

Inyecciones de Consolidación en Túneles Utilizando Lechadas de Cemento Estables

David Felipe Pazos Bernal

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Civil
Trabajo de Grado
Bogotá D.C
2020

Inyecciones de Consolidación en Túneles Utilizando Lechadas de Cemento Estables

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

David Felipe Pazos Bernal

Director:

Ing. Edgar Pazos Delgado

Asesorado por:

Ing. Carlos Torres Romero

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Civil
Trabajo de grado
Bogotá, D.C
2020

TABLA DE CONTENIDO

MARCO TEÓRICO	11
INTRODUCCIÓN	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
JUSTIFICACIÓN	13
OBJETIVOS	14
1.1 Objetivos generales	14
1.2 Objetivos específicos	14
FASE 1. CARACTERIZACIÓN DE LAS LECHADAS DE CEMENTO	
INYECTABLES	15
2. MÉTODO TRADICIONAL	15
3. CEMENTO PORTLAND	16
3.1 Definición	16
3.2 Propiedades químicas	16
3.3 Propiedades físicas y mecánicas	17
3.4 Hidratación del cemento	18
4. MEZCLAS RELACIÓN AGUA : CEMENTO	18
4.1 Clasificación de las mezclas	18
4.2 Mezclas líquidas	19
4.3 Mezclas de suspensión inestable	19
4.4 Mezclas de suspensión estable	19
5. MATERIALES BÁSICOS DE LECHADAS	20
5.1 Cemento portland	20
5.2 Agua	22
6. DOSIFICACIONES AGUA: CEMENTO	24
6.1 Definición relación lechada agua: cemento	24
6.2 El papel del agua en la lechada	24
6.3 Lechadas de cemento puro	26
7. MEZCLAS REFORZADAS CON ADITIVOS	27
7.1 Propiedades de las lechadas de cemento	28
7.2 Lechadas con aditivos fluidificantes	32
7.3 Mezclas de inyección de cemento- bentonita	34
7.4 Mezclas de inyección de cemento- silicato	35

7.5 Mezclas de inyección de cemento-bentonita-silicato.	35
7.6 Mezclas de inyección para tratamientos especiales.	36
8. IDENTIFICACIÓN DE ADITIVOS.	36
8.1 Aditivo bentonita fluidificante.	37
8.2 Aditivos acelerantes.	38
8.3 Aditivo cloruro de calcio.	39
8.4 Aditivo silicato de sodio.	40
8.5 Aditivo carbonato de sodio.	40
8.6 Aditivos plastificantes y/o reductores.	40
9. ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE LECHADAS DE CEMENTO.	41
9.1 Método de la prueba de viscosidad.	41
9.2 Ensayo de exudación de la mezcla Norma ASTM C940.	42
9.3 Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada. Norma (ASTM standard C/109C /109M).	44
9.4 Ensayo de gravedad específica.	45
FASE 2. MODELO GEOMECÁNICO DE LAS ROCAS INYECTABLES	46
10. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA.	46
11. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS FRACTURADAS.	50
11.1 Método del RQD.	51
11.2 Método de RMR.	52
11.3 Método de "Q system".	55
11.4 Método GSI.	57
12. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA EN TÚNELES.	60
12.1 Objetivos de la caracterización geotécnica.	60
12.2 Cartografía geológica.	61
12.3 Estudio de fracturación.	62
12.4 Estudio hidrogeológico.	63
12.5 Técnicas geofísicas.	63
12.6 Sondeos.	64
13. MECANISMOS DE CARGA.	64
13.1 Esfuerzos alrededor de la excavación de un túnel.	66
13.2 Método de arco de carga.	68
FASE 3. TRATAMIENTO CON INYECCIONES DE CONSOLIDACIÓN.	70
14. MÉTODO DE ENGROSAMIENTO SUCESIVO.	70
15. INYECCIÓN POR ETAPAS.	71

15.1 Etapa simple.....	71
15.2 Etapa descendente con obturador.....	73
15.3 Etapa ascendente con obturador.....	75
16. PROCESO DE INYECCIÓN.....	78
16.1 Paso 1. Preparación de la mezcla.....	78
16.2 Paso 2. Agitación de la mezcla.....	79
16.3 Paso 3. Inyección del hueco.....	79
17. PRESIÓN DE INYECCIÓN.....	81
17.1 Criterios básicos.....	81
17.2 Presiones de inyección permitidas.....	82
18. TASA DE INYECCIÓN.....	83
18.1 Escenarios durante el proceso.....	83
19. CORTINAS Y ABANICOS DE INYECCIÓN.....	87
19.1 Tratamiento de pos consolidación.....	87
19.2 Tratamiento preconsolidación.....	92
20. ANÁLISIS REOLÓGICO.....	94
20.1 Factores que influyen en la efectividad de la lechada.....	95
20.2 Proceso de mezcla de lechada.....	98
20.3 Bachadas de lechada.....	99
21. PRUEBAS DE LUGEON.....	100
21.1 Prueba de exploración simple.....	102
21.2 Prueba de exploración modificada.....	104
22. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS PRUEBA MODIFICADA.....	105
22.1 Caso 1. Flujo laminar.....	105
22.2 Caso 2. Flujo turbulento.....	106
22.3 Caso 3. Dilatación de fracturas.....	106
22.4 Caso 4. Lavado del material relleno de diaclasas.....	107
22.5 Caso 5. Obstrucción con material de relleno de las diaclasas.....	107
23. MAQUINARIA Y EQUIPO.....	108
23.1 Planta dosificadora de mezclas.....	108
23.2 Bombas de inyección de lechadas.....	111
23.3 Perforación.....	112
23.4 Taladro manual neumático.....	115
24. LÍNEAS DE CIRCULACIÓN.....	116
24.1 Sistema de inyección con retorno.....	116

24.2 Sistema de inyección sin retorno.	118
25. EQUIPOS DE MEDICIÓN.	119
25.1 Medidores de flujo.	119
25.2 Medidores de presión.	120
25.3 Obturadores.	122
26. CONCLUSIONES.	123
27. BIBLIOGRAFÍA.	127

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Compuestos principales del cemento portland	16
Tabla 2 Propiedades físicas y mecánicas del cemento portland	17
Tabla 3 Composición típica (%) del cemento portland. Norma ASTM C150.....	22
Tabla 4 Algunos ejemplos de mezclas gruesas únicas utilizadas en presas y túneles importantes.....	33
Tabla 5 Propiedades típicas de relaciones agua:cemento:bentonita	35
Tabla 6 Efecto de la bentonita en el sangrado	38
Tabla 7 Clasificación de la roca según el índice RQD	52
Tabla 8 Clasificación geomecánica del macizo rocoso con el índice RMR	54
Tabla 9 Soportes para un tunel de 10 m de luz.	55
Tabla 10 Definición de parámetros para método Q System (índice Q).....	56
Tabla 11 Clasificación de roca vs índice Q	57
Tabla 12 Clasificación del valor del GSI.....	60
Tabla 13 Indicadores de calidad. Método RMR	71
Tabla 14 Valores característicos de una dosificación en volumen. Una bolsa de cemento.....	99
Tabla 15 Valores característicos de una dosificación en volumen. Dos bolsas de cemento .	100
Tabla 16 Modelos típicos de mezcladores	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desarrollo de resistencias de cada componente del cemento	18
Figura 2. Formas de mezclado de lechadas	24
Figura 3. Efectos de lechadas de cemento vs resistencia a la compresión	26
Figura 4. Viscosidad y Velocidad de sedimentación de cementos basados en suspensiones..	27
Figura 5. Modelo reológico. Cuerpos Newtonianos (1). Cuerpos Binghamianos(2)	29
Figura 6. El concepto de tixotropía.....	30
Figura 7. Comparación tixotrópica entre varias mezclas de lechada de cemento	31
Figura 8. Velocidad de distribución de la lechada en una fisura	31
Figura 9. Dimensiones del Cono de Marsh.....	42
Figura 10. Porcentaje de agua de sangrado que sale de las lechadas de varias proporciones agua: cemento	43
Figura 11. Molde triple para cubos de cemento.....	44
Figura 12. Probetas y ensayo de resistencia a la compresión de lechadas de cemento	44
Figura 13. Balanza de lodos y lechadas de cemento	45
Figura 14. Gravedad específica teórica de lechadas agua: cemento	46
Figura 15. Esquina de formas de diaclasas	47
Figura 16. Representación de las familias de las discontinuidades	48
Figura 17. Medición de la orientación de las discontinuidades	48
Figura 18. Proceso para la estimación del RQD	51
Figura 19. Trozos típicos de testigos de más de 10 cm de longitud	51
Figura 20. Túnel atravesando formaciones con buzamiento	65
Figura 21. Túnel en rocas diaclasadas, con buzamiento vertical	65
Figura 22. Trayectoria de esfuerzos en un túnel de sección circular	66
Figura 23. Deflexión de líneas de flujo alrededor de un túnel con sección circular.....	68
Figura 24. Efecto arco en una excavación subterránea (Túnel en roca)	69
Figura 25. Etapa de Inyección Simple	71
Figura 26. Circuito de Inyección Etapa Simple.....	73
Figura 27. Etapas de Inyección Descendente	74
Figura 28. Circuito de Inyección Descendente	75
Figura 29. Etapas de Inyección Ascendente	76
Figura 30. Circuito de Inyección Ascendente.....	77
Figura 31. Proceso de Inyección de Consolidación	78
Figura 32. Esquema de inyección típico para un hueco de Anillo radial	80
Figura 33. Presiones de inyección permitidas.....	82
Figura 34. Escenario de pérdida repentina de presión durante el proceso.....	83
Figura 35. Disminución gradual de la tasa de inyección	84
Figura 36. Aumento y disminución gradual de la tasa de inyección	85
Figura 37. Posconsolidación Cortina Radial.....	88
Figura 38. Abanico de Inyecciones tipo radial en Nicho.....	90
Figura 39. Túnel de Sección Grande con sistema de Abanicos de Inyecciones Radiales utilizando un equipo Jumbo con plataforma móvil.....	91
Figura 40. Sistema de Preconsolidación Abanico de Inyecciones Proyecto Túnel, Patrón repetitivo.....	92

Figura 41. Preinyecciones laterales al frente de excavación.....	93
Figura 42. Variación del (%) Exudación vs (%) de Bentonita en Lechadas (A: C)	95
Figura 43. Variación del (%) Viscosidad vs (%) de Bentonita en Lechadas (A: C).....	96
Figura 44. Resistencia a la Compresión Inconfinada con diferentes dosificaciones de lechadas a:c y % de bentonita	98
Figura 45. Esquema simplificado para la prueba de Lugeon.....	101
Figura 46. Caso 1. Pruebas de agua en huecos de inyección. Tomas de agua análogas.....	102
Figura 47. Caso 2. Pruebas de agua en huecos de inyección. Obstrucción de fracturas.....	102
Figura 48. Caso 3. Pruebas de agua en huecos de inyección. Tomas de agua en aumento ...	103
Figura 49. Prueba de lugeon. Caso flujo laminar.....	105
Figura 50. Prueba de lugeon. Caso flujo turbulento.	106
Figura 51. Prueba de lugeon. Caso dilatación fracturas.....	106
Figura 52. Prueba lugeon. Caso lavado de diaclasas	107
Figura 53. Prueba de lugeon. Caso obstrucción con rellenos	107
Figura 54. Planta móvil de Lechada. Hany HCM500. Con Agitador y mezclador de alta turbulencia y cizallamiento.	108
Figura 55. Tolla cónica y rotor mezclador. Hany HCM.	109
Figura 56. Tanque agitador	110
Figura 57. Equipo dispensador de aditivos. Hany HCM.	111
Figura 58. Bomba Neumática tipo pistón.	112
Figura 59. Bomba de cavidad progresiva.	112
Figura 60. Taladro Jumbo hidráulico de percusión rotación.	113
Figura 61. Máquina perforadora. Tomada de: Manual de perforación y voladura de rocas..	114
Figura 62. Proceso percusión – rotación y barrido.	115
Figura 63. Taladro Jack leg neumático.	116
Figura 64. Línea de circulación de lechada con retorno.	117
Figura 65. Técnico en control de línea de circulación con retorno.....	118
Figura 66. Línea de circulación sin retorno	118
Figura 67. Medidor de flujo y presión.	120
Figura 68. Medidor de presión.....	121
Figura 69. Obturador neumático.....	122
Figura 70. Obturador mecánico.	123

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Cálculo RMR	53
Ecuación 2 Definición de método Q System	55
Ecuación 3 Cálculo de índice RMR.....	58
Ecuación 4 Cálculo de índice de calidad corregido Q´	58
Ecuación 5 Cálculo de valor GSI.....	59
Ecuación 6 Cálculo de GSI, conociendo el índice RMI	59
Ecuación 7 Cálculo del valor de Lugeon	104

MARCO TEÓRICO

El este documento se plantean los argumentos básicos que son necesarios para el tratamiento de inyecciones de lechadas de cemento en macizos rocosos direccionados en este caso a las obras subterráneas. Así mismo la comprensión de los conceptos técnicos básicos que se deberán tener en cuenta para el diseño de las mezclas de cemento a utilizar en la construcción de túneles en macizos rocosos.

El desarrollo de la investigación del tema se basa inicialmente en aportar el conocimiento de los componentes básicos para la elaboración de las lechadas de cemento , el uso de los aditivos que son necesarios para el reforzamiento de las mezclas propuestas para una correcta ejecución de las inyecciones de consolidación y el proceso de estudio de laboratorio sobre muestras que son el complemento final para conceptuar que tipo de diseño de lechada es la más adecuada para usar en problemas específicos que se presentan durante y después de una excavación subterránea.

INTRODUCCIÓN

El presente documento enseña los lineamientos técnicos para desarrollar un proyecto de inyecciones de consolidación en túneles, utilizando esencialmente lechadas estables, a partir de una investigación teórica y a través de información de proyectos hidroeléctricos históricos en donde se desarrollaron e implementaron las metodologías técnicas que aquí se presentan.

Así mismo se explican los métodos técnicos para la elaboración de los diseños de las mezclas de lechadas estables con el acompañamiento de pruebas de laboratorio de viscosidad, exudación, gravedad específica y resistencia a la compresión.

Por otra parte, se presenta la información geológica de las rocas, la clasificación y la caracterización geotécnica en las excavaciones subterráneas a partir del reconocimiento geotécnico previo del túnel y los mecanismos de carga relevantes para interpretar la

importancia de desarrollar un proyecto de inyecciones de consolidación en la construcción de una obra subterránea.

Igualmente se muestra el paso a paso para efectuar el tratamiento con inyecciones de lechadas de cemento haciendo referencia a los sistemas de inyección, a las pruebas de Lugeon, con inclusión de los equipos de perforación, las plantas del bachado de las mezclas, equipos agitadores, equipos de bombeo de las mezclas, equipos menores y medidores de flujo y de presión.

La conformación del documento se realizó a partir de la siguiente manera:

- ✓ Fase 1. Caracterización de lechadas de cemento
- ✓ Fase 2. Modelo geomecánico de las rocas inyectables.
- ✓ Fase 3. Tratamiento con inyecciones de consolidación.

Al final del escrito se presenta la lista de referencias que permitieron el desarrollo del presente documento, así mismo se incluye la lista de figuras y tablas respectivas.

RESUMEN

El documento muestra información técnica, referente al tratamiento con inyecciones de consolidación para utilizarlas en la construcción de obras subterráneas.

Se presenta las metodologías técnicas para investigar diseños de lechadas de cemento estables a través de pruebas de laboratorio (viscosidad, cohesión, resistencia), usando mezclas reforzadas con aditivos fluidificantes y acelerantes que son incorporados a las diferentes relaciones de lechadas agua: cemento.

Se muestra el modelo geomecánico de las rocas inyectables a través de un reconocimiento previo del terreno en donde se investiga las características y clasificación de las rocas fracturadas, el reconocimiento geotécnico y los mecanismos de carga en donde se explica el modelo de deformación de un túnel posterior a la excavación.

Se presenta el tratamiento de las inyecciones de consolidación, con inclusión de los sistemas actuales de inyección, de los equipos de perforación, equipos de inyección y equipos menores utilizados durante el proceso.

ABSTRACT

The document shows technical information, regarding the treatment with consolidation injections for use in the construction of underground works.

The technical methodologies to investigate stable cement slurry designs are presented through laboratory tests (viscosity, cohesion, and resistance), using mixtures reinforced with fluidizing and accelerating additives that are incorporated into the different ratios of water slurries: cement.

The geomechanical model of the injectable rocks is shown through a previous recognition of the terrain where the characteristics and classification of the fractured rocks, the geotechnical recognition and the loading mechanisms where the deformation model of a posterior tunnel is explained is investigated to the excavation.

The treatment of consolidation injections is presented, including current injection systems, drilling equipment, injection equipment and minor equipment used during the process.

JUSTIFICACIÓN

Los inconvenientes técnicos asociados con la presencia de macizos rocosos inestables durante la excavación de túneles ha sido con frecuencia la problemática de la ingeniería, no solo por mantener la estabilidad del túnel durante la excavación sino posteriormente para garantizar la estabilidad del túnel en condiciones de trabajo.

La investigación de “Lechadas de cemento estables” y su utilización en las inyecciones de consolidación en túneles excavados en roca permitirá el conocimiento

profundo y exhaustivo de las metodologías tradicionales y técnicas para la elaboración de lechadas de cemento reforzadas con aditivos y el uso en la consolidación de macizos rocosos que hacen parte integral en la estabilidad y construcción de túneles en rocas.

Por otra parte, los conocimientos adquiridos permiten contribuir con las investigaciones de la ingeniería geotécnica con respecto a la caracterización de las mezclas y a los procedimientos para la ejecución de cortinas y abanicos de inyección enfocados a buscar la permeabilidad, la capacidad y estabilidad del autoaporte de túneles excavados en roca.

