

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



“Metodología de inyecciones por el método ascendente para una pantalla de impermeabilización en el macizo rocoso fracturado de la zona de presa del proyecto hidroeléctrico Raaxhá ubicado en Alta Verapaz, Guatemala.”

Trabajo de graduación presentado por Pedro Rafael Pinetta Fortín para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2015

“Metodología de inyecciones por el método ascendente para una pantalla de impermeabilización en el macizo rocoso fracturado de la zona de presa del proyecto hidroeléctrico Raaxhá ubicado en Alta Verapaz, Guatemala.”

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

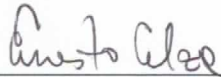
“Metodología de inyecciones por el método ascendente para una pantalla de impermeabilización en el macizo rocoso fracturado de la zona de presa del proyecto hidroeléctrico Raaxhá ubicado en Alta Verapaz, Guatemala.”

Trabajo de graduación presentado por Pedro Rafael Pinetta Fortin para optar el grado académico de Licenciado Ingeniería Civil


Guatemala

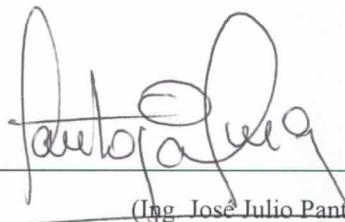
2015

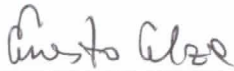
Vo. Bo.

(f): 
(Ing. Ernesto José Calza Solórzano)

Tribunal examinador:

(f): 
(Ing. Roberto Godo Levensen)

(f): 
(Ing. José Julio Pantoja)

(f): 
(Ing. Ernesto José Calza Solórzano)

Fecha de Aprobación: Guatemala 09 de diciembre del 2015.

PREFACIO

Guatemala, como país, no es ajeno a los avances tecnológicos en la rama de Ingeniería Civil y a su desarrollo en obras de gran magnitud derivadas de la constante demanda de servicios en lo que a producción de energía eléctrica se refiere.

Como protección a los recursos naturales fósiles y aprovechamiento de los recursos naturales renovables en Guatemala, la satisfacción de la demanda de energía eléctrica se ha visto orientada al uso de los recursos hídricos fluviales, por medio de hidroeléctricas.

La inversión en un proyecto hidroeléctrico es de gran magnitud y su retorno depende de la eficiente continuidad de la operación produciendo energía eléctrica, además de la vida del proyecto. La eficiente y continua operación, así como la vida del proyecto que proporcione el adecuado retorno de la inversión tiene como base el diseño global, en el cual las obras hidráulicas de ingeniería civil requieren especial atención, no solo en su dimensionamiento teórico, materiales a usar, técnicas de construcción, sino, además, en garantizar que estas sean impermeables a fugas de agua en reservorios o presas. Para determinar las posibles fugas de agua, son necesarios los estudios geológicos en los macizos rocosos y suelos en general, mismos que darán a luz las posibles fisuras, grietas y espacios vacíos, de existir éstas, será vital el sellarlas.

Derivado de la necesidad del sellado de grietas en macizos rocosos se origina el presente trabajo de graduación, como una forma específica de presentar una técnica de impermeabilización por medio del método ascendente de inyección, para el proyecto hidroeléctrico Raahxá ubicado en el departamento de Alta Verapaz, Guatemala. Aun cuando el desarrollo de un proyecto hidroeléctrico, por lo general, está a cargo de sus desarrolladores con experiencia en asuntos globales, se requiere de asesoría especializada para los trabajos en el área de geotécnica, que a su vez conlleva a los métodos de mejora del terreno, especialidad a la que pertenece las inyecciones de impermeabilización.

El presente trabajo puede usarse como una referencia para otros proyectos similares que requieran reducir la permeabilidad del macizo rocoso fragmentado, por medio de una pantalla de impermeabilización. Siempre y cuando las condiciones estratigráficas y del proyecto en general tengan concordancia con las de este trabajo.

Para la ejecución de este trabajo de graduación se contó con referencias bibliográficas en los temas a tratar y el apoyo incondicional del personal técnico y operativo que realizó en el sitio de la obra el trabajo de impermeabilización por medio del método expuesto en el presente documento.

Este trabajo no se hubiera podido llevar a cabo sin la intervención de la empresa Rodio-Swissboring Guatemala a la cual agradezco todo su apoyo; asimismo a los profesionales Ing. José Julio Pantoja, Ing. Renato Cáceres, Ing. Angel Hernández y Arq. David Archila que me dedicaron su tiempo y conocimientos; y en especial al Ing. Ernesto Calzia como asesor en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco profundamente a la Universidad del Valle de Guatemala mi formación profesional centrada en la excelencia académica y valores éticos que distinguen a esta casa de estudios y a sus egresados.

Agradezco además para no caer en omisión a mis compañeros de trabajo, de universidad y a cada una de las personas que me motivaron y apoyaron con su presencia, consejos y opiniones para llevar a buen término la conclusión de esta etapa de mi vida. En especial manera a Maria Fernanda Roldan por su apoyo constante y palabras de ánimo durante todo el proceso

Agradezco a Dios por concederme la vida y permitir que esta allá sido dispuesta en el seno de mi familia. A mis padres por apoyarme y guiarme en cada una de las etapas de mi vida, motivándome a seguir adelante y no rendirme ante las situaciones adversas que se presentaron en el camino, por ser mis tutores y mentores durante cada etapa. A mis hermanos por apoyarme a seguir adelante y brindarme sus consejos durante todo éste tiempo.

CONTENIDO

LISTA DE ILUSTRACIONES.....	x
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE ECUACIONES.....	xiii
RESUMEN	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	2
A. Generalidades del proyecto	2
B. Justificación.....	2
III. OBJETIVOS.....	3
A. Objetivo general.	3
B. Objetivos específicos.....	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
A. Medios inyectables.....	4
1. Generalidades de los medios de inyección.....	4
2. Principales medios inyectables.....	5
3. Reconocimiento del medio	7
B. Materiales inyectables	10
1. Tipos de mezclas	10
2. Características de los materiales inyectables.....	13
C. Presiones de inyección	15
1. Contrapresión.....	16
2. Presión de inyección y de rechazo de un mortero	16
D. Tipos de inyecciones	17
1. Según la metodología	17
2. Según el medio inyectable.....	30
3. Según su finalidad	31

E.	Ensayos de permeabilidad para comprobación de inyecciones	33
1.	Ensayos Lugeon.....	33
2.	Ensayos Lefranc	35
V.	MARCO PRÁCTICO.....	38
A.	Metodología de inyección en la pantalla de impermeabilización del proyecto hidroeléctrico Raaxhá	38
1.	Generalidades del proyecto hidroeléctrico	38
2.	Localización y accesos del proyecto	38
3.	Estratigrafía específica	39
4.	Utilización de pantalla de impermeabilización	41
5.	Objetivo a alcanzar	41
6.	Generalidades de los taladros de inyección.....	41
7.	Perforación de taladros	42
8.	Inyección	48
B.	Pruebas de comprobación de las inyecciones en la pantalla de impermeabilización.....	55
VI.	ANÁLISIS DE METODOLOGÍA DE INYECCIÓN.....	59
VII.	CONCLUSIONES.....	62
A.	Al objetivo general.....	62
B.	A los objetivos específicos.....	62
VIII.	RECOMENDACIONES	64
IX.	BIBLIOGRAFÍA.....	65
X.	APÉNDICE	66
A.	Pantalla de impermeabilización del proyecto hidroeléctrico Raaxhá	67
B.	Ficha técnica de central de Inyección Cosma	69
C.	Ficha técnica de bentonita Quik-Gel.....	71
D.	Ficha técnica de cemento UGC.....	74
XI.	GLOSARIO.....	78

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración	Página
Ilustración 1: Formación de rocas Kársticas en la era glacial.....	5
Ilustración 2: Macizo rocoso fisurado en cresta de Bardamina	6
Ilustración 3: Influencia del porcentaje de bentonita en la viscosidad del mortero.....	13
Ilustración 4: Penetrabilidad del mortero en función de la permeabilidad del medio.	14
Ilustración 5: Perforación de la longitud total del taladro.....	17
Ilustración 6: Obturación de primer tramo de inyección	18
Ilustración 7: Inyección de primer tramo.....	18
Ilustración 8: Obturación de segundo tramo	19
Ilustración 9: Inyección de segundo tramo	19
Ilustración 10: Obturación de último tramo.....	20
Ilustración 11: Inyección de último tramo	20
Ilustración 12: Taladro finalizado	21
Ilustración 13: Perforación de primer tramo.....	22
Ilustración 14: Obturación en boca	22
Ilustración 15: Inyección de primer tramo.....	23
Ilustración 16: Desobturado de primer tramo de inyección.....	23
Ilustración 17: Reperforación de tramos de inyección	24
Ilustración 18: Obturación de tramos de inyección	24
Ilustración 19: Inyección de tramos.....	25
Ilustración 20: Desobturado de tramos o finalización de taladro	25
Ilustración 21: Perforación de taladro.....	26
Ilustración 22: Relleno de vaina	27
Ilustración 23: Colocación de tubería con manchetas.....	27
Ilustración 24: Tubería con manchetas	28
Ilustración 25: Inyección de tramo superior	28
Ilustración 26: Inyección selectiva.....	29
Ilustración 27: Fin de Inyección	29
Ilustración 28: Valores K de permeabilidad para presas	31
Ilustración 29: Pantalla de impermeabilización.....	32
Ilustración 30: Esquema del ensayo Lugeon	35
Ilustración 31: Ensayo Lefranc de carga constante.....	36
Ilustración 32: Ensayo Lefrac de carga variable.....	37
Ilustración 33: Mapa de localización del Proyecto	38
Ilustración 34: Mapa de acceso al proyecto.....	39
Ilustración 35: Terreno medio.....	40

Ilustración 36: Núcleos de perforación	40
Ilustración 37: Presencia de cavidades y fisuras en Casa de Máquinas.....	41
Ilustración 38: Esquema de distribución de inyecciones	42
Ilustración 39: Plataforma de trabajo en campo	43
Ilustración 40: Esquema de localización de taladros	44
Ilustración 41: Camisa recuperable de perforación	44
Ilustración 42: Perforación de taladro.....	45
Ilustración 43: Soil Mec - 305	46
Ilustración 44: Compresor Ingresoll Rand 750CFM/125psi.....	46
Ilustración 45: Martillo de fondo	47
Ilustración 46: Tubería de perforación.....	47
Ilustración 47: Esquema del funcionamiento de obturadores superiores.....	48
Ilustración 48: Central de inyección Cosma	53
Ilustración 49: Mezclador de alta turbulencia.....	53
Ilustración 50: Agitador lento	54
Ilustración 51: Caballete de presión equipado con manómetro.....	54
Ilustración 52: Caja de recuperación entre 2.80m y 5.30 m	56
Ilustración 53: Núcleo de recuperación entre 7.50m y 9.70m	56
Ilustración 54: Caja de perforación entre los 9.70m y 12.00 m.....	57
Ilustración 55: Caja de perforación entre 11.70m y 14.05m.....	57

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1: Límites de permeabilidad en suelos o rocas	32
Tabla 2: Escalas de presión para ensayos Lugeon	34
Tabla 3: Dosificaciones de mezclas de inyección.....	49
Tabla 4: Volúmenes de inyección.....	50
Tabla 5: Permeabilidad para sondeos en Casa de Máquinas.	58

LISTA DE ECUACIONES

Tabla	Página
Ecuación 1: Presión de inyección en el medio.....	16
Ecuación 2: Caudal	34
Ecuación 3: Coeficiente de permeabilidad Lugeon	35
Ecuación 4: Coeficiente de permeabilidad Lefranc	36
Ecuación 5: Factor de forma	36
Ecuación 6: Coeficiente de permeabilidad para carga variable	37

RESUMEN

El proyecto hidroeléctrico Raaxhá se encuentra ubicado en el departamento de Alta Verapaz, Guatemala. El presente trabajo consta de la evaluación de la metodología de inyecciones de impermeabilización del eje de presa y la casa de máquinas. Para esto, se realizó una visita al proyecto en la cual se observó el proceso de perforación e inyección de los taladros de la pantalla de impermeabilización.

Como resultado de la visita se determinaron las siguientes características particulares del proyecto, estableciendo que la pantalla de impermeabilización se encuentra constituida a lo largo del eje de presa del proyecto y alrededor de la casa de máquinas, estando ambas estructuras apoyadas en material rocoso fracturado. La pantalla consta de taladros primarios y secundarios los cuales se encuentran distribuidos a cada 1.50 metros entre los ejes de cada perforación y cuya profundidad alcanza 12.00 metros aproximadamente.

La metodología aplicada para el proyecto es de inyección ascendente en tramos de 3.00 metros, hasta alcanzar una presión de 3 bares o 45 psi.

Al finalizar las inyecciones primarias se procede perforar e inyectar los taladros secundarios.

Cuando una zona del proyecto, de longitud variable según la disponibilidad de área trabajo, se da por concluida, se procede a la ejecución de los ensayos de comprobación. Estos consisten en perforaciones a rotación de diamantina con recuperación de núcleos, en la cual se pudo observar el estado de la roca inyectada, lo cual fue el caso de este proyecto. En conjunto con las perforaciones de recuperación se realizaron ensayos de permeabilidad tipo Lugeon.

Los ensayos Lugeon determinan que se ha alcanzado la impermeabilización requerida de las distintas zonas que conforman la pantalla. Para este proyecto, los ensayos Lugeon muestran valores de permeabilidad menores a 2.00×10^{-5} cm/seg, indicando que el tratamiento ha sido satisfactorio.

I. INTRODUCCIÓN

Las inyecciones en suelos o rocas son técnicas usadas para la mejora de terreno. Estas ayudan según su finalidad a incrementar la capacidad soporte del medio o a reducir la permeabilidad de éste. Las inyecciones se dividen en dos grandes ramas, en inyecciones de consolidación e inyecciones de impermeabilización.

En la actualidad las inyecciones son un procedimiento de construcción reconocido por todos los ingenieros, su uso data de principios del siglo XIX en Francia, por su inventor Bérigny en 1802. Sucediéndole ingenieros como Mary, Charrié, Raynal y Beaudemoulin. Los métodos de inyección fueron perfeccionándose en las décadas de 1920 a 1930, época que da paso a la construcción de obras hidráulicas de gran magnitud.

Las inyecciones se transformaron en procedimientos necesarios en la construcción de presas, haciendo posible por medio de su aplicación la eliminación de la circulación o fugas de agua presentes en este tipo de obras, ningún procedimiento anterior permitió llegar a un resultado tan satisfactorio de impermeabilización de manera tan económica, lo cual hace inevitable citar al geólogo Maurice Lugeon quien supo utilizar un procedimiento capaz de mejorar las estructuras del macizo rocoso, ya que su conocimiento en materia de suelos permitió establecer reglas lógicas y flexibles a la vez, que en la actualidad siguen estando en uso y que en función de ella el proceso de inyecciones en suelos goza de eficacia para trabajos de impermeabilización.

Debido a la morfología de los suelos, macizos rocosos y sus estratos, estos presentan características de permeabilidad que generan problemas de flujo de agua en la presa de los proyectos hidroeléctricos. Para evitar estos problemas, se considera la utilización de inyecciones de impermeabilización de mezcla de lechada o mortero. Este procedimiento se puede aplicar mediante diferentes tipos de metodología, entre estas se encuentran: ascendente, descendente o por maguitos de inyección.

La metodología ascendente es una de las más utilizadas cuando el medio a inyectar está compuesto por rocas fisuradas. Este método permite realizar la inyección en tramos entre tres y cinco metros de longitud, que permiten abarcar una gran parte de las fisuras de la roca. Éste es aplicable cuando el medio es estable y no tiendan a generar desprendimientos en las paredes de la perforación que produzcan problemas durante la inyección. Caso específico tratado en este trabajo de graduación.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

A. Generalidades del proyecto

El proyecto hidroeléctrico Raaxhá se encuentra ubicado en el departamento de Alta Verapaz, Guatemala. Debido a la conformación geológica de la zona fue necesario la utilización de una pantalla de impermeabilización por debajo del eje de presa, con el fin evitar futuros problemas de arrastre de material, inestabilidad del macizo rocoso o pérdidas de caudal por infiltración.

Dadas las características de la roca subyacente, se escogió el método de inyección en tramos ascendentes. Este método permite una correcta formación de los bulbos de inyección en rocas con estas propiedades, así como beneficios para el proyecto en términos de costo y tiempo. Este trabajo abarca la explicación del proceso constructivo de este tipo de inyecciones, desde su fase de preparación, perforación, inyección y control, así como una comprobación final de valores de permeabilidad del macizo rocoso para determinar la efectividad del tratamiento

B. Justificación

Guatemala es un país con una alta capacidad hídrica; éste cuenta con una amplia cantidad de ríos en su extensión territorial. Estos se encuentran divididos principalmente en tres vertientes: vertiente del Pacífico, vertiente del Caribe y vertiente del Golfo de México.

Los ríos que se encuentran en la vertiente del Golfo de México poseen grandes longitudes y se caracterizan por ser los más caudalosos del país. Debido a esto, esta zona ha tenido un gran auge en la instalación de centrales hidroeléctricas. En el año 2013 se aprobó la construcción del proyecto hidroeléctrico Raaxhá, el cual utilizará el caudal del río Icbolay para la generación de energía. Esta hidroeléctrica estará ubicada en el municipio de Chisec en el departamento de Alta Verapaz en Guatemala.

