA COMPARATIVA DE CONSUMOS POR ETAPA Y LINEA DE TRATAMIENTO (CONSOLIDACIÓN + PANTALLA) CONSUMO (l/m)



GRÁFICA COMPARATIVA DE CONSUMOS POR ETAPA Y LINEA DE TRATAMIENTO (CONSOLIDACIÓN VS PANTALLA) CONSUMO (l/m)

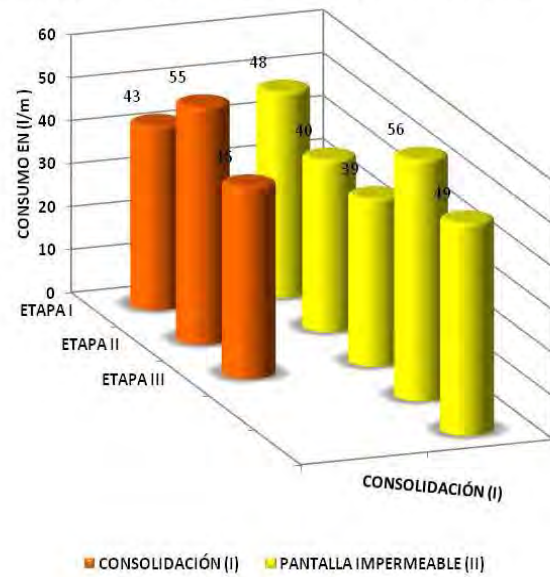
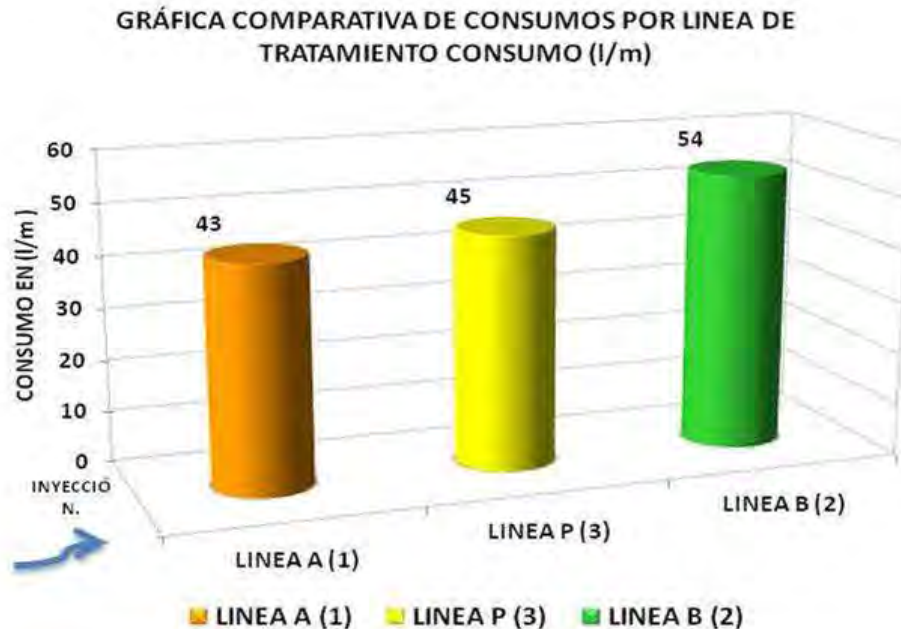


Gráfico 6.13. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P13-P14 (lts/m).

Con la aplicación de la metodología GIN se observa que se presentó una mejora en las líneas de consolidación. Obteniéndose reducciones entre la primera etapa y etapa última del 20% y una reducción del 13% entre etapa uno y última etapa realizada en los barrenos de pantalla impermeable.

Si se analizan los promedios de los tratamientos con inyección, considerando la secuencia de ejecución entre líneas y tomando en cuenta su separación indicada en la figura 6.26 obtenemos los siguientes resultados:



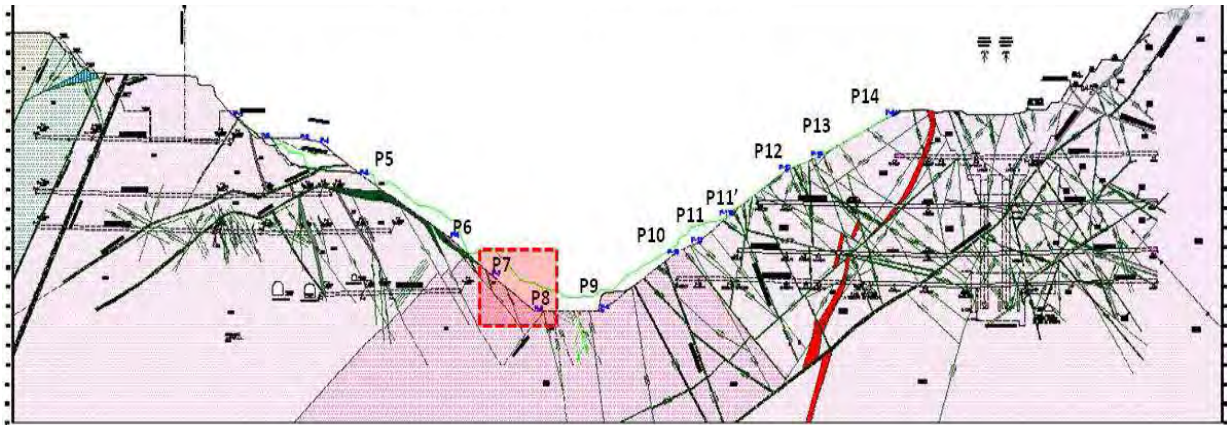
Linea	Tratamiento	Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
A	Consolidación	43	9%
B	Consolidación	54	
P	Pantalla Impermeable	44	

Gráfico 6.14. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P13-P14 en (lts/m).

Tal como se observa en el gráfico 6.14 las primeras líneas inyectadas (Líneas A y B) presentan mayores consumos de inyección que la línea P esto señala una disminución en el volumen inyectado del orden del 9%, aceptable para este tramo dado que las carga hidráulica en la zona será baja.

6.16.7 Tramo de inyección zona de la Margen Izquierda P7-P8.

Se revisan los consumos efectuados en el primer tramo del Plinto de la Margen Izquierda, en el cual se efectuaron 79 barrenos de inyección puntos P7 a P8. En la figura 6.28 se indica la sección analizada y el tramo en estudio.



En la figura 6.29 se presenta la sección típica y la distribución en planta de los barrenos de inyección así como el orden de ejecución de líneas de inyección en el tramo del Plinto P7-P8, en esta zona se realizaron 2 líneas de consolidación y una línea de pantalla de impermeabilización localizada en la parte central.

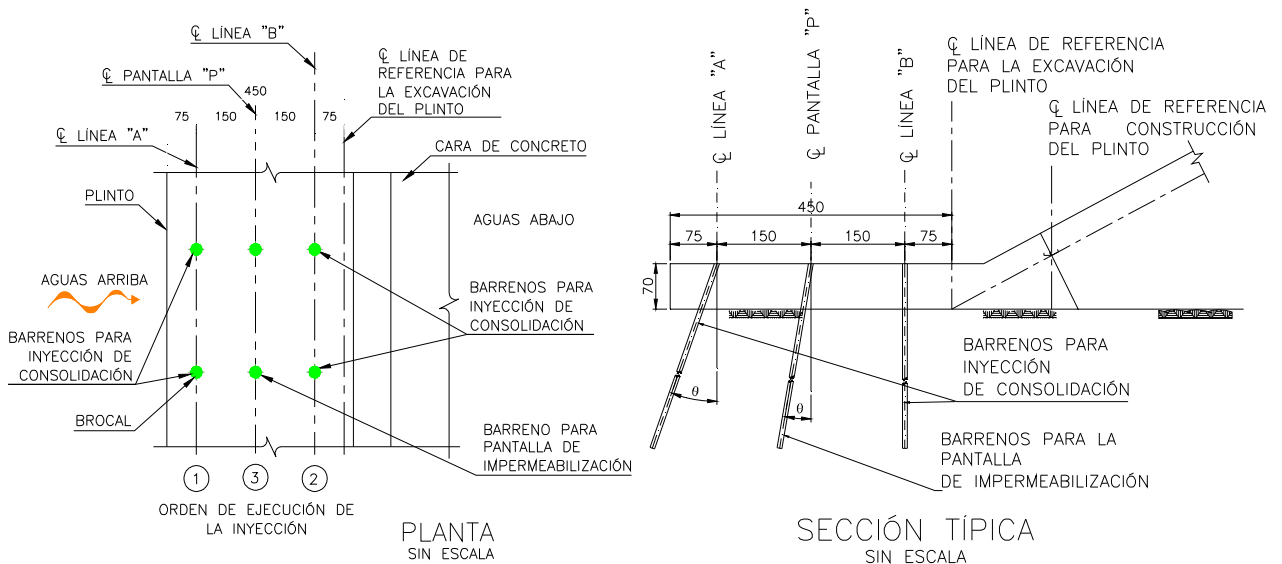


Figura 6.29. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P7-P8.

La figura 6.30 representa los consumos de inyección registrados y la clave de consumos utilizada.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento				Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV		
A	Consolidación	31	13	17	13	19	58%
B	Consolidación	38	13	34	28	29	26%

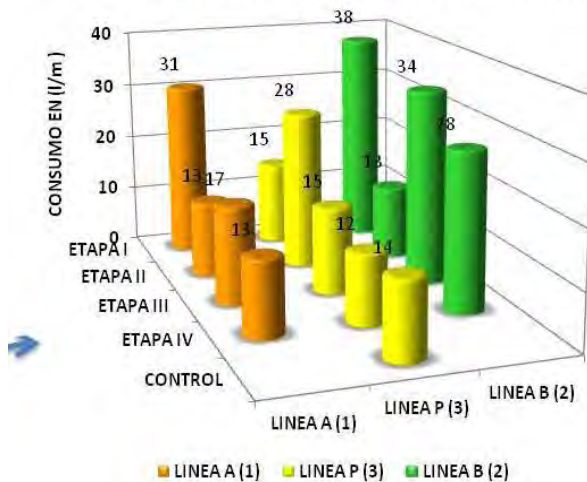
Tabla 6.26. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P7-P8.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento					Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Control		
P	Pantalla	15	28	15	12	14	18	7%

*El porcentaje de reducción se obtuvo solo considerando la etapa I y etapa de Control.

Tabla 6.27. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P7-P8.

GRÁFICA COMPARATIVA DE CONSUMOS POR ETAPA Y POR LÍNEA DE TRATAMIENTO (CONSOLIDACIÓN Y PANTALLA) CONSUMO (lts/m)



GRÁFICA COMPARATIVA DE CONSUMOS POR ETAPA DE TRATAMIENTO (CONSOLIDACIÓN VS PANTALLA) CONSUMO (l/m)

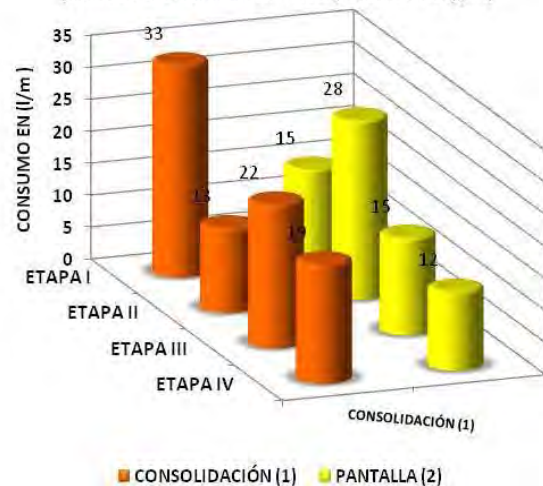
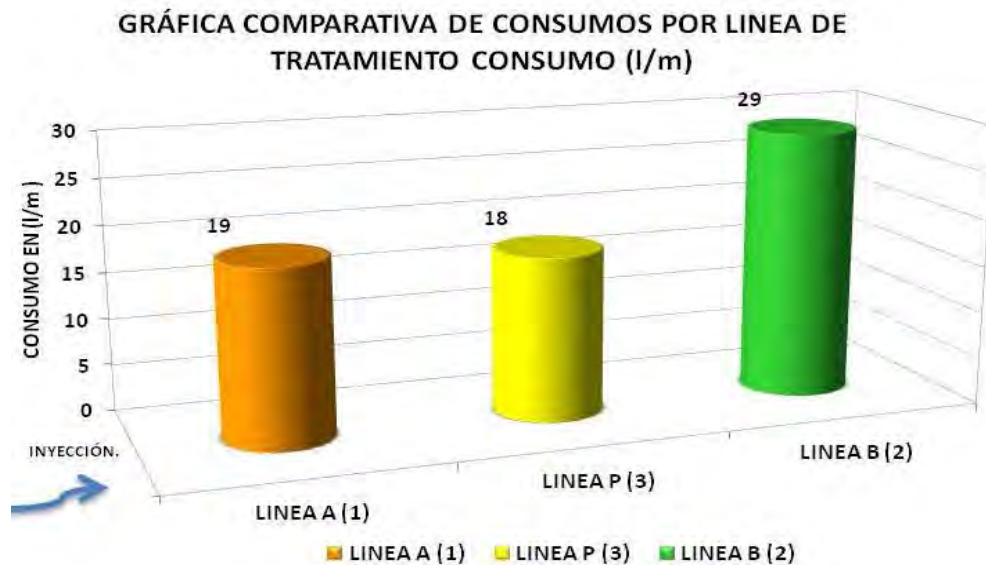


Gráfico 6.15. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P7-P8 (lts/m).