OBJETIVOS

1.1 Objetivos generales

Desarrollar los aspectos teóricos referentes al tratamiento de macizos rocosos con inyecciones de consolidación en excavaciones subterráneas, analizando la estructura de los macizos excavados en túneles, haciendo énfasis en su naturaleza, comportamiento, discontinuidades y la importancia del tratamiento de estos con inyecciones de consolidación, estudiando su estabilidad y comportamiento físico. Además, valorar su importancia y sus aplicaciones en proyectos de infraestructura hidráulica en Colombia, debido a que es un sistema usual en los proyectos de gran magnitud, como lo son las centrales hidroeléctricas. Así mismo, el propósito es investigar de manera detallada en que momentos se presenta la necesidad de recurrir a este tipo de tratamientos en los túneles.

1.2 Objetivos específicos

- Presentación de las normas técnicas vigentes con referencia a la ejecución principalmente de las siguientes pruebas de laboratorio: Viscosidad, Exudación y resistencia a la compresión inconfinaada.

- Identificar y exponer los equipos, procedimientos y métodos utilizados con referencia a la ejecución de las inyecciones de consolidación en túneles excavados en roca.
- Precisar los tipos y la caracterización del terreno del túnel que cumplen con las condiciones para el tratamiento con inyecciones de consolidación y definir las profundidades y espaciamiento de las cortinas de inyección con base en la geometría de la sección y la caracterización geológica de los macizos rocosos.
- Investigar el comportamiento de las lechadas con la utilización de aditivos y conocer los criterios que definen la estabilidad de las mezclas con agua : cemento.

FASE 1. CARACTERIZACIÓN DE LAS LECHADAS DE CEMENTO INYECTABLES.

2. MÉTODO TRADICIONAL.

El método tradicional o método convencional americano es utilizado en túneles y presas, consiste en la consolidación de macizos rocosos a través de inyecciones de lechadas de cemento, utilizando mezclas estables de cemento-bentonita, entre 3 a 4 dosificaciones con viscosidad creciente hasta llegar al rechazo por presión máxima de la inyección o volumen máximo de mezcla admitida. Generalmente se inicia con lechadas (agua : cemento) delgadas tipo 2:1 (en volumen) , y posterior el engrosamiento de las mezclas con el seguimiento de ensayos de laboratorio en el cambio de las propiedades reológicas de las mezclas (Fernandez, 2015) .

A diferencia de otras alternativas (a modo de información), como el método europeo o método Gin, la inyección de consolidación en los grandes macizos rocosos se hace con una lechada estable en base de solo cemento y con una sola dosificación, de tal manera que la lechada tiene viscosidad definida y finaliza la inyección con la curva Gin; que se aplica usualmente en rocas homogéneas (Fernandez, 2015) .

3. CEMENTO PORTLAND.

3.1 Definición.

El cemento es un material con presentación en forma de polvo que está compuesto químicamente por sílice, óxido de hierro, óxido de calcio y alúmina y sirve para formar pastas de cemento con adiciones apropiadas de agua y se endurece con el agua y el aire y además tiene la característica de integrar agregados estables. Así mismo es el material más importante en la elaboración de las lechadas de cemento y por consiguiente es concluyente conocer sus componentes químicos y su interacción con el agua y aditivos para la elaboración y designación de las mezclas estables (Rivera, Materiales Conglomerantes, 2010).

3.2 Propiedades químicas.

Estos compuestos químicos que se usan en la fabricación del cemento interactúan en los hornos rotatorios del proceso de producción para formar otros productos más complejos que logran definir un estado de equilibrio químico. (Guzmán, 2000)

A continuación, se muestran los compuestos químicos principales del cemento (véase tabla 1), su notación comprimida y las proporciones típicas de cada uno de los componentes:

Tabla 1
Compuestos principales del cemento portland

Nombre	Formula química	Notación abreviada	Proporciones típicas
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	50-60%
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	24%
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	11%
Ferritoaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8%

Recuperado de Dan Foundation grouting (Fuente:Weaver, 2007)

3.3 Propiedades físicas y mecánicas.

Las propiedades físicas y mecánicas del cemento son un complemento de las propiedades químicas y en la tabla 2 se muestran las características más importantes de cada uno de sus componentes. (Guzmán, 2000)

Tabla 2
Propiedades físicas y mecánicas del cemento portland

Propiedad	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Resistencia	Buena	Buena	Pobre	Pobre
Intensidad de reacción	Media	Lenta	Rápida	Rápida
Calor desarrollado	Medio	Pequeño	Grande	Pequeño
Resistencia a los sulfatos	Buena	Buena	Pobre	Media

Recuperado de Tecnología del concreto y del mortero (Fuente: Guzmán, 2000)

Las propiedades y caracterización del cemento se pueden determinar a través de ensayos de laboratorio ampliamente reconocidos en las normas ASTM y se presentan a continuación los más relevantes para el estudio de las mezclas de lechadas para inyecciones (Guzmán, 2000):

- Peso específico (Densidad). **Norma ASTM C188-95.**
- Superficie específica (Finura). **Norma ASTM C204.**
- Consistencia normal. **Norma ASTM C187-98.**
- Fraguado del cemento. **Norma ASTM 191.01 (Vicat).**
- Resistencia a los sulfatos. **Norma ASTM C452.**
- Resistencia a la compresión inconfina. **Norma ASTM C109.**

3.4 Hidratación del cemento.

Proceso de hidratación del cemento.

El componente químico C_3S (silicato cálcico), es el que contribuye a la obtención de una mayor resistencia mecánica y así mismo aporta una mayor velocidad y calor de hidratación. Esto significa que el proceso de fraguado es más rápido. A continuación, se muestra en la figura No 1 cómo es el desarrollo de las resistencias de cada componente.

(Silva, 2017)

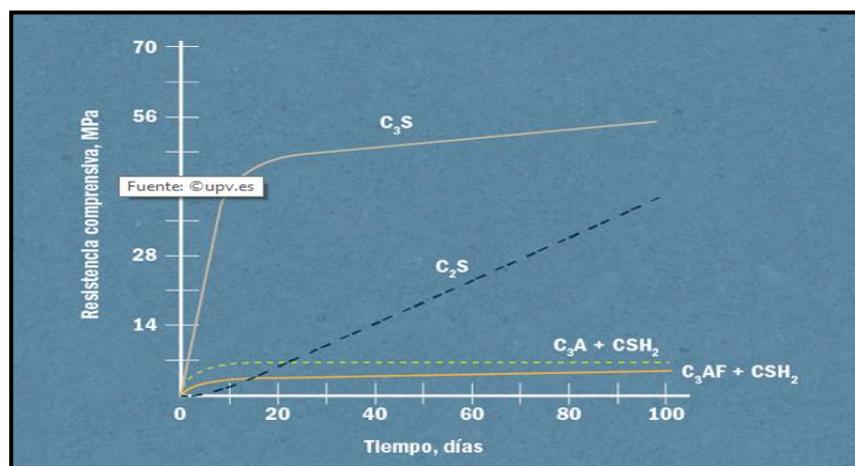


Figura 1. Desarrollo de resistencias de cada componente del cemento (fuente: Silva, 2017)

4. MEZCLAS RELACIÓN AGUA : CEMENTO.

4.1 Clasificación de las mezclas.

Las mezclas empleadas en inyecciones de consolidación anillos y/o cortinas para impermeabilización de macizos rocosos, se clasifican en tres categorías.

- 1.1 Líquidas.
- 1.2 Suspensiones inestables.
- 1.3 Suspensiones estables.

(Cambefort, 1999, p. 36)

4.2 Mezclas líquidas.

Las mezclas líquidas son referidas a los fluidos químicos que son utilizables en casos especiales en donde es necesario endurecer materiales rocosos de características friables y que se presentan durante una excavación subterránea. Su presentación se caracteriza de la siguiente forma (Cambefort, 1999, p. 36):

- Geles duros.
- Geles plásticos.

4.3 Mezclas de suspensión inestable.

Las lechadas inestables, son simplemente suspensiones de agua/cemento en proporciones volubles, que una vez termine el proceso de agitación de la mezcla aparece la sedimentación con indicadores muy bajos para ser utilizables en inyecciones de consolidación; en consecuencia, es necesario reforzar estas lechadas con aditivos para lograr la estabilización de la mezcla. (Cambefort, 1999, pp. 36-37).

Entre las mezclas inestables se tiene las siguientes:

- **Suspensiones de cemento puro:**
 $A/C = 0.5/1, 1/1, 2/1, 3/1$
- **Suspensiones de cemento rebajado:** se sustituye parte del cemento por un polvo inerte como puede ser arena fina, cenizas volantes.

(Mejora del Terreno, 2013, p. 561)

4.4 Mezclas de suspensión estable.

Las lechadas estables son logradas diluyendo lodos de arcilla en agua, en combinación hecha por tanteo con dosificaciones de agua: cemento, las cuales se someten a periodos de agitación hasta obtener muestras estables dentro de los rangos técnicos establecidos y que se

puedan utilizar en los procesos de la consolidación de los macizos rocosos que es la materia que nos interesa. (Cambefort, 1999, p. 37).

En este tipo de mezclas no se evidencia la sedimentación en el proceso de la inyección y no se produce un efecto bóveda en los puntos críticos de la zona rocosa. Existen tres tipos de mezclas estables, las cuales son: (Valcarce, 2000)

- Bentonita-Cemento.
- Cemento- Silicato.
- Cemento-Bentonita-silicato.

5. MATERIALES BÁSICOS DE LECHADAS.

5.1 Cemento portland.

- **Tipos del cemento portland.**

De acuerdo con la Norma ASTM C150, se reconocen 8 tipos de cemento que son utilizables para la elaboración de las lechadas para inyecciones.

- El tipo I es el cemento de uso general para uso en la mayoría de las aplicaciones de lechada en las que no se requieren las propiedades especiales de otros tipos (por ejemplo, resistencia al sulfato o bajo calor de hidratación).
- El Tipo II está fabricado para resistir el ataque moderado de sulfato y para generar una tasa de calor de hidratación más lenta y más baja que la exhibida por el Tipo I.
- El Tipo III está diseñado para su uso en aplicaciones para las que se desea una resistencia temprana relativamente alta. El tamaño de partícula del Tipo III es notablemente más pequeño que el de los otros tipos. (Los tipos I y II tienen una finura de Blaine de aproximadamente 3,700 cm² / g, mientras que el tipo III tiene una finura de aproximadamente 5,400 cm² / g.) Como señaló Melbye (1993), el cemento tipo III a menudo se especifica para la lechada de masas de roca porque su relativa finura

facilita la inyección y penetración en roca fracturada que podría resultar difícil de aplicar con lechada con éxito con lechada formulada con cemento Tipo I o II.

- El tipo IV genera menos calor durante la hidratación que el tipo II y desarrolla resistencia a una velocidad mucho más lenta que el tipo I. Se considera para su uso en grandes ubicaciones de lechada de gran masa cuando las altas temperaturas resultantes del calor de hidratación no son aceptables.

- El tipo V se usa cuando hay alto contenido de sulfato en aguas subterráneas.

(Weaver, 2007, p. 94)

Finalmente, se puede observar que el cemento portland tipo 2 rebaja la cantidad de silicato tricálcico y de aluminato tricálcico, puesto que son los dos compuestos que tienen individualmente mayor calor de hidratación; además, al reducir el aluminato tricálcico, sus cualidades frente a los sulfatos mejoran notablemente. Véase Tabla No 3.

Tabla 3
Composición típica (%) del cemento portland. Norma ASTM C150

	Tipo de cemento				
	I	II	III	IV	V
Notación abreviada					
C_3S	50	45	60	25	40
C_2S	25	30	15	50	40
C_3A	12	7	10	6	4
C_4AF	8	12	8	12	10
Medición					
Área superficial específica cm^2/g	3500	3500	4500	3000	3500
Fuerza compresiva (1 day, Mpa)	7	6	14	3	6
Calor de hidratación (7days, J/g)	330	250	500	210	250

Recuperado de Dan Foundation Grouting (Fuente: Weaver, 2007)

5.2 Agua.

- **Especificaciones básicas.**

El componente más utilizado de una mezcla de lechada es el agua. Como regla general, el agua utilizada para el proceso de mezclado siempre debe estar libre de materia orgánica o partículas que puedan contribuir de manera física o química al rechazo prematuro de un agujero o al posterior deterioro de la mezcla cuando se fragua.

Idealmente, debería estar libre de sales potencialmente nocivas, como los sulfatos. Estas sales pueden crear problemas a corto y largo plazo con la lechada o el proceso de lechada. En este sentido, una tabulación del comité ACI (1985) indica que un contenido de

sulfato de hasta 150 ppm se considera una exposición "leve", que no requiere ningún tipo especial o mezcla de cemento.

Además, el agua que contiene cloruros no se usa normalmente en la práctica de la ingeniería geotécnica. Los límites más altos permitidos para las concentraciones de cloruro pueden ser aceptables para las operaciones de lechada en las que la lechada no estará en contacto con estructuras de acero.

Parte del agua no apta para beber puede ser adecuada para su uso en lechadas. De tal forma que se estipula que en ausencia de agua potable, el suministro de agua aceptable deberá contener menos de 500 ppm de iones de cloruro y ningún material orgánico.

El agua potable normal es preferible; cualquier otra agua debe analizarse para detectar la presencia de material nocivo.

Con respecto al efecto de la temperatura, nuestros estudios nos dicen que la velocidad de reacción química aumenta sustancialmente con la temperatura de los componentes, dentro de los rangos normales de operación asociados con la lechada de cemento.

Como ilustración, los estudios realizados en la Universidad Northwestern demostraron que un aumento en la temperatura del agua de mezcla de 5 ° C a 35 ° C (41-95 ° F) puede causar un aumento de cinco veces en el estrés de cementación, con la mayoría del cambio ocurriendo entre 20 ° C y 35 ° C (68-95 ° F).

Teniendo en cuenta la proporcionalidad directa entre el límite elástico ("cohesión") y la temperatura, parece razonable inferir que, al enlechar rocas finamente fracturadas, se puede obtener una ventaja potencialmente significativa si la temperatura del agua de mezcla puede ser mantenido por debajo de 25 ° C (77 ° F). (Weaver, 2007, p. 89)

6. DOSIFICACIONES AGUA: CEMENTO.

6.1 Definición relación lechada agua: cemento.

Esencialmente, la lechada de cemento, o lodo, es una mezcla de cemento y agua. Es una regla bien establecida en la tecnología del concreto definir la relación A / C que es "agua a cemento" en peso (por ejemplo, $A / C = 0.5$: significa 0.5 kg de agua añadida a 1.0 kg de cemento. (Véase figura 2), considerando así el cemento como la base de la mezcla. Sin embargo, en las prácticas de inyecciones de lechadas la relación ocasionalmente se dosifica en volumen de sus componentes. (Lombardi, 2002, p. 5)

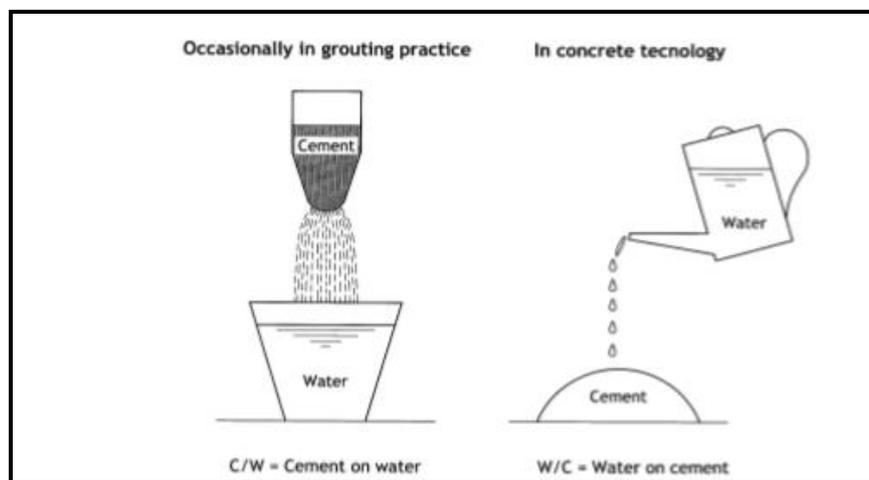


Figura 2. Formas de mezclado de lechadas(fuente: Lombardi, 2002)

6.2 El papel del agua en la lechada.

- La discusión sobre el tipo de lechada a usar "gruesa o delgada" es bastante antigua. Básicamente las diferencias investigadas en los conceptos se deben a los diversos roles que se supone que juega el agua durante el proceso de consolidación.

- El primer papel del agua es hidratar el cemento, y obviamente no hay discusión sobre la necesidad de esta primera cantidad de agua (digamos $A / C = 0.3$ a 0.4).
- Una segunda función, lograda con adición de agua, es producir una mezcla fluida con cohesión y viscosidad reducidas para que la lechada pueda propagarse en los agrietamientos de la masa rocosa. Sin embargo, esta función también puede ser asumida, al menos parcialmente, por algunos aditivos como los plastificantes. Sin embargo, un adicional de, digamos, $A / C = 0.3$ es necesario y bastante normal (dependiendo del valor de Blaine). El alcance de esta cantidad adicional de agua es, de hecho, evitar el contacto directo entre las partículas de cemento individuales y, por lo tanto, la acumulación de una fricción interna en la suspensión. Esta fricción causaría una presión exponencialmente creciente a lo largo del agrietamiento para detener de inmediato la progresión de la suspensión.
- Una tercera cantidad de agua en la mezcla está destinada a compensar las posibles pérdidas de agua durante el proceso de consolidación debido, por ejemplo, a la absorción de agua por una roca seca. No es posible estimar la cantidad de agua requerida para esta función. Sin embargo, este riesgo no existe debajo del nivel freático y se puede eliminar por encima saturando adecuadamente la masa rocosa justo antes de que comience la lechada.
- Una función adicional atribuida al agua es la de un "abridor de fisuras" para facilitar la penetración de la lechada en grietas delgadas. Pero, esta función puede ser asumida nuevamente por el agua subterránea existente o el agua de saturación, que se presionará automáticamente en las juntas frente a la

lechada, sin tener que ser incluida en la lechada y, por lo tanto, sin afectar sus propiedades.