Debido a la conformación geológica de la zona, se encuentran rocas fisuradas o fragmentadas, las cuales permiten filtración de agua a los estratos de roca o suelo. Al momento de construir una presa, esta infiltración debe controlarse con el fin de evitar problemas de inestabilidad de la estructura y pérdida de caudal. Por tanto, el estudio de los métodos de impermeabilización de macizos rocosos es de vital importancia para el sector construcción e industrial.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general.

- Evaluar y discutir la metodología para la realización de inyecciones de impermeabilización por el método ascendente en el macizo rocoso fracturado del sitio de presa del proyecto hidroeléctrico Raaxhá.

B. Objetivos específicos.

- Identificar la necesidad de la utilización de una pantalla de impermeabilización en el proyecto hidroeléctrico Raaxhá
- Determinar los pasos claves en el proceso de construcción de la pantalla de impermeabilización.
- Establecer criterios de evaluación para determinar cuándo se debe suspender una determinada fase de inyección.
- Establecer parámetros para la efectividad de la pantalla de impermeabilización por medio de ensayos de comprobación In situ. (Ensayos de permeabilidad)
- Identificar las limitaciones del método de inyección ascendentes en un macizo rocoso fracturado.
- Evaluar las ventajas y complicaciones de la inyección de lechada.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Medios inyectables

1. Generalidades de los medios de inyección. Las inyecciones son procedimientos constructivos que se utilizan para consolidar o impermeabilizar estratos de suelo o roca que presentan características de porosidad y permeabilidad. Los procesos de inyección pueden ser aplicados en arenas, gravas, aluviones o rocas fragmentadas. (Cambelfort, 1968)

Para cumplir con el fin de las inyecciones es necesario rellenar las fisuras o huecos que se presentan en los diferentes materiales con líquidos que se solidifican con el tiempo. El líquido de inyección se conoce como mortero o lechada de inyección o mezcla. Para inyectar la mezcla se hace a través de taladros en el material, en los cuales se introduce la mezcla y ésta se hace penetrar a presión en las grietas o fisuras. En algunos casos, no es necesario la utilización de taladros para la inyección, en estos se inyecta desde las fisuras superficiales. (Cambelfort, 1968)

La mezcla de inyección y el método de inyección varían según sea la forma de los huecos a rellenar. Estos pueden ser primordialmente de dos categorías.

- Fisuras.
- Huecos de suelos sueltos o incoherentes.

Las fisuras en contraste con los huecos sueltos en suelos presentan aberturas constantes y regulares, mientras huecos en los suelos suelen ser mucho más desiguales sin presentar un patrón a lo largo de su estructura.

La diferencia entre las características de los huecos en un material puede determinar que la metodología de inyección se realice de distinta manera en los diferentes medios. Debido a las características del medio, el tiempo de inyección puede variar entre éstos. (Giordano, 2008)

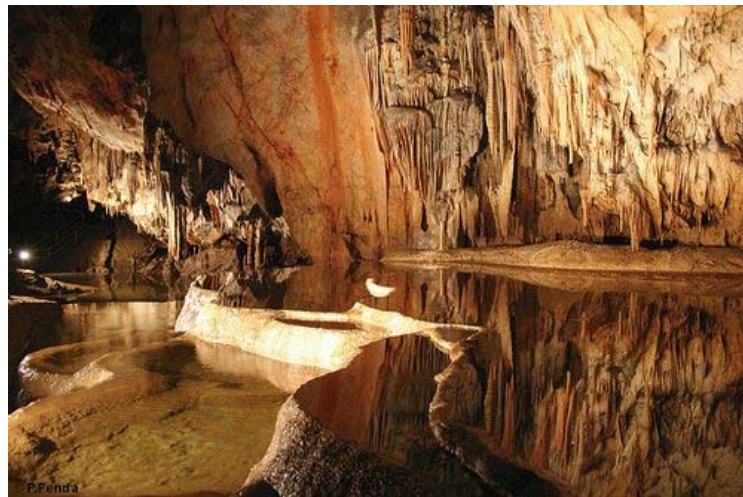
2. Principales medios inyectables

a. Rocas Kársticas. Este tipo de rocas son todas aquellas que se han formado por medio de aguas subterráneas como resultado de una disolución de zonas importantes como túneles, pozos o sifones. (Kutzner, 1996)

En algunas ocasiones es necesario tapar con concreto cualquier tipo de zona que se considere afectada por disolución, sin embargo, este tipo de acciones en algunas ocasiones se consideran difíciles de realizar o no siempre son posibles. Si este es el caso, se recurre a la inyección la cual se considera más bien como un relleno. Este tipo de dificultades se presenta, ya que los karst son poco numerosos y por lo general se encuentran aislados en las zonas donde se localizan este tipo de formaciones rocosas. (Kutzner, 1996)

Algunas de las dificultades de este tipo de rocas son que poseen un trazado que se considera prácticamente invisible desde la superficie, tienen grandes dimensiones y en su mayoría se encuentran recorridas por corrientes de agua. Por ello a la hora de impermeabilizarlos no es suficiente establecer una pantalla de perforaciones, ni inyectar como se hace comúnmente en las rocas fisuradas. A la hora de realizar una o más perforaciones estas en su mayoría desembocan en el karst y es necesario inyectar una gran cantidad de productos para lograr detener todas las disoluciones, evitando todo tipo de deslavado. (Cambelfort, 1968)

Ilustración 1: Formación de rocas Kársticas en la era glacial



Fuente: (Molins, 2004)

b. **Rocas fisuradas.** Las rocas fisuradas se caracterizan por tener una cantidad abundante de fisuras, logrando que cualquier tipo de perforación en un punto absorba de manera fácil cualquier cantidad de la mezcla inyectada, sin embargo, en algunas ocasiones no siempre ocurre lo mismo, más si se trata de rocas kársticas.

Por otro lado, es necesario que, a la hora de realizar algún proceso de inyección, sin importar la magnitud de la fisura o abertura, se verifique la calidad que posee la roca para realizar un proceso adecuado de selección para emplear el método óptimo de inyección. (Cambelfort, 1968)

Las rocas porosas con algunas fisuras como areniscas no son tratadas de la misma forma que cualquier tipo de roca que sea impermeable ya que cada una tiene características distintas, por consiguiente, si se tratan ambas rocas igual se puede tener un efecto que corresponde a una permeabilidad que puede provocar una desecación de fluidos en la circulación de las fisuras, logrando así que el fluido evolucione demasiado rápido y el proceso se considere como insatisfactorio. (Cambelfort, 1968)

Para definir el método y proceso de inyección a implementar es necesario determinar la fisuración de la roca y la posibilidad de circulación del agua, en algunas ocasiones también se pueden realizar sondeos geotécnicos, esto para completar cualquier tipo de informe técnico, en estos sondeos se hacen siempre reconocimientos por inyección de agua llamados ensayos Lugeon. (Cambelfort, 1968)

Ilustración 2: Macizo rocoso fisurado en resta de Bardamina



Fuente: (Karmelo, 2011)

c. **Suelos incoherentes.** Los suelos incoherentes están constituidos por aluviones de arenas y gravas, también se consideran suelos incoherentes los constituidos por depósitos de cantos o restos de morteros que se encuentren en estado descompuesto. (Giordano, 2008)

Este tipo de suelos se caracterizan por tener un índice de huecos importantes teniendo un porcentaje de 20 a 35%, al contrario de las rocas fisuradas ya que éstas tienen un porcentaje aproximado de 3%. (Cambelfort, 1968)

Los poros de estos suelos son muy irregulares, para algunos estudios y evaluaciones se utiliza un coeficiente que recibe el nombre de tortuosidad; en el caso de las inyecciones este coeficiente no es de mucha importancia. Por otro lado, existen ciertos fenómenos de segregación del mortero o una impregnación incompleta de este en todos los poros, estos fenómenos no se logran explicar en su totalidad más que por la morfología del suelo en la que se determina una variación de tamaño y forma en los diferentes poros del suelo. (Cambelfort, 1968)

Debido a la dificultad para determinar los poros, es necesario definir la permeabilidad del suelo por medio de ensayos Lefranc, éste nos da una idea de los espacios vacíos que se presentan en los suelos. (Cambelfort, 1968)

3. Reconocimiento del medio

a. **Profundidad de reconocimiento.** La profundidad que se desea determinar en un reconocimiento depende de varios factores que se deben tomar en cuenta como los trabajos que se desean realizar, la naturaleza de la obra y en consiguiente del terreno en donde se va a realizar, si el terreno posee impermeabilización y consolidación todos estos factores se involucran y están ligados en todo el proceso. (Ovando, 2011)

Cuando la naturaleza de la obra puede definir si la misma requiere de algún tipo de tratamiento ya sea parcial o total, se debe analizar si el terreno requiere de realizar trabajos como pantallas o retículas para evitar las fugas y tomar en cuenta la estabilidad del mismo. Es necesario una investigación y análisis que permitan reconocer previamente toda la zona y superficie del terreno, logrando así determinar cuáles

necesita de trabajos de impermeabilización o consolidación. La profundidad de reconocimiento se determina dependiendo de la naturaleza del terreno. (Ovando, 2011)

b. Reconocimiento para una impermeabilización. Para realizar una impermeabilización en un macizo rocoso es fundamental basarse en el criterio de Lugeon, ya que en algunos casos este criterio permite reducir el volumen de los trabajos.

Sin embargo, frecuentemente sucede que las pruebas de agua muestran una disminución de permeabilidad en cierta profundidad, y aumentando cada vez que se profundiza más. Por ello es importante dirigir los reconocimientos, logrando así determinar la capa que tenga menos permeabilidad y suponiendo que la pantalla de impermeabilización pueda llegar a quedar detenida ahí, si éste es el caso es necesario calcular el caudal de fugas, este cálculo puede llegar a no ser exacto, pero es más que suficiente para conseguir algo factible y satisfactorio. (Giordano, 2008)

Procediendo de esta manera, es poco probable que las pantallas sean simétricas, ya que éstas se adaptan a la calidad del macizo. Por consiguiente, el reconocimiento de aluviones se realiza de manera diferente, ya que como conocimiento se sabe que son permeables. Es importante realizar sondeos con ensayos de agua en todo el espesor del depósito aluvial, a menos que éste se encuentre en una formación demasiado profunda, que se encuentre por ejemplo a más de 100 metros de profundidad. (Giordano, 2008)

Sin embargo, este tipo de ensayos, de bombeo en su mayoría, no son suficientes, ya que no permiten demostrar claramente la heterogeneidad que poseen los aluviones, lo cual es fundamental para establecer cualquier tipo de proyecto de inyecciones. Por ello en algunas ocasiones en proyectos como presas se completan este tipo de ensayos con una medida de niveles piezométricos en función de la profundidad, temperatura de agua y la resistividad sumándole de igual manera un análisis químico. Este tipo de análisis permiten determinar la prevención de una pantalla de más de 10m de profundidad en algunas ocasiones. (Giordano, 2008)

c. Reconocimiento para una consolidación. En algunas ocasiones es necesario evitar situar una obra en terrenos poco resistentes, pero sin embargo en algunas ocasiones es prácticamente imposible actuar de manera diferente. (Giordano, 2008)

Una consolidación de roca fracturada o de un terreno que carece de estabilidad puede realizarse con base en una inyección. Pero no puede ser utilizada para mejorar la resistencia de la arcilla o de un limo, ya que la permeabilidad de los mismos es tan pequeña haciendo prácticamente imposible introducir un mortero común. (Giordano, 2008)

No se tienen ningún tipo de reglas que sean precisas para analizar la dimensión exacta del volumen que se desea consolidar. Esto se puede valorar aplicando fórmulas de Boussinesq, que brindan la repartición de tensiones en un medio que es semi-infinito en una superficie. Sin embargo, al llegar a una profundidad determinada las tensiones muestran características débiles lo cual demuestra que no necesita de ningún tipo de consolidación. (Giordano, 2008)

Este método no es muy riguroso en algunas ocasiones ya que se muestra que no siempre se está en presencia de un medio que sea semi-infinito. De igual forma a la hora de realizar una consolidación, es muy complicado afirmar que el lugar estudiado sea homogéneo e isótropo, como lo hace la fórmula de Boussinesq. (Giordano, 2008)

d. Heterogeneidad de los aluviones. La observación que se realiza en el proceso de excavación de los aluviones demuestra que un depósito fluvial siempre se percibe de forma heterogénea. Este tipo de aluviones se pueden observar en diferentes partes del mundo como en los valles de Nilo y en los ríos franceses. (Cambelfort, 1968)

La heterogeneidad de todos los depósitos se determina por la superposición de capas granulométría, teniendo así diferentes capas de espesor variando en arena y grava. (Cambelfort, 1968)

En algunas ocasiones para tener un buen proceso de inyección es necesario realizar una descomposición de tres elementos, sin embargo, este tipo de precisión se considera poco factible ya que el elemento es poco frecuente. (Cambelfort, 1968)

Un método que se considera sencillo es realizar una perforación de reconocimiento con un tubo, que permita que se realicen agujeros por toda su altura, esto provocara un bombeo o inyección de agua en las diferentes capas que contiene el suelo, afectando en sus circulaciones más importantes. Este recurso será

capaz de medir las diferentes variaciones de la velocidad del agua que contiene el tubo, para así determinar las capas que son más o menos permeables. (Cambelfort, 1968)

B. Materiales inyectables

1. Tipos de mezclas. Existen diferentes clases de materiales inyectables, las mezclas empleadas para inyecciones y para impermeabilización y consolidación están clasificadas en tres categorías principales: (Cambelfort, 1968)

- Líquidas
- Suspensiones inestables
- Suspensiones estables

Las líquidas se encuentran compuestas de productos químicos algunos de ellos pueden ser silicato de sosa, que puede llegar a estar diluido o mezclado con algún tipo de reactivo, resinas sintéticas o productos hidrocarbonatados puros. (Cambelfort, 1968)

Las suspensiones inestables son suspensiones en el agua, de piedra molida o bien de cemento, éstas no son consideradas homogéneas más si son agitadas, cuando esta agitación cesa comienza a lo que se le llama sedimentación. (Cambelfort, 1968)

Las suspensiones estables se obtienen en el proceso de dilución de la arcilla con el agua o de la combinación de la misma con el cemento y la arena. La estabilidad de esta se logra nivelando la dosificación, la agitación y el tratamiento que se desea emplear.

El tratamiento en su mayoría consiste prácticamente en utilizar una pequeña cantidad de mezcla llamada ingrediente estabilizador la cual se introduce, demostrando así la estabilidad relativa de las mezclas. Esta mezcla se considera totalmente satisfactoria si logra no presentar ninguna sedimentación en el transcurso del proceso de inyección el cual dura varias horas. (Cambelfort, 1968)

Las diferentes mezclas se pueden emplear en dos procesos distintos como la consolidación y la impermeabilización. (Cambelfort, 1968)

a. **Morteros de inyección en estado líquido.** Todos los morteros son líquidos, sin embargo, todos aquellos que no contengan partículas que puedan medirse de forma fácil, no son considerados totalmente líquidos. La bentonita cuyas dimensiones poseen una milésima de milímetro no es considerada como un mortero líquido. Por otro lado, el silicato de sodio si se considera un mortero líquido ya que a pesar de que posee micelas coloidales están son difíciles de medir, siendo así dimensiones inferiores a la bentonita. (Kutzner, 1996)

En algunas ocasiones es posible que todos los morteros en estado líquido puedan penetrar cualquier hueco por donde discurra el agua, sin embargo, es necesario que la permeabilidad del medio que vaya ser inyectado no sea de un tamaño demasiado reducido. Lo anterior puede producirse en los limos y en las arcillas, ya que los limos son considerados prácticamente no inyectables. Otro que es poco probable de inyectar es si el medio que se desea inyectar llega a contener poros apreciables o una permeabilidad no despreciable, pero el mortero tiene demasiada viscosidad. Estas situaciones se presentan en proyectos donde se trabajan con arenas que son totalmente finas ya que los morteros viscosos son considerados económicamente elevados en su precio. (Kutzner, 1996)

b. **Morteros de inyección inestables.** Para lograr apreciar los defectos y las cualidades de un mortero de inyección inestable es necesario basarse en un ejemplo donde se muestren las características del mortero, suponiendo se quiera inyectar aluviones con un mortero de cemento que sea ordinario e inestable. (Cambelfort, 1968)

Se puede observar que las arenas se componen de granos en todas sus dimensiones, por el contrario, el cemento está compuesto de granos de mayor grosor y agregando que no todos estos se comportan de manera independiente, es necesario que para llevar la inyección a cabo se pueda introducir en los poros existentes entre los granos de la arena. (Cambelfort, 1968)

Las dimensiones de los huecos de un aluvión son totalmente desconocidas, ya que en su mayoría no se forman de manera uniforme. Los agujeros pueden presentarse de diversos tamaños, lo cual muestra que el cemento no puede penetrar una arena que contenga granos más gruesos, ya que no puede admitirse que el cemento no logre penetrar los espacios vacíos entre granos de arena. (Cambelfort, 1968)

Además, estudios demostraron que en el caso que la arena permita el paso del cemento este no podrá penetrar tanto lo más serán algunos centímetros. Sin embargo, puede aumentarse un poco la penetración si se emplean morteros de inyección que se encuentren muy bien diluidos, ya que con el uso del agua es mucho más fácil lograr que los granos de cemento o los flóculos circulen uno tras el otro, logrando que no se forme ningún tipo de bóvedas que logren detener la inyección. Otra prueba que forma bóvedas de manera indirecta es a través de la inyección de morteros aireados, los cuales son espumosos y con una densidad que puede alcanzar hasta los 0.15 Kg/cm^3 . (Cambelfort, 1968)