Con la aplicación de la metodología GIN se observa que se presentó una mejora sustancial en las líneas de consolidación. Obteniéndose reducciones entre la primera etapa y etapa última del 26% al 58% y una reducción del 7% entre etapa uno y última etapa realizada en los barrenos de pantalla impermeable.

Se observaron resultados sin un cierre progresivo entre etapas en la Línea B, cabe destacar que se supone que parte de la mezcla inyectada tuvo comunicación con el cuerpo de cortina dada la cercanía de la Línea B con la Ladera natural y a su vez con el material de la presa.

Si se analizan los promedios de los tratamientos con inyección, considerando la secuencia de ejecución entre líneas y tomando en cuenta su separación indicada en la figura 6.29 obtenemos los siguientes resultados:



Línea	Tratamiento	Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
A	Consolidación	19	25%
B	Consolidación	29	
P	Pantalla Impermeable	18	

Gráfico 6.16. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P7-P8 en (lts/m).

Tal como se observa en el gráfico 6.16 las primeras líneas inyectadas (Líneas A y B) presentan mayores consumos de inyección que la línea P esto señala una disminución en el volumen inyectado del orden del 25%, aceptable para este tramo.

6.16.8 Tramo de inyección zona de la Margen Izquierda P6-P7.

Se revisan los consumos efectuados en el segundo tramo del Plinto de la Margen Izquierda, en el cual se efectuaron 79 barrenos de inyección puntos P6 a P7. En la Figura 6.31 se indica la sección analizada y el tramo en estudio.

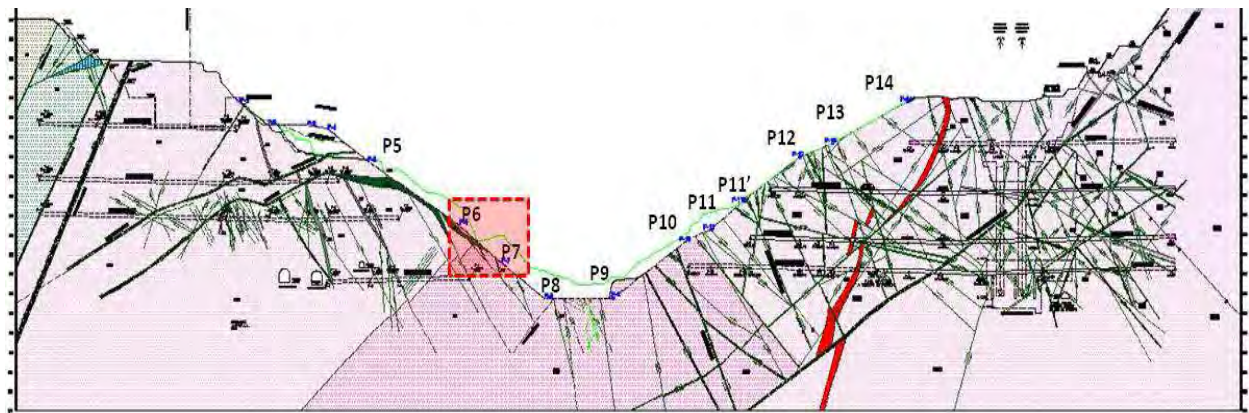


Figura 6.31. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P6-P7.

En la figura 6.32 se presenta la sección típica y la distribución en planta de los barrenos de inyección así como el orden de ejecución de líneas de inyección en el tramo del Plinto P6-P7, en esta zona se realizaron 2 líneas de consolidación y una línea de pantalla de impermeabilización localizada en la parte central.

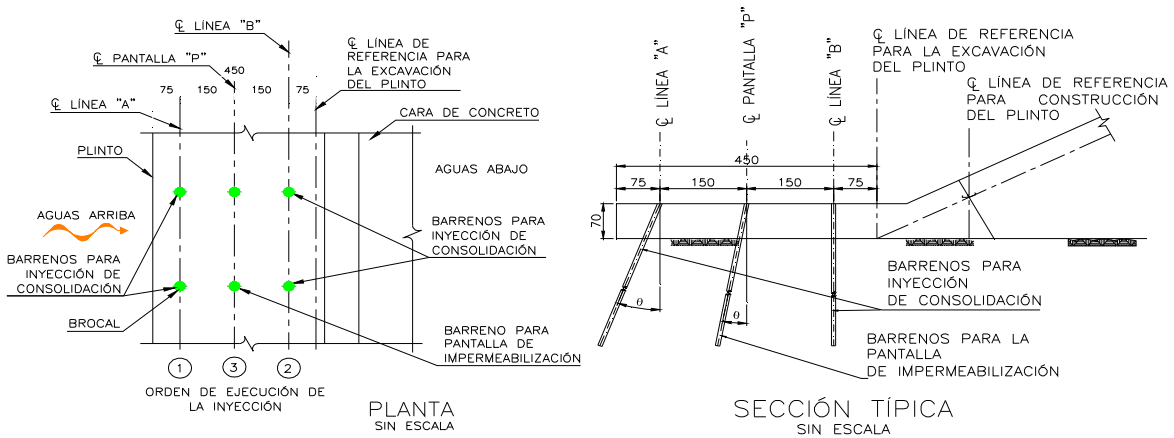


Figura 6.32. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P6-P7.

La figura 6.33 representa los consumos de inyección registrados y la clave de consumos utilizada.

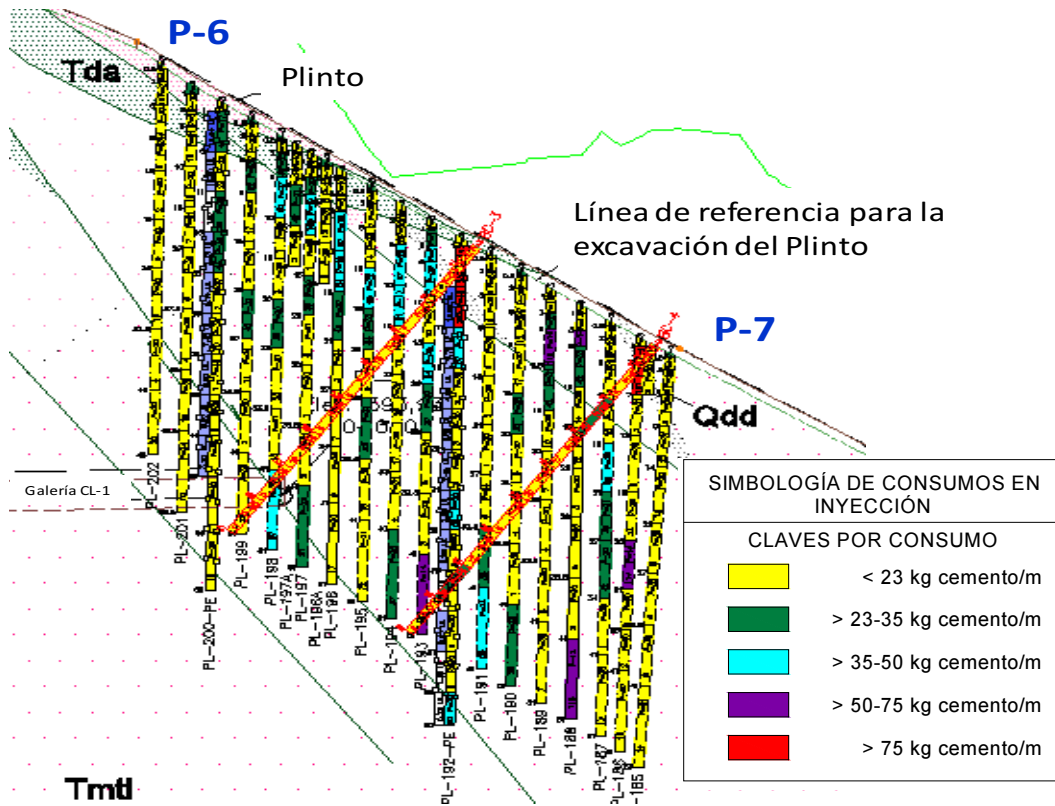


Figura 6.33. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Izquierda P6-P7 P.H. La Yesca.

Se analizaron 444 tramos de inyección, cada tramo o progresión tiene una longitud de 5 m, se realizaron 46 barrenos de consolidación (10 y 20 m de profundidad), 28 barrenos de pantalla impermeable (50 m de longitud), 2 barrenos de control (40 m de longitud), en las tablas 6.28 y 6.29 se presenta el resumen de consumos de inyección obtenidos por línea de tratamiento y en el gráfico 6.17 se presenta la distribución gráfica de los resultados.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento				Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV		
A	Consolidación	38	37	39	21	19	45%
B	Consolidación	159	48	72	35	29	78%

Tabla 6.28. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P6-P7.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento					Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Control		
P	Pantalla	40	35	21	15	15	27	63%

*El porcentaje de reducción se obtuvo solo considerando la etapa I y etapa de Control.

Tabla 6.29. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P6-P7.

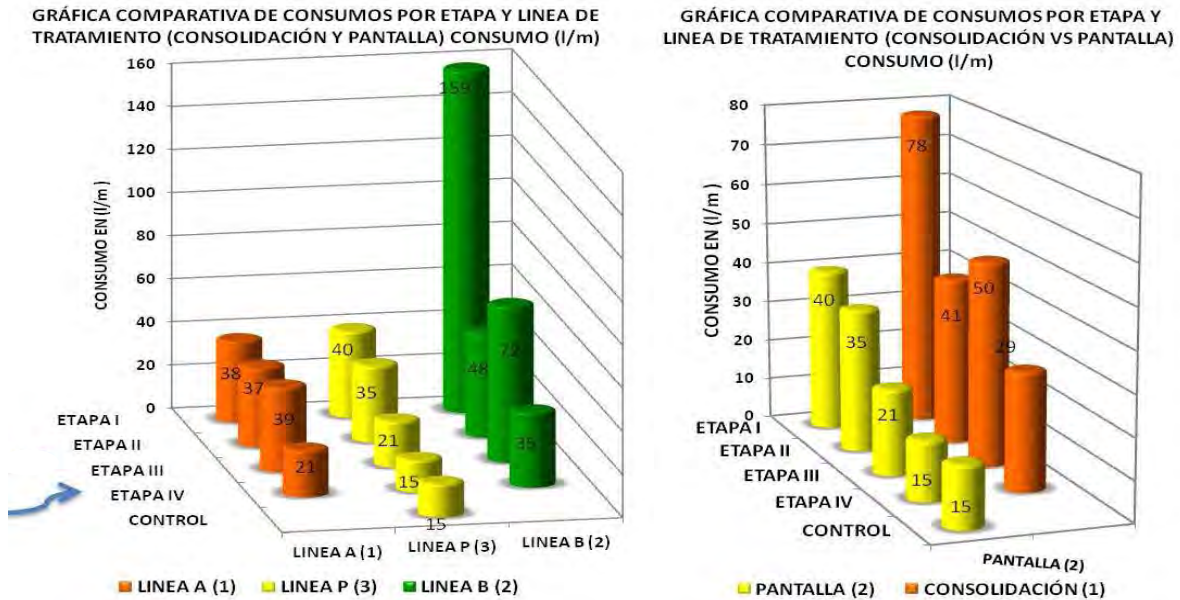


Gráfico 6.17. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P6-P7 (lts/m).