(Lombardi, 2002, p. 6)

6.3 Lechadas de cemento puro.

El agua utilizada en exceso de la cantidad necesaria para la hidratación se agrega para que la lechada sea lo suficientemente fluida como para ser inyectada. Como se muestra en la Figura 3, tales lechadas limpias son inestables en relaciones (agua: cemento) menores de aproximadamente 0,45 (en peso). (Weaver, 2007, p. 166)

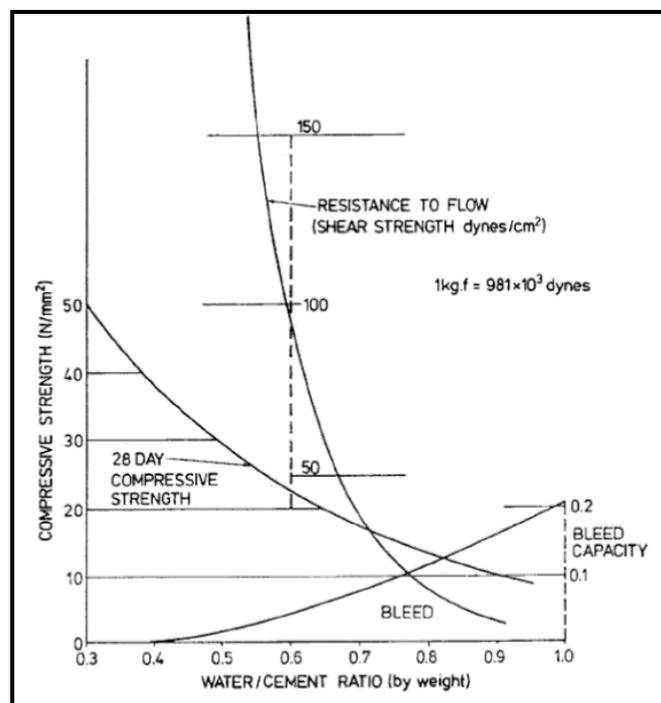


Figura 3. Efectos de lechadas de cemento vs resistencia a la compresión (Fuente:Weaver, 2007)

En relación con la lechada de masa de roca, ha sido tradicional usar contenidos de agua mucho más altos para reducir la reología de la lechada y, por lo tanto, conceptualmente, mejorar la penetrabilidad.

Los datos de sangrado, de viscosidad se pueden observar en la Figura 4. A partir de estos datos, se concluyó que “las propiedades más favorables de flujo y sedimentación de las

suspensiones ocurren con relaciones agua: cemento entre 1.0 y 1.5 (en peso). En la figura 4 el 1, corresponde a los valores de la viscosidad, el 2 representa la velocidad de sedimentación y el 3 muestra la relación agua: cemento. (Weaver, 2007, p. 168)

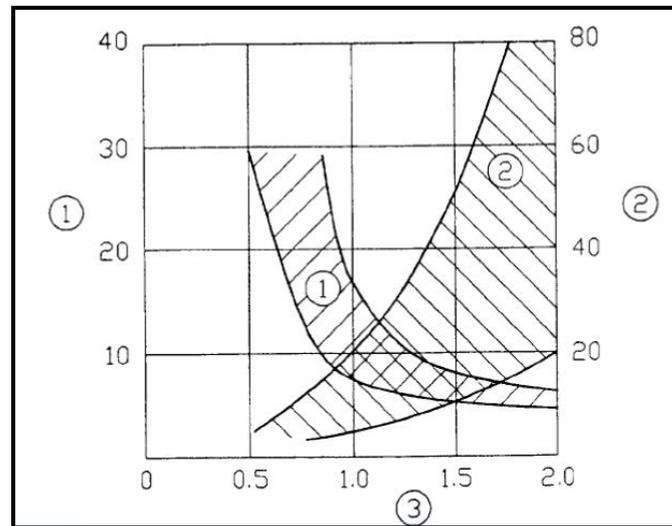


Figura 4. Viscosidad y Velocidad de sedimentación de cements basados en suspensiones (Fuente:Weaver, 2007)

Por todas estas razones, las lechadas deben tener estabilidad de fluidos y durabilidad a largo plazo. Los aditivos y las sustituciones de cemento son extremadamente valiosos para modificar las propiedades de los fluidos, pero el hecho es que el contenido de agua de una lechada es el control más importante sobre su comportamiento a corto y largo plazo. (Weaver, 2007, p. 169)

7. MEZCLAS REFORZADAS CON ADITIVOS.

Se presenta una gran variedad de aditivos para fluidos de inyecciones, que son usados para desarrollar funciones específicas dadas en el diseño y en la estabilidad de las lechadas de cemento. Sus variedades y dificultades es definida de acuerdo a las condiciones solicitadas en cada proceso de inyección (Laura, 2010).

7.1 Propiedades de las lechadas de cemento.

Las propiedades de las lechadas de cemento, están definidas en la siguiente manera:

- **Propiedades reológicas.**
 - Viscosidad
 - Cohesión
 - Fricción interna
- **Propiedades físicas.**
 - Exudación
 - Finura: superficie específica Blaine.
 - Resistencia

(Fernandez, 2015).

La reología de una lechada es un estudio muy complejo, pero que se puede caracterizar por tres parámetros: viscosidad, cohesión y fricción interna. Las partículas de cemento actúan en forma fisicoquímica abrupta para producir estas propiedades. A presiones de lechada equivalentes, anchuras de fractura y tamaños de partículas de lechada, la viscosidad controla la velocidad de penetración (y, por lo tanto, el tiempo de lechada), y la cohesión controla la presión interna requerida para iniciar o reiniciar el flujo de lechada. La cohesión también controla la distancia máxima de penetración. La fricción interna entre los componentes sólidos, cuando sea suficientemente alta, causará bloqueos de la fisura que se inyecta debido al aumento exponencial de la presión requerida para el movimiento. Estos comentarios se aplican a una mezcla viscoplástica estable e implican lógicamente que controlar la reología de una lechada al reducir la cohesión inicial y retrasar su aumento con el tiempo mejorará significativamente la penetrabilidad. Sin embargo, a diferencia del caso simple de una lechada de solución, cuya penetrabilidad depende casi por completo de la

viscosidad, las lechadas de cemento tienen muchos controles complejos sobre la penetrabilidad.

Dependiendo de su composición, las lechadas pueden comportarse como fluidos newtonianos o binghamianos, cuyo comportamiento se ilustra en la Figura 5. En fluidos newtonianos, el esfuerzo de corte (es decir, la fuerza requerida para mover el líquido) está directamente y solo relacionado con el gradiente de corte (o viscosidad dinámica). En contraste, los fluidos de Bingham muestran cohesión (también conocida como valor de rendimiento de Bingham, límite de flujo, tixotropía o resistencia al corte, además de la viscosidad dinámica plástica. (Weaver, 2007, p. 138)

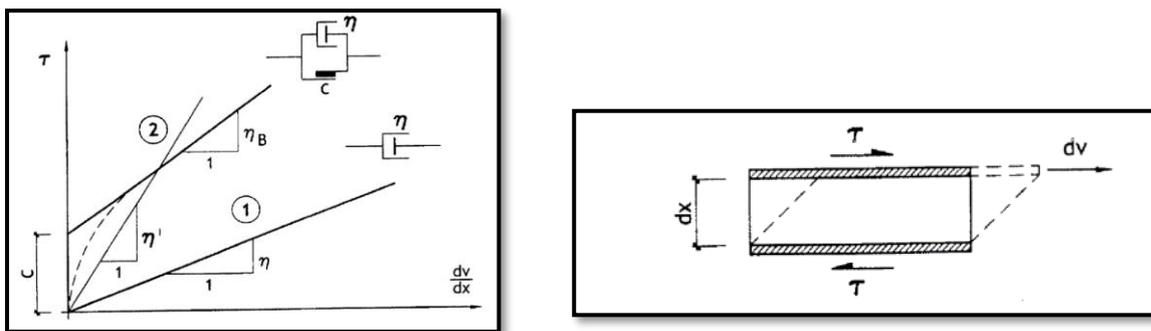


Figura 5. Modelo reológico. Cuerpos Newtonianos (1). Cuerpos Binghamianos(2) (Fuente:Weaver, 2007)

El agua y soluciones verdaderas, se comportan como fluidos newtonianos, mientras que los HMG estables se comportan como fluidos de Bingham. La viscosidad (es decir, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte) en los fluidos de Binghamian puede permanecer constante a una velocidad de corte constante, pero puede cambiar en respuesta a la tendencia de un material a espesarse o adelgazarse a medida que aumenta la velocidad de corte. Este cambio a menudo se denomina "engrosamiento por cizallamiento" o "adelgazamiento por cizallamiento", respectivamente. La viscosidad de cualquier lechada está determinada por la relación agua: cemento y el contenido y la naturaleza de los rellenos y aditivos. Como se muestra en la Figura 6, la viscosidad de las lechadas de partículas estables

puede, sin embargo, permanecer relativamente constante durante un período de 2 a 3 horas (hasta el fraguado inicial), antes de aumentar rápidamente al fraguado final. (Weaver, 2007, p. 140)

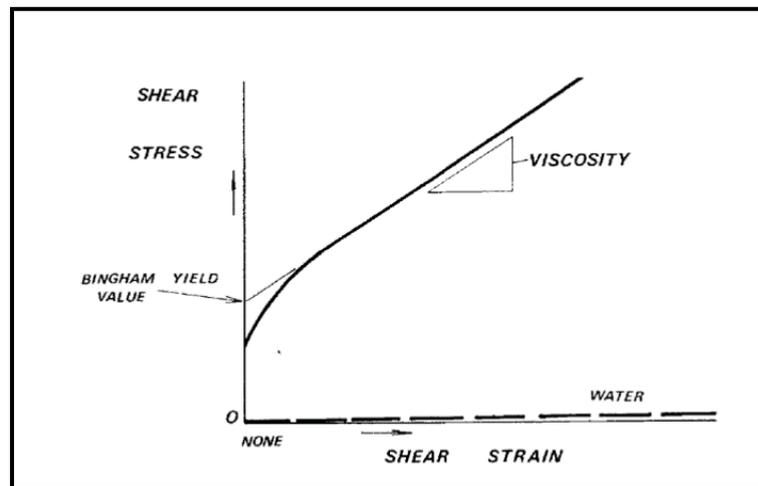


Figura 6. El concepto de tixotropía (houslby 1990, con permiso de John Wiley & Son) (Fuente:Weaver, 2007)

La tixotropía se define como esa "propiedad de un material que le permite endurecerse en poco tiempo mientras está en reposo, pero adquirir una menor viscosidad cuando se agita mecánicamente, siendo el proceso reversible". Por ejemplo el comportamiento de la salsa de tomate embotellada cuando se mantiene boca abajo y estacionaria o cuando se mantiene boca abajo y se golpea con la palma de la mano puede usarse como una ilustración.

El valor de cohesión ("valor de rendimiento de Bingham") en la Figura 6 es, por lo tanto, una medida del grado de esfuerzo cortante o presión necesaria para iniciar (o reiniciar) el flujo de fluido. Usando el caso simple de lechadas de cemento puro (Figura 7), vemos que la cohesión aumenta con una disminución en la relación agua: cemento, en la medida en que, en mezclas con alta cohesión, esta propiedad tixotrópica dominará el rendimiento reológico. (Weaver, 2007, p. 141)

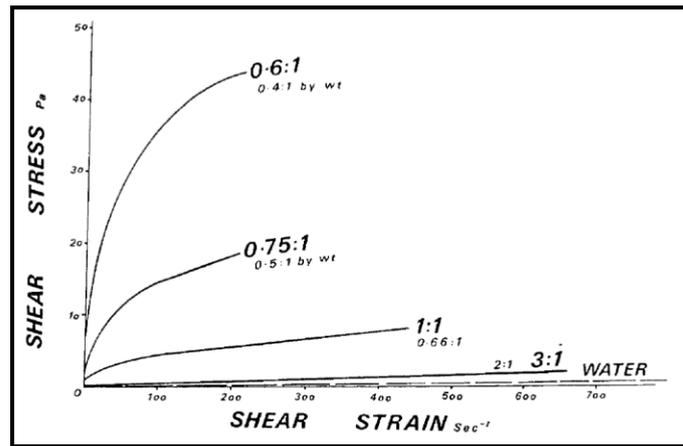


Figura 7. Comparación tixotrópica entre varias mezclas de lechada de cemento (Fuente:Weaver, 2007)

Volviendo a la Figura 5, la viscosidad dinámica se muestra en (n), la viscosidad plástica se muestra en (nB), y la viscosidad aparente se muestra en (n1). Cuanto menor es la cohesión, más cercanas están la viscosidad plástica y la viscosidad aparente entre sí. En el caso de un fluido newtoniano, la cohesión es cero y la viscosidad plástica y la viscosidad aparente son equivalentes y se denominan viscosidad dinámica.

A continuación, se observa la distribución de la velocidad de los fluidos, newtoniano y binghamiano es decir, un (HMG: lechadas de alta movilidad) en una fisura (Figura 8), una vez que el grosor medio (e) del "núcleo rígido" excede el ancho medio de la fisura (r), luego el flujo se detendrá si las paredes de la fisura son ásperas. (Weaver, 2007, p. 141)

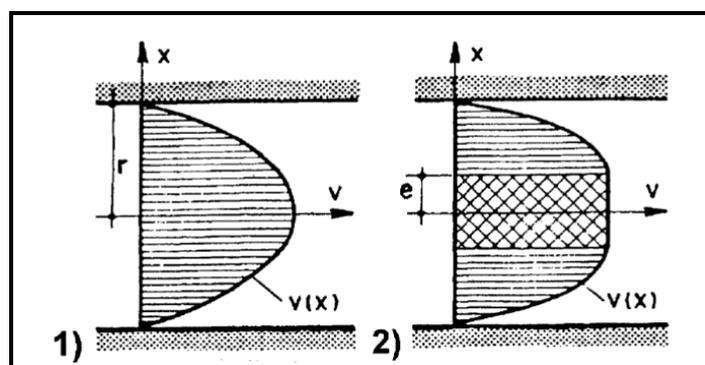


Figura 8. Velocidad de distribución de la lechada en una fisura (Fuente:Weaver, 2007)

Caso 1. Fluido agua. Caso 2 fluido lechada

Este concepto fue tan crítico que se ha concluido que la relación de la cohesión por unidad de peso de lechada era "el determinante de un proceso de lechada de roca". Si las paredes de la fisura son muy lisas, puede ocurrir una "extrusión" pura de la lechada, por ejemplo, en el caso de que se bombee (LMG: Lechadas de baja movilidad) a través de una "línea resbaladiza" de acero. (Weaver, 2007, p. 141)

Por otra parte, también se utilizó este modelo de "núcleo" para afirmar que al final del proceso de consolidación, las paredes de las fisuras estarán cubiertas por débiles mezclas delgadas, mientras que el núcleo de la fisura posiblemente se llene con un cuerpo de cemento gris más fuerte, como resultado del endurecimiento de una mezcla más espesa. Esta estratificación de la lechada puede observarse a menudo en núcleos perforados en una masa de roca inyectada. (Weaver, 2007, p. 142)

7.2 Lechadas con aditivos fluidificantes.

Al mezclar con aditivos se obtiene un alto rendimiento en la formulación de lechadas. Teniendo en cuenta, que los aditivos se dividen en dos grandes grupos: tipos minerales y químicos. El primer grupo tiene como función en reemplazar el cemento y actuar como un relleno, que ayudan a reducir la contracción, a modificar la resistencia, aumentar la fluidez, y la densidad. El cual incluye a la bentonita y las cenizas volantes.

Cuando se usa un cemento Portland normal, una relación agua-cemento total del orden de 0.6 a 0.7 es un valor bastante adecuado en la gran mayoría de los casos. Véase Tabla 4 (lechadas A/C, estables con aditivos). Para cementos micro-finos, sin embargo, se requiere una relación A/ C más alta, hasta 1.0 o 1.2. (Lombardi, 2002, p. 7)

Tabla 4
Algunos ejemplos de mezclas gruesas únicas utilizadas en presas y túneles importantes

Presas	A/C	Fluidificador
	I	II
Paute (Ecuador) parte superior	0.6	Intraplast 1.4%
Alicura (Argentina)	0.67	Intraplast 1.2 %
El cajón (Honduras)	0.7	Bentonita 0.2%
Cloyde dam (New Zealand) 2 part	0.6	Intraplast 1%
El chocón (Argentina)	1.0	Bentonita 0.5 %
Sir (Turquia)	0.7	Cemento puzolánico, Mistra 1%
Katse (Lesotho)	0.59	Bentonita 1.2%
Pichi Picún Leufu(Argentina)	0.7	Cemento + ceniza conplast 1.5% varios
Potrerillos (Argentina)	0.7	Rheobuild/Viscocrete 0.7-0.8%
Ait Hamou (Marruecos)	1.0	Bentonita 2%
Casecnan lower tunnel (Philippines)	0.63	Intraplast 1%

Recuperado de Fuente Grouting of Rock Masses (Fuente: Lombardi, 2002)

Las lechadas estables se define como las suspensiones en agua de partículas finas, como lo son el cemento, arcilla pura, bentonita o cementos activados por otros aditivos, que no presentan una decantación moderada durante los procesos de inyección. Adicionalmente, las lechadas son poco estables cuando la relación agua/cemento sea mayor.

En un proyecto que tiene la necesidad de utilizar inyecciones, se debe indicar los casos admisibles de emplear las lechadas de cemento estabilizadas con ayuda del silicato de sodio, el cual compensa la disminución de la rigidez provocada por la bentonita.

Generalmente se mezcla el cemento con aditivos para mejorar sus propiedades; estos compuestos se dividen de la siguiente manera:

- Materiales para relleno grueso.
- Productos reactivos.
- Productos para conseguir efectos especiales.

(Derqui Morilla, 1935)

7.3 Mezclas de inyección de cemento- bentonita.

La bentonita es el aditivo principal para mejorar las propiedades de las inyecciones de consolidación, conocidas como la penetración y la estabilidad. La cantidad necesaria de la bentonita sódica al emplearla en un cemento para inyección, normalmente está entre un 2% y un 5%. En el momento en que se realice la mezcla cemento-bentonita y agua se produce un cambio químico produciendo la bentonita sódica a bentónica calcita, lo cual hace que la mezcla floccule, estos flóculos obtenidos son grandes y gelatinosos, lo cual previene la sedimentación del compuesto y estabiliza el fluido.