Un mortero de inyección de cemento aireado logra penetrar en arenas mucho más finas que un mortero de cemento ordinario, esto es así debido a las burbujas que se forman, las cuales poseen dimensiones que son comparables a los granos de cemento, a su vez deformables. Por lo tanto, no es suficiente que la dimensión sea más pequeña que los agujeros de la arena para lograr que la inyección sea posible. Para lograr el objetivo, es necesario que los granos no logren agruparse impidiendo así la formación de bóvedas. De igual forma para que el proceso se considere satisfactorio es necesario tomar en cuenta la naturaleza del mortero, los morteros de cemento son inestables, los granos se mantienen en suspensión o en algunos casos en agitación, si ésta logra cesar, los granos sedimentan. (Cambelfort, 1968)

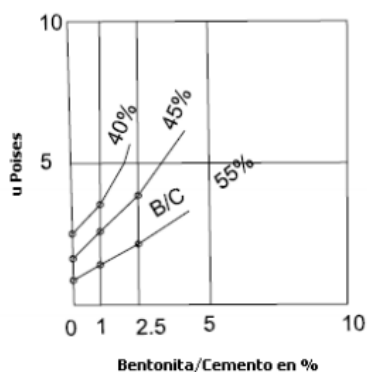
El fenómeno de sedimentación es que el permitirá la inyección de las fisuras en los macizos rocosos, pero en su mayoría impide la inyección en lugares de arena. (Cambelfort, 1968)

c. Morteros de inyección estables. Algunos fenómenos que se describieron anteriormente no se podrán evitar excepto utilizando morteros que no produzcan sedimentación durante una inyección, permitiendo que no se formen bóvedas a la hora de llegar a pequeños intersticios. Este tipo de condiciones impide emplear suspensiones que contengan dosificaciones bajas en su relación agua/cemento=1/2, este tipo de dosificación no produce decantación, pero sin embargo se bloquean en pequeños huecos como las suspensiones de mayores dosificaciones. (Ovando, 2011)

Las que son utilizadas con éxito son las suspensiones a base de arcilla ya que por tener características de finura en su grano y sus propiedades coloidales generan estabilidad en los morteros de inyección. En algunas ocasiones cuando se presentan aluviones que no poseen características demasiado finas se puede agregar una pequeña porción de cemento al mortero con la finalidad de que le fraguado contenga mayor

rigidez. En algunas ocasiones este tipo de suspensiones contienen únicamente arcilla de tipo tixotrópica la cual se adhiere después de alguna inyección a la hora que la circulación del mortero finaliza. Los morteros de tipo estable se presentan con características como viscosas, y en su mayoría son más rígidos. (Ovando, 2011)

Ilustración 3: Influencia del porcentaje de bentonita en la viscosidad del mortero



Fuente: (Ovando, 2011)

Sin embargo, se ha demostrado que su inyección no es tan profunda ya que no llega a todos los poros que tenga el terreno, se ha comprobado por medio de un análisis minucioso a los aluviones inyectados que los morteros circulan únicamente en contacto con granos gruesos que se encuentran envueltos en elementos con características más finas, por ello se prevé la piedra es el punto de partida de un mortero a la hora de inyectar terrenos circundantes. Con lo que se puede establecer que proviene del efecto muro debido a la piedra. Esto quiere decir que el establecer algún tipo de contacto los huecos logran expandirse y maximizar su tamaño comparado con los elementos finos logrando así que le mortero pase con mayor facilidad. (Ovando, 2011)

2. Características de los materiales inyectables

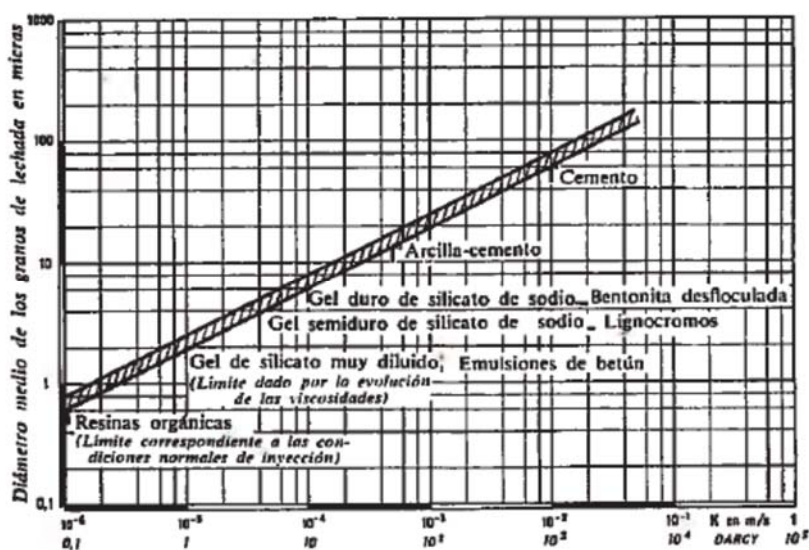
a. Separación de fases. Este fenómeno que se caracteriza por ser parte de los morteros de agua-cemento-arcilla es la llamada separación de fases, ésta consiste en que los materiales que conforman el mortero se separan durante la inyección, los granos de arcilla logran agruparse por un lado mientras que los de cemento por otro, logrando tener un resultado que no se asemeja al preparado previamente. Sin embargo, este tipo de situaciones no son tan graves siempre y cuando la inyección de morteros este

destinada únicamente para impermeabilizar, ya que a pesar del inconveniente todos los huecos logran rellenarse bien con el mortero y en algunas ocasiones si la arcilla es menos resistente que el cemento mismo, este logra impedir que la arcilla se expanda por la presión hidrostática. (Cambelfort, 1968)

b. Límite de inyectabilidad. Existe una relación entre las dimensiones de los granos de un mortero con el medio a inyectar para lograr que la inyección sea posible. Este tipo de relación es por la impregnación perfecta del medio, la cual consiste en un caso que se realiza en algunas ocasiones, sin embargo, no es algo totalmente obligatorio en la inyección de aluviones. (Cambelfort, 1968)

Diversos estudios e investigadores han tratado de definir la relación realizando una penetración de morteros de granulometría, colocados en tubos con características rígidas como si se tratara de un ensayo de permeabilidad. Para encontrar un criterio el cual determina una comparación entre las dimensiones de los huecos o fisuras a inyectar con los granos del material que se está utilizando para la inyección. Por medio de la fórmula de Kozeny se puede encontrar el coeficiente de permeabilidad de un estrato con base en las características granulométricas de éste. De tal forma que permite una mejor comprensión al poder determinar un límite de permeabilidad con base en un coeficiente de permeabilidad. Es importante hacer mención que la permeabilidad que se puede encontrar por medio de la fórmula de Kozeny puede discrepar a la permeabilidad real del estrato. (Cambelfort, 1968)

Ilustración 4: Penetrabilidad del mortero en función de la permeabilidad del medio.



Fuente: (Cambelfort, 1968)

C. Presiones de inyección

Es necesario determinar cuál es la presión que se desea llegar durante inyecciones de cemento en un determinado material. El medio a inyectar y la finalidad de la inyección son los principales parámetros para determinar la presión de inyección. El medio determina la contrapresión que este puede resistir antes de provocar que se fisure o se levante el terreno. Por otro lado, la finalidad indica una determinada presión para mejorar las características geotécnicas del medio como una disminución de la permeabilidad o un aumento de la capacidad soporte del mismo.

La presión de inyección siempre se debe de medir a la entrada de la perforación. En el caso de los aluviones esta presión no es tan certera como en el caso de cuando se está inyectando el macizo rocoso. La presión de inyección depende de los siguientes factores:

- Dimensión de la perforación,
- Viscosidad del mortero o lechada.
- Caudal de inyección
- Radio de acción de la inyección.

Cuando estos factores se mantienen sin variación la presión de inyección permanece constante al momento de la inyección. La variable más sensible al momento de la inyección es la viscosidad del mortero ya que esta puede variar dependiendo de la correcta preparación del mortero a lo largo de todo el procedimiento.

La presión de inyección es difícil de medir ya que el funcionamiento del inyector puede generar ciertas vibraciones y no estar dando un caudal constante de inyección. Por lo cual es importante establecer el orden de magnitud de la presión de inyección con el fin de contrarrestar este al momento de la inyección.

Las presiones de inyección normalmente son fijadas por los ensayos de permeabilidad realizados en el medio previo a los trabajos de inyección.

1. **Contrapresión.** Se puede determinar que existe una contrapresión del medio cuando se detiene el proceso de inyección y la lectura en el manómetro no es igual a cero. En estos casos es necesario abrir una válvula de descarga en la cual se libera el excedente de mortero, de esta forma se puede dar como finalizada una inyección.

En estos casos es importante tener en cuenta que estos casos de sobrepresión pueden causar fisuras en el terreno y que se levanten los terrenos. Esto se da comúnmente cuando en el medio se puede encontrar estratos de arcillas las cuales no permiten una inyección aun con presiones bajas de inyección. (Ovando, 2011)

2. **Presión de inyección y de rechazo de un mortero.** Se considera una fisura de abertura única e inyección, con un caudal Q y una presión P. Se determina que el mortero inestable de inyección se considera un fluido newtoniano por lo que se puede establecer. (Ovando, 2011)

Ecuación 1: Presión de inyección en el medio.

$$P = \frac{6vQ}{\pi e^3} \ln \frac{R}{r}$$

Donde:

e= Abertura de la fisura (mm)

r= Radio del taladro (mm)

Q= Caudal (l/s)

v = Coeficiente de viscosidad (poises)

P= Presión (Kg/cm²)

R= Distancia de la fisura al centro del talador (cm)

D. Tipos de inyecciones

1. Según la metodología

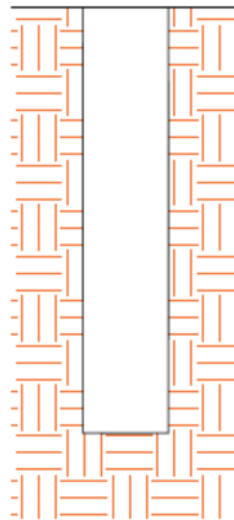
a. Ascendente

1) Metodología

Paso 1: Perforación

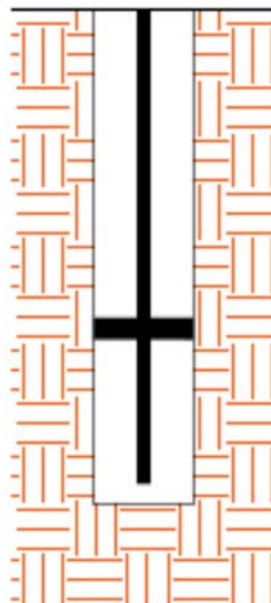
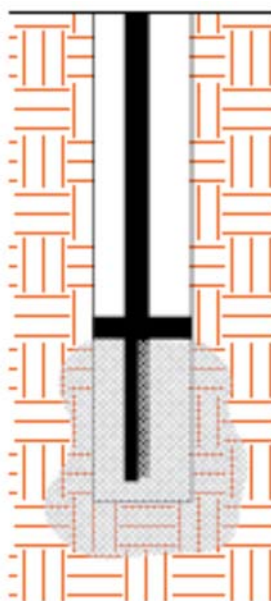
Se realiza una perforación que alcance la profundidad final que debe de ser inyectado. Luego de esto se procede a limpiar la perforación o “lavar la perforación”, con el fin de limpiar las fisuras o agujeros que se busca inyectar. Este procedimiento se puede llevar acabo tanto con aire como con agua.

Ilustración 5: Perforación de la longitud total del taladro



Paso 2: Obturación e inyección del primer tramo.

Luego se introduce la manguera de inyección equipada con un obturador superior. Esta manguera se levanta de 20 cm a 30 cm del fondo de inyección con el fin de evitar un taponamiento al momento de inyectar y que el mortero o lechada pueda circular libremente. El tramo que se inyecta es entre de 3.00 m hasta 5.00 m recomendadamente. Se busca unos tramos no muy espaciados para que la inyección pueda ser de modo uniforme a lo largo de la perforación.

Ilustración 6: Obturación de primer tramo de inyección**Ilustración 7: Inyección de primer tramo.**

Paso 3: Obturación e inyección de siguiente tramo

Al finalizar la inyección de un tramo anterior, se procede a desobturar el tramo. Luego se eleva el equipo al siguiente tramo y se procede a obturar la sección. Cuando está obturada la perforación se procede a inyectar el mortero o lechada hasta que alcance la presión requerida. Este procedimiento se repite múltiples veces hasta alcanzar inyectar el tramo total de la perforación.

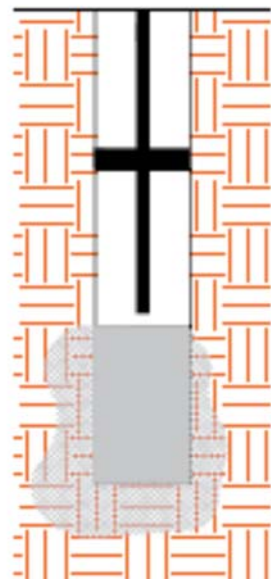
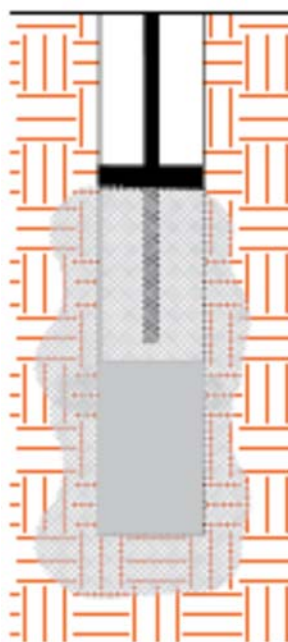
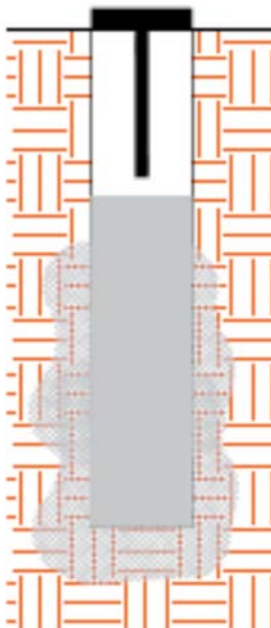
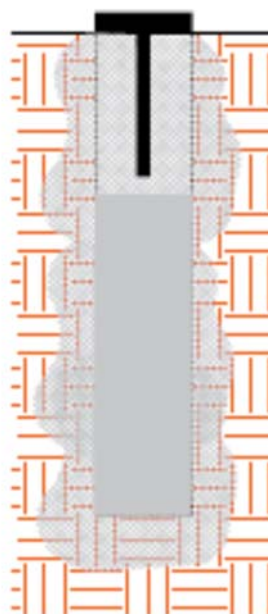
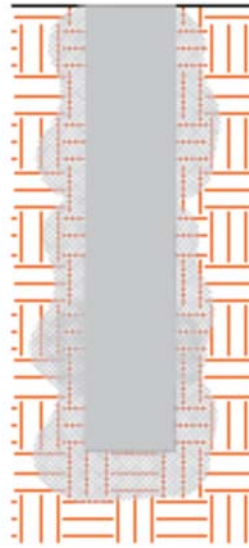
Ilustración 8: Obturación de segundo tramo**Ilustración 9: Inyección de segundo tramo**

Ilustración 10: Obturación de último tramo**Ilustración 11: Inyección de último tramo**

Paso 4: Finalizar el taladro

Por último, se desobtura el taladro en boca y se retira el equipo de inyección de la perforación, para continuar en el siguiente punto.

Ilustración 12: Taladro finalizado

2) Desventajas.

- No es posible realizar una reinyección en el taladro al menos que se perforo nuevamente el tramo que se desea inyectar.

3) Ventajas

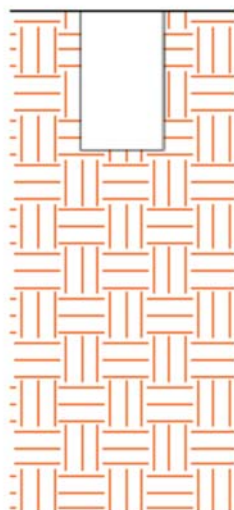
- Es un método sencillo de seguir.
- No es necesario re perforar durante el proceso de inyección.
- Se puede inyectar gradualmente el medio a medida que se va subiendo

b. Descendente

1) Metodología

Paso 1: Perforación

Se realiza una perforación que alcance la profundidad del primer tramo que debe de ser inyectado. Los tramos deben de tener una profundidad en la cual no se corra riesgo de desprendimientos en la pared de la perforación. Luego de estos se procede a limpiar la perforación o “lavar la perforación”.

Ilustración 13: Perforación de primer tramo.

Paso 2: Obturación e inyección de primer tramo

Luego se introduce la manguera de inyección equipada con un obturador de boca. Esta manguera se levanta de 20cm a 30 cm del fondo de inyección con el fin de evitar un taponamiento al momento de inyectar y que el mortero o lechada pueda circular libremente.