Con la aplicación de la metodología GIN se observa que se presentó una mejora sustancial en las líneas de consolidación. Obteniéndose reducciones entre la primera etapa y etapa última del 45% al 78% línea A y Línea B respectivamente y una reducción del 63% entre etapa uno y última etapa realizada en los barrenos de pantalla impermeable.

Se observaron resultados sin un cierre progresivo entre etapas en la Línea B, cabe destacar que se supone que parte de la mezcla inyectada tuvo comunicación con el cuerpo de cortina dada la cercanía de la Línea B con la Ladera natural y a su vez con el material de la presa.

Si se analizan los promedios de los tratamientos con inyección, considerando la secuencia de ejecución entre líneas y tomando en cuenta su separación indicada en la figura 6.32 obtenemos los siguientes resultados:

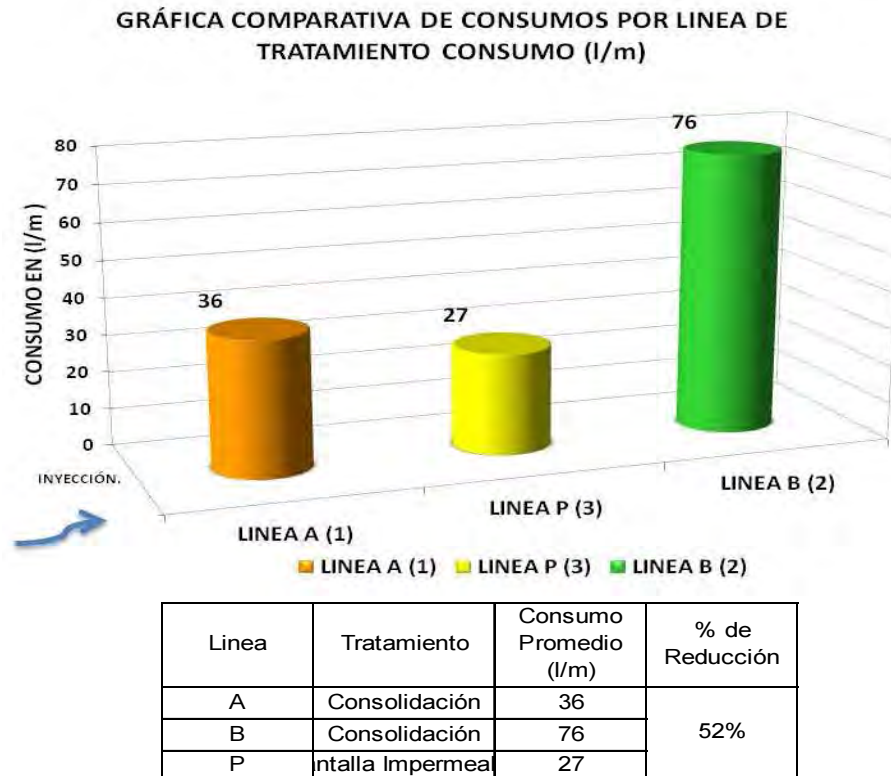


Gráfico 6.18. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P6-P7 en (lts/m).

Tal como se observa en el gráfico 6.18 las primeras líneas inyectadas (Líneas A y B) presentan mayores consumos de inyección que la línea P esto señala una disminución en el volumen inyectado del orden del 52%, aceptable para este tramo.

6.16.9 Tramo de inyección zona de la Margen Izquierda P5-P6.

Se revisan los consumos efectuados en el tercer tramo del Plinto de la Margen Izquierda, en el cual se efectuaron 146 barrenos de inyección puntos P5 a P6. En la figura 6.34 se indica la sección analizada y el tramo en estudio.

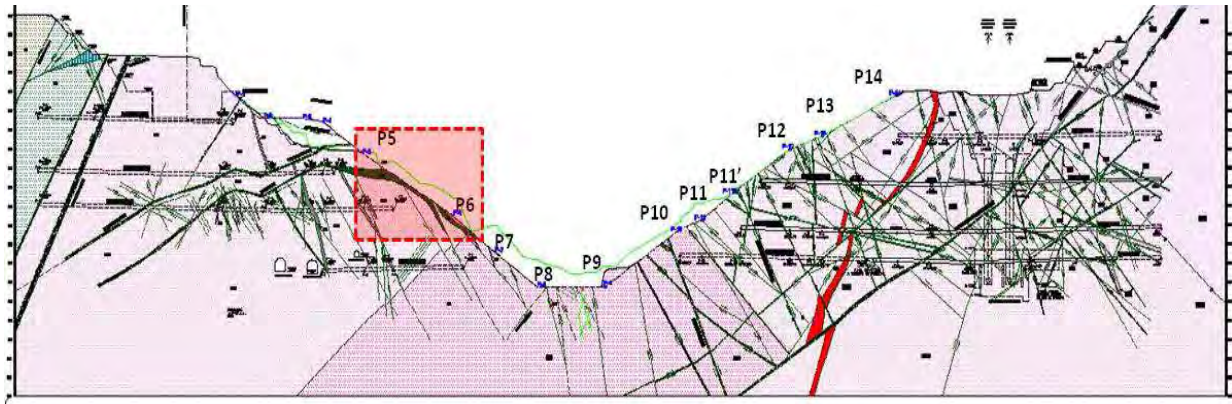


Figura 6.34. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P5-P6.

En la figura 6.35 se presenta la sección típica y la distribución en planta de los barrenos de inyección así como el orden de ejecución de líneas de inyección en el tramo del Plinto P5-P6, en esta zona se realizaron 2 líneas de consolidación y una línea de pantalla de impermeabilización localizada en la parte central.

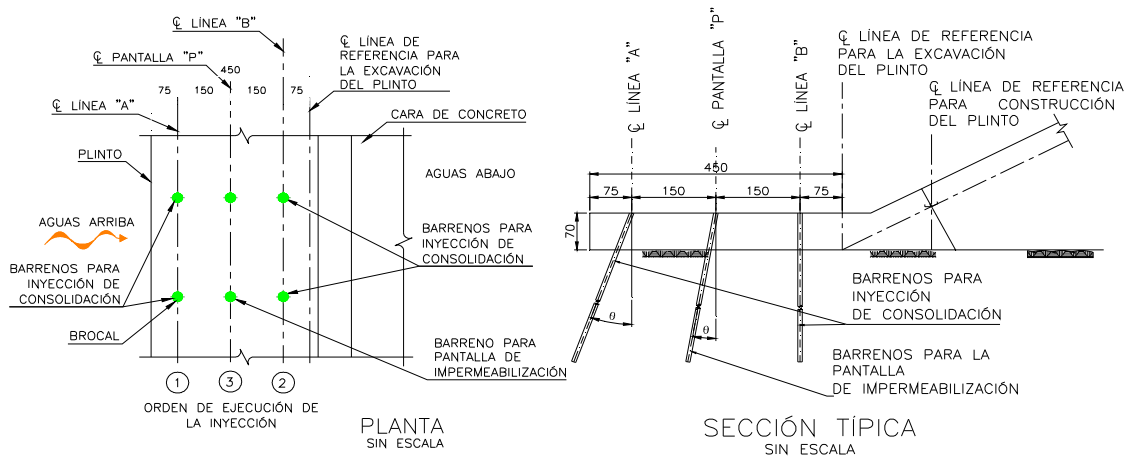


Figura 6.35. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P5-P6.

La figura 6.36 representa los consumos de inyección registrados y la clave de consumos utilizada.

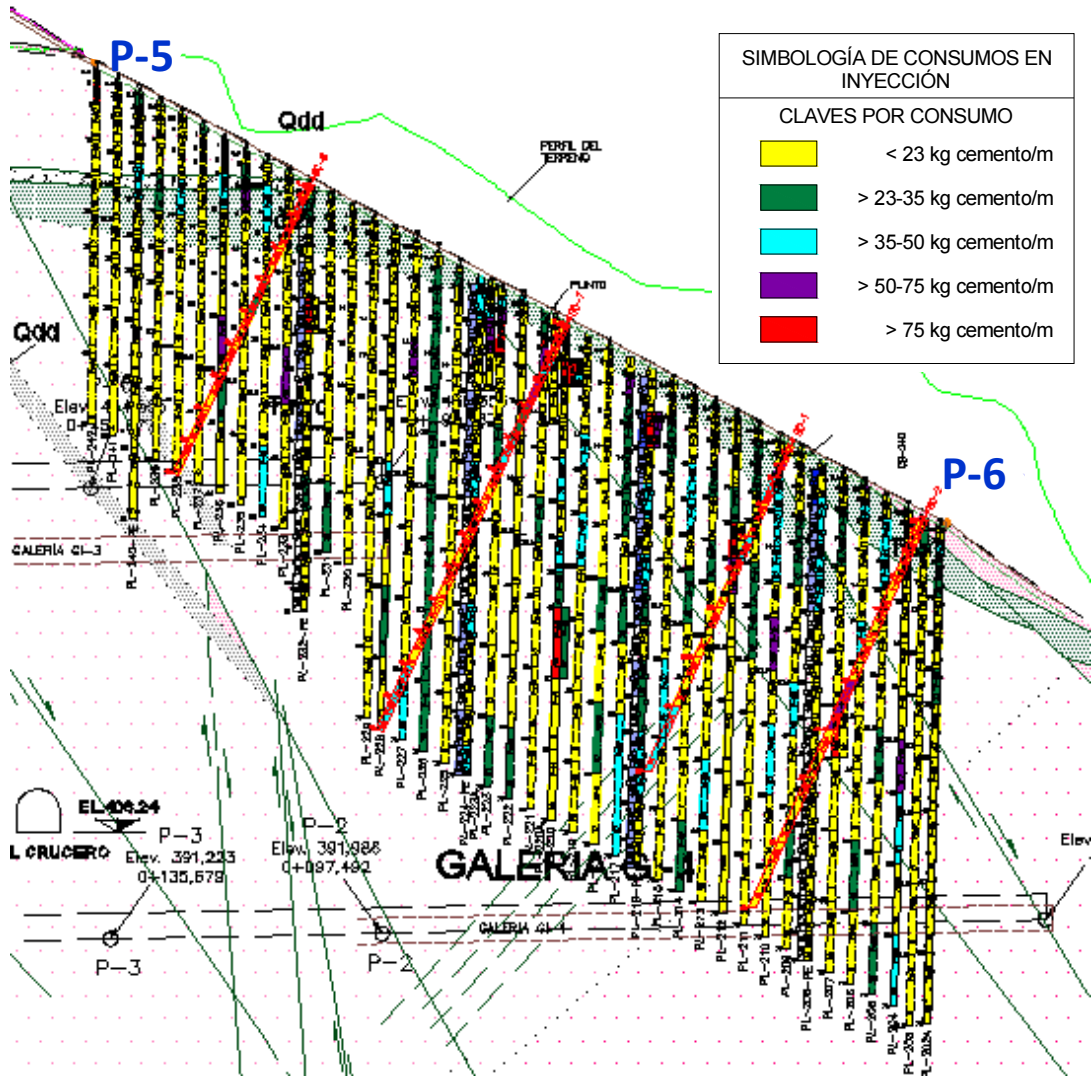


Figura 6.36. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Izquierda P5-P6 P.H. La Yesca.

Se analizaron 1102 tramos de inyección, cada tramo o progresión tiene una longitud de 5 m, se realizaron 99 barrenos de consolidación (10 y 20 m de profundidad), 47 barrenos de pantalla impermeable (50 m a 70 m de longitud), 3 barrenos de control (45 a 60 m de longitud), en las tablas 6.30 y 6.31 se presenta el resumen de consumos de inyección obtenidos por línea de tratamiento y en el gráfico 6.19 se presenta la distribución gráfica de los resultados.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento				Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV		
A	Consolidación	54	42	49	53	49	2%
B	Consolidación	50	58	55	48	54	4%

Tabla 6.30. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P5-P6.

Línea	Tratamiento	Consumo en (l/m) de cemento					Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Control		
P	Pantalla	40	23	22	45	35	28	13%

*El porcentaje de reducción se obtuvo solo considerando la etapa I y etapa de Control.