Al momento de añadir bentonita al cemento se reduce lo que es la resistencia, aumentando la plasticidad; de tal manera que esta propiedad puede ser un problema, pero en algunas ocasiones pueden conllevar a grandes ventajas.

(Aduvire, Tratamientos del terreno, 1997)

Según un estudio reológico, se muestra que la adición de bentonita aumenta la viscosidad y el límite de resistencia al corte de las lechadas de cemento en los que la relación A/C sea constante.

Si se comparan lechadas con una misma decantación, se observa que el aumento de dosificación de bentonita disminuye la viscosidad de la lechada; esto se concibe fácilmente porque las dispersiones de la bentonita, aunque muy diluidas, presentan una rigidez aceptable. Esto quiere decir que se necesitan dosificaciones de bentonita débiles para estabilizar las lechadas de cemento ya que la rigidez aumenta rápidamente. (Cambefort, 1999, pp. 224-225)

Bentonita. La dosis típica es de 2 al 5% en peso de material cementoso. La Bentonita se agrega como una suspensión pre hidratada, un mínimo de 12 horas antes de usar. Cuando se usa bentonita pre hidratada, la cantidad de agua en la suspensión debe considerarse en los cálculos del bachado. Véase Tabla No 5. (Weaver, 2007, p. 170)

Tabla 5
Propiedades típicas de relaciones agua:cemento:bentonita

Water:Cement Ratio by Weight	Bentonite by Weight of Water (%)	Bleed % at		Wet Density (mg/m^3)	Flow Cone (s) [water = 10 s]	HAAKE Viscometer RV20-MV2 ^a		Unconfined Compressive Strength of 100-mm Cubes (MPa)			
		3 h	3-24 h			Yield Stress (Pa)	Plastic Viscosity (Pa/s)	3 Days	7 Days	14 Days	28 Days
		1	2			5	2	1.514	15	31	0.020
1.2	3	3	0	1.434	20	80	0.025	1.8	4.9	6.7	7.6
1.25	2.5	5	3	1.427	14	50	0.023	1.6	4.0	4.9	6.3
1.5	3	7	2	1.340	13	30	0.025	0.9	1.7	2.3	2.8
2	4	2	2	1.250	15	48	0.028	0.5	1.2	1.5	2.0
2	5	1	0	1.290	16	54	0.020	0.6	1.4	1.9	2.2
2	6	1	0	1.290	20	75	0.025	0.8	1.4	1.9	2.3
3	4	4	0	1.189	22	60	0.023	0.3	1.4	0.61	0.71
4	5	2	1	1.170	12	25	0.017	0.09	0.51	0.22	0.27
5	6	1	0	1.120	18	32	0.023	0.03	0.14	0.06	0.08

Recuperado de Dan Foundation Grouting (Fuente: Weaver, 2007)

7.4 Mezclas de inyección de cemento- silicato.

En una lechada de cemento la rigidez aumenta al adicionar silicato de sodio. La mejora de esta mezcla es más sensible cuando la dosificación del cemento sea más fuerte; de tal manera, que una lechada con estas características se encuentra en reposo. Así mismo, la rigidez aumenta cuando este variando el tiempo y se presenta generalmente en una hora aproximadamente, llevando acabo una aceleración de fraguado de cemento debida al silicato. (Aduvire, Tratamientos del terreno, 1997).

7.5 Mezclas de inyección de cemento-bentonita-silicato.

Las inyecciones al mezclar con silicato producen una aceleración en el fraguado, de tal manera que produce una lechada grumosa, que es conveniente mezclar estos dos productos.

Al realizar esta mezcla, por medio de varios ensayos se demuestra que la lechada es homogénea y tiene una rigidez mayor que únicamente con la bentonita, observando un

comportamiento tixotrópico y su resistencia mecánica es bastante alta (Aduvire, Tratamientos del terreno, 1997).

7.6 Mezclas de inyección para tratamientos especiales.

- **Mezclas de inyección química.**

Las mezclas con tratamientos especiales se convierte en una lechada química, la cual es un proceso de una solución químicamente reactiva que tiene un comportamiento con alta fluidez, luego después de un tiempo predeterminado reacciona para formar un sólido, semisólido o un gel (Aduvire, Tratamientos del terreno, 1997).

8. IDENTIFICACIÓN DE ADITIVOS.

Generalmente se utilizan aditivos dispersantes y expansores, que tienen un comportamiento fluidificante, como objetivo en lograr a disminuir la viscosidad y cohesión de la mezcla; al momento de emplear estos aditivos o de otros fluidificantes, acelerantes o retardadores, debe tener un análisis previo en cada caso, conociendo los resultados de los ensayos de laboratorio para determinar el porcentaje indicado que se adicionará a la lechada. (ANI, 2016).

La Norma **ASTM C494 (2017b)**, explica las diferentes propiedades de los aditivos utilizados para las mezclas. La ASTM enumera siete tipos de aditivos químicos:

- Tipo A (reductor de agua): Reduce el porcentaje de agua en la mezcla del orden de 5% al 12%, aumenta la resistencia a la compresión de la mezcla en un 10% y no influye en el tiempo de fraguado.
- Tipo B (retardante): Aumenta el tiempo de fraguado de 1 a 3.5 horas.
- Tipo C (acelerante): Disminuye el tiempo de fraguado de 1 a 3.5 horas.

- Tipo D (reductor de agua y acelerante): Aumenta el tiempo de fraguado de 1 a 3.5 horas e incrementa la resistencia a la compresión de la mezcla por lo menos un 10%.

184

- Tipo E (reductor de agua y acelerante): Aumenta el tiempo de fraguado de 1 a 3.5 horas e incrementa la resistencia a la compresión de la mezcla por lo menos un 10%.

- Tipo F (reductor de agua de alto rango): reduce el porcentaje de agua en la mezcla del orden de 10% al 40%. Así mismo, se incrementa la resistencia a la compresión de la mezcla en un 40%.

- Tipo G (reductor de agua de alto rango y retardante): reduce el porcentaje de agua en la mezcla del orden de 10% al 40%. Así mismo, se incrementa la resistencia a la compresión de la mezcla en un 25% y aumenta el tiempo de fraguado de 1 a 3.5 horas.

Los aditivos químicos tipo F y G se denominan como superplastificantes.

(Rodríguez, 2019, pp. 183-184)

8.1 Aditivo bentonita fluidificante.

- **Arcilla o Bentonita - Lechadas de cemento**

Estas suspensiones se estabilizan con un mineral de arcilla especialmente seleccionado para proporcionar uno o una combinación de los siguientes beneficios:

- Proporcionan mezclas homogéneas "coloidales" con una amplia gama de viscosidades.
- Reduce el sangrado y aumenta la resistencia contra la filtración a presión,
- Aumenta el tiempo de fraguado,
- Aumenta el tiempo de hidratación del cemento,
- Mejora la penetrabilidad y la resistencia al lavado,
- Permite una amplia gama de resistencias de fraguado y
- Reduce la permeabilidad.

Los productos comunes utilizados incluyen arcilla natural, bentonita natural, bentonitas permutadas y bentonitas activadas. (Weaver, Dan foundation grouting, 2007, pág. 169)

- En trabajos de impermeabilización, las lechadas contendrán más proporción de arcilla y menos proporción de cemento.
- En trabajos de consolidación, las lechadas contendrán más proporción de cemento y menos de arcilla. (Weaver, 2007, p. 169)

Tabla 6

Efecto de la bentonita en el sangrado

Lechada Mezcla Agua Relación de cemento (por peso)	Porcentaje de sangrado		
	0% Bentonita	2 % Bentonita	4% Bentonita
3:1	62	40	22
2:1	52	20	6
1:1	16	3	1
0.6:1	5	0	0

Recuperado de Dan Foundation Grouting (Fuente: Weaver, 2007)

Los datos presentados por Deere indican que los resultados de la Tabla 6 pueden obtenerse mediante el uso de bentonita hidratada durante 12 horas antes de mezclar.

(Weaver, 2007, p. 170)

8.2 Aditivos acelerantes.

Son productos que, al contrario de los retardadores, favorecen la disolución de los constituyentes anhidros del cemento, su disolución o su velocidad de hidratación; su acción no está muy bien definida, aunque se presente una cristalización rápida de silicatos y aluminatos cálcicos en la pasta del cemento hidratada. En la mayoría de ocasiones ellos se encuentran el cloruro de calcio que es el acelerante por excelencia; sin embargo, también

actúan como aceleradores o acelerantes el cloruro sódico, amónico, y férrico. (UCV, 2009, p. 8)

8.3 Aditivo cloruro de calcio.

El cloruro de calcio es conocido como un compuesto sólido inodoro, blanco y cristalino que es altamente soluble en agua y es una muestra de sal. Así mismo, este químico es higroscópico, que brinda resultados en atraer y absorber moléculas de agua de su entorno. (Cloruro de sodio, 2017)

El cloruro de calcio es el acelerador más utilizado en las mezclas de lechada. Este aditivo reacciona con el yeso, C_3A , C_4AF y tiene una ventaja en actuar como catalizador del C_3S y del C_2S , produciendo una aceleración formando un gel. El cloruro de calcio tiene propiedades altas que ayudan aumentar significativamente la resistencia y se adiciona en porcentajes no mayores al 2% por peso del cemento, además presenta los siguientes efectos secundarios:

1. En el proceso de mezclado aumenta considerablemente la trabajabilidad.
2. Al combinarlo con un aditivo, aumenta del contenido de aire.
3. Tiene efectos en retener la humedad en los agregados disminuyendo el sangrado.
4. Presenta un aumento ligeramente en la contracción por secado.
5. La durabilidad disminuye a largo plazo.
6. La resistencia a los sulfatos disminuye a largo plazo.
7. Posteriormente de la ganancia rápida en resistencia, hay una baja en la evolución de la misma.

(Eddy, 2011)

8.4 Aditivo silicato de sodio.

Es un acelerante que es altamente cohesivo, debido a la rápida reacción de los iones de calcio liberados durante el fraguado inicial formando silicato de calcio. Al usarse proporciones altas (>20% del peso de cemento) puede ocurrir un fraguado rápido, pero se reducirá proporcionalmente la resistencia a la compresión de la mezcla. (Weaver, 2007).

8.5 Aditivo carbonato de sodio.

Uno de los acelerantes utilizados frecuentemente es el carbonato de sodio; el cual su dosificación debe ser estrictamente controlada debido a que por dosis pequeñas puede actuar como retardador y logra producir un aumento considerable de la retracción (UCV, 2009, p. 9). Así mismo, este aditivo se utiliza para acelerar la mezcla de inyección a base de cemento, en una proporción del 25% del peso del cemento. (Weaver, 2007, p. 118).

8.6 Aditivos plastificantes y/o reductores.

Los plastificantes y superplastificantes permiten lograr una manejabilidad de mezclas con relación Agua: Cemento bajas, logrando una mezcla de inyección de alta resistencia, buena durabilidad, baja exudación y baja contracción. Los plastificantes comunes incrementan la bombeabilidad entre un 5% y 10% y los superplastificantes incrementan la bombeabilidad entre 15% y 30%. Las proporciones más comunes de plastificantes y superplastificantes en las mezclas para inyección es de hasta 2% del peso del cemento. (Weaver, 2007, p. 121).

9. ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE LECHADAS DE CEMENTO.

9.1 Método de la prueba de viscosidad.

- **Cono de flujo de Marsh. ASTM-C939.**

El Cono de Marsh, es un embudo hecho de plástico o metal y con un soporte lateral para sostenerlo mientras la prueba está en progreso. La descarga va a una taza de un volumen especificado y se mide el tiempo para llenarlo. Véase figura 9|

Hay diferentes prácticas sobre la cantidad medida de lechada. La práctica estándar de los EE. UU. es usar 1 cuarto de galón 946 ml, pero en algunos otros países esto se redondea a 1,000 ml, y a veces se usa una prueba de medio tamaño de 500 ml. Los tiempos de salida del fluido agua para cada uno de estos volúmenes son:

- 946 ml - 26 seg
- 1000 ml - 28 seg
- 500 ml - 14 seg

(HOULSBY, 1990, p. 99)

El ensayo consiste en tomar el tiempo de flujo de un volumen específico de suspensión que pasa a través de un cono, con terminación en una boquilla de geometría sencilla, este tiempo permite obtener el esfuerzo de fluencia de la suspensión, debido a que el tiempo de flujo es proporcional a la viscosidad. Finalmente, es estandarizado para su uso por los ingenieros y se logre comprobar la calidad de la lechada. (Quitian & Rojas, 2013, p. 20).

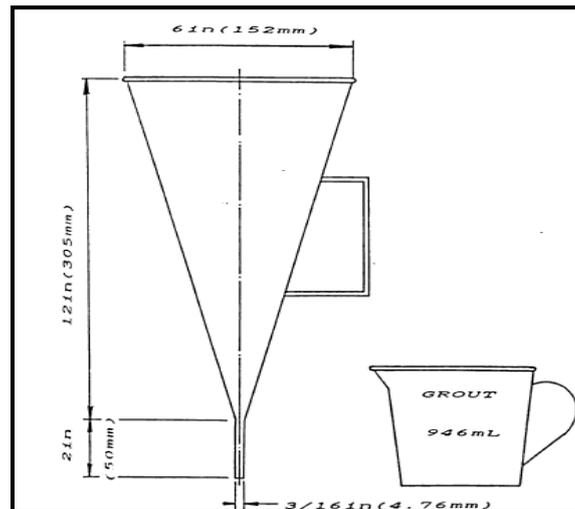


Figura 9. Dimensiones del Cono de Marsh (Fuente: HOULSBY, 1990)

Respecto a este embudo, se mantiene verticalmente con el extremo del tubo cerrado por un dedo, el líquido a medir se vierte a través de la malla para eliminar las partículas que pudieran bloquear el tubo y cuando el nivel del líquido llega a la malla, la cantidad en el interior es igual al volumen nominal. Para realizar la medición el dedo se retira e inicia el conteo del tiempo con un cronómetro, permitiendo que el líquido pase a un recipiente de medición. El tiempo en segundos se registra como una medida de viscosidad. (J-Rohi Ingeniería, 2016).

9.2 Ensayo de exudación de la mezcla Norma ASTM C940.

- **Pruebas de sangrado.**

Este método de ensayo tiene por objetivo determinar la exudación o el sangrado y la variación de volumen (expansión o contracción) de la mezcla (lechada o mortero) utilizada como producto de inyección.

El proceso utilizado para medir la exudación en una probeta de 1000 ml consiste inicialmente en agregar en un recipiente cilíndrico de vidrio, en el que se marcará una señal para indicar la altura de llenado (h_1).

En el recipiente de ensayo se verterá la cantidad necesaria de la mezcla de inyección, hasta enrasar con la señal marcada en el mismo, (h_1). Terminado el llenado, se tapará el recipiente para evitar la evaporación y se mantendrá así el tiempo preciso para que se establezca la decantación de la mezcla y se medirá entonces el nivel de agua, (h_2) y el de los materiales sólidos, (h_3). Estas mediciones deberán hacerse en etapas intermedias, para determinar finalmente la posible exudación de la mezcla transcurridas 3 horas desde su preparación. (Fomento, 2017).

Las lechadas más delgadas se asientan más rápidamente que las más gruesas. El sangrado varía con diferentes finuras y fuentes de cemento. Como se puede observar en la Figura No 10.

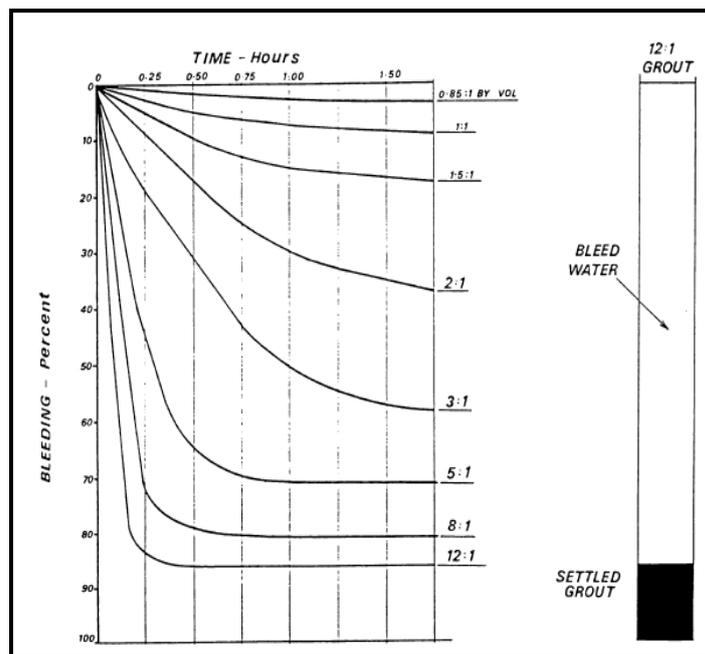


Figura 10. Porcentaje de agua de sangrado que sale de las lechadas de varias proporciones agua: cemento (Fuente: HOULSBY, 1990)

Una lechada 2:1, puede perder el 35% de su volumen inicial durante el proceso de sangrado, después de aproximadamente 1,5 horas, para lechadas más delgadas 5:1, el sangrado puede ser del 70%, y para lechadas excesivamente delgadas como 12:1 puede ser del 85%. Véase figura No 10. (HOULSBY, 1990, p. 84)

9.3 Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada. Norma (ASTM standard C/109C /109M).

El ensayo de resistencia a la compresión inconfiada sobre muestras cúbicas o cilíndricas de lechadas, consiste en aplicar una carga axial de compresión, a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. Veánse figuras 11 y 12.