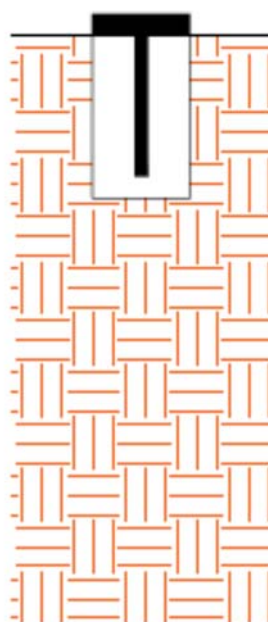
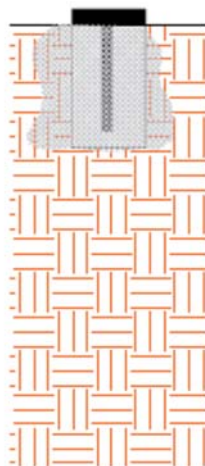
Ilustración 14: Obturación en boca

Ilustración 15: Inyección de primer tramo



Paso 3: Desobturado

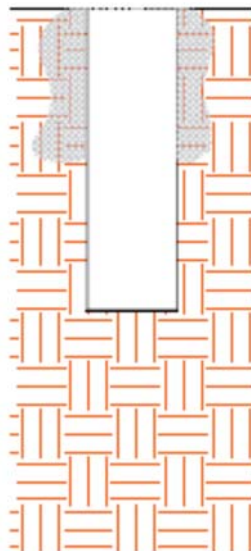
Se desobtura el primer tramo de inyección y se procede a retirar el equipo de inyección de la perforación

Ilustración 16: Desobturado de primer tramo de inyección



Paso 4: Reperforación

Se procede a una reperforación de los tramos anteriores más la longitud correspondiente a la perforación del siguiente tramo de inyección. Cada vez que se realiza una perforación es necesario realizar un proceso de lavado o de limpieza en esta con la finalidad de limpiar las fisuras o agujeros de taladro. Las re perforación se pueden realizar aproximadamente veinticuatro horas después de haber inyectado el tramo anterior, para no dañar la zona inyectada y crear nuevas fisuras en la perforación.

Ilustración 17: Reperforación de tramos de inyección

Paso 5: Obturación e inyección de tramos de inyección

Se baja el equipo de obturación hasta la parte superior del tramo inyectar y se procede a obturar la sección. Cuando está obturada la perforación se inyecta el mortero o lechada hasta que alcance la presión requerida.

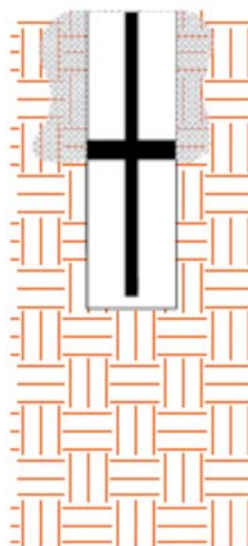
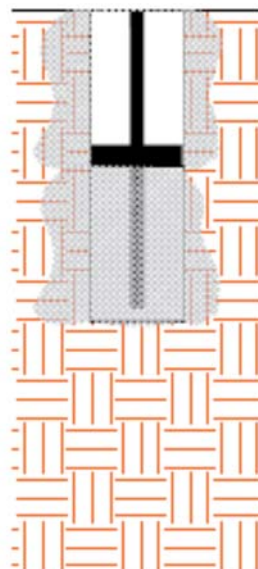
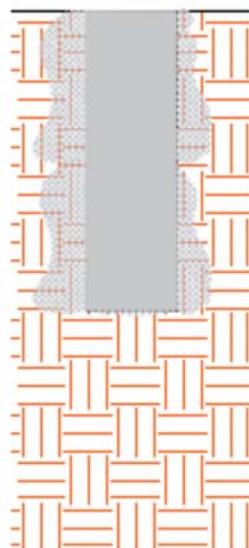
Ilustración 18: Obturación de tramos de inyección

Ilustración 19: Inyección de tramos

Paso 6: Desobturado o finalización del taladro

Se desobtura el tramo de inyección y se procede a retirar el equipo de inyección de la perforación. Si no se ha alcanzado la profundidad de los taladros se repiten los pasos 4 y 5 hasta alcanzar la profundidad total del taladro para darlo por finalizado.

Ilustración 20: Desobturado de tramos o finalización de taladro

2) Desventajas

- Tiempos de espera por lavado o re perforación para continuar los trabajos
- Posible necesidad de re perforación para continuar los trabajos
- Alta cantidad de maniobras para la ejecución de los trabajos a realizar.

3) Ventajas

- Permite llevar un control al momento de estar inyectando en los diferentes tramos
- Permite trabajar con terrenos con tendencia a derrumbarse en las paredes de perforación ya que se mejora el terreno de arriba hacia abajo

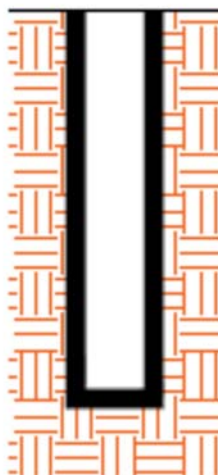
c. Por manguitos

1) Metodología

Paso 1: Perforación

Se realiza una perforación con el objetivo de alcanzar la profundidad final del taladro de inyección. Debido a que esta metodología en su mayoría, se utiliza en medios que tienden a tener desprendimientos en las paredes de perforación preferentemente se requiere que la perforación sea ejecutada por rotación de diamantina.

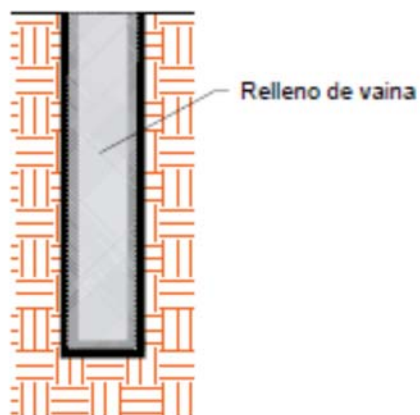
Ilustración 21: Perforación de taladro



Paso 2: Relleno de vaina

Se realiza un relleno de vaina que consiste básicamente en la preparación de una lechada, misma que se vierte en la parte interna de la tubería de perforación, con el fin de evitar desprendimientos en las paredes de perforación al momento de retirar lo concerniente a lo descrito en el paso 1.

Ilustración 22: Relleno de vaina



Paso 3: Instalación de manchetas

Posterior al relleno de vaina, se procede a la colocación de tubería de PVC equipada con válvulas antiretorno (manchetas), recomendablemente a cada 0.50 m en toda la longitud de la perforación.

Ilustración 23: Colocación de tubería con manchetas

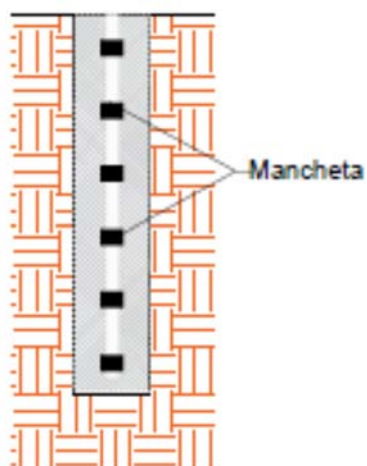


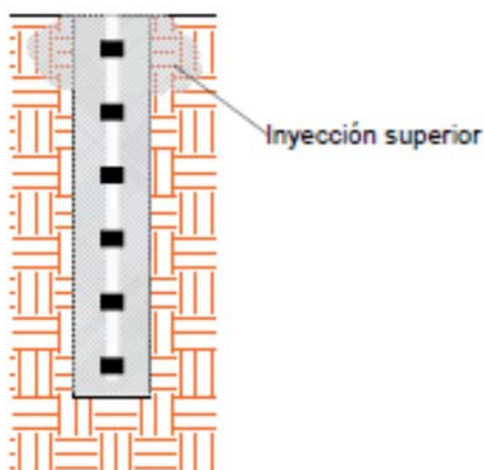
Ilustración 24: Tubería con manchetas



Paso 4: Inyección de parte superior

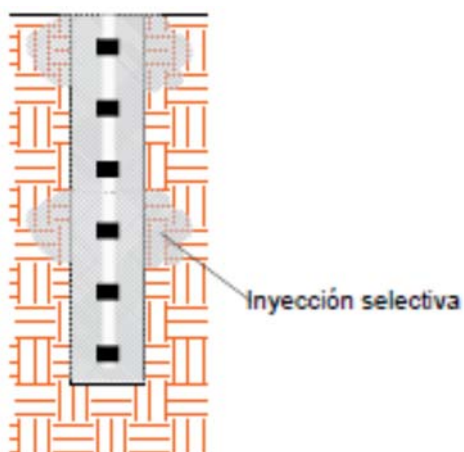
Se realiza una inyección de lechada, mortero o mezcla en el primer metro de la perforación, con el propósito de prevenir “comunicación” entre el taladro y el terreno superficial no incluyente en el proceso de inyección como tal.

Ilustración 25: Inyección de tramo superior



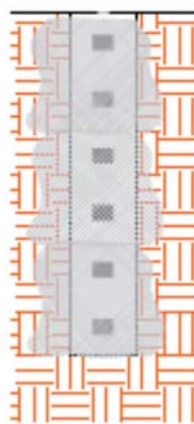
Paso 5: Inyección por manchetas

Al momento de inyectar se puede realizar el proceso en cualquier tramo del taladro independientemente. Esto se realiza por medio de obturadores dobles, sellando la parte superior o inferior del tramo.

Ilustración 26: Inyección selectiva

Paso 6: Lavado final

Al terminar de inyectar las diferentes manchetas se procede a realizar un lavado de la tubería PVC equipada con las válvulas antiretorno.

Ilustración 27: Fin de inyección

2) Desventajas

- Alto costo debido a los materiales que se deben utilizar para la inyección.
- La posibilidad de no romper el recubrimiento (vaina)
- Que se genere un taponamiento en alguno de los maguitos
- Bajo rendimiento en el proceso de trabajo

3) Ventajas

- Se puede inyectar todo tipo de medio.
- Selección de los tramos que se desean inyectar, sin tener la necesidad de inyectar todo el taladro.
- Poder reinyectar un tramo si es necesario.

2. Según el medio inyectable

a. **Suelo.** En los suelos se pueden realizar inyecciones con la finalidad de reducir o controlar el movimiento del agua, aumentar la capacidad soporte de este, reducir los asentamientos y una mejora para resistir efectos de erosión en el mismo. Existen diferentes métodos que son aplicables para las inyecciones en los suelos, entre éstas están las ascendentes, descendentes y por manguitos, con sus respectivas variantes como encamisado o tubería ranurada con el objetivo de estabilizar las paredes de la perforación previo al proceso de inyección que se lleva a cabo.

Según la granulometría de los suelos es mortero o lechada que se debe utilizar. Debido a la granulometría de las arcillas es muy difícil introducir una lechada en sus espacios vacíos, por lo cual a través de la inyección se logra desplazar bloques de arcilla formando lentes o bulbos de lechada.

Para las arenas y gravas se pueden utilizar distintas lechadas según sea el tamaño del grano, para arenas finas se utilizan lechada de baja viscosidad para que logren penetrar los diferentes espacios vacíos. Para arenas gruesas y gravas se utilizan lechadas de alta viscosidad que puedan rellenar espacios más grandes.

b. **Roca.** Estos son materiales en su mayoría sólidos pudiendo formar un macizo sólido que no está compuesto por granos. Estos macizos pueden estar fracturados, fisurados o algunas veces poseen cavidades internas como huecos o agujeros dentro del sólido. Dependiendo del tipo de defectos que se puedan presentar en la roca se puede realizar ensayos de Lugeon para determinar la permeabilidad de ésta y así definir el tipo de mortero o lechada a utilizar.

Para rocas fisuradas se tiende a utilizar morteros o lechadas de inyección que presenten características fluidas para así penetrar las diferentes grietas que se puedan encontrar. Según el tamaño de las fisuras se tiende a definir el tipo de mortero a utilizar que tan viscoso o el diámetro máximo de sus partículas.

Para rocas que presenta grandes cavidades o huecos se utilizan inyecciones de relleno y lechadas que ocupen grandes espacios sin la necesidad que estas sean muy fluidos ya que el fin es el de rellenar estas cavidades.

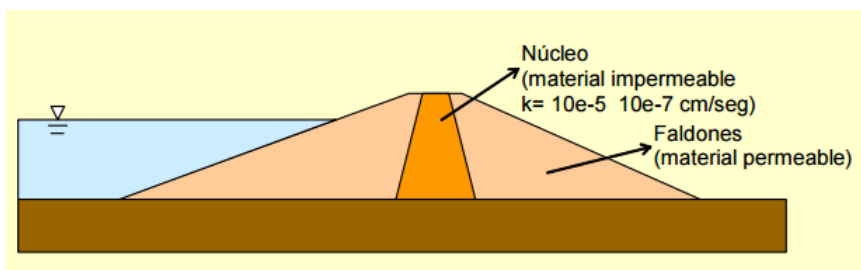
3. Según su finalidad

a. **Inyecciones de impermeabilización.** Consiste en una reducción de la permeabilidad de los medios por medio de perforaciones profundas, sellando fracturas, fisuras o huecos. Esto se inyecta con el fin de evitar el paso de agua en estos estratos. (Giordano, 2008)

- Reducción de las fuerzas hidrostáticas actuantes en la base de las estructuras de retención de agua o en el recubrimiento de túneles. (Giordano, 2008)

La presión de inyección en estos casos se determina por medio de ensayos de permeabilidad como Lugeon y Lefranc en los cuales se establece un aproximado del tamaño de las fisuras que se desean rellenar. Para esto es necesario establecer los límites permeabilidad que se busca alcanzar para que se considere que una presa trabaja de manera impermeable. Se considera que la permeabilidad de una presa está en un rango aceptable cuando esta es inferior a una magnitud de 10^{-5} cm/seg. (Angelone, 2012)

Ilustración 28: Valores K de permeabilidad para presas



Fuete: (Angelone, 2012)

El valor de permeabilidad aceptado para las presas está ligado a los valores de permeabilidad de suelos o rocas. Para esto se estable un rango de parámetros en el cual se determina si el medio presenta una elevada, media, baja, muy baja permeabilidad o este es prácticamente impermeable (Whitlow, 2015)

Tabla 1: Límites de permeabilidad en suelos o rocas

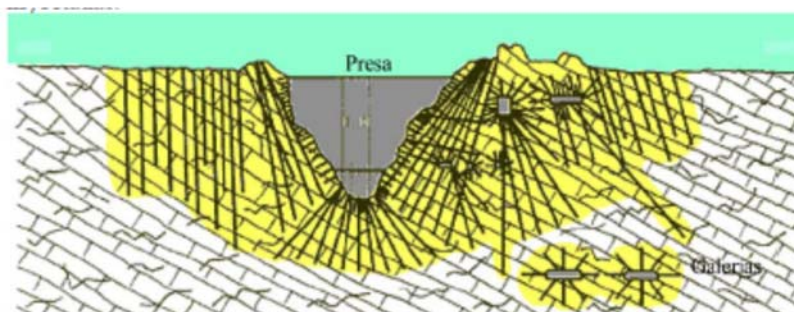
Grado de permeabilidad	Con ductividad hidráulica cm/s
Elevada	Superior a 10^{-1}
Media	10^{-1} a 10^{-3}
Baja	10^{-3} a 10^{-5}
Muy baja	10^{-5} a 10^{-7}
Practicamente impermeable	men or de 10^{-7}

Fuente: (Whitlow, 2015)

La profundidad de las inyecciones varía según la altura de las presas, la presión hidrostática del agua y la naturaleza del terreno. Esta altura por lo general es entre el 50% y el 75% de la altura total de la presa.

El conjunto de perforaciones de inyección se le denomina como pantalla de impermeabilización o cortina de impermeabilización. Esta consta de una serie de perforaciones continua sobre uno o más ejes. Las pantallas se extienden por debajo de la presa desde el fondo del cauce hasta las partes altas de la ladera o empotramiento de las estructuras. (Cambelfort, 1968)

Ilustración 29: Pantalla de impermeabilización



Fuente: (Giordano, 2008)

b. Inyecciones de consolidación. El objetivo principal de las inyecciones de consolidación es mejorar las propiedades del medio aumentando la capacidad soporte de estos. En este proceso se busca mejorar las características de deformabilidad de este. Cuando se aplican inyecciones de consolidación se busca mejorar las propiedades del medio para que este pueda soportar y no deformarse ante la sobre carga

que se va someter el terreno, esta sobre carga se puede deber a una estructura o que vaya a almacenar una gran más de materiales. (Vasquez, 2006)

Las inyecciones de consolidación por lo general se realizan en un esquema de grilla con el objetivo de alcanzar una mayor área y de esta manera lograr mejorar la capacidad soporte del medio en las zonas posteriores al eje de presa, también son utilizadas para rellenar oquedades entre los revestimientos de túneles y la zona de contacto con el medio. (Cambelfort, 1968)

E. Ensayos de permeabilidad para comprobación de inyecciones

Para la determinación de qué tan fisurado está el suelo se utilizan los ensayos de permeabilidad. Mediante estos ensayos se estima por medio de caudales y presión la permeabilidad del suelo, conociendo la permeabilidad del suelo se estima el tamaño de las fisuras, grietas o cavidades que existan dentro del medio. Por esto, estos ensayos son un parámetro clave al momento de determinar la necesidad de la utilización de inyecciones en el suelo.

Los ensayos de permeabilidad se utilizan como un ensayo de comprobación, el cual determina si un suelo realmente mejoró sus propiedades. En éste se determina si el suelo se volvió lo suficientemente impermeable según el diseño. Primordialmente existen dos ensayos de permeabilidad los Lugeon y los Lefranc. Los ensayos Lugeon se utilizan primordialmente en rocas, mientras los ensayos Lefranc se utilizan en suelos.

1. **Ensayos Lugeon.** Los ensayos Lugeon se realizan en campo para calcular la permeabilidad del suelo. Es un ensayo en campo que se realiza a través de sondeos, se aplican en macizos rocos, para medir su permeabilidad. El ensayo se basa en medir el volumen de agua que se inyecta durante un tiempo, equivalente a expresar el caudal en un tramo de sondeo.

Ecuación 2: Caudal

$$Q = V/t$$

Donde:

Q: Es el caudal.