Tabla 6.31. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P5-P6.

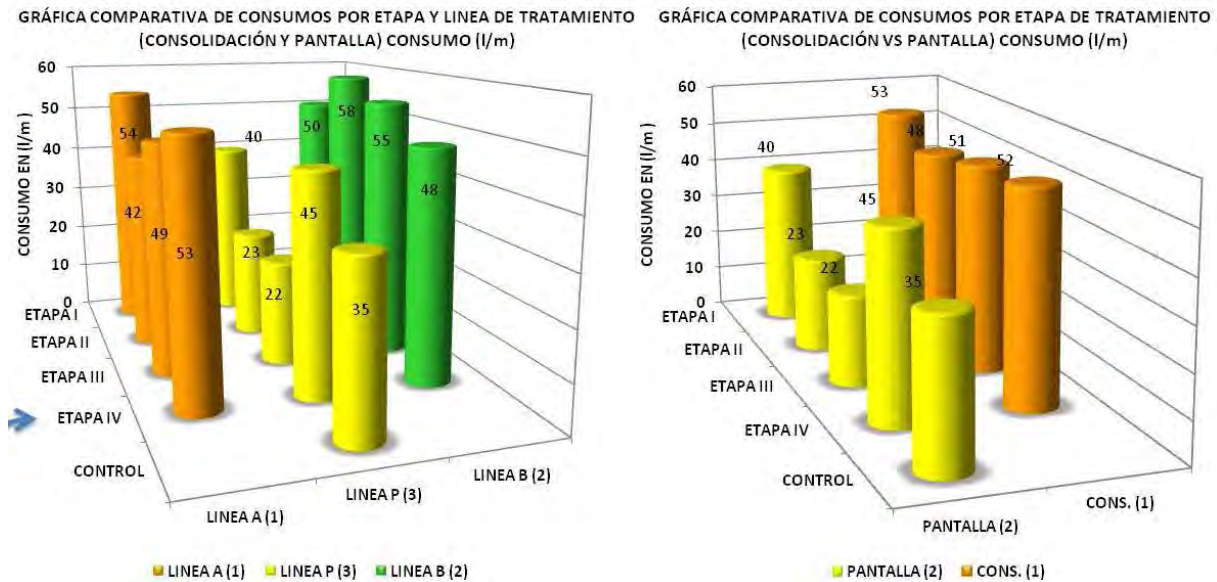


Gráfico 6.19. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P5-P6 (lts/m).

Con la aplicación de la metodología GIN se observa que se presentó una leve mejora en las líneas de consolidación. Obteniéndose reducciones entre la primera etapa y etapa última del 2% al 4% línea A y Línea B respectivamente y una reducción del 13% entre etapa uno y última etapa realizada en los barrenos de pantalla impermeable.

Se observaron resultados con un cierre progresivo entre etapas reducido, sin embargo dados los consumos presentados se prevé que son consumos bajos.

Si se analizan los promedios de los tratamientos con inyección, considerando la secuencia de ejecución entre líneas y tomando en cuenta su separación indicada en la figura 6.35 obtenemos los siguientes resultados:



Línea	Tratamiento	Consumo Promedio (l/m)	% de Reducción
A	Consolidación	49	46%
B	Consolidación	54	
P	Pantalla Impermeable	28	

Gráfico 6.20. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P5-P6 en (lts/m).

Tal como se observa en el gráfico 6.20 las primeras líneas inyectadas (Líneas A y B) presentan mayores consumos de inyección que la línea P esto señala una disminución en el volumen inyectado del orden del 46%, aceptable para este tramo.

6.17 Análisis de curvas GIN.

En este capítulo se analizarán los diferentes criterios GIN presentados con la finalidad de demostrar cada uno de los criterios de cierre que se presentaron en los diferentes procesos de inyección según la metodología establecida en el P.H. La Yesca.

6.17.1 Criterio de cierre por Presión Máxima.

Se presenta un ejemplo del inyectado con el criterio de cierre por Presión Máxima en la progresión de un barreno ejecutado en la zona del Cauce.

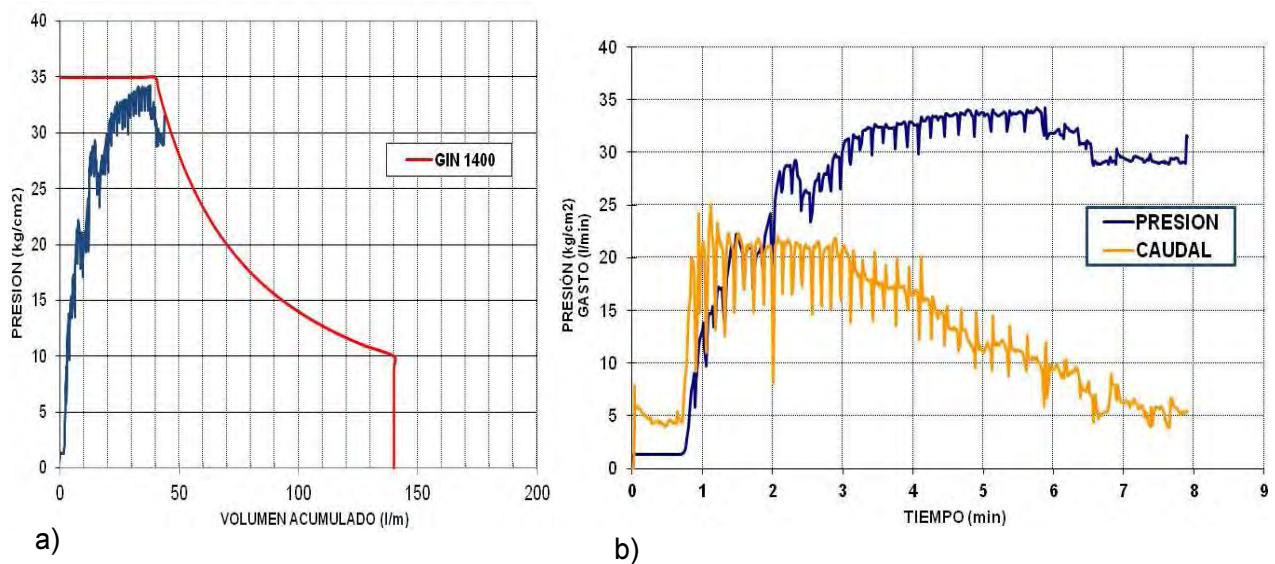


Gráfico 6.21. Curva GIN en inyección de barreno zona del Cauce criterio de cierre por Pmax.

En el grafico 6.21 a) se observa la curva límite de presión y volumen (Curva GIN) y la trayectoria real del proceso de inyectado, y en el gráfico 6.21 b) se presenta la

gráfica de Presión vs Caudal (gasto), se observa cómo se presenta el incremento de presión y la disminución del caudal de inyección al llegar a la presión Máxima.

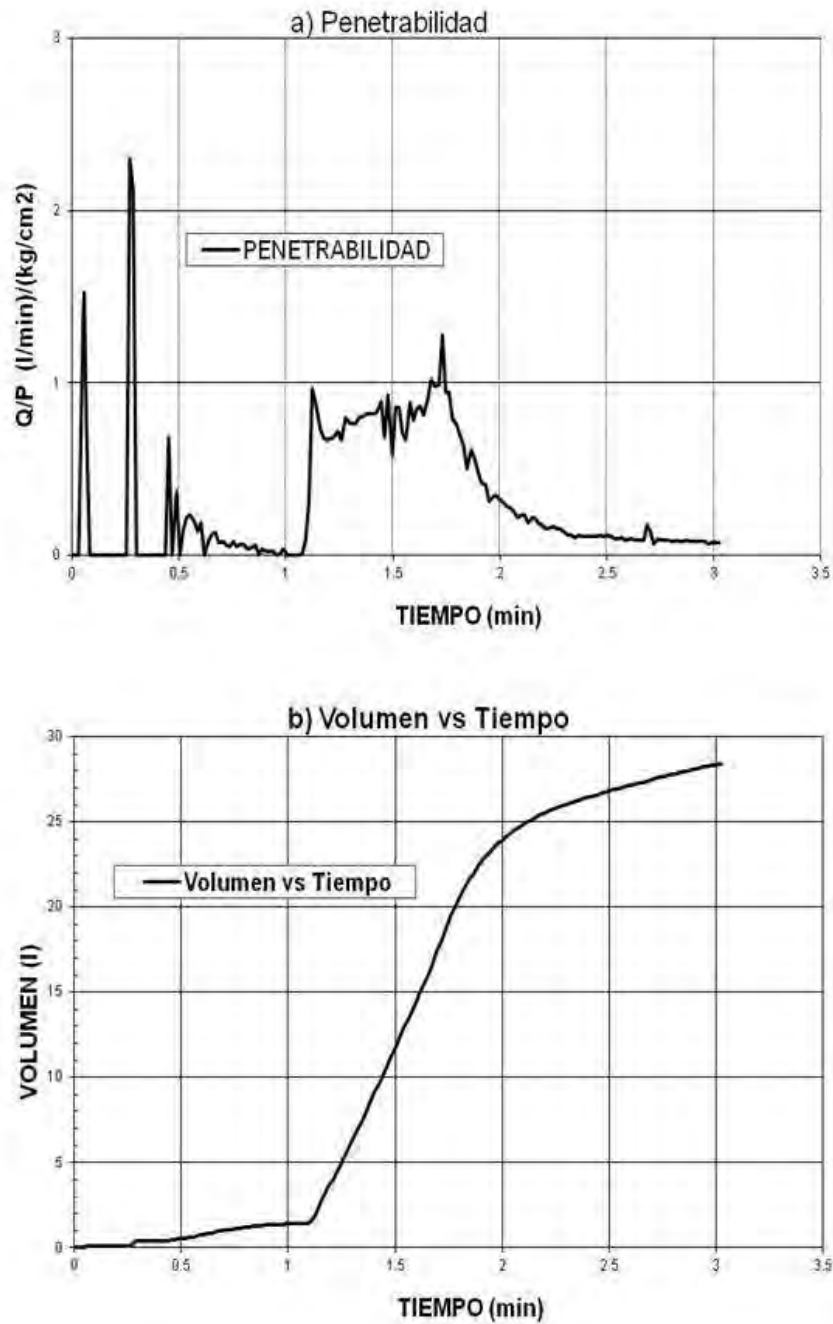


Gráfico 6.22. a) Curva Gasto-Presión vs Tiempo y b) Curva Volumen vs Tiempo.

En el gráfico 6.22 se muestran dos curvas de control utilizadas para la evaluación de un tramo inyectado, en este caso se observa en la gráfica 6.22 a) la gráfica de penetrabilidad en la cual se presenta el inicio de la inyección y como la curva de penetrabilidad disminuye al finalizar el proceso, la gráfica 6.22 b) indica la representación de volumen absorbido en el periodo de tiempo de duración del proceso de inyección.

Finalmente se muestran dos gráficos más que el método GIN recomienda para la evaluación de tramos inyectados.