Figura 11. Molde triple para cubos de cemento (Fuente: Pinzuar, 2019)

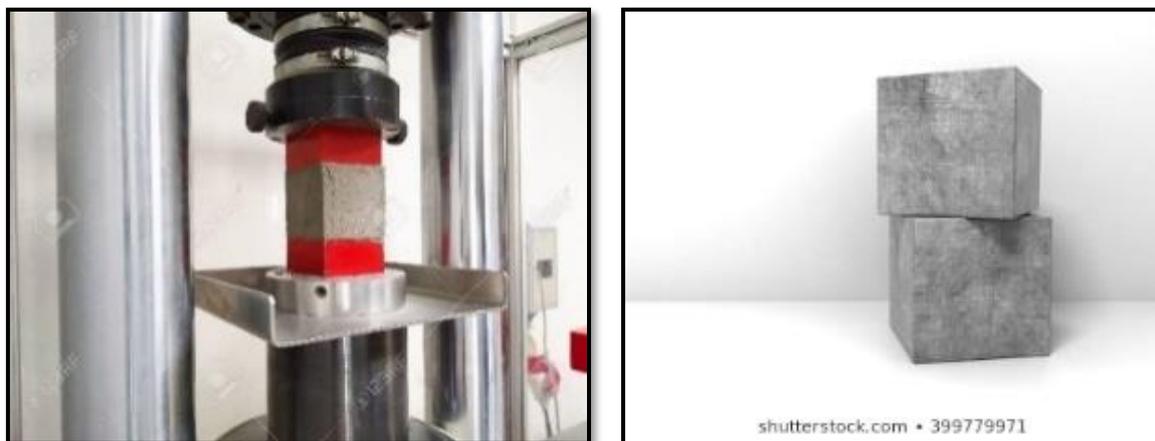


Figura 12. Probetas y ensayo de resistencia a la compresión de lechadas de cemento (Fuente: Shutterstock, 2003)

Los resultados de este ensayo se pueden usar como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación y mezclado de la lechada; para el cumplimiento de especificaciones y como control para evaluar la efectividad de aditivos y otros usos similares.

(Unicauca, 2007, p. 1)

9.4 Ensayo de gravedad específica.

La balanza de lodos es un objeto que es preciso para determinar el peso por unidad de volumen (gravedad específica) de las lechadas de inyección.

La balanza para lodo Figura No 13, se compone de un vaso para el lodo (Cup) de volumen fijo con una tapa (Lid) en un extremo de una barra graduada y un contrapeso en el otro extremo. Una pesa deslizante (Sliding weight) puede ser movida a lo largo de la barra y una burbuja indica cuando la barra está a nivel. La lectura de la densidad se toma en el punto donde la pesa deslizante está posicionada en la barra cuando está a nivel. La precisión del peso del lodo debería ser de (+/- 0,01 g/cm³). La balanza para lodo puede calibrarse con agua u otro líquido de densidad conocida ajustando el contrapeso. (Oilfield Glossary, 2019)

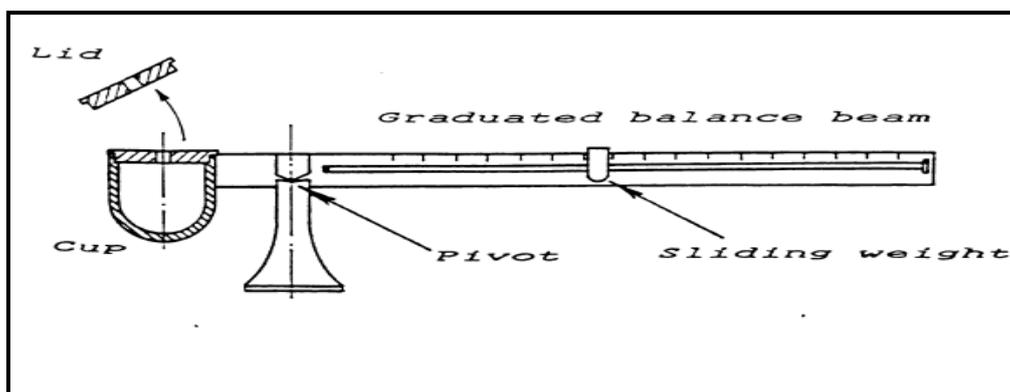


Figura 13. Balanza de lodos y lechadas de cemento (Fuente:HOULSBY, 1990)

La prueba lleva menos de un minuto y los resultados se referencian con los datos mostrados en la Figura 14, en donde la información teórica se realizó usando un cemento con gravedad específica de 3.15. (HOULSBY, 1990, p. 95)

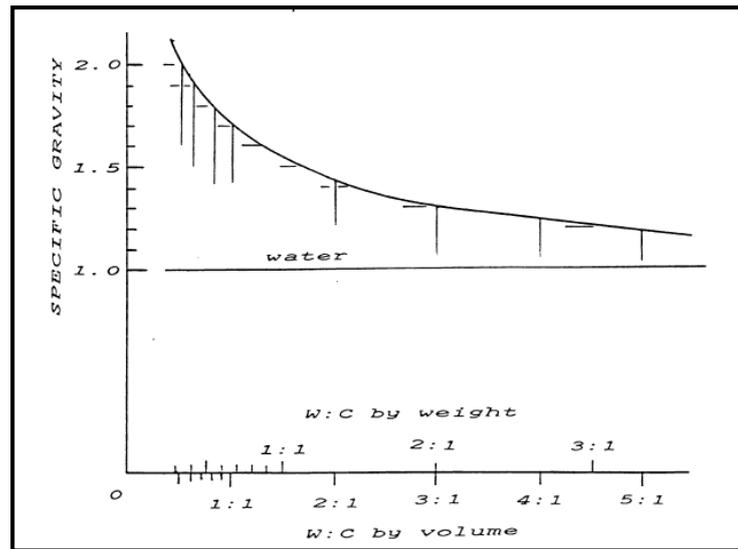


Figura 14. Gravedad específica teórica de lechadas agua: cemento (Fuente: HOULSBY, 1990)

FASE 2. MODELO GEOMECÁNICO DE LAS ROCAS INYECTABLES

10. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA.

Las consideraciones geológicas juegan un papel importante en la elección de una alineación correcta del túnel, en la selección de técnicas de excavación adecuadas y para proporcionar soportes y técnicas adecuados para la estabilidad de la sección del túnel a medida que avanza la excavación. Por otra parte, a través de los frentes de acceso, es muy importante tener una comprensión adecuada del terreno para que los problemas encontrados puedan ser mínimos. (Gokhale, 2008)

En un estudio de estabilidad al estar en función de las discontinuidades sistemáticas, se debe apoyar en datos estructurales específicos para seguir las consecuencias que pueden condicionar un fracturamiento en sus propiedades globales, en su resistencia mecánica, en su deformación y en el comportamiento hidráulico del macizo rocoso. De tal forma, que al realizar un recorrido geológico en el interior de un túnel, es de gran utilidad obtener información de datos estructurales de los diversos sistemas de discontinuidades como lo son

el espaciamiento, orientación, rugosidad, apertura, relleno, presencia de agua, resistencia de las paredes, persistencia, teniendo en cuenta se debe tener los elementos fundamentales y necesarios para efectuar las clasificaciones geomecánicas. En la figura 15, se observa la disposición espacial entre las diaclasas sistemáticas y las diaclasas no sistemáticas. (SCT, 2016)

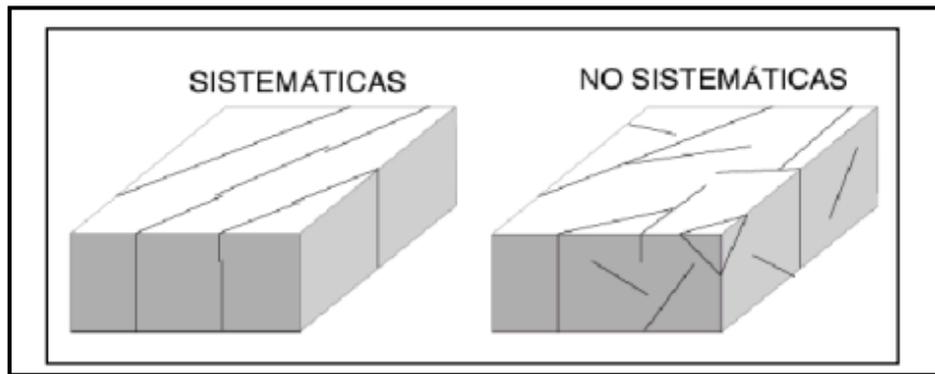


Figura 15. Esquema de formas de diaclasas (fuente: Tranquilino, 2008)

Es necesario conocer, que la estabilidad cuando se encuentra compuesta por la formación de bloques o cuñas, se puede estimar con la caracterización en superficie, que usualmente se realiza partir de sondeos; conociendo las condiciones en que puedan estar las discontinuidades en las profundidades del túnel, para así verificarlas y ajustarlas durante el proceso de construcción. (SCT, 2016)

Al momento de identificar una discontinuidad, se determina la orientación que es efectuada por su buzamiento y por su propia dirección. Para realizar la orientación medida de cada tipo de diaclasas, se efectúa por medio de valores estadísticos, con una representación gráfica de las discontinuidades logrando obtener una visión en la geometría general de los macizos rocosos. A continuación en la figura 16, se permite visualizar en el diagrama bloques tridimensionales que la distribución de los planos y la orientación de fracturación con respecto al túnel. (SCT, 2016)

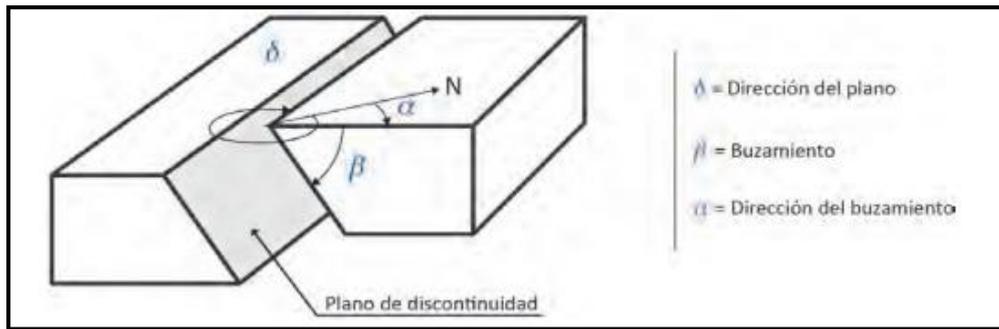


Figura 16. Representación de las familias de las discontinuidades (fuente: SCT,2016)

Otro método para definir la orientación de una discontinuidad en un macizo, es por medio de su rumbo o su dirección (ángulo que forma una línea horizontal trazada sobre el plano de discontinuidad con el norte magnético, midiendo hacia el este) y su buzamiento, debiendo indicar en este caso el sentido del buzamiento (norte, sur, este, oeste). (SCT, 2016, pág. 8) Finalmente, la dirección del plano y la del buzamiento forman un ángulo de 90° , véase figura 17.

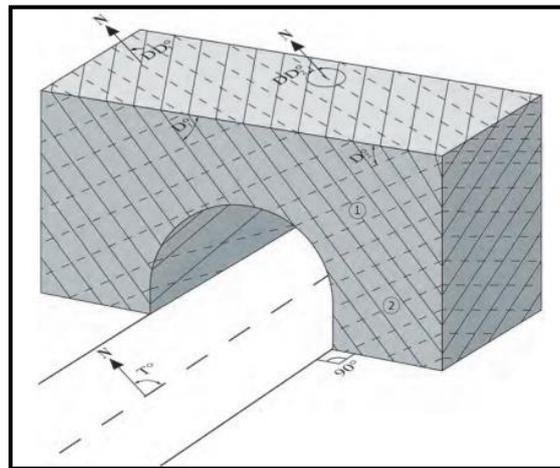


Figura 17. Medición de la orientación de las discontinuidades (fuente: SCT, 2016)

En los siguientes ítems, se informa las propiedades geométricas que presentan las discontinuidades:

- **Espaciamiento:** Es la distancia media perpendicular que forma entre los planos de discontinuidad, lo cual influye su comportamiento global en el macizo rocoso y genera el tamaño de los bloques de una matriz rocosa se presentan en diversas familias de diaclasas. (SCT, 2016)
- **Continuidad:** La continuidad es la extensión en un plano de discontinuidad; verificando si la matriz rocosa se encuentra involucrada o no en los puntos de rotura en un macizo rocoso, definiendo el grado que se condiciona en los parámetros globales de un macizo rocoso. (SCT, 2016)
- **Rugosidad:** La rugosidad que se forma en la discontinuidad efectúa la resistencia al corte, estableciendo un parámetro de definición que nos indica que a mayor rugosidad mayor es la resistencia. El espacio que se forma en un plano de discontinuidad, es la distancia perpendicular que separa las paredes cuando no se forma relleno; teniendo en cuenta que este aspecto puede ocasionar cambios en diferentes lugares del macizo rocoso. (SCT, 2016)
- **Relleno:** En el momento de presentarse relleno, puede ocasionar un comportamiento variable en las discontinuidades. Los tipos de rellenos que se presentan son materiales blandos arcillosos, una disgregación de un material afectado por la meteorización de la roca o un elemento rocoso de diferente naturaleza a la de las paredes. Las propiedades físicas de un relleno como lo son la deformabilidad, la resistencia al corte y la permeabilidad, controlan el comportamiento de la discontinuidad en sí. Así mismo, es necesario conocer, si existe o no relleno, ya que las discontinuidades son un camino viable para las filtraciones de agua, y posteriormente para un túnel construido. (SCT, 2016)

11. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS FRACTURADAS.

Las masas rocosas están compuestas de diferentes minerales de diferente resistencia y susceptibilidad a la intemperie. Durante la deformación, se desarrollan varias características estructurales en las rocas. Estos incluyen fracturas, lineamientos, pliegues y fallas. Los planos débiles desarrollados en las masas rocosas facilitan la meteorización a través de la acción de agencias naturales como el agua. Por lo tanto, el comportamiento de ingeniería de una masa de roca está controlado en gran medida por las juntas o discontinuidades, además de su resistencia y características de deformación. Los datos confiables de las pruebas de campo en rocas in situ y las pruebas de laboratorio en muestras son muy esenciales para el refuerzo del suelo durante la construcción de presas, deslizamientos de tierra. (Gokhale, 2008)

Desde hace varias décadas las clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos se han impuesto como una de las herramientas más poderosas disponibles en la Mecánica de Rocas. Las clasificaciones geomecánicas constituyen, hoy en día, una parte fundamental dentro del diseño de los túneles en roca. No obstante, conviene definir su campo de aplicación, ya que cada una forma parte del proceso de caracterización, bien como función geomecánica o como método empírico de diseño. (Serrano, 2005, pp. 229-253)

En un principio los terrenos de cimentación se clasificaron simplemente en dos grandes categorías: terrenos buenos y malos. Actualmente, las clasificaciones son mucho más complejas y matizadas; además, constituyen la pieza clave en que se apoya el diseño empírico de las obras en los macizos rocosos. Estas clasificaciones son en muchos casos la única base disponible para el diseño de estructuras subterráneas complejas; la mayor parte de los túneles que se construyen en la actualidad hacen uso de alguna clasificación geomecánica. (Serrano, 2005, pp. 229-253)

11.1 Método del RQD.

Sobre la base de la recuperación del núcleo, Deere y sus colegas en 1967 proponen una expresión cuantitativa de la calidad del macizo rocoso. La designación de calidad de roca (figura 19), es la relación de la longitud acumulada de las piezas individuales que excede las 4 pulgadas (10 cm) de longitud con respecto a la longitud total del núcleo expresada como porcentaje. El procedimiento para la estimación de RQD se indica en la figura 18. (Gokhale, 2008)

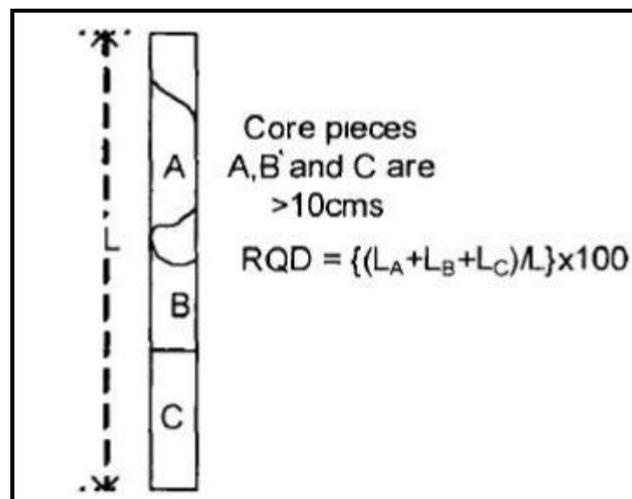


Figura 18. Proceso para la estimación del RQD (fuente: Gokhale, 2008)



Figura 19. Trozos típicos de testigos de más de 10 cm de longitud (fuente: Suárez, 2015)

Tabla 7
Clasificación de la roca según el índice RQD

RQD	CALIDAD
0-25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Regular
75-90	Buena
90-100	Muy buena

Fuente: *Mecánica de rocas I.*

Alrededor del año 1988, se definió que el tipo de soportes recomendados para túneles (pernos de roca, arcos de acero) que se pueden usar para masas de roca con valores RQD que oscilan entre 25 y 75. De tal manera, que no se necesita soportes para formaciones con valores RQD superiores a 75. Véase tabla 7. (Gokhale, 2008)

Cuando el sondeo no se realiza debidamente, el RQD se puede calcular a partir del número de diaclasas por unidad de volumen. Una relación simple puede ser convertir este número a RQD para el caso de RQD de masas de roca libre de arcilla. $RQD = 115 - 3.3 J_v$, donde $J_v =$ número total de diaclasas por m^3 ($0 < RQD < 100$) para $35 > J_v$. (Gokhale, 2008)

11.2 Método de RMR.

El índice RMR conocido como (Rock Mass Rating) fue propuesto por el profesor Bieniawski en 1973. Actualmente, el índice RMR ha sido modificado desde entonces por su autor a medida que se ha ido disponiendo de información sobre nuevos casos históricos y conforme han ido apareciendo nuevos procedimientos de construcción y normas internacionales por lo cual, actualmente goza de 351 casos incorporados por su autor como base del sistema, además de un gran apoyo internacional; dándole amplio apoyo internacional y una gran fiabilidad. (<, 2005, pp. 229-253)

Inicialmente el índice se desarrolló en relación con el proyecto y la construcción de túneles, pero posteriormente se ha extendido su uso en taludes y cimentaciones en roca.

Esta clasificación geomecánica (tabla 8), depende de un índice RMR, que va generalmente de 8 a 100, basándose en cinco parámetros intrínsecos, como lo siguientes: (Serrano, 2005, pp. 229-253).