V: Es el volumen.

t: Es el tiempo del ensayo.

El ensayo es realizado en cinco escalas de presión, en los cuales la presión con la que el agua es inyectada, varía entre cada una de ellas. Antes de empezar, se define la presión máxima a ser utilizada, esta no debe exceder la presión de confinamiento esperada de la profundidad de la perforación; sobre esta presión máxima se trabaja durante el ensayo para no generar fracturas en la roca.

Cada escala de presión se mantiene en intervalos de 10 minutos. Las primeras escalas de presión se trabajan de manera ascendente hasta alcanzar la presión máxima del ensayo y las dos escalas restantes se trabajan de manera descendente trabajando la misma presión que utilizo en las ascendentes. Siendo Pmax la presión máxima definida a la cual el agua debe ser inyectada.

Tabla 2: Escalas de presión para ensayos Lugeon

Escala 1	Escala 2	Escala 3	Escala 4	Escala 5
Bajo 0.50*P _{MAX}	Medio 0.75*P _{MAX}	Máximo P _{MAX}	Medio 0.75*P _{MAX}	Bajo 0.50*P _{MAX}

Fuente: (Quiñonez, 2015)

El ensayo muestra un parámetro de la permeabilidad debida a las fisuras que se presentan en el medio. Es común para este ensayo expresar la permeabilidad en unidades Lugeons.

Un Lugeon (Lg) es una unidad equivalente a 1 litro por minuto y metro, bajo una presión de 10 kg/cm²; esto es aproximadamente igual a 1×10^{-7} m/s. Es una unidad pequeña, valores menores de un Lg son medio prácticamente impermeables.

Para establecer la permeabilidad en la roca o muestra objeto del estudio, la misma se calcula o deduce de la siguiente fórmula o ecuación la ecuación:

Ecuación 3: Coeficiente de permeabilidad Lugeon

$$k = \frac{Q}{2\pi LH_t} \log_e(L/r)$$

Donde:

k: Es la permeabilidad.

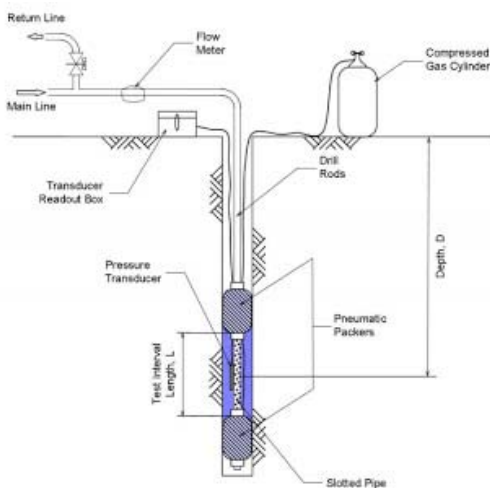
Q: Es la velocidad constante del flujo en la perforación.

L: Es la longitud del tramo ensayado.

H_t : Es la presión de sobrecarga a la profundidad del ensayo

r: Es el radio de la perforación de prueba.

Ilustración 30: Esquema del ensayo Lugeon

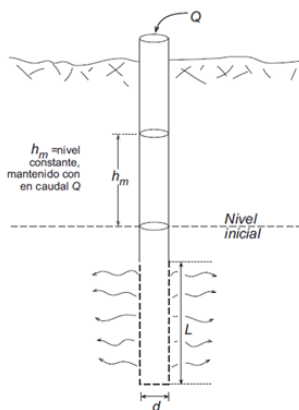


Fuente: (Quiñonez, 2015)

2. Ensayos Lefranc. El ensayo Lefranc se utiliza en suelos permeables o semipermeables, de tipo granular, situados por debajo del nivel freático, y en rocas muy fracturadas. Existen dos métodos para realizar el ensayo Lefranc de carga constante y carga variable.

Para el ensayo con carga constante, se debe saturar primero el suelo hasta que el aire de los vacíos sea expulsado y con esto lograr que haya una infiltración más uniforme en el suelo. Esto se hace para mantener un caudal constante durante el lapso de tiempo de la prueba. El caudal de admisión debe medirse cada 5 minutos, siempre logrando mantener el nivel constante dentro del sondeo durante aproximadamente 45 minutos.

Ilustración 31: Ensayo Lefranc de Carga Constante



Ecuación 4: Coeficiente de permeabilidad Lefranc

$$K = \frac{Q}{C * h_m}$$

Donde:

K : Es el coeficiente de permeabilidad.

Q : Es el caudal inyectado.

h_m : Es la altura del agua dentro del sondeo, por encima del nivel estático previo.

C : Es el factor de la forma.

Ecuación 5: Factor de forma

$$C = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{2L}{d}\right)}$$

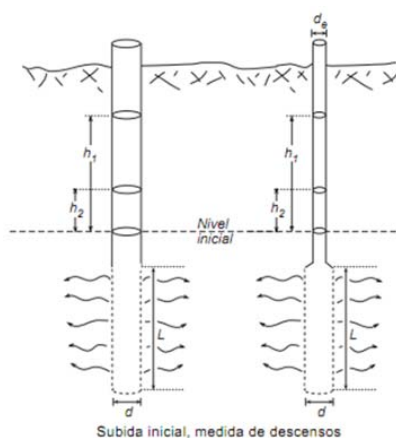
Donde:

L: Es la longitud del ensayo.

d: Es el diámetro de perforación.

El ensayo de carga variable establece el ingreso de un volumen de agua súbitamente en un sondeo y medir tiempo-cambio en la altura, con la medición de estos descensos en un tiempo determinado, se puede obtener la permeabilidad.

Ilustración 32: Ensayo Lefrac de Carga Variable



Ecuación 6: Coeficiente de permeabilidad para carga variable

$$K = \frac{d_e^2 \ln\left(\frac{2L}{d}\right)}{8 L t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Donde:

K: Es el coeficiente de permeabilidad.

h_1, h_2 : Es la altura al principio y al final del ensayo.

t: Es el tiempo transcurrido entre la observación de los niveles h_1 y h_2 .

L: Es la longitud de la zona filtrante.

d: Es el diámetro de la zona filtrante.

d_e : Es el diámetro de la entubación

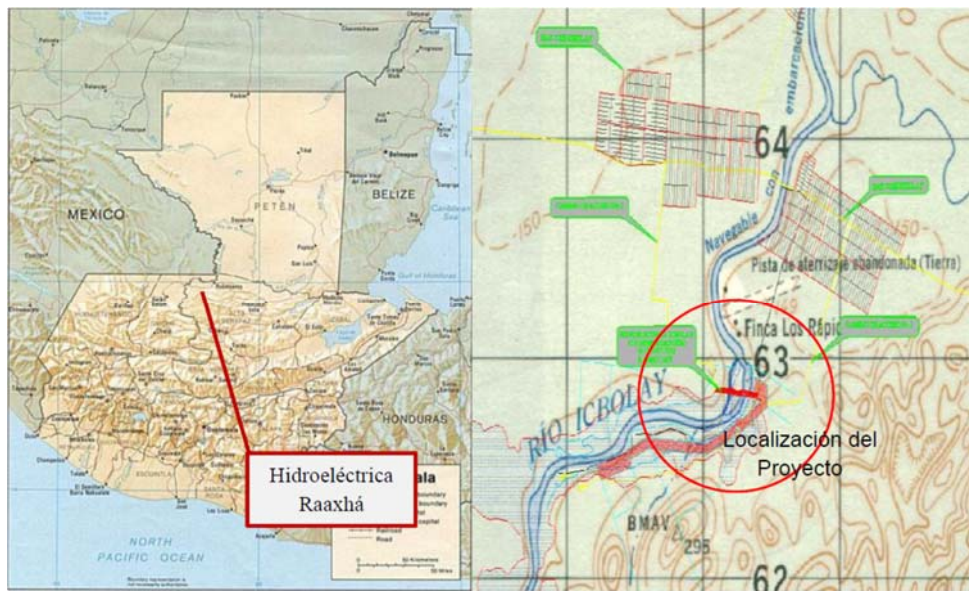
V. MARCO PRÁCTICO

A. Metodología de inyección en la pantalla de impermeabilización del proyecto hidroeléctrico Raaxhá

1. **Generalidades del proyecto Hidroeléctrico.** Proyecto hidroeléctrico RAAXHÁ se encuentra dentro de los límites de la finca Los Rápidos San Isidro, la cual está ubicada en el municipio de Cobán, del departamento de Alta Verapaz, Guatemala. Dado las características específicas del proyecto, éste consta con una Casa de Máquinas ubicada a pie de Presa, sobre el cauce del río. La Casa de Máquinas estará constituida por un conjunto de turbinas para aprovechar una caída bruta de 6.50 metros.

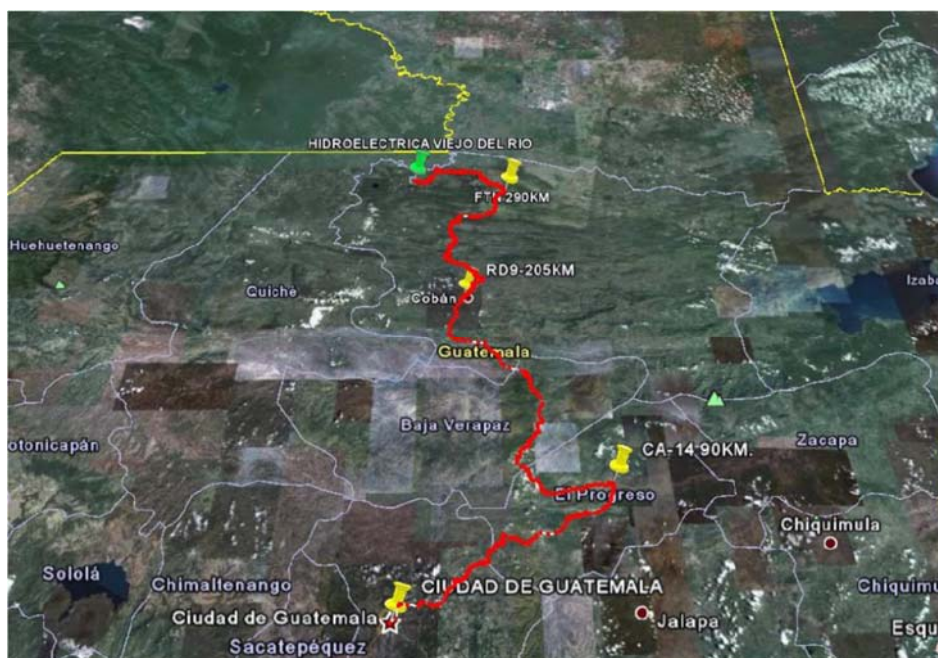
2. **Localización y accesos del proyecto.** La ruta principal para acceder a la finca los Rápidos San Isidro proveniente de ciudad de Guatemala es por medio de la CA-9 Norte hasta el Rancho en el departamento del progreso, luego se toma la ruta CA-14 hacia Cobán, desde Cobán se toma la ruta departamental RD-9 hasta llegar a la franja transversal del Norte, en esta se conduce por cuarenta kilómetros llegando a la comunidad San Juan Icbolay.

Ilustración 33: Mapa de localización del Proyecto



Fuente: (Energy Resources, 2014)

Ilustración 34: Mapa de acceso al proyecto



(Energy Resources, 2014)

3. Estratigrafía específica. Según los estudios de exploración geotécnica realizados en la zona del eje de presa y casa de máquinas del proyecto hidroeléctrico Raaxhá, en el área se observan estratos de características arcillosas junto con estratos de roca. En el área de estudio, la primera capa del terreno estaba constituida por arcillas o material proveniente del relleno conformado (con espesor aproximado de hasta 2.00 metros) para la construcción de plataformas de trabajo. A partir del primer estrato, en el resto de la estratigrafía, se pudo observar la presencia de bandas correspondientes a estratos de roca fracturada comprendidos por capas de entre 0.50 – 1.00 metros, la cual presenta permeabilidades mayores a 2.00×10^{-5} cm/seg (Alvarado, 2015). Estas formaciones rocosas se encuentran colindantes al cauce del Río Icbolay por lo cual han sido expuestos a flujos subterráneos que han propiciado la creación de cavidades de origen kárstico, tal como lo refiere tal como se expresa en la sección IV, tema A, sub-tema 2, literal a “Rocas Karticas”. Es importante señalar que la presencia de roca fracturada se debe al origen y proceso geológico de conformación del estrato rocoso y no a los flujos de agua subterránea proveniente del río.

Tal y como puede observarse en la caja de muestras para los núcleos de recuperación, Ilustración 35, las fisuras en el terreno poseen tamaños de aproximadamente 2.00 mm.

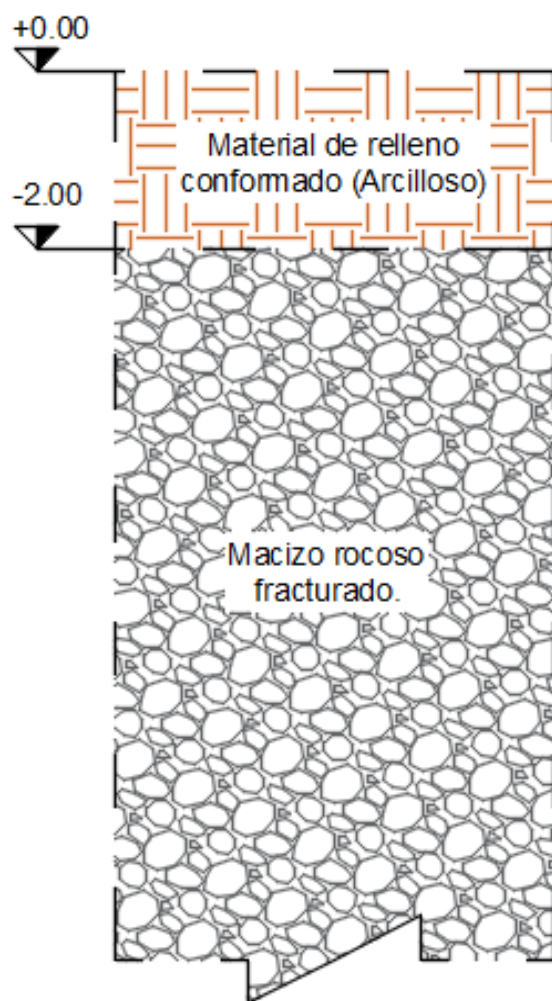
Ilustración 35: Terreno medio**Ilustración 36: Núcleos de perforación**

Ilustración 37: Presencia de cavidades y fisuras en Casa de Máquinas



Fuente: (Alvarado, 2015)

4. Utilización de pantalla de impermeabilización. En la zona de presa se llevó a cabo una pantalla de inyecciones de lechada y mortero, con el fin de realizar la impermeabilización del macizo rocoso fragmentado o fisurado que se encuentra en el área. Las inyecciones de impermeabilización que conforman la pantalla se realizaron sobre el eje de presa y la casa de máquinas del proyecto hidroeléctrico, ésta consta de dos ejes de inyecciones, el primer eje está compuesto de taladros primarios y secundario separados a una distancia de 1.50 metros entre sí, mientras el segundo eje está compuesto únicamente por taladros secundarios a una distancia de 1.50 metros entre sí.

5. Objetivo a alcanzar. Se estableció que era necesario reducir la permeabilidad del macizo rocoso fragmentado sobre el eje de presa y alrededor de la casa de máquinas, para que la permeabilidad recomendada en los medios circundantes a la presa sea menor a $2.00 \times 10^{-5} \text{cm/seg}$.

6. Generalidades de los taladros de inyección

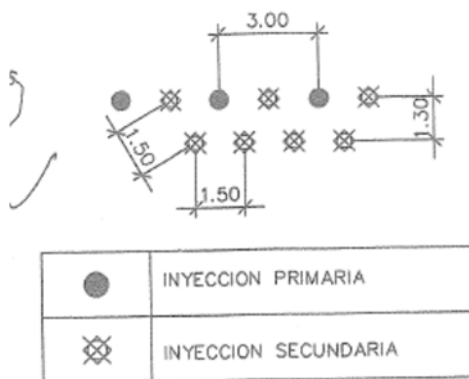
a. Taladros primarios. Las perforaciones primarias de la pantalla de impermeabilización se encuentran a una distancia de 3.00 metros de separación entre los centroides de perforación. La longitud de perforación de los taladros es de 10.00 metros y son totalmente verticales. Estos se realizaron con base en la metodología ascendente de inyección, en tramos de 3.00m.

El procedimiento de ejecución de los taladros primarios estableció que éstos se perforarán e inyectarán previo al inicio de los taladros secundarios.

b. Taladros secundarios. Los taladros ubicados en el primer eje se encuentran a una separación de 3.00 metros entre centros de perforación y en la mitad de la distancia entre dos taladros primarios (separación entre taladros primarios y secundarios es de 1.50 m). Los taladros ubicados en el segundo eje se encuentran a una separación de 1.50 metros entre centros. Constan de una longitud de perforación de 6.00 metros y son totalmente verticales. Estos se realizaron con base en la metodología ascendente de inyección, en tramos de 3.00m.

Las perforaciones secundarias del primer eje se realizaron a continuación de finalizar las inyecciones primarias de una zona de trabajo y las inyecciones secundarias correspondientes al segundo eje se ejecutaron al haber concluido con las perforaciones e inyecciones eje anterior. Debido a la existencia de inyecciones primarias colindantes a estas perforaciones los taladros suelen consumir una menor cantidad de mezcla de inyección para lograr alcanzar la presión requerida.