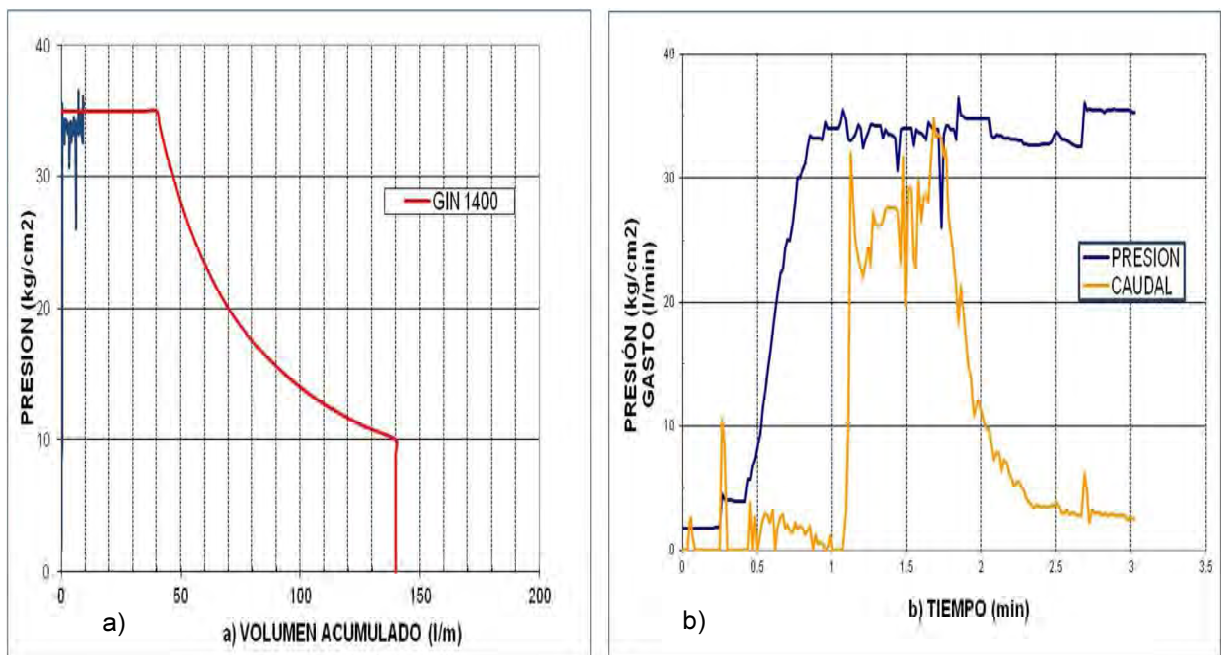


Gráfico 6.23. a) Presión y caudal vs Volumen inyectado en (l/m) y b) Penetrabilidad Q/P vs Volumen.

En el gráfico 6.23 a) se observa otra representación del proceso de inyección, en el cual se nota el incremento en la presión de inyección a la Presión Máxima especificada en el tramo y la reducción del caudal de inyección presentándose con esto el final de la inyección y la gráfica 6.23 b) muestra otra representación de la penetrabilidad en función del volumen.

6.17.2 Criterio de cierre por intersección de la curva GIN.

Se presenta un ejemplo del inyectado con el criterio de cierre por la intersección de la curva GIN en la progresión de un barreno ejecutado en la zona del Cauce.

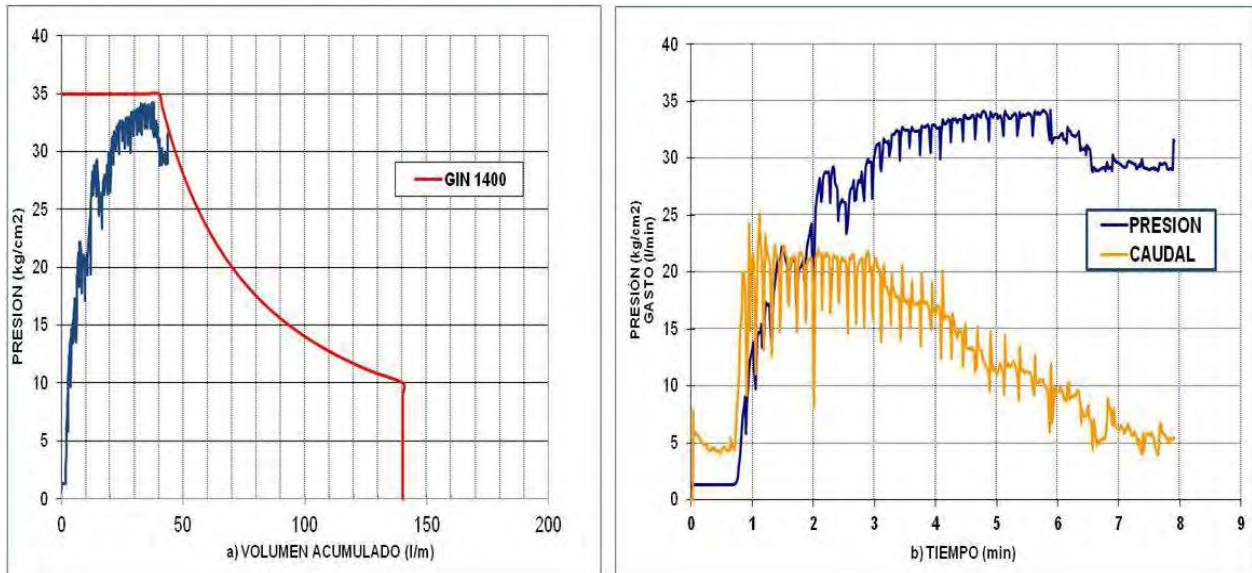


Gráfico 6.24. Proceso de Inyectado en una progresión Barreno PL-134C. (Etapa II), criterio de cierre por intersección de curva GIN.

En el gráfico 6.24 a) se observa la curva límite de presión y volumen (Curva GIN) y la trayectoria real del proceso de inyectado, y en el gráfico 6.24 b) se presenta la gráfica de Presión vs Caudal (gasto), se observa cómo se presenta el incremento de presión y la disminución del caudal de inyección.

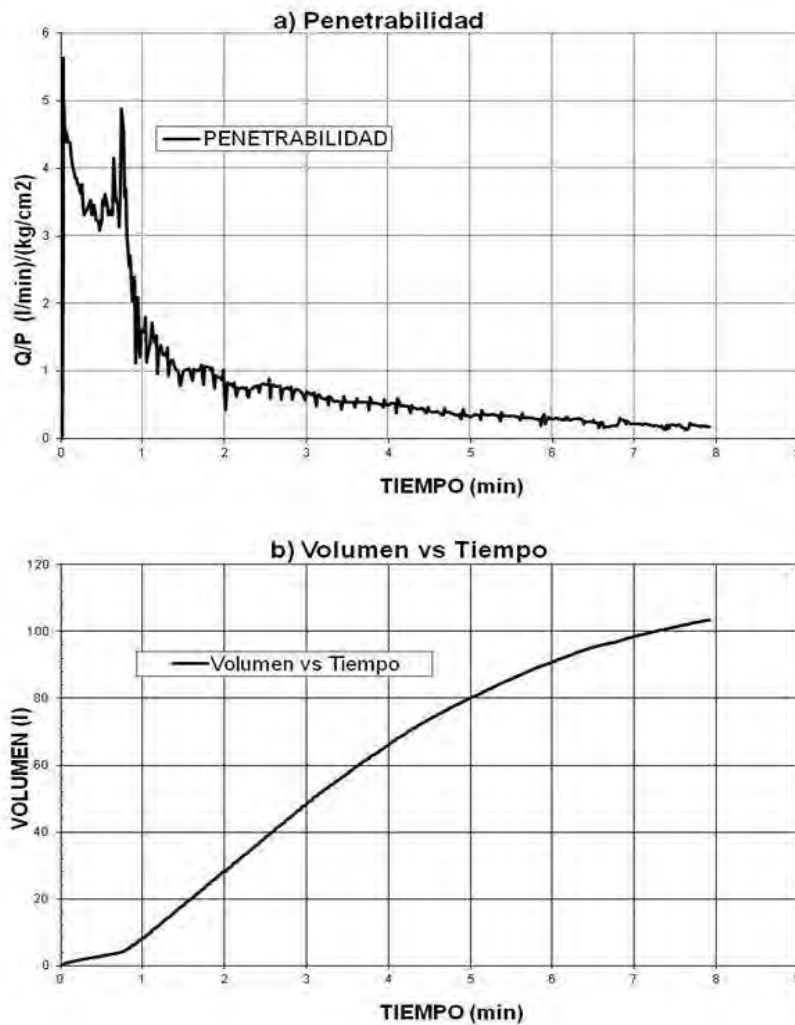


Gráfico 6.25. a) Curva Gasto-Presión vs Tiempo y b) Curva Volumen vs Tiempo.

En el gráfico 6.25 se muestran dos curvas de control utilizadas para la evaluación de un tramo inyectado, en este caso se observa en la gráfica 6.25 a) la gráfica de penetrabilidad en la cual se presenta el inicio de la inyección y como la curva de penetrabilidad disminuye al finalizar el proceso, la gráfica 6.25 b) indica la representación de volumen absorbido en el periodo de tiempo de duración del proceso de inyección.

Finalmente se muestran dos gráficos más que el método GIN recomienda para la evaluación de tramos inyectados.

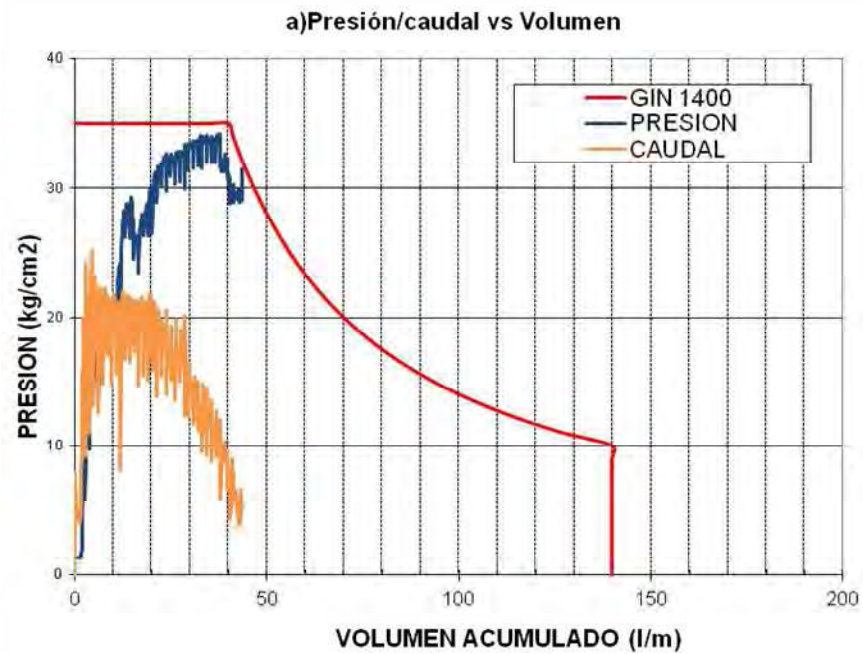


Gráfico 6.26. Presión y caudal vs Volumen inyectado en (l/m).

En el gráfico 6.26 se observa otra representación del proceso de inyección, en el cual se nota el incremento en la presión de inyección y la reducción del caudal de inyección presentándose con esto el final de la inyección.

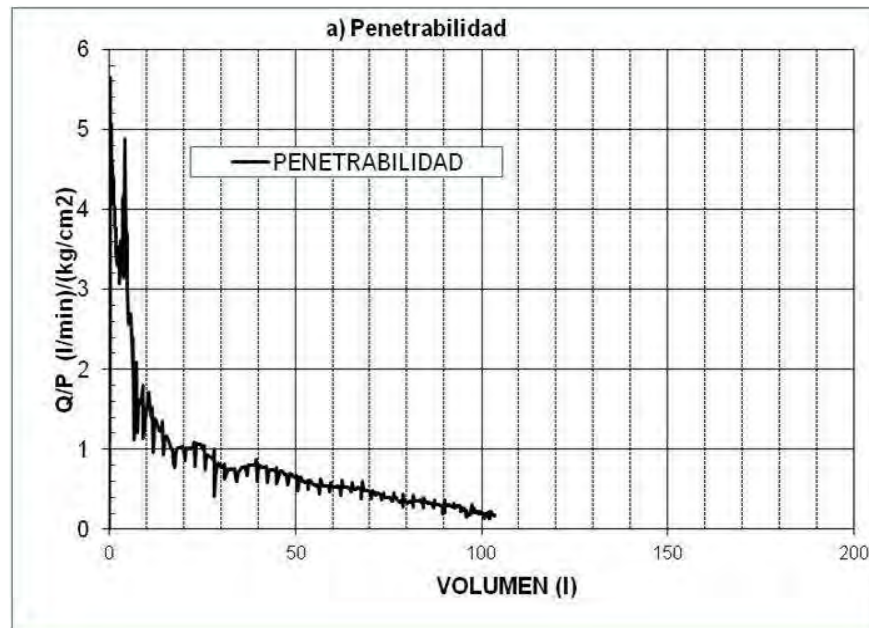


Gráfico 6.27. Caudal/Presión vs Volumen.

El gráfico 6.27 es otra forma de representar la penetrabilidad en una progresión de inyección, similar a la gráfica 6.26 a) se presenta el inicio de la inyección y como la curva de penetrabilidad disminuye al finalizar el proceso de inyección.