1. Resistencia a la compresión simple de la roca intacta.
2. RQD.
3. Espaciamiento de las discontinuidades.
4. Características de las discontinuidades.
5. Condiciones hidráulicas.

Adicionalmente, se agrega un sexto parámetro que se introduce de forma diferenciada dependiendo el proyecto a realizar (Túneles, minas, cimentaciones y taludes), el cual es la orientación de las discontinuidades y no es de carácter intrínseco. (Serrano, 2005, pp. 229-253)

$$RMR = A + B + C + D + E + (F)$$

Ecuación 1 Cálculo RMR

A= Parámetro de la resistencia de la roca intacta.

B= Parámetro de RQD.

C= Parámetro de espaciamiento.

D= Parámetro de condiciones de las discontinuidades.

E= Parámetro de la influencia del agua.

F= Parámetro de orientación de discontinuidades.

(Serrano, 2005, pp. 229-253)

Tabla 8
Clasificación geomecánica del macizo rocoso con el índice RMR

CALIDAD	Muy buena	Buena	Aceptable	Mala	Muy mala
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Fuente: Mecánica de rocas I.

A cada uno de estos parámetros para el macizo rocoso se le asigna un valor de calificación, de acuerdo a la selección apropiada en los valores de clasificación descrita en las tablas. Se debe tener en cuenta que la masa rocosa se divide en varias regiones generalmente por características estructurales como lo son las fallas. Todos los valores de clasificación correspondientes a la masa de roca se describen en las tablas de datos respectivas y se suman para obtener el valor final de la clasificación de masa de roca. (Gokhale, 2008)

En la Tabla 9 se presenta un conjunto de líneas de guía, según lo propuesto por el profesor Bieniawski (1989), para elegir los soportes para un túnel de 10 m de luz. De acuerdo con el valor de RMR obtenido para la masa de roca en consideración, la longitud, la separación y el tipo de soportes se pueden elegir con estos parámetros. Sin embargo, estos deben reforzarse aún más si se encuentran nuevos problemas en la masa rocosa durante la excavación. (Gokhale, 2008)

Tabla 9
Soportes para un tunel de 10 m de luz.

Calidad roca	Excavación	Pernos de roca	Shotcrete	Arcos de acero
Muy buena	Avance 3ml.seccion completa	-	-	-
Buena	Avance 3ml.seccion completa	Pernos en la clave L=3m,con malla electr.	50mm espesor en la clave	-
Aceptable	Avance en media sección en 1.5-3 m	Pernos L=4 m,en clave y paredes, con malla electr.	50-100mm espesor en clave y paredes	-
Mala	Avance en media sección instalando soporte en 1-1.5 m	Pernos L= 4-5 m en clave y paredes con malla electr.	100-150mm espesor en clave y paredes	Arcos acero cada 1.5 m
Muy mala	Avance en media sección instalando soporte en 0.5- 1.5 m	Pernos L= 5-6 m en clave y paredes con malla electr.	150-200mm espesor en clave y paredes	Arcos acero cada 0.75 m

Tomado de: Principios de ingeniería geológica (Fuente: Gokhale, 2008)

11.3 Método de "Q system".

Este método se utiliza para la clasificación de los macizos rocosos (tabla 10), y aparece después de un extenso periodo de ensayos y tanteos realizados en 1973, obteniendo finalmente seis parámetros y un conjunto de categorías dentro del método. De acuerdo con el sistema de clasificación, la calidad del macizo rocoso puede definirse mediante: (Jimeno, 2000, p. 29).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Ecuación 2 Definición de método Q System

Tabla 10
Definición de parámetros para método Q System (índice Q)

Definición de parámetros que integran el índice Q			
RQD	Índice de fracturación		
Jn	Índice de diaclasado	RQD/Jn	Medida del tamaño del bloque.
Jr	Índice de rugosidad		
Ja	Relleno discontinuidad	Jr/Ja	Medida ángulo de fricción entre bloques
Jw	Factor reducción por presencia agua		
SRF	Factor tensional de la roca	Jw/SRF	Medida de las tensiones efectivas.

Tomado de: Ingeo Túneles (Fuente: Jimeno, 2000)

El rango de valores numéricos que puede tomar el índice Q de calidad de la roca se encuentra entre 0.001 (Condición mala) y 1.000 (Condición buena). Los seis parámetros pueden estimarse a partir de la cartografía geológica de la zona y de la descripción de los testigos procedentes de los sondeos de investigación, pudiendo verificarse o bien corregirse, posteriormente durante la excavación. (Jimeno, 2000, p. 29)

El amplio rango de valores que tiene el índice Q, constituye una característica muy importante del Sistema Q y refleja la variación en la calidad de la roca de manera probablemente más rápida que mediante la escala lineal del índice RMR. Debido a esta característica, se logra de manera más fácil la correlación con el resto de los parámetros físicos de la roca. (Jimeno, 2000, p. 29)

Clasificación de la roca según “Q system”

El Índice Q varía entre 0.001 y 1.000, asociado a la clasificación del macizo como se presenta a continuación, en la tabla 11: (Aspectos generales del Q de Barton, 2000, p. 174)

Tabla 11
Clasificación de roca vs índice Q

TIPO DE MACIZO	VALOR DE Q
EXCEPCIONALMENTE MALA	0.001-0.01
EXTREMADAMENTE MALA	0.01-0.1
MUY MALA	0.1-1
MALA	1-4
MEDIA	4-10
BUENA	10-40
MUY BUENA	40-100
EXTREMADAMENTE BUENA	100-400
EXCEPCIONALMENTE BUENA	400-1000

Recuperado de: Aspectos generales del Q (fuente: Barton, 2000)

(Aspectos generales del Q de Barton, 2000, p. 174)

11.4 Método GSI.

El GSI es un índice que representara de forma adecuada las características intrínsecas del macizo rocoso. Por tanto, el resto de parámetros incluidos en las clasificaciones geomecánicas existentes (Estado tensional in situ, orientación de las discontinuidades o las características hidrogeológicas) fueron omitidos por el esquema GSI. (Jimeno, 2000, p. 121)

El rango de valores del GSI varía desde 10, normalmente en el caso de macizos rocosos muy fracturados, hasta 100, para un macizo rocoso intacto. Generalmente, se suelen distinguir una serie de intervalos característicos dentro del rango total de valores que toma el GSI como <25, 25-45, 45-65, 65-85 y >85; que se asocian con las propiedades geomecánicas obtenidas a partir de estudios experimentales, correlaciones, etc. (Jimeno, 2000, p. 121)

El GSI puede obtenerse a partir de los siguientes puntos:

a. A partir del índice RMR.

Utilizando el índice RMR (Rock Mass Rating) creado por Bieniawski y su clasificación en la versión de 1989; se suman en primer lugar los valores obtenidos en los cuatro primeros parámetros (Resistencia a la compresión simple de la roca intacta, RQD, espaciado de las diaclasas y naturaleza de las diaclasas). Posteriormente, se caracteriza el macizo rocoso como completamente seco, añadiendo un valor adicional de 15 a la suma previamente calculada, obteniendo como resultado final un RMR'. (Jimeno, 2000, pp. 122-123) Y así para valores de RMR' superiores a 23, el índice GSI puede calcularse mediante la expresión:

$$GSI = RMR' - 5$$

Ecuación 3 Cálculo de índice RMR

Cuando el RMR' es inferior a 23 esta clasificación no puede ser utilizada para estimar el GSI, sino con el índice Q o, mediante el reconocimiento físico del material.

(Jimeno, 2000, pp. 122-123)

b. A partir del índice Q.

Al utilizar el índice Q para estimar el GSI, en primer lugar, se asigna el valor de 1 al coeficiente reductor por la presencia de agua (J_w), equivalente al supuesto de condiciones secas, mientras que el coeficiente del estado tensional SRF, conocido como (Stress Reduction Factor), no siendo un parámetro intrínseco del macizo rocoso, no ha sido considerado. El índice de calidad del macizo rocoso corregido, Q' , se calcula mediante:

$$Q' = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right)$$

Ecuación 4 Cálculo de índice de calidad corregido Q'

(Jimeno, 2000, pp. 122-123)

El valor de Q' así obtenido puede ser utilizado para calcular el valor del GSI a partir de la expresión:

$$GSI = 9 \cdot \ln Q' + 44$$

Ecuación 5 Cálculo de valor GSI

(Jimeno, 2000, pp. 122-123)

c. A partir del índice RMI.

El levantamiento geológico de frentes y el resto de datos recogidos durante la excavación del túnel piloto (con una longitud de 1400 m) perteneciente al túnel de S permitieron definir una correlación entre el índice GSI y un nuevo índice intrínseco del macizo rocoso el índice RMI (Rock Mass Index). Basándose en la colección de datos procedente de 62 reconocimientos geomecánicos, se propuso la siguiente expresión:

$$GSI = 5,5 \cdot \ln(RMI) + 42$$

Ecuación 6 Cálculo de GSI, conociendo el índice RMI

(Jimeno, 2000, pp. 122-123)

d. A partir de descripciones cualitativas (Hoek y Brown).

El valor del GSI puede también obtenerse a partir del reconocimiento de la estructura del macizo rocoso y las condiciones de las superficies de discontinuidad, como se observa en la tabla 12. (Jimeno, 2000, p. 124)

Tabla 12
Clasificación del valor del GSI

CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES. ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO.	MUY BUENO	BUENO	MEDIOCRE	MALO	MUY MALO
Macizo en bloques (1).	>65	55-75	45-65	35-55	25-45
Bloques numerosos (2)	55-75	45-65	35-55	25-45	15-35
Bloques/pliegues (3)	45-65	35-55	30-45	20-40	10-30
Triturado (4)	40-55	30-45	25-40	15-30	>20

Fuente: Ingeo túneles, libro 3 Madrid 2000. serie: Ingeniería de túneles. Pag 124

Dónde:

1. Macizo rocoso no alterado formado por bloques bien interconectados, a partir de un sistema de familias diaclasadas según tres direcciones ortogonales.
2. Macizo rocoso fracturado, parcialmente alterado, formado por bloques angulosos según un esquema de cuatro o más familias de discontinuidades.
3. Macizo rocoso replegado y diaclasado, compuesto por bloques angulosos originados a partir de un sistema de numerosas familias de discontinuidades.
4. Macizo rocoso muy fracturado, compuesto por bloques angulosos o redondeados, escasamente interconectados.

(Jimeno, 2000, p. 124)

12. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA EN TÚNELES.

12.1 Objetivos de la caracterización geotécnica.

La importancia del reconocimiento geológico es identificar y cuantificar los aspectos más relevantes que caracteriza una obra, a lo que se conoce como “Modelo Geotécnico” del terreno. (Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

El Modelo Geotécnico debe contemplar los siguientes aspectos:

- Estratigrafía.
- Estructura del macizo rocoso.
- Litología.
- Contactos y distribución de litologías.
- Geomorfología.
- Espesor y características del manto de alteración.
- Espesor de los materiales de recubrimiento.
- Posición y movilidad del agua.

Con base en lo anterior se elaborará el “Perfil longitudinal Geológico-Geotécnico” de la excavación, acompañado de perfiles transversales y es de vital importancia realizar la planta estructural geotécnica definida en la cota de la excavación. (Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

12.2 Cartografía geológica.

En esta fase el objetivo es realizar los trabajos siguientes:

- **Afloramientos**

Aquí se establece la diferenciación entre los afloramientos del substrato rocoso y los depósitos de recubrimientos superficiales. En las formaciones del substrato rocoso se evaluará los siguientes aspectos:

1. Clasificación geomecánica (RMR Y Q)
2. Resistencia de la matriz rocosa
3. Grado de meteorización y su espesor.

(Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

En los depositos se evalua lo que es la morfologia, la litologia y el espesor de estos depositos.

- **Tectónica y estructura**

Además de los datos de los materiales existentes, la cartografía deberá Incluir todos los datos necesarios para definir la estructura del macizo rocoso, igualmente la estratificación de los terrenos como también las discontinuidades estructurales existentes. (Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

- **Hidrogeología**

Realizar un estudio minucioso de surgencias de agua, fuentes, etc. Evaluando las características hidrogeológicas del terreno. (Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

- **Definición de Litotipos**

Se definen los diferentes litotipos de características mecánicas y litológicas similares que existan en el área de estudio. De cada uno de estos litotipos se deben efectuar ensayos de carga puntual para determinar la resistencia a la compresión simple. (Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

- **Clasificación mecánica del macizo rocoso**

Con el objeto de valorar la calidad geotécnica del macizo rocoso, se procederá a su clasificación, utilizando la clasificación de Bieniawski (Rock Mass Ratio) y la clasificación de Barton (Índice Q). (Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

12.3 Estudio de fracturación.

El estudio de fracturación contempla los siguientes aspectos:

- Levantamiento de discontinuidades estructurales.
- Correlación diaclasas-fracturación regional.
- Análisis de microestructuras para la estimación del gado tensional.

(Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

De cada plano de discontinuidad que se identifique se obtendrán los siguientes parámetros: tipo de plano, orientación (dirección de buzamiento y buzamiento), espaciado, continuidad (según rumbo y buzamiento), rugosidad, resistencia a la compresión simple, relleno y presencia de agua. Cuando se establezcan las principales familias de diaclasas, se obtendrán estereogramas o diagramas de rosetas de las mismas.

(Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

12.4 Estudio hidrogeológico.

El objetivo del estudio hidrogeológico es determinar los acuíferos que afecten a la excavación. Esto incluye conocer:

- Número y extensión de los acuíferos.
- Conductividad hidráulica de las formaciones.
- Isopiezas.
- Accidentes hidrogeológicos (barreras impermeables, huecos de disolución etc.).

(Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

12.5 Técnicas geofísicas.

Los métodos más relevantes en la investigación Geológica-Geotécnica de una obra subterránea son los siguientes:

- Métodos eléctricos.
- Métodos electromagnéticos.
- Métodos sísmicos.
- Métodos tomográficos (sobre ondas acústicas o electromagnéticas).

(Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

12.6 Sondeos.

Los sondeos mecánicos se constituyen como el sistema económicamente más costoso de una investigación, proporcionando una información muy valiosa. En general la perforación más empleada es el sistema wireline empleando batería sencilla, doble o inclusive triple en función del tipo de terreno, para la toma de muestras. (Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

Los sondeos deben ser supervisados por especialista geólogo y geotécnico que:

- Testifique el sondeo
- Dirija la toma de muestras
- Supervise los ensayos in situ
- Controle los parámetros de perforación de relevancia geotécnica.

(Benjamin celada Tamames, pp. 55-57)

13. MECANISMOS DE CARGA.

El comportamiento geotécnico de las formaciones rocosas no solo está influenciado por la litología, sino también de manera dominante por sus características estructurales. La suma total de estos aspectos se refleja en el comportamiento de la formación geológica. (Gokhale, 2008)

Si el alineamiento del túnel coincide con la dirección del rumbo de las formaciones rocosas o muy cerca de la dirección del rumbo, la misma formación continuara hasta que el alineamiento se desvíe de esta dirección. Esto es aceptable si las formaciones son competentes, pero en el caso de formaciones menos competentes, se recomienda tramos cortos del túnel dentro de ellas. Por lo tanto, es preferible tener el alineamiento desviado de la dirección del rumbo con formaciones menos competentes. (Gokhale, 2008)

A continuación, en la figura 20 se evidencia las formaciones del buzamiento.

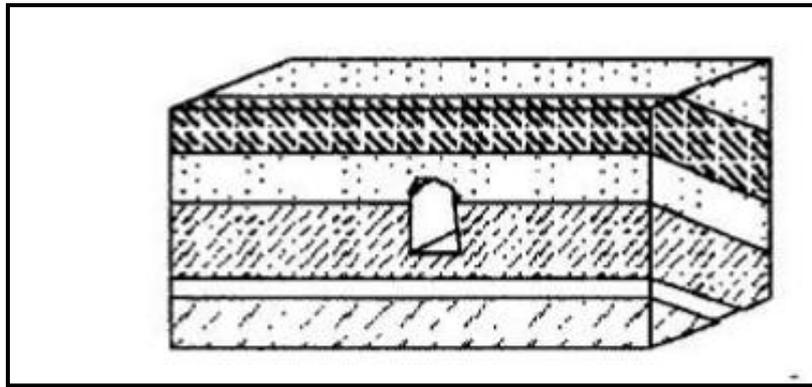


Figura 20. Túnel atravesando formaciones con buzamiento (fuente: Gokhale, 2008)

Los buzamientos tienen formaciones muy bajas (que corresponden a formaciones casi horizontales), los problemas son mínimos en formaciones macizas ya que el túnel intercepta una sola formación. Si la formación particular es conveniente, entonces la necesidad de revestimiento sería mínima o no existiría como tal. En el caso de formaciones con buzamiento interceptadas por un túnel (Véase Figura 21), las formaciones competentes no plantean problemas y las incompetentes crean problemas de deslizamiento a lo largo de las direcciones de infiltración en el túnel. (Gokhale, 2008)

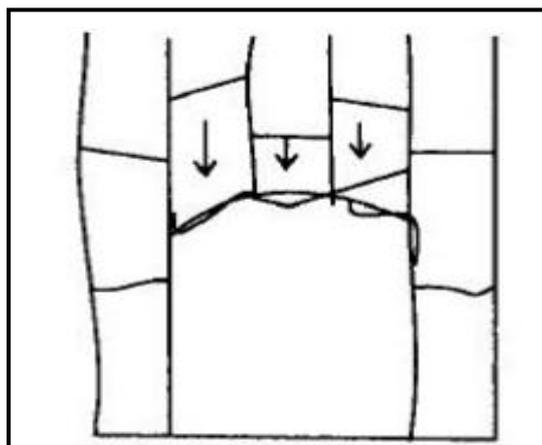


Figura 21. Túnel en rocas diaclasadas, con buzamiento vertical (fuente: Gokhale, 2008)