Ilustración 38: Esquema de distribución de inyecciones



Fuente: (Aguilar, 2014)

7. Perforación de taladros

a. Conformación de plataforma. Debido a la configuración de las áreas de trabajo del proyecto fue necesario determinar los periodos en los cuales se perforó e inyectó los diferentes taladros del eje de presa y casa de máquinas, esto se debió a la necesidad de desviar cauce del río para la correcta elaboración de plataformas de trabajo.

Se realizó un programa de trabajo en el cual se estableció los periodos de tiempo en los que se debían de realizar los diferentes trabajos, en los periodos que se desviaba el cauce del río se creaban bordas de

protección para que las variaciones del nivel de este no afectara las zonas de trabajo, dificultando una labor continua.

Las dimensiones de las plataformas se establecieron de tal manera que se puede habilitar un área de trabajo continua, que permitió la movilidad de la maquinaria de perforación y sin poner en riesgo al personal de trabajo.

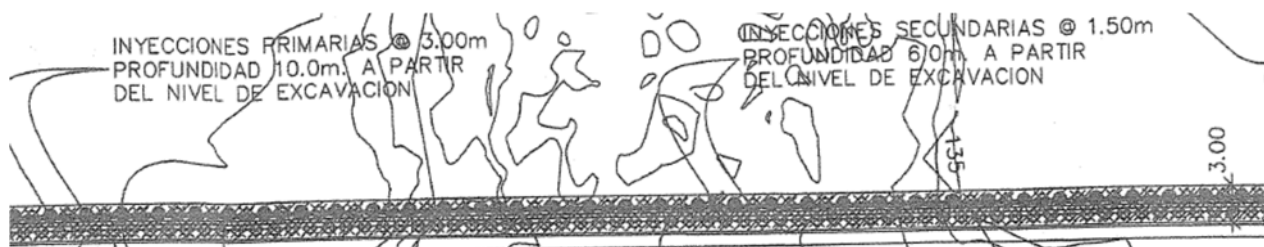
Ilustración 39: Plataforma de trabajo en campo



d. Localización de los taladros de inyección. Por medio de equipos topográficos se estableció los puntos de perforación en campo con base a lo indicado en los planos del proyecto en el apéndice A. En conjunto con el supervisor del proyecto se realizaba un programa de los trabajos a ejecutar durante las jornadas laborales.

El procedimiento utilizado en el proyecto consto en la perforación e inyección de todos los taladros primarios en un determinado sector, para continuar con los trabajos correspondientes de los taladros secundarios. De preferencia los taladros primarios se intercalaron para evitar fugas de mezcla entre perforaciones.

Ilustración 40: Esquema de localización de taladros



(Aguilar, 2014)

e. **Perforación.** Se realizó la perforación total de cada uno de los taladros por el método a rotoperforación con equipos neumáticos de alto rendimiento. Entre el primer y segundo metro de la perforación se utilizó una camisa recuperable de perforación, con el fin de estabilizar la capa de terreno donde se conformó la plataforma, para evitar desprendimientos de material que afectaran el proceso de inyección.

Ilustración 41: Camisa recuperable de perforación



Los taladros fueron perforados verticalmente en un diámetro de 3" (76 mm), con un sistema de martillo de fondo equipado con tallantes para perforar suelo o roca. La perforación de cada taladro fue de hasta 12.00m, de los cuales los primeros 2.00 m correspondían a la capa de terreno de conformación de plataforma y los 10.00 m restantes al taladro de inyección primario.

Ilustración 42: Perforación de taladro



d. **Lavado de perforación.** Se limpiaron las perforaciones con aire y agua hasta retirar el material suelto. Este proceso se dio por finalizado hasta que el agua limpia alcanzara la parte superior de la perforación. El anterior procedimiento fue de suma importancia para dejar expuestas las fisuras del medio para la posterior inyección.

e. **Reperforación.** La reperforación no es una condición que se presentó frecuentemente en las perforaciones por método ascendente pero llegó a ocurrir. Fue necesario perforar nuevamente en dos escenarios primordialmente:

- En las perforaciones donde ocurrió algún tipo de desprendimiento de las paredes de la perforación. Este escenario no permitió la correcta instalación del equipo de inyección, por lo que fue necesario reperforar del taladro.
- En los casos que no se logró alcanzar la presión de inyección en un tramo y fue necesario suspender la inyección hasta el día siguiente, si no se limpió adecuadamente la perforación, se reperforo el tramo para continuar con el procedimiento de inyección.

f. Equipos utilizados

- Perforadora sobre orugas tipo Soil Mec-305 o similar.

Ilustración 43: Soil Mec - 305



- Compresor Ingresoll Rand 750/125 o similar.

Ilustración 44: Compresor Ingresoll Rand 750CFM/125psi



- Martillo de fondo

Ilustración 45: Martillo de fondo



- Accesorios varios de perforación.

Ilustración 46: Tubería de perforación



g. Personal

- Encargado de obra.
- Operador de perforadora hidráulica.
- Ayudantes especializados.
- Ayudantes generales.

8. Inyección

a. **Obturación de la perforación.** Para la inyección dentro del taladro se colocaron obturadores o “packers” neumáticos simples tipo Bimbar. Estos obturadores no permitían la inyección fuera de los tramos que se estaban inyectando. La obturación fue un proceso fundamental en la inyección ascendente ya que esta logro confinar un tramo de inyección.

Ilustración 47: Esquema del funcionamiento de obturadores superiores



Fuente: (Tecnología & Accesorios, 2015)

b. **Mezcla de mortero o lechada de inyección.** Fue necesaria la instalación de una planta de inyección con sus respectivos equipos para preparación, dosificación, mezclado, monitoreo, control e instrumentación de la inyección. Los materiales inyectables se homogenizaron utilizando mezcladores de alta turbulencia para lograr una suspensión coloidal de los productos. La lechada fabricada se envió a un tanque en el cual era constantemente agitada, previamente al proceso de bombeo de inyección. Esta cantidad inyectada se midió volumétricamente en el agitador además de medir las variaciones en las presiones de trabajo a través de manómetros colocados en la salida de la bomba.

Para el proyecto se utilizaron dos mezclas de inyección, la primera es una lechada relación A/C=1.2 y la segunda un mortero relación A/C= 0.7. La dosificación de cada uno de los constituyentes de las mezclas utilizadas para la inyección se encuentra a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3: Dosificaciones de mezclas de inyección

	Lechada A/C=1.2	Mortero A/C= 0.7
Cemento (Kg)	85.00	85.00
Agua (Kg)	102.00	60.00
Bentonita (Kg)	0.86	0.86
Arena (Kg)	0.00	1.50

La primera lechada con relación A/C=1.2, puede ser considerada como una mezcla líquida debido a que no posee granos gruesos presentes en su granulometría. Sin embargo, la presencia de bentonita cuya granulometría posee partículas menores a la milésima de milímetro, la mezcla no se clasifica como una mezcla líquida, tal y como se mencionó en la sección IV, tema B, sub-tema 1 de este trabajo. La presencia de este material, debido a las propiedades coloidales que poseen sus granos finos, genera estabilidad en la mezcla de inyección permitiendo limitar la sedimentación de los materiales que la componen. Por este motivo la mezcla es considerada un mortero estable suficientemente fluido para ser utilizado en inyecciones con presencia de fisuras con una abertura mayor a una milésima de milímetro, que es el diámetro de la partícula de mayor tamaño de la mezcla y menores a dos milímetros, que corresponde a la fisura esperada en el macizo rocoso.

Por otra parte, la presencia de bentonita en la mezcla con relación A/C=0.7, permite clasificar a la mezcla como un mortero estable. Debido a las propiedades granulométricas de la arena, esta mezcla se utiliza en el proceso de inyección para el relleno de mayores volúmenes de inyección, por ejemplo cavidades kársticas y grietas de mayor tamaño, obligarían a un consumo mayor de materiales y pueden tener efectos económicos en los costos de inyección.

c. **Criterios de parada.** El proceso de inyección era suspendido cuando se cumplía alguna de las siguientes consideraciones durante la inyección:

- Volumen máximo de inyección.
- Presión máxima con caudal constante.
- Incremento de presión súbita..
- Fuga de mezcla.

La inyección se reanudaba cuando al haber solucionado las causas que dieron origen a la suspensión de los trabajos sin haber alcanzado el volumen o presión requerida; o la lechada de inyección fraguaba para continuar el proceso de inyección. Cuando la inyección alcanzaba su presión máxima o el volumen máximo esta se finalizaba por completo y procedía a inyectar el siguiente tramo o taladro.

1) **El volumen máximo de inyección.** Se consideraron tres volúmenes de inyección, estos se aplicaron en forma consecutiva con un día de espaciamiento entre uno y otro. El volumen de cada uno de los días de inyección para un tramo se encuentra a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4: Volúmenes de inyección

	Mezcla	Cantidad de sacos (42.5 Kg)	Volumen (L)
Volumen día 1	Lechada A/C = 1.2	20	1020
Volumen día 2	Mortero A/C = 0.7	80	2400
Volumen día 3	Mortero A/C = 0.7	80	2400

Se consideró que el volumen del día 1 debía ser de una lechada A/C=1.2 para lograr penetrar fisuras de espesores esperados de 2.00 mm como se indica en la estratigrafía del proyecto. Se estimó hasta 1020 L de mezcla para lograr rellenar satisfactoriamente estas fisuras. Para el volumen del día 2 y 3 se utilizó Morteros A/C = 0.7, ya que al no haber logrado los días anteriores la presión requerida se estableció la posible presencia de cavidades Kársticas en la zona de influencia de la inyección. Para lograr rellenar las cavidades se estimó un volumen de hasta 2400 L por cada día de inyección

Cuando con el volumen del día 1 no se alcanzaba la presión de diseño, se aplicaba al día siguiente el volumen del día 2. Si el volumen del día 2 no alcanzaba la presión requerida se suspendía la inyección y se continuaba al día siguiente con el volumen del día 3. Si el volumen del día 3 no alcanzaba la presión establecida se daba por finalizado el tramo. Éste era evaluado por el consultor del proyecto para determinar si se continuaba con la inyección o se realizaban taladros extras en la zona, para lograr la presión establecida.

La diferencia de un día de inyecciones entre los diferentes volúmenes, se debe a la necesidad que la mezcla anterior penetre adecuadamente las fisuras en la roca y logre fraguar de manera parcial para que la roca no sufra fracturas durante la inyección del día siguiente.

2) **Presión máxima con caudal constante.** Este es el parámetro que se busca obtener al momento de suspender una inyección. En éste se logra al obtener la presión de diseño por lo cual se puede dar por finalizado el tramo de inyección. Para el proyecto en estudio se buscó encontrar una presión P de 3 bares o 45 psi. Esta presión se debía lograr por medio de un caudal constante.

La presión P se obtuvo por medio de la Ecuación 1:

$$P = \frac{6 \cdot 3(\text{poises}) \cdot 2(\text{l/s})}{\pi^2(\text{mm})^3} \ln \frac{150(\text{cm})}{76(\text{mm})} = 3.28 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$

Donde:

e= Es el espesor esperado de las fisuras en el macizo rocoso fragmentado. (e = 2.00 mm)

r= Es el radio de los taladros de perforación. (r = 3.28 mm)

Q= Es el caudal proporcionado por la central de inyección en el apéndice B. (Q = 2 l/s)

v = Es la viscosidad de la mezcla con base en la ilustración 3. (v = 3 poises)

R= Es el radio de influencia de los taladros. (R = 150 cm)

Nota: Se determina el radio con base a la separación entre taladros primarios.

La presión se monitoreó por medio de manómetros de presión tanto en la salida de la bomba y antes de la boca del taladro. Se utilizó la presión en la boca de taladro como parámetro para medir la presión de inyección.

El monitoreo de la presión de inyección es un factor de suma importancia a salida de la bomba y a la entrada del taladro. Se controló la presión para determinar posibles obstrucciones en la tubería de inyección lo cual podía dañar el equipo y no lograr una inyección adecuada.

3) Incremento súbita de presión. Este es un parámetro se monitoreo ya que se generó obstrucciones en la tubería de inyección entre el manómetro en la entrada de la perforación y la salida de la tubería en el tramo de inyección. El incremento de presión en algunos casos se debió al haber logrado la presión de inyección y esta tiende a incrementar rápidamente. Este tipo de suspensión de inyección se reanudo de manera casi instantánea cuando se limpió la tubería en los casos de obstrucción o se suspendió definitivamente cuando se alcanzó la presión de inyección. Esta decisión en la mayoría de los casos fue determinada por el supervisor de la obra.

4) Fuga de mezcla. Durante el proceso de inyección el supervisor del proyecto observó los diferentes puntos de la zona donde podía existir algún tipo de fuga. Se presentaron fugas en las partes superiores de los taladros colindantes o se identificaban rastros de mezcla en el cauce del río.

Las fugas normalmente se presentaron en la parte superior de la inyección, en esa zona se determinaba visualmente la presencia de la mezcla en superficie. Cuando las fugas eran menores estas se taponeaban para continuar los trabajos de inyección. Si la fuga se presentaba en proporciones excesivas visualmente se suspendía la inyección y se continuaba al día siguiente.

Las fugas que se presentan en el cauce del río se suspenden inmediatamente la inyección y se continúa al día siguiente con la siguiente mezcla aunque no se inyectara el volumen total de la mezcla anterior.

d. Monitoreo de inyección. Para el proceso de inyección se monitoreó el volumen de inyección en los diferentes tramos y la presión máxima de inyección que se debían alcanzar en cada uno de los taladros.

e. Equipo

- Central de inyección Cosma

Ilustración 48: Central de inyección Cosma



Fuente: (Rodio-Swissboring, 2011)

- Grupo mezclador de alta turbulencia

Ilustración 49: Mezclador de alta turbulencia



- Agitadores lentos

Ilustración 50: Agitador lento



- Tanque de agua
- Bomba centrífugas
- Bomba Bean Royal
- Obturadores tipo Bimbar
- Accesorios de inyección

Ilustración 51: Caballete de presión equipado con manómetro.



f. Personal

- Encargado de obra.
- Inyectista.
- Ayudantes especializados.
- Ayudantes de inyección
- Ayudantes de mezclado.

B. Pruebas de comprobación de las inyecciones en la pantalla de impermeabilización.

Los sondeos de comprobación se ejecutaron a las profundidades determinadas por el consultor. La profundidad de dichos sondeos fue de hasta 18.00 metros y en su mayoría se realizaron entre los 14.00m y 16.00m. Algunos sondeos alcanzaron las profundidades máximas, por el hecho que los ensayos Lugeon no reflejaron la permeabilidad esperada y se profundizaron hasta llegar a un estrato con permeabilidad competente. La razón por la cual los sondeos se profundizaban entre 2.00m y 4.00m más que los taladros de inyección, correspondió a la necesidad del comportamiento del estrato de roca por debajo de la pantalla de impermeabilización. Los sondeos se realizaron a lo largo del eje de presa y la casa de máquinas con el fin de comprobar la permeabilidad.

Para estos trabajos se utilizó el sistema de perforación con diamantina tipo “wireline” con un diámetro de perforación HQ (núcleo de 63.5mm / taladro de 96.0 mm). Los núcleos recuperados de estos sondeos fueron colocados en cajas plásticas con capacidad de 2.4 m de perforación de núcleo HQ cada una para su fácil traslado y posterior registro e identificación.

En la Ilustración 51 se logra identificar cómo la lechada logró penetrar algunas fisuras y cavidades dentro del macizo rocoso, mientras que en la Ilustración 52 es mucho más evidente la presencia de la mezcla de inyección dentro de la roca. Entre los 9.00m y los 9.70 metros se aprecia un cantidad considerable de lechada relleno una cavidad que se presentaba en la roca.

Ilustración 52: Caja de recuperación entre 2.80m y 5.30 m



Ilustración 53: Núcleo de recuperación entre 7.50m y 9.70m



En la ilustraciones 53 y 54 se identifica claramente la presencia de la mezcla en el estrato. En estas se logra observar el color grisáceo de la mezcla entre el color marrón del medio. En la Ilustración 53 se observa un estrato entre 9.70 m y 10.50 m que no se logró inyectar correctamente. Este está compuesto por rocas de diámetros de hasta 0.05 m sin la presencia de una matriz. En los estratos inferiores se observa

claramente la mezcla de inyección. En la Ilustración 54 se presenta una mejor consistencia de la roca mostrando claramente las zonas donde logró penetrar la mezcla de inyección.

Ilustración 54: Caja de perforación entre los 9.70m y 12.00 m



Ilustración 55: Caja de perforación entre 11.70m y 14.05m



Se realizaron pruebas de permeabilidad tipo Lugeon. Para estas se utilizaron obturadores neumáticos tipo Bimbar especialmente adaptados para trabajo con sistema “wireline”. Se ejecutaron las pruebas en forma descendente conforme avanzaba el sondeo en tramos de 3 metros y utilizando 5 escalas de presión de 10 minutos cada una. Los resultados obtenidos de las pruebas de Lugeon fueron evaluados por un consultor el cual estableció el correcto funcionamiento de la pantalla de impermeabilización, con base en la permeabilidad requerida del proyecto menor a 2.00×10^{-5} cm/seg. Cuando la permeabilidad obtenida era mayor a esta se consideraba con fuga, por lo tanto de alta permeabilidad.

Tabla 5: Permeabilidad para sondeos en Casa de Máquinas.