6.17.3 Criterio de cierre por Volumen Máximo.

Se presenta un ejemplo del inyectado con el criterio de cierre por Volumen Máximo en la progresión de un barreno ejecutado en la zona del Cauce.

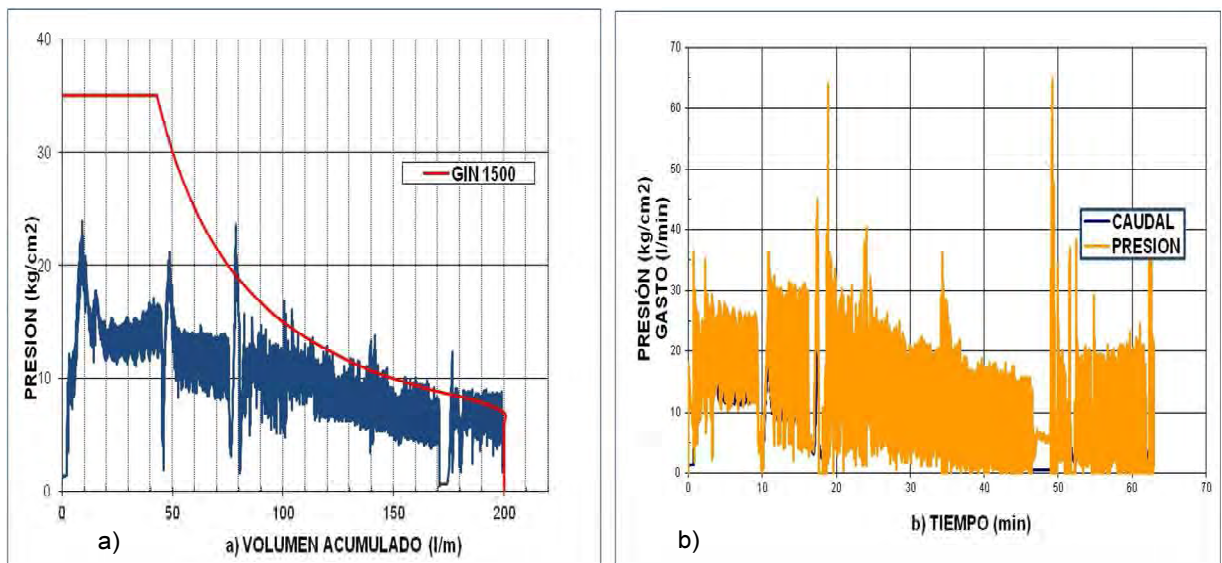


Gráfico 6.28. Curva GIN en inyección de barreno zona del Cauce criterio de cierre por V_{max} .

En el gráfico 6.28 a) se observa la curva límite de presión y volumen (Curva GIN) y la trayectoria real del proceso de inyectado, y en el gráfico 6.28 b) se presenta la gráfica de Presión vs Caudal (gasto), se observa cómo se presenta la disminución de presión y un caudal variable de inyección al llegar al volumen máximo establecido.

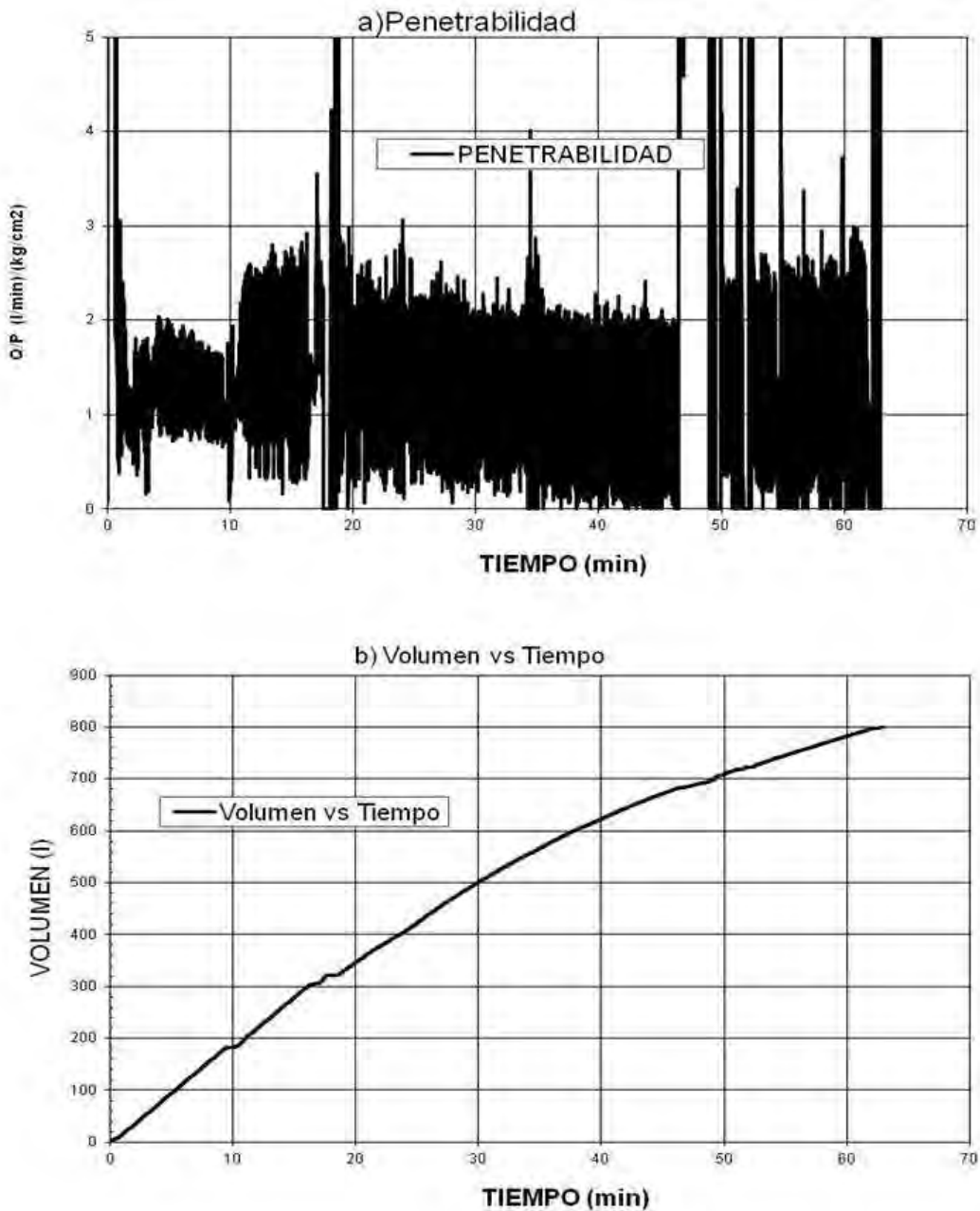


Gráfico 6.29. a) Curva Gasto-Presión vs Tiempo y b) Curva Volumen vs Tiempo.

En el gráfico 6.29 se muestran dos curvas de control utilizadas para la evaluación de un tramo inyectado, en este caso se observa en la gráfica 6.29 a) la gráfica de penetrabilidad en la cual se presenta el inicio de la inyección y como la curva de penetrabilidad disminuye al finalizar el proceso, la gráfica 6.29 b) indica la

representación de volumen absorbido en el periodo de tiempo de duración del proceso de inyección.

Finalmente se muestran dos gráficos más que el método GIN recomienda para la evaluación de tramos inyectados.

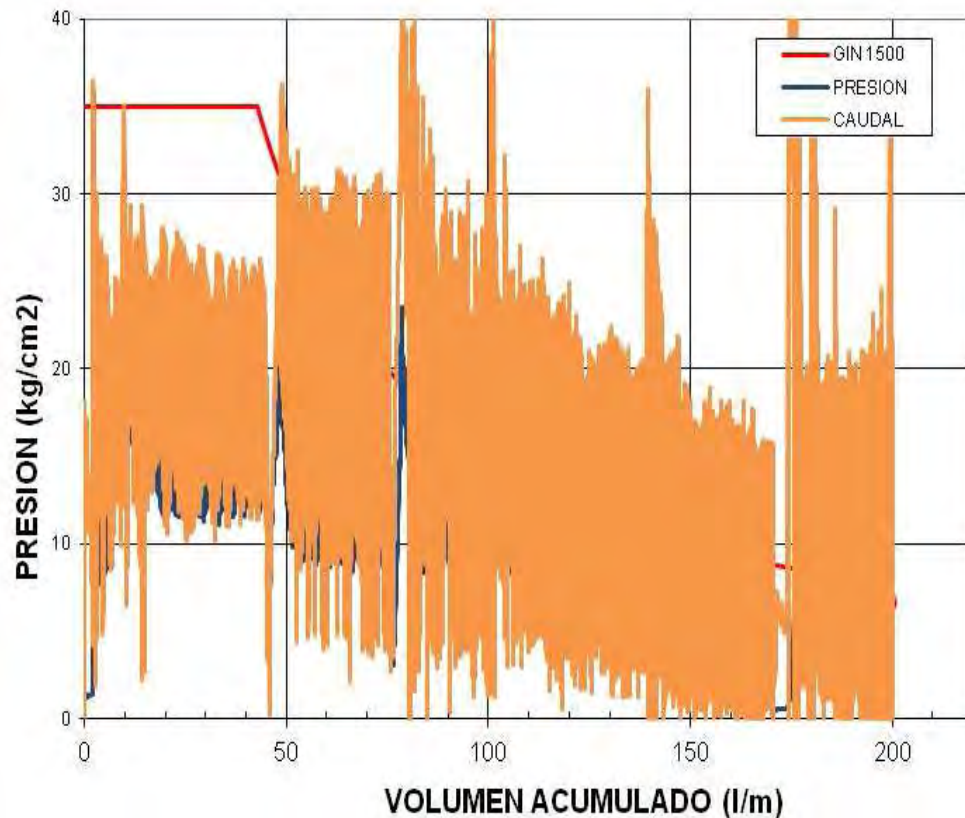


Gráfico 6.30. Presión y caudal vs Volumen inyectado en (l/m).

En el gráfico 6.30 se observa otra representación del proceso de inyección, en el cual se nota la disminución en la presión de inyección y un caudal variable de inyección al llegar al volumen máximo establecido.

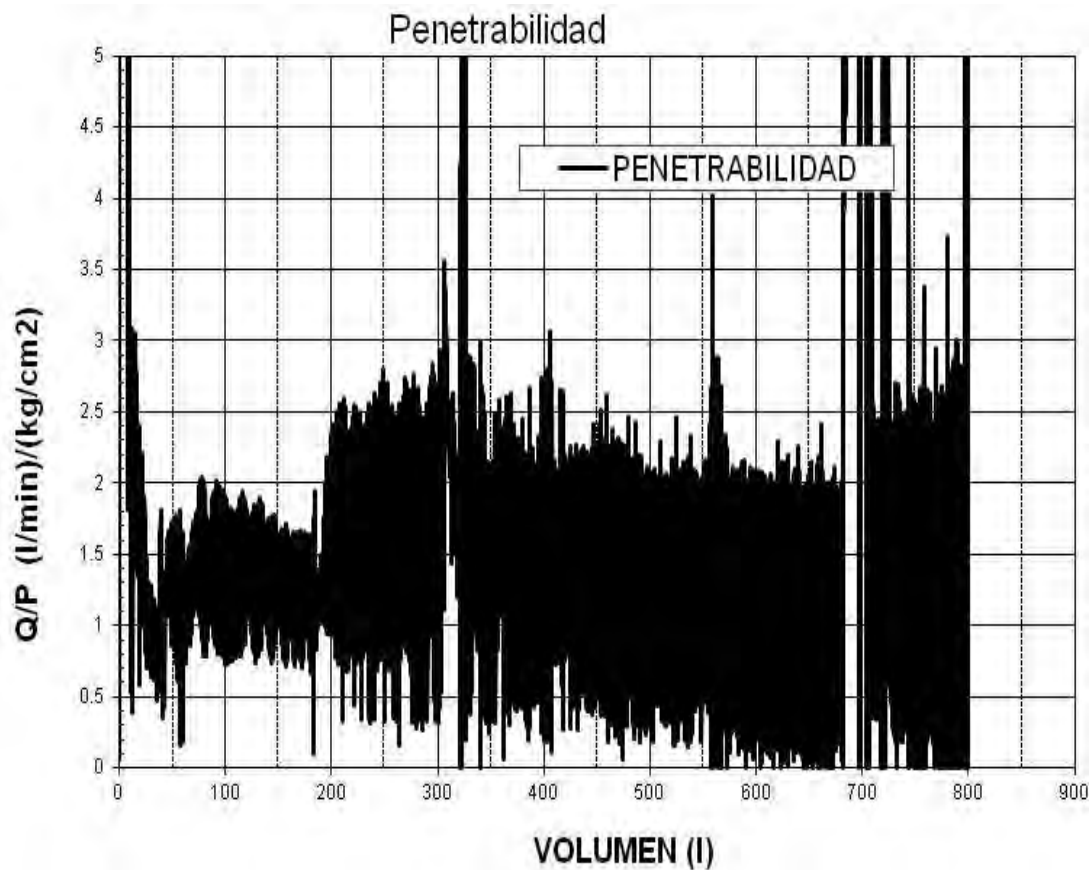


Gráfico 6.31. Caudal/Presión vs Volumen.