13.1 Esfuerzos alrededor de la excavación de un túnel.

Cuando se practica una excavación subterránea en un macizo rocoso, los esfuerzos que existían con anterioridad se perturban, y se inducen nuevos esfuerzos en la roca en las inmediaciones de la excavación. Un método para representar este nuevo campo de esfuerzos es el de las trayectorias de los esfuerzos principales, que son líneas imaginarias en un cuerpo elástico comprimido a lo largo de los cuales actúan los esfuerzos principales. La figura 22 muestra las trayectorias de los esfuerzos principales mayor y menor en el material que circunda un orificio circular en una placa elástica comprimida uniaxialmente. Estas trayectorias de esfuerzos principales pueden considerarse como si se dividiera el material en elementos sobre los que actúan los esfuerzos principales. Del lado derecho de la figura 22, dos de las trayectorias del esfuerzo principal mayor se señalan con líneas punteadas, y en puntos arbitrariamente elegidos sobre estas trayectorias, se muestran los esfuerzos principales que actúan sobre elementos imaginarios. (CARRION, 2019, pp. 17-18)

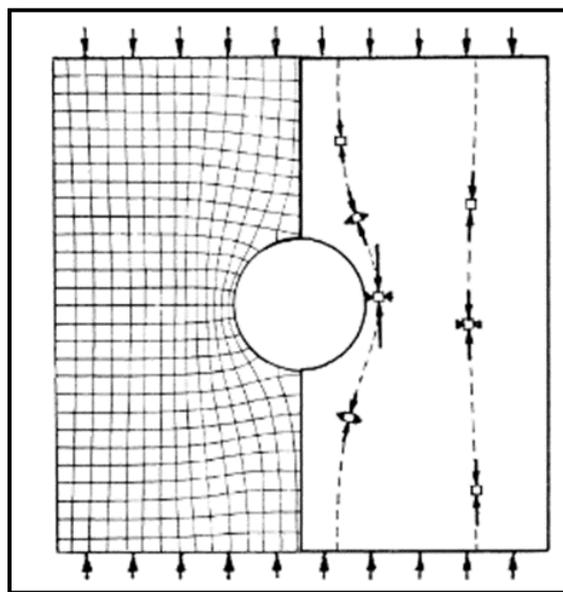


Figura 22. Trayectoria de esfuerzos en un túnel de sección circular (fuente: CARRION, 2019)

La dirección y la magnitud del esfuerzo principal se indica con una flecha, lo cual, el largo de la flecha marca lo que es la magnitud del esfuerzo principal teniendo en cuenta una escala determinada. Así mismo, se evidencia que los esfuerzos principales distan notablemente de ser verticales u horizontales en los puntos del orificio que desvía las trayectorias de los esfuerzos. De tal forma, que al colocar una obstrucción cilíndrica; el agua tiene que fluir alrededor de este obstáculo y por ende las líneas de flujo varían, tal como lo indica la siguiente figura 23. En los puntos de inmediación de la obstrucción aguas arriba y aguas abajo, el movimiento del agua va más lento y se observa las líneas de flujo variando hacia afuera. En este aspecto la separación es análoga a la separación de las trayectorias de esfuerzo que se forman en las zonas de esfuerzos a tensión; de tal manera que, la formación de esas zonas de esfuerzos de tensión se observa en el techo y en el suelo de una excavación circular que se sujeta a una compresión aplicada uniaxial mente. En los lados del obstáculo el flujo de agua tiene que ir más rápido, para llegar a un punto alcanzando el resto del flujo y las líneas de flujo se amontona una a la otra como se muestra en le figura. Generalmente esto es igual al amontonamiento de trayectorias de los esfuerzos que se encuentran en zonas de esfuerzos compresivos aumentados. En la siguiente figura, se evidencia que fuera de una zona en estudio a 3 veces el diámetro de obstrucción, las líneas de flujo no varían y no se desvían en una forma apreciable y no se evidencia una afectación por un efecto de la excavación. (CARRION, 2019)

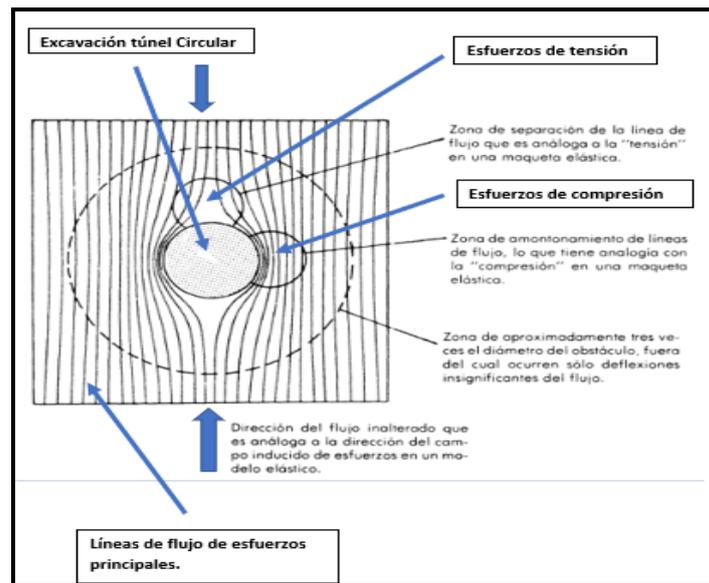


Figura 23. Deflexión de líneas de flujo alrededor de un túnel con sección circular (fuente: CARRION, 2019)

13.2 Método de arco de carga.

Las tensiones preexistentes se desvían debido a la excavación de la cavidad y canalizan alrededor de ella el “Efecto Arco”, creando zonas de altas tensiones en las paredes de la excavación. En la figura 24, logramos verificar el efecto arco de carga a partir de una excavación. (Lunardi, 2017, p. 2)

Es necesario comprender lo delicado que es este proceso al considerar que es precisamente la correcta canalización de tensiones alrededor de la cavidad lo que determina la integridad y la vida del túnel. La canalización de tensiones se produce dependiendo de las tensiones en juego y de las propiedades resistentes y de deformación del terreno. (Lunardi, 2017, p. 2)

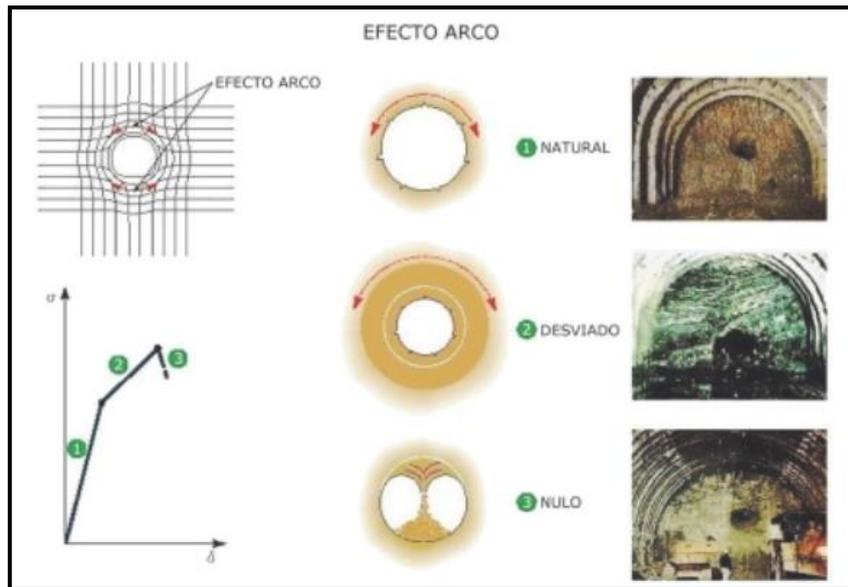


Figura 24. Efecto arco en una excavación subterránea (Túnel en roca) (fuente: Lunardi, 2017)

En el caso número 1 se da cuando el terreno alrededor de la cavidad soporta fácilmente la tensión desviada a su alrededor, respondiendo elásticamente en términos de resistencia y deformación. (Lunardi, 2017, p. 2)

El segundo caso aparece cuando el terreno alrededor de la cavidad, que no es capaz de soportar el flujo desviado de tensiones, responde inelásticamente, plastificándose, y deformándose proporcionalmente al volumen del terreno afectado por el fenómeno de plastificación. El fenómeno de plastificación también produce un incremento del volumen del terreno afectado y se propaga radialmente produciendo la desviación de la canalización de las tensiones lejos del túnel hacia el seno del macizo rocoso hasta que el estado triaxial de tensiones es compatible con las propiedades resistentes del terreno. En esta situación el efecto arco se produce lejos de las paredes de la excavación, mientras que el terreno alrededor de la excavación que ha sido perturbado hasta este punto es capaz, tan solo de contribuir al equilibrio estático final con su propia resistencia residual e incrementando la deformación de forma considerable. (Lunardi, 2017, pp. 2-3)

El tercer caso aparece cuando el terreno que rodea la excavación es completamente incapaz de soportar el flujo desviado de tensiones y responde en la zona de rotura produciendo el colapso de la cavidad. (Lunardi, 2017, pp. 2-3)

Analizando las siguientes situaciones se puede deducir que:

- El efecto arco solo se da de forma natural en el primer caso.
- En el segundo caso el efecto arco se produce de una forma natural únicamente si se ayuda al terreno con una intervención apropiada que lo estabilice.
- En el tercer caso, debido a la imposibilidad de crear un efecto arco de forma natural, se debe inducir de forma artificial actuando antes de la excavación.

(Lunardi, 2017, pp. 2-3)

FASE 3. TRATAMIENTO CON INYECCIONES DE CONSOLIDACIÓN.

14. MÉTODO DE ENGROSAMIENTO SUCESIVO.

El método de engrosamiento sucesivo, permite llevar la inyección paulatinamente a partir de mezclas más delgadas a lechadas con relaciones más gruesas, y de esta forma optimizar el relleno con cemento de la roca fracturada alrededor de la perforación. (Fuente: Elaboración propia).

Este método se expone en este documento y su utilización en el proceso de inyecciones, está relacionado con los indicadores de la calidad de la roca a recibir este tipo de tratamiento, los cuales se muestran en el capítulo 2. Con base en las experiencias en los diseños y en las construcciones realizadas en obras subterráneas; existen respuestas convincentes desde el punto de vista técnico , corresponden al sistema propuesto por Bieniawski en (1989), con título “CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA ROCK MASS RATING (RMR)”, el cual permite relacionar el “valor índice de la calidad de la roca” , con

otros parámetros de laboratorio y de campo aportando así un adecuado dominio estructural del macizo rocoso en una excavación subterránea, y de esta forma establecer una mejor interpretación principalmente en los terrenos tipo III, IV y V en los cuales se deberían realizar tratamientos puntuales de pre consolidación y pos consolidación de la roca antes, durante y posterior a la construcción de los túneles. (Fuente: Elaboración propia).

En la tabla 13 se muestran y se destacan los tipos de terreno más vulnerables de acuerdo con esta clasificación y por consiguiente con más posibilidad en la intervención con este tipo de procedimientos.

Tabla 13
Indicadores de calidad. Método RMR

Terreno tipo	Calidad	Valor índice de calidad
I	Roca muy buena	81-100
II	Roca buena	61-80
III	Roca regular	41-60
IV	Roca pobre	21-40
V	Muy muy pobre	< 20

Fuente: Mecánica de rocas I.

15. INYECCIÓN POR ETAPAS.

15.1 Etapa simple.

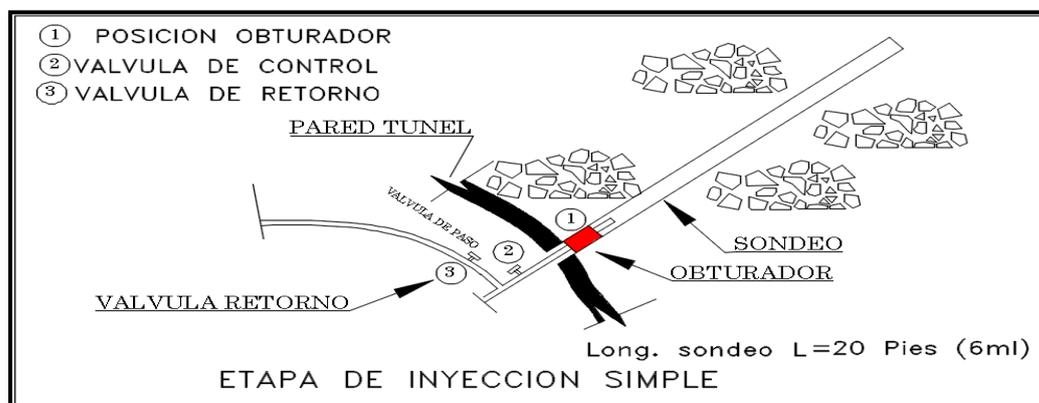
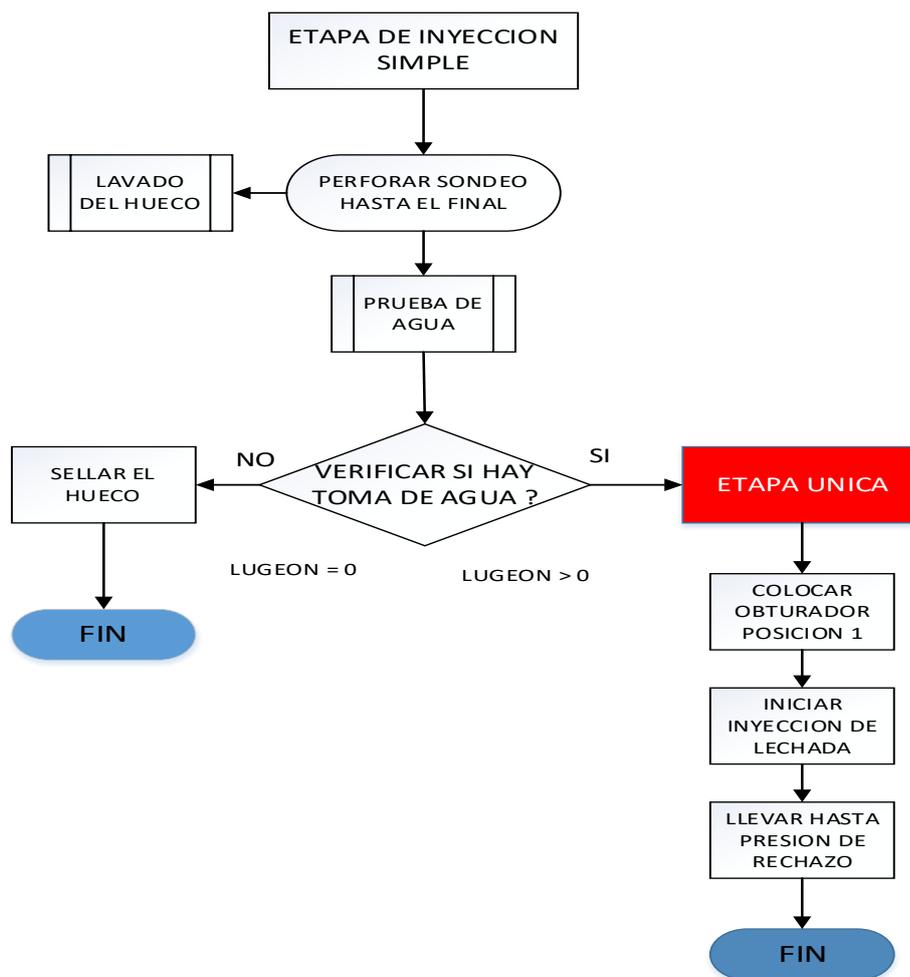


Figura 25. Etapa de Inyección Simple. Fuente: Elaboro autor. Adaptado de (U.S. Department of the Interior, 2014)

La figura 25 ilustra la inyección en una sola etapa o etapa simple; consiste en perforar el sondeo hasta la profundidad final, lavar el orificio, hacer la prueba de agua y posteriormente proceder a la inyección en una “etapa única o simple”. Este método está limitado a inyectar sondeos poco profundos, máximo de (20 pies), en roca relativamente sólida con pocas fracturas y sin mayores fugas en la superficie. (U.S. Department of the Interior, 2014)

En la figura 26 se presenta un circuito típico para una “Inyección Única o simple” en una sola etapa. Ahí se muestra el paso a paso que se debería ejecutar para la realización del proceso y se identifica el criterio a seguir, teniendo en cuenta si el resultado de la prueba de lugeon es nulo ($\text{lugeon}=0$), entonces el hueco se sella con una lechada de cemento y por el contrario si es mayor que cero ($\text{lugeon} > 0$) se inicia con el tratamiento de la inyección hasta llegar hasta la presión de rechazo o siguiendo el criterio de cierre más adecuado. (Fuente: Elaboración propia).



Notas:

1.- La toma de agua se verifica con el ensayo de **LUGEON**, que se debe realizar previamente a los tratamientos con inyecciones.

Figura 26. Circuito de Inyección Etapa Simple. Fuente: Elaboro Autor.

15.2 Etapa descendente con obturador.

La inyección descendente consiste en consolidar por etapas el área aferente del orificio desde la superficie de la excavación, hasta la parte más profunda del sondeo, con longitudes de 10 pies normalmente. Se inicia la primera etapa, perforando el primer tramo con longitud de 10 pies, colocando el obturador en la posición (1) como se indica en la figura 3 y posteriormente cuando se llega a la presión de rechazo, se continúa con la perforación hasta los siguientes 10 pies de profundidad, se lava el orificio, se desplaza el obturador a la

etapa siguiente, en la posición (2), se realiza prueba de lugeon y se procede a inyectar la lechada después de 24 horas, hasta obtener la presión de rechazo; de esta manera se continua así sucesivamente el procedimiento hasta terminar con la profundidad de diseño de la cortina. (U.S. Department of the Interior, 2014). El objetivo del método es ir formando un anillo consolidado desde la superficie del tunel hacia el interior de la roca. Véase Figura 27.