Sondeo	Ubicación	Ensayo	Profundidad (m)		Permeabilidad cm/seg
			de	a	
PS-8	CM8- CM17	1	3.00	6.00	0.00×10^0
		2	6.00	9.00	0.00×10^0
		3	9.00	12.00	3.81×10^{-5}
		4	12.00	15.00	2.07×10^{-5}
		5	15.00	16.00	6.38×10^{-6}
PS-9	CM31- CM18	1	3.00	6.00	4.58×10^{-6}
		2	6.00	9.00	3.81×10^{-6}
		3	9.00	12.00	4.50×10^{-6}
		4	12.00	15.00	FUGA, ALTA PERMEABILIDAD

Fuente: (Alvarado, 2015)

En la Tabla 5 se puede determinar que el sondeo PS-08 no se obtuvo un dato de permeabilidad en el ensayo 1 y 2, lo cual denota que entre los 3.00 y 6.00 metros se tiene un estrato impermeable. En el sondeo PS-09 en el ensayo 4 se obtuvo un valor de permeabilidad mayor a lo requerido por lo cual se indica un alta permeabilidad en el tramo correspondiente ente los 12.00 y 15.00 metros.

En la zona de la casa de máquinas se obtuvieron ensayos de permeabilidad con alta permeabilidad. Esto se debió a que posteriormente a la realización de los trabajos de inyección de impermeabilización se trabajó con explosivos en el área. Las explosiones dañaron fracturando la roca ya inyectada por lo que fue necesario la realización de taladros extras de inyección.

Los taladros de reinyección se perforaron a cada 4.00m entre ejes y mantienen las características de los taladros de la pantalla de impermeabilización. Esto se realizó con el fin de disminuir la permeabilidad de la zona causado por los trabajos con explosivos.

VI. ANÁLISIS DE METODOLOGÍA DE INYECCIÓN

La metodología de inyección por el método ascendente, la cual fue utilizada en el proyecto hidroeléctrico Raaxhá se adapta a las necesidades requeridas según el medio que se encuentra en la zona; mismo que se caracteriza por ser una macizo rocoso fragmentado o fisurado. El macizo rocoso presenta características de estabilidad lo cual permite una correcta perforación en la totalidad de la longitud de los taladros, sin que este sea propenso a desprendimientos en las paredes de la perforación. Al ser un estrato estable se logró realizar las inyecciones desde la parte inferior del taladro por tramos de 3.00 metros hasta llegar a la cota de superficie.

En el proceso de inyección cabe comentar la importancia de respetar la distribución de los taladros y su distancia entre sí, tal como se establece en los planos de distribución (ver apéndice A), para que la mezcla logre abarcar el área de influencia de cada una de las perforaciones, de tal forma que no exista espacios dentro de la pantalla sin mezcla de inyección. En el proyecto se logró la correcta distribución de los taladros tanto primaria como secundaria previa al proceso de perforación.

Es importante hacer notar que el tipo de perforación a rotopercusión que se utilizó, es el adecuado para el proyecto en virtud de su eficiencia, ya que combina la rotación y percusión simultáneamente. La percusión rompe por impacto el macizo rocoso obteniendo de esta forma partículas más finas, acelerando así el método a rotación, si solo este existiera, reduciendo los tiempos de perforación con el consecuente incremento de eficiencia en tiempo y evitando desgaste excesivos en la herramienta de perforación, derivando en una mayor vida útil que concluye en la reducción de costos. Sin embargo a pesar de la eficiencia demostrada por este método se dio la necesidad de reperfilar algunos tramos de inyección cuando se presentó alguno de los escenarios establecidos en la sección V, tema A, sub-tema 7, literal e “Reperforación”; cuya incidencia no demerita la eficiencia del método de perforación utilizado.

Para que la mezcla de inyección logre una máxima penetración en la fisuras o fracturas del macizo rocoso y se obtenga los resultados esperados, el proceso de lavado debe hacerse con sumo cuidado y de la manera correcta, ya que estos son los que permiten que la mezcla se logre introducir en las fisuras o fracturas de manera correcta con aire y agua hasta retirar el material suelto.

El método ascendente de inyección permitió que el tramo de 3.00 metros del taladro de perforación que se llevó a cabo, tuviese un área de contacto lo suficientemente amplia para atravesar las fisuras o fracturas presentes en la roca para la correcta circulación de la mezcla en el medio de inyección. En el proyecto, durante el proceso de inyección fue necesario, tal como se expresa en la sección V, tema A, sub-tema 8, literal c “Criterios de parada”, al numeral 1) “El volumen máximo de inyección”; que si en los tramos no se lograba alcanzar la presión requerida con el volumen del día 1 que utiliza una mezcla de lechada $A/C=1.2$, es necesario utilizar en la siguiente etapa el volumen del día 2 el cual cambia el tipo de mezcla a un mortero $A/C=0.7$ (ver tabla 4); que posee características para sellar fisuras con una mayor abertura. En dado caso no se haya llegado a alcanzar la presión requerida en los días 1 y 2, es necesario la aplicación del volumen del día 3 el cual mantiene las mismas características de inyección del volumen del día 2.

En el caso específico de este proyecto se estableció que la presión requerida para dar como finalizado un tramo de inyección satisfactoriamente fue de 3.00 bares o 45 psi medidos por medio de manómetros instalados a boca de taladro.

Durante el desarrollo del proyecto la presión fue alcanzada aleatoriamente, en algunos tramos se alcanzó con el volumen del día 1, para otros fue necesario la aplicación del volumen del día 2 y otros requirieron llegar hasta la aplicación del volumen del día 3. Es importante comentar que fue necesaria la intervención del ingeniero consultor del proyecto para aquellos tramos en los cuales no se alcanzó la presión requerida: en base a su criterio, tomó la decisión de dejar algunos tramos con la presión alcanzada menor a la requerida, en otros continuar el proceso de inyección hasta alcanzar la presión de diseño y en algunos ordenó la perforación de taladros adicionales.

Cabe mencionar, además, que el consultor del proyecto es el profesional a cargo de decidir en base a los criterios establecidos de para cuando una inyección se debe suspender o dar por finalizada la misma.

Posterior a la finalización de una zona de inyección trabajada, se realizaban los ensayos de comprobación y permeabilidad correspondientes. En las perforaciones de recuperación de núcleos se logró identificar la presencia de lechada o mortero en las muestras correspondientes que se identifican por medio de cajas de recuperación (ver ilustraciones 51 a 54 inclusive).

Por medio de los ensayos de permeabilidad correspondientes al eje de presa se determinó que estos cumplieron con la finalidad de las inyecciones obteniendo permeabilidades menores a 2.00×10^{-5} cm/seg cumpliendo con los objetivos trazados en la sección V, tema A, sub-tema 5.

Debido al uso de explosivos en la zona de casa de máquinas cuya onda expansiva dañó la pantalla de impermeabilización realizada previamente, los resultados de los ensayos de permeabilidad no fueron del todo satisfactorios; requiriendo perforación e inyección adicionales para lograr la permeabilidad requerida (ver Tabla 5).

Debido a que cada uno de los procesos se llevó acabo de manera correcta, siendo estos perforación, limpieza, inyección y pruebas comprobación, se determina que la metodología de inyección utilizada fue la adecuada. Utilizando perforación a rotopercusión para el terreno medio encontrado, inyección ascendente debido a que no se presentan desprendimientos de las paredes de perforación y ensayos de comprobación en los cuales se determinó que se alcanzó la permeabilidad requerida para el proyecto.

VII. CONCLUSIONES

A. Al objetivo general

- Habiendo cumplido con los requisitos de la presión de los taladros y logrando disminuir la permeabilidad del medio de forma sustancial se evaluó que el método utilizado, es decir la metodología de inyección por el método ascendente se acopló de una manera satisfactoria para el proyecto hidroeléctrico Raaxhá.
- La metodología de inyección por el método ascendente para el proyecto hidroeléctrico Raaxhá presentó características que facilitaron el proceso de perforación a rotopercusión y una adecuada inyección de lechada o mortero en tramos ascendentes de 3.00m, sin presentar dificultades en el proceso.

B. A los objetivos específicos

- Habiendo estudiado la estratigrafía de la zona del eje de presa y la casa de máquinas se determinó la presencia estratos de roca fracturadas con permeabilidades mayores a 2.00×10^{-5} cm/seg, excediendo el valor de permeabilidad requerido para el proyecto, lo que requiere una pantalla de impermeabilización para reducir la permeabilidad existente a valores menores a 2.00×10^{-5} cm/seg.
- El resultado satisfactorio obtenido en el proceso de inyección en la pantalla de impermeabilización obedece a la correcta concatenación de los pasos a seguir uno a uno, en su orden establecido en la sección V, tema A “Metodología de inyección en la pantalla de impermeabilización del proyecto hidroeléctrico Raaxhá”.
- Se aplicaron criterios de presión y volumen para suspender o dar por finalizada una inyección basados en los lineamientos del proyecto y el juicio sobre estos del consultor del proyecto, los criterios aplicados corresponden 3 bares de presión y los valores de la Tabla 4 para los criterios de volumen.

- Para los trabajos de impermeabilización del eje de presa se logró cumplir con los criterios requeridos para que ésta funcionará de manera adecuada con una permeabilidad menor a 2.00×10^{-5} cm/seg, según los ensayos tipo Lugeon, cuyos resultados se observan en la Tabla 5.
- La necesidad de reinyección se debió a trabajos ajenos a los de impermeabilización en los que se utilizaron explosivos que dañaron la pantalla de impermeabilización, y en las zonas con alta permeabilidad según ensayos tipo Lugeon.
- El método ascendente permitió un trabajo con mayor eficiencia de tiempo debido a que las perforaciones se realizaron a la profundidad total de los taladros sin la necesidad excesiva de maniobras extras de reperfusión, y aun cuando estas se dieron, la misma eficiencia del método permitió realizarlas sin afectar el ritmo de trabajo.
- En el caso específico de este proyecto no se presentó limitación alguna para la aplicación del método de inyección ascendente el macizo rocoso fracturado.
- Se determinó que efectivamente la lechada cumplió con la finalidad de sellar satisfactoriamente los tramos que presentaron fisuras de hasta dos milímetros de acuerdo con los ensayos de comprobación. Sin embargo cuando los tramos de inyección presentaban aberturas mayores o cavidades Karsticas se volvió más viable la inyección de mortero.

VIII. RECOMENDACIONES

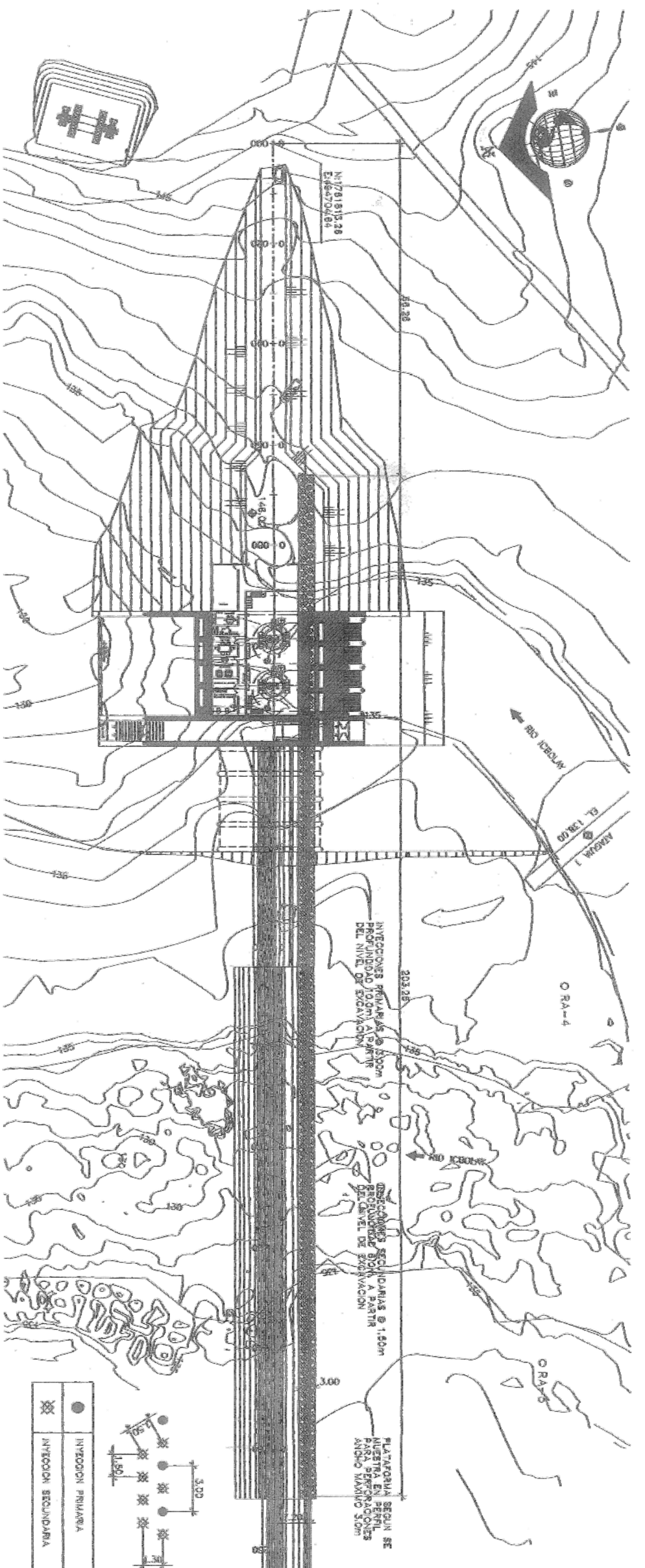
- Previo a la decisión de la utilización de una pantalla de impermeabilización es necesario la realización de un estudio geológico y geotécnico que refleje la estratigrafía y permeabilidad de la zona de estudio.
- Previo al inicio de los trabajos es de suma importancia establecer los parámetros que regirán y normaran el proceso de inyección, tales como la presión de inyección, el diámetro de perforación, profundidad, distribución de taladros, mezcla a utilizar y la permeabilidad requerida entre otros; esto para evitar problemas de criterio durante la ejecución de la obra.
- Se recomienda el uso del método ascendente de inyección siempre y cuando las condiciones estratigráficas encontradas cumplan con características similares a las encontrada en el proyecto objeto
- Se recomienda la perforación a rotoperCUSión en presencia de estrato de roca, debido a la combinación de dos métodos de perforación simultáneos, los cuales son rotación y percusión, generando una mayor eficiencia en el trabajo.
- Se debe establecer una secuencia de pasos a seguir, que cumplan con orden establecido para la metodología de inyección a ejecutar. Fijando de antemano criterios de parada que ayudan a la correcta ejecución de cada uno de los pasos a seguir. Nombrando de parte del cliente a un profesional que ejerza su criterio para evaluar la correcta ejecución del trabajo de conformidad a los parámetros establecidos del proyecto.
- Se recomienda la ejecución de ensayos de comprobación posteriores a los trabajos de inyección para garantizar la reducción de la permeabilidad al valor requerido.