El gráfico 6.31 es otra forma de representar la penetrabilidad en una progresión de inyección, se presenta el inicio de la inyección y la forma en que la curva de penetrabilidad se mantiene variable al llegar al volumen máximo establecido.

7 CONCLUSIONES.

Se observa que en general el método aplicado satisface las condiciones del macizo rocoso, notándose un cierre progresivo entre las diferentes etapas de inyección.

El conocimiento de las características del macizo rocoso, tales como litología, orientación y condiciones geotécnicas de las discontinuidades, conocimiento de la permeabilidad fueron la base principal del diseño de la pantalla de inyecciones.

El conocimiento de la geología durante el proceso de excavación es básico para la identificación de zonas en las cuales se puedan presentar consumos mayores y a su vez con la información geológica poder optimizar el diseño de los barrenos de inyección.

Ajustar los parámetros GIN en función de las condiciones del macizo rocoso es una práctica vital para optimizar el tratamiento con inyección, disminuyendo en gran medida los posibles hidrofracturamientos o hidrogateo (distención) y mejorando las condiciones del macizo de manera óptima.

La importancia de realizar barrenos de control una vez terminado el tratamiento en zonas donde se presenten consumos relativamente altos es de vital importancia, ya que mediante los barrenos de control pueden reforzarse las zonas que requieran un mayor tratamiento.

Las mezclas de inyección deben ser diseñadas en función de las necesidades del macizo rocoso, con el objetivo de conseguir una mezcla resistente que mejores las condiciones del mismo, las mezclas deben ser también resistentes contra el lavado, la reducción de la cantidad de agua en la mezcla es muy importante, de este modo se garantiza inyectar una mezcla densa y estable, es decir con una decantación o sedimentación mínima. La persistencia y abertura de las discontinuidades determinan en parte las características y dosificación de las mezclas.

El método GIN propone utilizar una mezcla única para simplificar lo más posible los trabajos de inyección y se agilizan los procedimientos de inyección, sin embargo el monitoreo de las mezclas debe ser una tarea continua, ya que existen factores externos que pueden afectar las propiedades reológicas de las mezclas, es por eso que en muchas ocasiones se requieren ajustes durante el proceso de ejecución de los tratamientos.

En el tratamiento con inyecciones es muy importante considerar la inyección como una parte esencial del proyecto, es claro que aún falta mucha investigación por realizar en el tema para la cimentación de grandes presas y su tratamiento, es necesario además contar con personal humano capacitado y equipo de alta tecnología en el proceso de inyección para evitar en lo posible la mayor cantidad de errores durante la aplicación del método.

REFERENCIAS.

1. ASCE (2003). Grouting and Ground Treatment: Proceedings of the Third International Conference, Proceedings of the Third International Conference, Volume 1. New Orleans, Louisiana.
2. ASCE (2003). Grouting and Ground Treatment: Proceedings of the Third International Conference, Proceedings of the Third International Conference, Volume 2. New Orleans, Louisiana.
3. Carluccio C. Eliana. (2005). Inyección de Suelos, Cátedra de Cimentaciones, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.
4. Donald A. Bruce, (1994). Innovations in American Grouting Practice, The International Symposium on Anchoring and Grouting Techniques, Guangzhou, China
5. Donald A. Bruce. (1982). Rock Grouting at Wimbleball Dam, Londres.
6. Donald A. Bruce. (2007). Dam Foundation Grouting, ASCE press, United States of America.
7. Duncan C Wyllie (2004). Rock Slope Engineering, civil and mining, 4th edition, Tylor & Francis Group.
8. Especificaciones de construcción de obra Civil del P.H. La Yesca (2007). Capítulo 6 Tratamientos de la Roca, México.
9. Franco G. (2007) Estudio Geotécnico Complementario en el Cauce del Río Grande de Santiago para el Proyecto Hidroeléctrico "La Yesca", Jalisco-Nayarit, Comisión Federal de Electricidad, México.
10. Friedrich- Karl Ewert (1995) Rock Type Related Criteria for Curtain Grouting, Alemania.
11. Friedrich- Karl Ewert (2009). Aspectos Metodológicos Para Diseñar, Ejecutar, Evaluar e Interpretar Las Pruebas de Agua Tipo Lugeon e Inyecciones en Roca, Comisión Estatal del Agua, México.
12. Friedrich-Karl Ewert. (1997). Dam Engineering permeability, groutability and grouting of rocks related to Dam Sites, Water Power & Dam Construction, United Kingdom
13. Gaziev Erast, (1999). Tratamientos Especiales Para Mejoramiento de Cimentaciones Rocosas De Grandes Presas de Concreto, México

14. González de Vallejo Luis. (2002). Ingeniería Geológica, Pearson, Prentice Hall, Madrid.
15. Henri Camberfort (1958) Algunos Aspectos de la Inyección de Suelos, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
16. Hsai-Yang Fang. (1991). Foundation Engineering Handbook, Kluwer Academic Publishers, United States of America
17. IMTA (2001). Geotecnia en Ingeniería de Presas, Coordinación de Tecnología Hidráulica. México.
18. James Warner, P.E. (2004). Practical Handbook of Grouting, Soil, rock, and Structures, Jhon Wiley & Sons, Canada.
19. Lombardi G. (1985). Grout Slurries Thick or Thin, Issue in Dam Grouting – ASCE convention, Denver.
20. Lombardi G. (1985). Some Theoretical Considerations on Cement Rock Grouting, Suiza.
21. Lombardi G. (1985). The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock, Comission Internationale Des Grands Barrages, Suiza.
22. Lombardi G. (1994). Cimentación de Presas de Hormigón y sus Tratamientos. Simposium Internacional de la ISRM y IV Congreso Sudamericano de Mecánica de Rocas. Santiago de Chile.
23. Lombardi G. (1994). The Use of Stable Grout and GIN Technique in Grouting for Dam Rehabilitation, Annual meeting Canadian Dam Safety Conference CSDA and CANCOLD, Winnipeg
24. Lombardi G. (1999). Iniezioni Di Masse Rocciose Con Miscele Cementizie. Il Concetto GIN, Rivista Italiana di Geotecnia, Suiza.
25. Lombardi G. (2001). Presas de Enrocado con Cara de Hormigón, Uso de los criterios GIN para consolidación e impermeabilización de la roca, Suiza.
26. Lombardi G. (2003). Grouting of Rock Masses, Suiza.
27. Lombardi G. (2004). La Cimentación de Presas de Fabrica, Congreso Sinergia, Argentina.
28. Lombardi G. (2009) Especificaciones Sobre Inyecciones, Proyecto Hidroeléctrico la Yesca, México.

29. Lombardi G. (2011). Concrete Face Rockfill Dams Use Of GIN Criteria For Consolidation And Impermeabilization Of The Foundation Rock, The Second International Symposium on Rockfill Dams, Rio de Janeiro.
30. Lombardi G.-Deere D. (1993). Grouting Design and Control using de GIN Principle, Water Power & Dams Construction
31. Lopez Jorge, (2012). Design, Construction and Monitoring of Grout Curtains for Concrete Face Rockfill Dams in Volcanic Rocks, International Symposium on Dams for a Changing World, Japón.
32. Materon Bayardo (2009). Concrete Face Rockfill Dams, Brazil.
33. Mustafa Al Kuisi. (2001) Improvement of Dam Foundation Using Grout Intensity Number (GIN) Technique at Tannur Dam Site, South Jordan. Jordania. 2001.
34. Muzas Fernando L. (1989). Reflexiones sobre el Jet Grouting, revista de Obras Públicas, España
35. Rabago A. (1982). Chicoasen Project Grouting and Drainage System. México.
36. Riemer W. (1990) The Seepage at The Atatürk Fill Dam, Comission Internatinale Des Grands Barrages, Italia.
37. Riemer W. (1995) Atatürk Dam, Hydrogeological and Hidrochemical Monitoring of Grout Curtain in Karstic Rock, A report from ASCE Comitte on Grouting, Geotechnical, United States.
38. Satoh H. (2003) Investigation on Dam Foundation Grouting Process, Japón.
39. Tarbuck E. J. (2005). Ciencias de la Tierra, Una Introducción a la Geología Física, Madrid.
40. Vafa Rombugh, (2006). Permeability Control of GIN Mixes During Fractured Rock Grouting, Geotechnique.
41. Widman. R. (1996). International Society for Rock Mechanics Comission on Rock Grouting, Great Britain.

APÉNDICE.

Índice de figuras.

Figura 2.1. Inyección por compactación (Carluccio, 2005).	18
Figura 2.2. Inyección por impregnación (Carluccio, 2005).	20
Figura 2.3. Inyección por Fracturamiento Hidráulico. (Hsai-Yang Fang, 1991).	20
Figura 2.4. Inyección por impregnación (Carluccio, 2005).	22
Figura 2.5. Aplicaciones del Jet Grouting (Hsai-Yang Fang, 1991).	23
Figura 2.6. Método Seco. (MCG, 2002).	24
Figura 2.7. Forma de instalación de las columnas utilizando Deep Mixing. (MCG, 2002).	25
Figura 2.8. Diagrama de Flujo para el diseño y ejecución de los trabajos de inyección (R. Widmann, 1994).	27
Figura 2.9. Características de las discontinuidades en macizos rocosos. (Wyllie, 1999).	39
Figura 2.10. Ilustración esquemática de las vías de agua según su grado de apertura (Ewert.2009).	44
Figura 2.11. Ambigüedad de resultados en pruebas Lugeon (Ewert, 1985).	45
Figura 2.12. Ensayo Lugeon. A): Obturador Simple B): Obturador doble (González 2002).	46
Figura 2.13. Ejemplo de representación de Ensayo Lugeon en un sondeo. (González 2002).	47
Figura 2.14. Relaciones Presión-Caudal en Ensayo Lugeon (Marsal y Resendiz 1975).	48
Figura 4.1. Relación entre la geometría de las diaclasas y el espaciamiento entre barrenos. (Ewert, 2009).	63
Figura 4.2. Agrupación de los barrenos de las etapas sucesivas en el concepto de profundidades escalonadas (Ewert, 2009).	64
Figura 4.3. Diseño de una cortina de inyecciones (A) Diseño tradicional, (B) Diseño adaptado en cada etapa basado en el consumo obtenido en los barrenos cercanos de etapas inyectadas previamente. (Lombardi, 2003).	65
Figura 4.4. Orientación esquemática de la relación entre las orientaciones de las diaclasas y la dirección de los barrenos.	67
Figura 5.1. Conceptos fundamentales del modelo FES.	71
Figura 5.2. Relación esfuerzo-deformación para una muestra de roca seca fracturada cargada perpendicularmente a las juntas. ("Grouting of rock masses" Lombardi, 2003).	72