IX. BIBLIOGRAFÍA

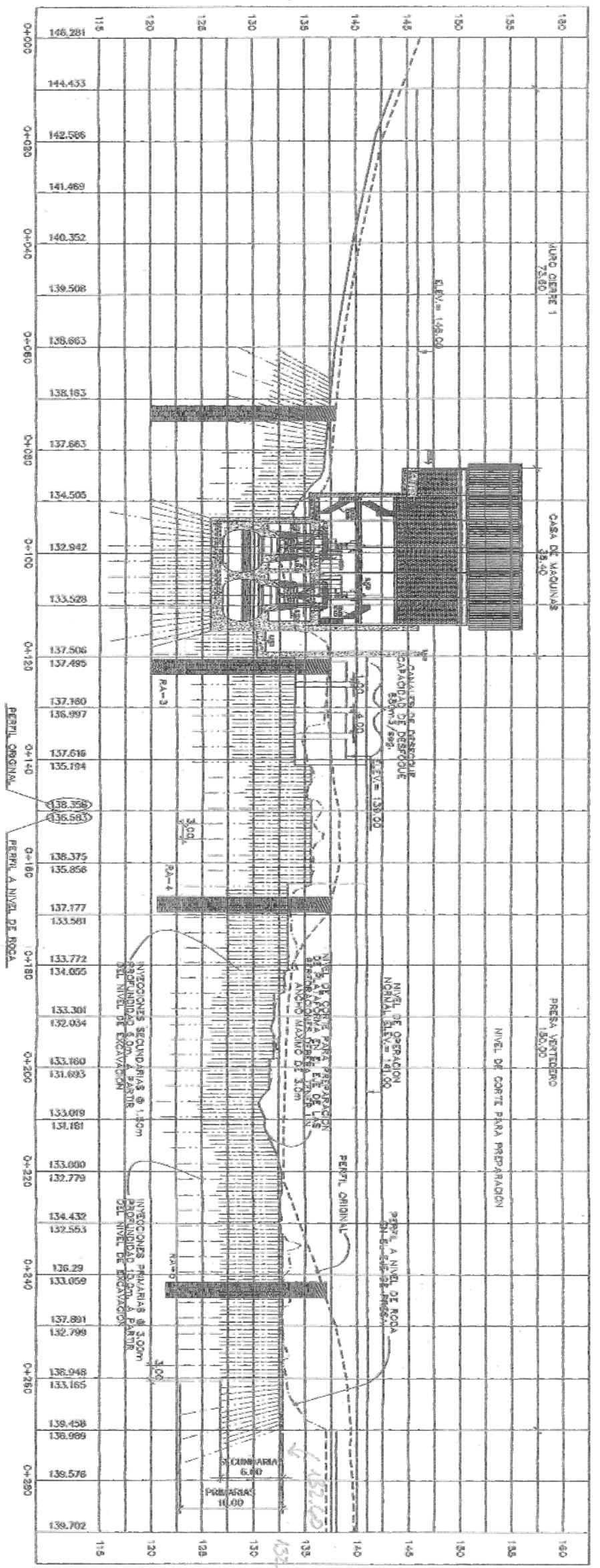
- Aguilar, R. (23 de abril de 2014). Energy Resources. *Plano de Pantalla de impermeabilización*. Guatemala.
- Alvarado, R. (2015). *Reporte sobre Inyecciones adicinales en el sitio de Casa de Máquinas*. Guatemala: GeoTest.
- Angelone, S. (2012). *FCEINA*. Recuperado el 6 de octubre de 2015, de GEOLOGIA Y GEOTECNIA: http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Redes%20en%20Presas%202012_2s.pdf
- Calzia, E. (2012). *Ficha de obra -Inyecciones Panamá*. Guatemala: Rodio-Swissboring.
- Cambelfort, H. (1968). *Inyección de Suelos*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Energy Resources. (14 de marzo de 2014). Hidroeléctrico Raaxhá. Guatemala.
- Giordano, P. (2008). *Tratamiento de fundaciones-Inyecciones*. La Plata: Universidad de La Plata.
- Karmelo, J. (31 de julio de 2011). *KomandoKreta*. Recuperado el 15 de septiembre de 2015, de Cresta de Bardamina: <http://www.komandokroketa.org/Bardamina/Bardamina.html>
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of Rock and Soil*. Netherlands: Balkema .
- Molins, R. (26 de mayo de 2004). *AstroMía*. Recuperado el 15 de septiembre de 2015, de Fotos Tierra: <http://whois.domaintools.com/astromia.com>
- Montoya, M. (14 de febrero de 2012). *Escuela de Ingenieria de Antioquia*. Recuperado el 6 de octubre de 2015, de Ensayo de Permeabilidad en el Suelo Lefranc: <https://sites.google.com/site/lefrancsuelos/ecuaciones-y-calculos/NIVEL%20CTE.PNG?attredirects=0>
- Ovando, H. (Julio de 2011). *Biblioteca Usac*. Recuperado el 16 de septiembre de 2015, de Inyección del suelo por medio de la Técnica de Jet Grouting: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3278_C.pdf
- Quiñonez, C. (09 de mayo de 2015). *USSDMAS*. Recuperado el 6 de octubre de 2015, de Lugeon test Interpretation: <http://ussdams.com/proceedings/2010Proc/405-414.pdf>
- Rodio-Swissboring. (14 de marzo de 2011). Central de Inyección Cosma.
- Tecnología & Accesorios*. (11 de febrero de 2015). Recuperado el 6 de octubre de 2015, de Packers (Obturadores) Inflables.
- Vasquez, R. (Junio de 2006). *Instituto Politécnico Nacional*. Recuperado el 15 de agosto de 2015, de Proyecto Hidroelectrico El Cajon Nayarit Tepic: http://tesis.ipn.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/4908/420_TRATAMIENTO%20DE%20LA%20ROCA%20MEDIANTE%20INYECCIONES%20EN%20EL%20PLINTO%20DEL%20PROYECTO%20HIDROELECTRICO%20EL%20CAJON.pdf?sequence=1
- Whitlow, R. (6 de octubre de 2015). *Fundamentos de Mecánica de suelos 3*. México: CECSA. Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/106254333/Basic-Soil-Mechcnics-Roy-Whitlow-2001#scribd>

X. APÉNDICE

A. Pantalla de impermeabilización del proyecto hidroeléctrico Raaxhá



PLANTA PERFORACIONES PARA INYECCION DE IMPERMEABILIZACION



PERFIL PERFORACIONES PARA INYECCION DE IMPERMEABILIZACION

Hidroeléctrica Raxhá

Perfil de impermeabilización en área de Toma y Presa

Objetivo

Realizar una cortina de inyecciones a presión de una lechada de cemento para lograr la suspensión en las vetas del macizo rocoso (baja discontinuidad) y con ello lograr la reducción de la permeabilidad.

Metodología

Se realizaron dos líneas de perforaciones perpendiculares a la dirección del flujo, separadas 1.30 metros entre ellas a 1.50 y 1.50 m. entre perforaciones, seridas 0.75 m. para formar frentillos.

Se demarcaron perforaciones primarias y secundarias de acuerdo al orden en que se perforan e inyectan.

Las perforaciones primarias se ubican en la fila quez erriba y están separadas 3.0 m. entre cada una, tendrán un diámetro de perforación de 38 mm. profundidad 10.0 m.

Las perforaciones secundarias están ubicadas en la primera fila (aguas arriba), separadas 3.0 m. cada una de las perforaciones primarias, y en la segunda fila aguas abajo, separadas a cada 1.5 m. diámetro 38 mm. profundidad 8.0 m.

Las perforaciones se deberán realizar utilizando equipo de rotación, con el diámetro inyectado.

La perforación se realizará hasta la profundidad total, luego las inyecciones se deberán realizar en forma ascendente, en tramos de 1.0 m. de altura, utilizando obturadores para ir cubriendo cada tramo. Se realizará la inyección y una vez finalizada la inyección se moverá el obturador hacia la sección de arriba (aprovechamientos a las 6 hrs) y se inyecta la nueva sección, repitiendo el procedimiento hasta completar la inyección.

Se deberán inyectar los perforaciones primarias luego las secundarias.

Las inyecciones se deberán hacer una presión de 3.0 Kg/cm², a chuzada según los pruebas iniciales.

La lechada deberá tener una relación 6/2 en peso (agua a 1:1.5) ajustada según las pruebas iniciales.

Las primeras perforaciones se deberán realizar con extracción de nucleos y realizar pruebas de inyección, con la intención de colibrar la presión de inyección y densidades de la lechada.

PLANOS RELACIONADOS:

0	24.04.14	PARA APROBACION	RESPONSABLE
REV.	FECHA	DESCRIPCION DE LA REVISION	RESPONSABLE



HIDROELECTRICA RAXHA

DEPTO. DE ALTA VERBAZ
REPUBLICA DE GUATEMALA

PROYECTO: 002-PRAXHA-2013-CONSTRUCCION

CLIENTE: DEPTO. DE ALTA VERBAZ

DISEÑO: 33.AA.014

REVISIÓN: RC-405

FECHA: 0

INFORMACION ADICIONAL

B. Ficha técnica de central de inyección Cosma

DATOS TECNICOS

MARCA: COSMA

CILINDRO DE CEMENTO Ø 55 MM

CAUDAL.....0 - 120 L / MIN

PRESIÓN0 - 100 BAR

AGITADOR

VOLUMEN.....1000 L

VELOCIDAD DE ROT. DEL EJE DE LAS ASPAS 60 - 70 RPM

MEZCLADOR

VOLUMEN.....1450L

RPM DE HELICE.....1200 RPM

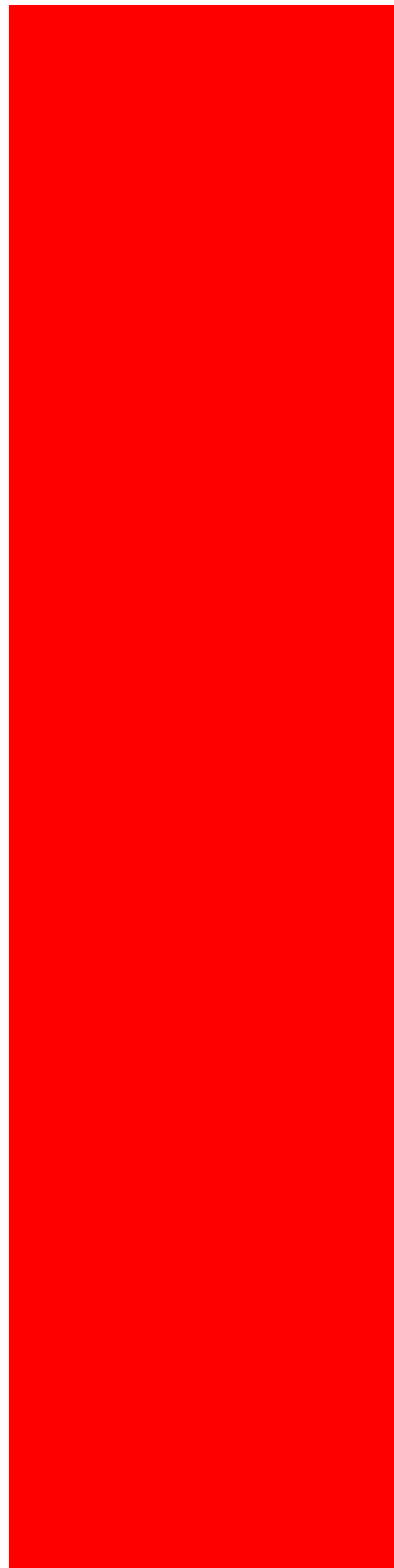
DIMENSIONES

LONGITUD.....2000 MM

ALTURA.....1800 MM

ANCHO.....1200 MM

PESO.....900 KG



C. Ficha técnica de bentonita Quik-Gel



QUIK-GEL®

Viscosificador

Descripción QUIK-GEL es una bentonita de sodio de Wyoming, de alta calidad y alto rendimiento, molida finamente (malla 200) y fácil de mezclar. QUIK-GEL imparte características de viscosidad, control de pérdida de fluido y gelación a fluidos de perforación con base de agua dulce.

Aplicaciones/Funciones

- Mezclar con agua dulce para formar un fluido de perforación con bajo contenido de sólidos para aplicaciones generales de perforación
- Viscosificar fluidos de perforación con base de agua
- Reducir la filtración formando una delgada capa de filtrado con baja permeabilidad
- Mejorar la capacidad de limpieza del pozo de los fluidos de perforación
- Mezclar con agentes espumantes para producir fluidos de perforación de "gel/espuma" para aplicaciones de perforación por aire/espuma

Ventajas

- Conforme a la norma 60 de NSF/ANSI
- Producto económico embalado en un solo saco
- Proporciona lubricidad a los fluidos de perforación
- Se mezcla fácilmente y alcanza la máxima viscosidad de forma rápida
- Produce más del doble de lodo de igual viscosidad que la misma cantidad de bentonita de grado aprobado por API utilizada en campos petrolíferos

Propiedades típicas

- Aspecto Polvo de color gris o marrón
- Densidad aparente, lb/ft³ 68 a 72 (compacto)
- pH (solución de un 3%) 8.9

Tratamiento recomendado

Mezclar lentamente a través de un mezclador de chorro o tamizar lentamente en el vórtice de un agitador de alta velocidad.

Cantidades aproximadas de QUIK-GEL agregadas a agua dulce			
Aplicación o resultado deseados	lb/100 gal	lb/bbl	kg/m³
Condiciones de perforación normales	15-25	6-10	18-30
Formaciones inconsolidadas	35-50	15-21	42-60
Perforación para sistemas de gel/espuma	12-15	5-7	14-18

- 1 bbl = 42 galones USA

Información adicional**Nota:**

- Para un rendimiento óptimo, tratar previamente el agua con 1 a 2 libras de Soda ash por 100 galones de agua (1.2-2.4 kg/m³).

Embalaje

QUIK-GEL® viene embalado en bolsas de papel de varias capas de 50 lb (22.7 kg).

Disponibilidad

QUIK-GEL puede adquirirse a través de cualquier distribuidor de productos de perforación industrial Baroid. Para encontrar el distribuidor PPI Baroid más cercano póngase en contacto con el Departamento de Servicios al Cliente en Houston o con el Representante de Ventas de PPI de su área

Baroid Industrial Drilling Products**Product Service Line, Halliburton**

3000 N. Sam Houston Pkwy. E.

Houston, TX 77032

Servicio al cliente (800) 735-6075 Gratuito (281) 871-4612

Servicio técnico (877) 379-7412 Gratuito (281) 871-4613

D. Ficha técnica de cemento UGC

CEMENTO PROGRESO

UGC con puzolana

Reduce agrietamientos y es más durable.



DESCRIPCIÓN

Este es un cemento pórtland con adición de puzolana natural y se clasifica como cemento para uso general en la construcción. Esto quiere decir que por las características propias de éste, puede ser utilizado en prácticamente todas las actividades típicas de la construcción, en especial en la fabricación de concreto premezclado, mezclado en obra y en la elaboración de morteros de diferentes tipos.

PRESENTACIONES



Sacos de 42.5kg



Granel



CARACTERÍSTICAS

Características	Normativa	Cempro
Tiempo de fraguado		
Vicat Inicial (minutos)	45 min	263.75
Vicat Final (minutos)	420 máx	385
Resistencia a la compresión (psi)		
1 día	NA	1661
3 días	1890 min	2770
7 días	2900 min	3511
28 días*	4060 min	4599
Resistencia a los sulfatos		
6 meses, % máximo	0.10	
Calor de hidratación (kJ/Kg)		
7 días máximo (MCH)	290	265
Expansión barra de mortero		
14 días %	.02 máx	0.006
56 días %	.02 máx	

*Resultados promedio de ensayos realizados a lotes producidos en el mes de junio del 2012. La resistencia de 28 días corresponde al mes anterior.

BENEFICIOS



Mayor resistencia mecánica.



Mayor impermeabilidad de lo que se lograría con un cemento portland ordinario.



Ofrece tiempos de fraguados controlados que facilitan su colocación en obra, sin afectar el desarrollo de resistencias y tiempos de desmolde.



Promueve una mayor retención de la humedad, generando mezclas más plásticas y trabajables que favorecen los procesos de colocación y acabados.



Moderado calor de hidratación, reduciendo el riesgo de fisuración y contribuyendo con una mejor apariencia y mayor durabilidad de las estructuras.



Moderada resistencia a los sulfatos, puede ser utilizado en obras expuestas al agua de mar, al ambiente marino o a suelos y aguas con moderado contenido de sulfatos.



Baja reactividad álcali-sílice con agregados reactivos, lo cual previene la expansión excesiva del concreto debido a la reacción entre los iones hidróxidos liberados de compuestos alcalinos, evitando así agrietamientos y desprendimientos del recubrimiento de las estructuras de concreto.

USOS

Las siguientes tablas son sugerencias de cómo utilizar los productos bajo condiciones controladas y agregados normalizados. Para lograr los resultados deseados, deben hacerse ensayos específicos a las mezclas que garanticen las propiedades físicas y químicas del producto final.

CONCRETOS

TIPOS DE CONCRETO	USOS	PROPORCIONES cemento : arena : pedrín	RESISTENCIA PSI libras por pulgada cuadrada por sus siglas en ingles	AGUA recomendada por saco
Baja Resistencia	Bases para desagües, rellenos, etc.	1 : 2.5 : 4	2,000 a 2,500	20 a 25 litros
Mediana Resistencia	Aceras, pisos, vías peatonales, etc.	1 : 2 : 3	2,500 a 3,000	20 a 25 litros
Buena Resistencia	Elementos estructurales: vigas, columnas, losas, etc.	1 : 2 : 2.5	3,000 a 3,500	20 a 25 litros
Alta Resistencia	Pavimentos, pisos de bodegas, etc.	1 : 1.5 : 2.5	3,500 a 4,000	20 a 25 litros

Es importante utilizar parigüella (cajas de 1 pie x 1 pie x 1 pie) dependiendo de los agregados.

MORTEROS

TIPOS DE CONCRETO	USOS	PROPORCIONES Cemento: Cal : Arena
M (Alta resistencia)	Cimentación, muros de contención etc.	1 : 1/4 : 3.5
S (Alta adherencia)	Adherentes, recubrimientos, etc.	1 : 1/2 : 4.5
N (Uso general)	Uso general.	1 : 1 : 6
0 (Baja resistencia)	Divisiones sin carga.	1 : 2 : 9

ACABADOS

TIPO DE RECUBRIMIENTO	CEMENTO	CAL	ARENA DE RÍO	ARENA BLANCA	ARENA AMARILLA
ENSABIETADO	1	1/4	4 a 6		
REPELLO	1/4	1			3 (1/4")
CERNIDO VERTICAL	1/8	1		2 (1/16")	
CERNIDO REMOLIN.	1/8	1		3 (1/16")	
ALISADO	1/8	1		1 (1/16")	

XI. GLOSARIO

- **Desecación:** Es el proceso de formación de grietas poligonales en el suelo compacto al perder el agua y la humedad
- **Eje de presa:** Línea definida por dos puntos en el espacio, en torno a la cual se desarrolla la construcción de la estructura que produce el embalse
- **Inyección:** Acción que consiste en introducir una sustancia a presión en el interior de un cuerpo.
- **Inyección ascendente:** Procedimiento el cual consiste en inyectar lechada o mortero desde la parte inferior de la perforación, hasta llegar a la parte superior de la misma.
- **Inyección descendente:** Procedimiento el cual consiste en inyectar lechada o mortero desde la parte superior de la perforación, hasta llegar a la parte inferior de la misma.
- **Inyección por manguitos:** Procedimiento el cual consiste en inyectar lechada o mortero en un determinado tramo de la perforación, utilizando válvulas auto retractables conocidas comúnmente como manguitos o manchete.
- **Macizo rocoso:** Forma en la que se presentan las rocas en el medio natural. Un macizo rocoso está compuesto por una o varias rocas que a su vez contiene diversas discontinuidades: planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues y otros caracteres estructurales.
- **Medio:** En este documento se refiere a las características o particularidades de una capa de suelo o roca.
- **Permeabilidad:** es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna.
- **Porosidad:** Es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total.

- Separación de fases: Separar las partículas sólidas de mayor tamaño de las de menor tamaño dispersas en otro sólido o en un líquido de un sistema heterogéneo.
- Tixotrópico: Es la propiedad de algunos fluidos que muestran un cambio de su viscosidad en el tiempo
- Tortuosidad: Es una característica que representa lo tortuoso de una curva, es decir, el grado de vueltas o rodeos que tiene.