Figura 5.3. Relación esfuerzo-deformación para una muestra de roca seca fracturada cargada perpendicularmente a las juntas. (“Grouting of rock masses” Lombardi, 2003).....	73
Figura 5.4. Leyes reológicas de las mezclas de inyección, (1) Fluido Newtoniano ej. el agua (2) Fluido Binghamiano ej. La mezcla de inyección. (“Grouting of rock masses” Lombardi, 2003).	74
Figura 5.5. Perfiles de velocidad de flujos viscosos y viscoplásticos en un tubo circular (“The role of cohesion in cement grouting of rock”, Lombardi, 1985)	77
Figura 5.7. Viaje de la inyección en función de la distancia recorrida por la mezcla (“Some theoretical consideration on cement grouting”, Lombardi, 1985).	82
Figura 5.8. Ley de Flujo en un tubo o junta para un cuerpo Binghamiano. (“Some theoretical consideration on cement grouting”, Lombardi, 1985).	84
Figura 5.9. Ley de Flujo en un tubo o junta para un cuerpo Binghamiano. (“Some theoretical consideration on cement grouting”, Lombardi, 1985).	85
Figura 5.10. Esquema utilizado para la representación de la inyección de una discontinuidad simple. (“Some theoretical consideration on cement grouting”, Lombardi, 1985).	92
Figura 5.11. Ejemplo de cálculo de la inyección en una discontinuidad 1) Inyección vs tiempo 2) Características de la bomba de inyección. (“Some theoretical consideration on cement grouting”, Lombardi, 1985).	93
Figura 5.12. Distribución de la presión a lo largo de una discontinuidad en diferentes intervalos de tiempo durante el proceso de inyección. (“Some theoretical consideration on cement grouting”, Lombardi, 1985).	95
Figura 5.13. Hidrogateo o distención como un tipo de inestabilidad elástica o bifurcación (“Grouting of Rock Masses”, Lombardi, 2003).	99
Figura 5.14. Penetración de una mezcla delgada a presión en una discontinuidad (“Grouting of Rock Masses”, Lombardi, 2003).	100
Figura 5.15. Curvas de trayectoria de inyectado (Lombardi & Deere, 1993).	102
Figura 5.16. Curvas GIN límite para diferentes intensidades de inyectado (Lombardi & Deere, 1993).	103
Figura 5.17. Proceso de inyectado en una progresión, (a) Presión de Inyectado, (b) Flujo de Mezcla de Lechada, (c) Volumen Absorbido, (d) Penetrabilidad. 0: Inicio de la inyección H: Hidrofracturamiento y F: Finalización de la Inyección.	107
Figura 5.18. Proceso de inyectado en una progresión.	108
Figura 5.19. Ejemplo de resultados del inyectado para una pantalla de inyecciones. Puntos finales de las trayectorias de todas las progresiones de inyectado (Típico) (Lombardi, 1993).	110

Figura 6.1. Croquis de localización del sitio.	114
Figura 6.2. Geología superficial en la zona del Plinto-Cauce.....	117
Figura 6.3. Sección geológica-geofísica a lo largo del eje del Plinto.	117
Figura 6.4. Localización de los sitios en donde se realizaron pruebas de Inyección.....	126
Figura 6.4a. Localización de los sitios en donde se realizaron pruebas de Inyección.....	127
Figura 6.5. Sección del plano de estanqueidad.....	131
Figura 6.6. Planta de delimitación del Plano de Estanqueidad.	131
Figura 6.7. Curvas GIN propuestas inicialmente de acuerdo a la elevación (msnm).	136
Figura 6.8. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca.	144
Figura 6.9. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P8-P9.	145
Figura 6.10. Inyecciones efectuadas en Plinto P8-P9, P.H. La Yesca.....	146
Figura 6.11. Convención de colores para identificar zonas de consumo.	146
Figura 6.12. Planta y sección de la distribución de los barrenos de inyección en el tramo P8-P9.	147
Figura 6.13. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P9-P10.	151
Figura 6.14. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Derecha P9-P10 P.H. La Yesca.....	151
Figura 6.15. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P9-P10.	152
Figura 6.16. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P10-P11'.	155
Figura 6.17. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Derecha P10-P11' P.H. La Yesca.....	156
Figura 6.18. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P10-P11'.	157
Figura 6.19. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P11'-P12.	162
Figura 6.20. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P11'-P12.	162
Figura 6.21. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Derecha P11'-P12 P.H. La Yesca.....	163
Figura 6.22. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P12-P13.	166

Figura 6.23. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P12-P13.....	166
Figura 6.24. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Derecha P12-P13 P.H. La Yesca.....	167
Figura 6.25. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P13-P14.....	170
Figura 6.26. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P13-P14.....	171
Figura 6.27. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Derecha P13-P14 P.H. La Yesca.....	171
Figura 6.28. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P7-P8.....	175
Figura 6.29. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P7-P8.....	175
Figura 6.30. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Izquierda P7-P8 P.H. La Yesca.....	176
Figura 6.31. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P6-P7.....	179
Figura 6.32. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P6-P7.....	180
Figura 6.33. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Izquierda P6-P7 P.H. La Yesca.....	180
Figura 6.34. Sección Geológica de la boquilla del P.H. La Yesca indicando el tramo analizado de Pantalla P5-P6.....	184
Figura 6.35. Planta y sección del Plinto y distribución de los barrenos de inyección en el tramo P5-P6.....	184
Figura 6.36. Inyecciones efectuadas en Plinto Margen Izquierda P5-P6 P.H. La Yesca.....	185

Índice de fotografías.

Fotografías 6.1 y 6.2. Equipos de perforación tipo Track Drill con martillo de fondo.	137
Fotografía 6.3. Equipo de perforación y plataforma utilizada para realizar los barrenos de inyección en el Plinto Margen izquierda.	138
Fotografía 6.4. Equipo de perforación y plataforma utilizada para realizar los barrenos de inyección en el Plinto Margen Derecha.	138
Fotografía 6.5. Equipo de inyección tipo Häny con turbo mezclado de altas revoluciones.	139
Fotografía 6.6. Equipo de inyección tipo Clivio con turbo mezclado de altas revoluciones.	140

Índice de gráficos.

Gráfico 6.1. Consumo de barrenos por línea de inyección en zona del cauce, Plinto P8-P9, en (lts/m).	149
Gráfico 6.2. Consumo de barrenos por línea de inyección en zona del cauce, Plinto P8-P9, en (lts/m).	150
Gráfico 6.3. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto Margen Derecha P9–P10 en (lts/m).	153
Gráfico 6.4. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto Margen Derecha P9–P10 en (lts/m).	154
Gráfico 6.5. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P10-P11 (lts/m).	159
Gráfico 6.6. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P11-P11' (lts/m).	159
Gráfico 6.7. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P10-P11 en (lts/m).	160
Gráfico 6.8. Consumo de barrenos por línea de inyección, Plinto P11-P11' en (lts/m).	161
Gráfico 6.9. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P11'- P12 (lts/m).	164
Gráfico 6.10. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P11'- P12 en (lts/m).	165
Gráfico 6.11. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P12-P13 (lts/m).	168
Gráfico 6.12. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P12-P13 en (lts/m).	169
Gráfico 6.13. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P13-P14 (lts/m).	173
Gráfico 6.14. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P13-P14 en (lts/m).	174
Gráfico 6.15. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P7-P8 (lts/m).	177
Gráfico 6.16. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P7-P8 en (lts/m).	178

Gráfico 6.17. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P6-P7 (lts/m).....	182
Gráfico 6.18. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P6-P7 en (lts/m).....	183
Gráfico 6.19. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P5-P6 (lts/m).....	186
Gráfico 6.20. Consumo de barrenos por línea de inyección en Plinto P5-P6 en (lts/m).....	187
Gráfico 6.21. Curva GIN en inyección de barreno zona del Cauce criterio de cierre por Pmax.....	188
Gráfico 6.22. a) Curva Gasto-Presión vs Tiempo y b) Curva Volumen vs Tiempo.....	189
Gráfico 6.23. a) Presión y caudal vs Volumen inyectado en (l/m) y b) Penetrabilidad Q/P vs Volumen.	190
Gráfico 6.24. Proceso de Inyectado en una progresión Barreno PL-134C. (Etapa II), criterio de cierre por intersección de curva GIN.	191
Gráfico 6.25. a) Curva Gasto-Presión vs Tiempo y b) Curva Volumen vs Tiempo.....	192
Gráfico 6.26. Presión y caudal vs Volumen inyectado en (l/m).....	193
Gráfico 6.27. Caudal/Presión vs Volumen.....	193
Gráfico 6.28. Curva GIN en inyección de barreno zona del Cauce criterio de cierre por Vmax.....	194
Gráfico 6.29. a) Curva Gasto-Presión vs Tiempo y b) Curva Volumen vs Tiempo.....	195
Gráfico 6.30. Presión y caudal vs Volumen inyectado en (l/m).....	196
Gráfico 6.31. Caudal/Presión vs Volumen.....	197

Índice de tablas.

Tabla 2.1. Propiedades de la Matriz rocosa y métodos para su determinación. (González 2002).....	29
Tabla 2.2. Valores de resistencia de la roca intacta. Datos obtenidos a partir de Rhan (1986), Walthan (1999), Obert y Duvall (1967), Farmer (1968).	32
Tabla 2.3. Clasificación según la resistencia a la compresión simple de suelos y rocas (ISRM, 1981)	33
Tabla 2.4 Valores típicos de peso específico y porosidad de las rocas, entre paréntesis algunos valores medios de porosidad eficaz, datos seleccionados a partir de Goodman (1989), Rhan (1986), Walthan (1999), Farmer (1968).	34
Tabla 2.5. Clasificación de durabilidad en base al índice I_{D2}	35
Tabla 2.6. Clasificación de durabilidad en base al índice I_{D1}	36
Tabla 2.7. Velocidad de propagación de las Ondas V_p (m/s).....	37

Tabla 2.8. Clasificación de Macizos rocosos en función de la permeabilidad (Olalla y Sopena 1991).	49
Tabla 5.1. Fórmulas para Perfiles de velocidad de flujos viscosos y viscoplásticos en un tubo circular (“The role of cohesion in cement grouting of rock”, Lombardi, 1985).....	78
Tabla 5.2. Fórmulas para flujos viscosos en un tubo circular y juntas (“The role of cohesion in cement grouting of rock”, Lombardi, 1985).....	80
Tabla 5.3. Fórmulas para inyección de una sola fisura (“Some theoretical consideration on cement grouting”, Lombardi, 1985).....	81
Tabla 5.4. Valores de la curva 1 según la intersección de cada envolvente GIN.	104
Tala 6.1. Unidades litológicas encontradas en la zona donde se desplantó el Plinto.....	119
Tabla 6.2. Características de las principales fallas de la zona del Plinto del PH la Yesca.	121
Tabla 6.3. Determinación del RMR para los materiales bajo el Plinto en la MI y MD.....	123
Tabla 6.4. Determinación del RMR para los materiales bajo el Plinto en el Cauce. P. H. La Yesca...	124
Tabla 6.5. Resumen de los resultados de las Pruebas Lugeon de los barrenos en la zona del Plinto.	125
Tabla 6.6. Zonificación de la pantalla por elevaciones.....	130
Tabla 6.7. Zonificación por elevación para la ejecución de los tratamientos.	135
Tabla 6.8. Dosificación de la Mezcla 1.	140
Tabla 6.9. Dosificación de la Mezcla 2.	141
Tabla 6.10. Características de las mezclas utilizadas.....	141
Tabla 6.11. Características de las mezclas de inyección.....	142
Tabla 6.12. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P8-P9.	148
Tabla 6.13. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P8-P9.	148
Tabla 6.14. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P9-P10.	153
Tabla 6.15. Consumos de barrenos de Pantalla de Impermeabilización Profunda, Plinto P9-P10.	153
Tabla 6.16. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P10-P11.	157
Tabla 6.17. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P11- P11'.	158
Tabla 6.18. Consumos de barrenos de Pantalla de Impermeabilización Profunda, Plinto P10-P11. ...	158
Tabla 6.19. Consumos de barrenos de Pantalla de Impermeabilización Profunda, Plinto P11-P11'. .	158
Tabla 6.20. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P11'-P12.	164
Tabla 6.21. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P11'-P12. .	164

Tabla 6.22. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P12-P13.	168
Tabla 6.23. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P12-P13. ...	168
Tabla 6.24. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P13-P14.	172
Tabla 6.25. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P13-P14. ...	172
Tabla 6.26. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P7-P8.	177
Tabla 6.27. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P7-P8.	177
Tabla 6.28. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P6-P7.	181
Tabla 6.29. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P6-P7.	181
Tabla 6.30. Consumos de barrenos de consolidación, Plinto P5-P6.	186
Tabla 6.31. Consumos de barrenos de Pantalla de impermeabilización Profunda, Plinto P5-P6.	186