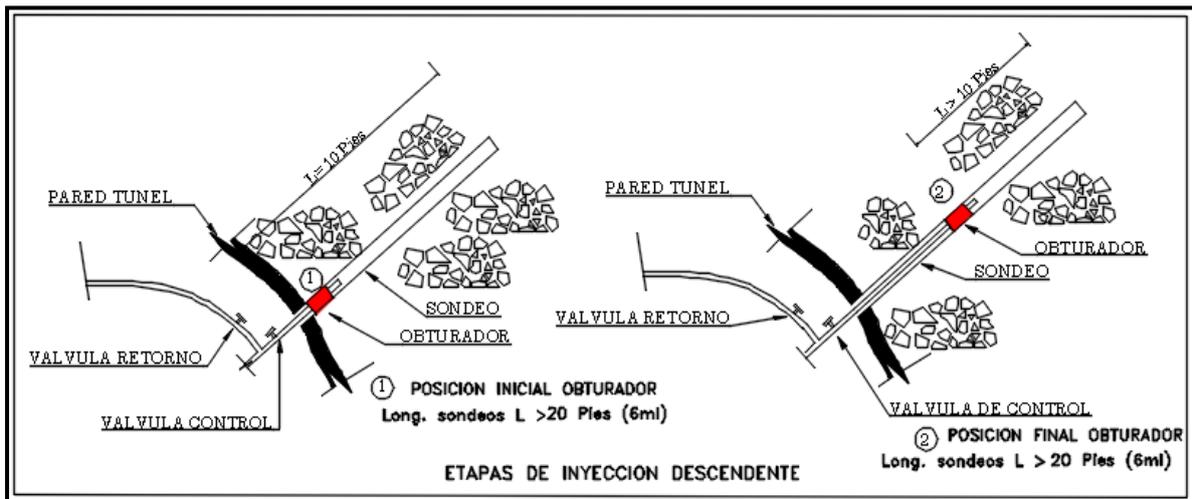
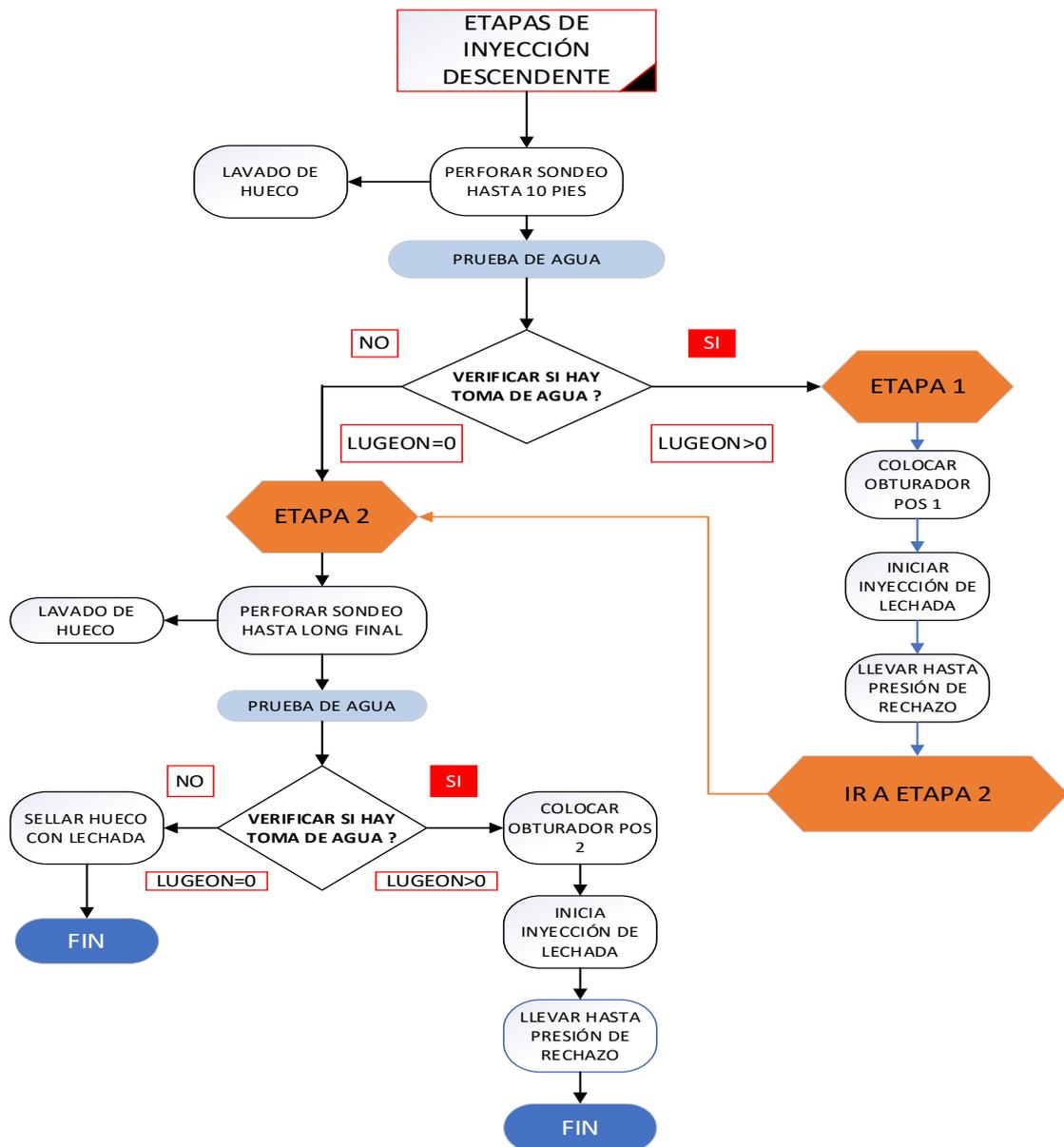


Figura 27. Etapas de Inyección Descendente. Fuente: Elaboro autor. Adaptado de (U.S. Department of the Interior, 2014)

Una de las finalidades de la dinámica del obturador es la de proteger las etapas previas inyectadas de las altas presiones que puedan derivarse de las etapas subyacentes. En conclusión, el método es dispendioso porque toca perforar varias veces y el Bureau Reclamation, lo recomienda para usarlo en situaciones donde se encuentren cavidades, derrumbes y posibles fugas de la lechada durante el proceso de inyección. (U.S. Department of the Interior, 2014)

En la figura 28 se muestra un circuito típico de una “Inyección Descendente” para un sistema de cortinas de seis metros de profundidad y con dos etapas de inyección de tres metros (3) de largo cada una.



Notas:

1.- La toma de agua se verifica con el ensayo de **LUGEON**, que se debe realizar previamente a los tratamientos con inyecciones.

Figura 28. Circuito de Inyección Descendente. Fuente: Elaboro Autor.

15.3 Etapa ascendente con obturador.

Este método de inyección, a diferencia del anterior, inicia desde la parte más profunda del sondeo con dirección hacia la superficie de la excavación, consolidando anillos de 10 pies de longitud, en una etapa a la vez. Se inicia perforando todo el hueco (Fig. 29), se lava, se realiza prueba de agua (Lugeon), se inyecta la primera etapa con el obturador en la posición

(1) (Fig.29) y se lleva el proceso hasta alcanzar la presión de rechazo; seguidamente, se debe dejar un tiempo de 5 a 6 horas, de fraguado de la mezcla antes de volver a reiniciar la inyección y se continua de la misma manera, desplazando el obturador hasta la posición(2) y así sucesivamente hasta alcanzar la profundidad de diseño de la cortina. (U.S. Department of the Interior, 2014) Véase figura 29.

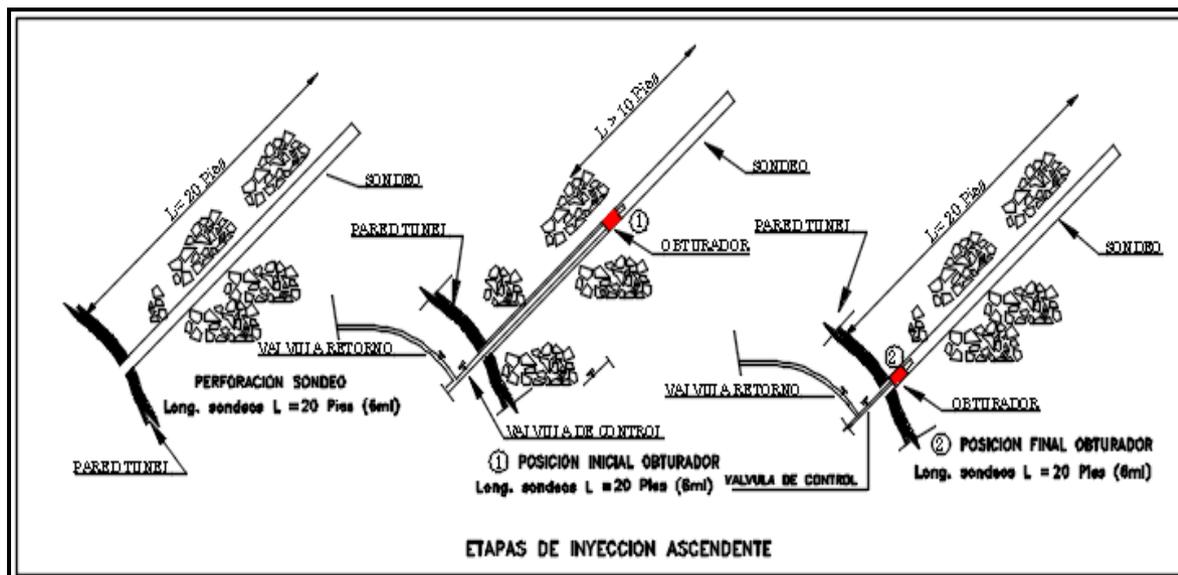


Figura 29. Etapas de Inyección Ascendente. Fuente: Elaboro autor. Adaptado de (U.S. Department of the Interior, 2014)

Es importante recordar que el valor de la prueba de lugeon = 0, es un indicativo de que la toma de agua es nula; en las demás situaciones el valor de la prueba de lugeon > 0, es un indicador de que habría toma de lechada y del grado de permeabilidad del macizo rocoso.

Esta técnica, no debe ser usada en huecos que presenten derrumbes y tampoco donde la geometría del orificio no sea circular porque es difícil instalar el obturador y con el adicional de que la roca no quede bien inyectada. (HOULSBY, 1990, p. 129)

Un circuito típico por etapas con longitudes de 10 pies cada una y un sistema ascendente se muestra en el siguiente diagrama de flujo de actividades (Fig. 30), en donde se

indican el paso a paso del proceso y los puntos de decisión de la interface con dependencia a los valores de las pruebas de agua. (HOULSBY, 1990, p. 129)

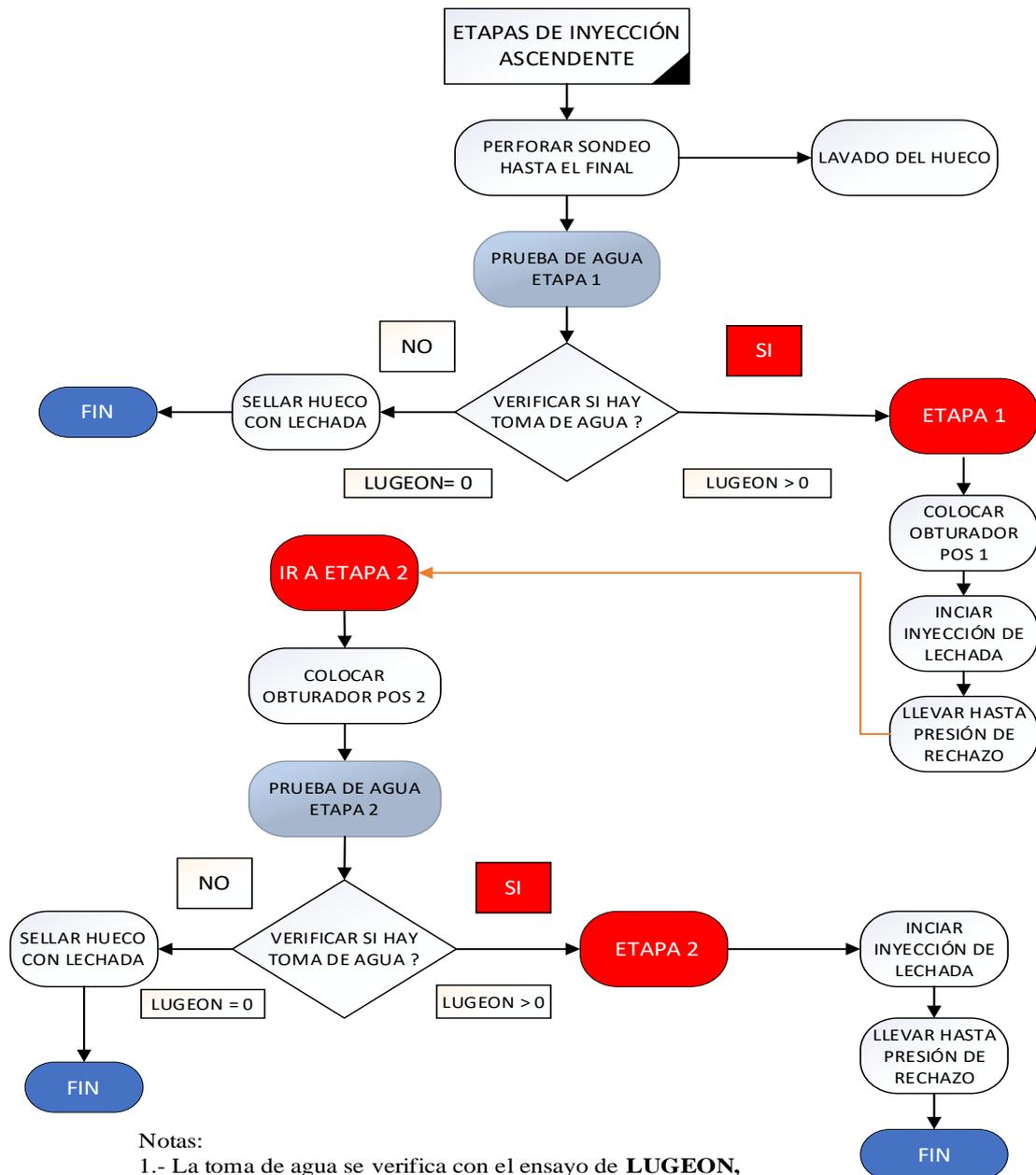


Figura 30. Circuito de Inyección Ascendente. Fuente: Elaboro Autor

16. PROCESO DE INYECCIÓN.

16.1 Paso 1. Preparación de la mezcla.

El agua de amasado con el cemento y los aditivos involucrados, se preparan en el tanque mezclador en donde se fusionan hasta obtener una consistencia uniforme que no contenga grumos. En el mecanismo indicado en la figura 31, la lechada es sometida a un mezclador coloidal de alta velocidad de rotación entre 1500 rpm y 2000 rpm, esto permite mantener la lechada en estado coloidal durante un lapso de tiempo y evitar la sedimentación de las partículas que se encuentren dispersas en el fluido (agua). Este volumen mezclado es indispensable reservar, en el caso de un procedimiento de "toma" alta, lo cual sería un consumo de características críticas en donde se necesita garantizar que el flujo de lechada sea óptimo. El bureau Reclamation recomienda un volumen mínimo de 17 pies cúbicos para el mezclador y agitador en conjunto (U.S. Department of the Interior, 2014). Véase figura 31.

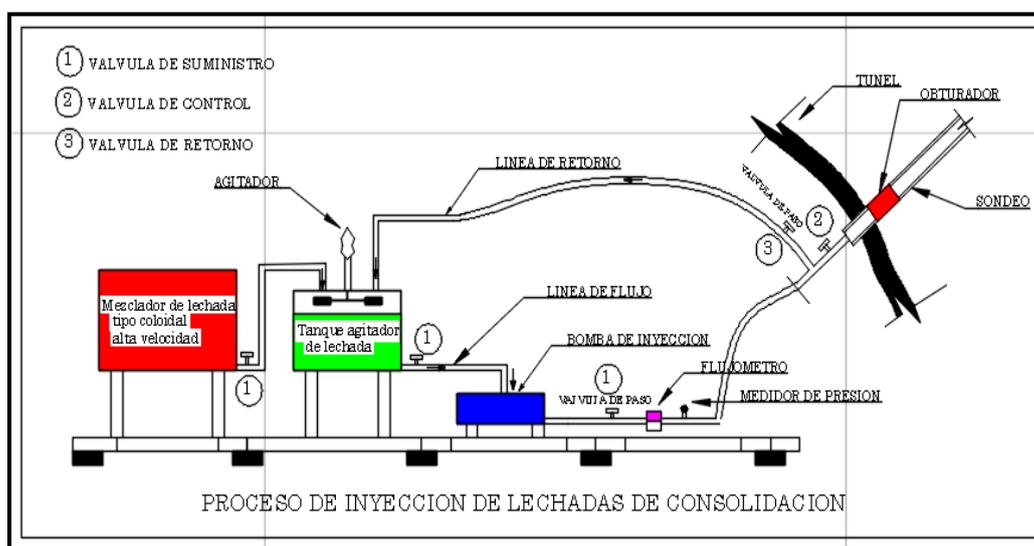


Figura 31. Proceso de Inyección de Consolidación. Adaptado de Bureau Reclamation. Embankment Dams. pp. 15-30. Fuente: Elaboro autor.

16.2 Paso 2. Agitación de la mezcla.

Seguidamente del tanque mezclador y como se indica en la figura 32 la lechada fluye a través de la línea de suministro, hacia el tanque agitador compuesto por un tanque en forma de tinajas verticales, tipo paleta giratoria, en donde se mantiene la mezcla en suspensión después de mezclar la lechada, esta situación previene que la lechada no se sedimente y en consecuencia el producto permanecería continuamente listo para ser inyectado. Una vez la lechada se encuentre toda en el tanque agitador se procederá a mezclar el siguiente lote de lechada en el tanque mezclador mientras se inyecta la mezcla del tanque agitador. (U.S. Department of the Interior, 2014) Véase figura 32.

16.3 Paso 3. Inyección del hueco.

Antes de iniciar la inyección, la válvula de suministro (1) y la válvula de retorno (3) deben estar completamente abiertas, y la válvula de control (2) debe estar cerrada. En este escenario, toda la lechada que fluye a través de la línea de suministro se dirige de regreso al tanque agitador a través de la línea de retorno. Véase Figura 32. (U.S. Department of the Interior, 2014)

A continuación, con la bomba circulando lechada en las líneas de suministro, la presión y el flujo hacia el orificio a consolidar se controlan en el colector (tubo dentro del orificio) mediante la válvula de control (2) y la válvula de retorno (3). La válvula de control (2) en el cabezal, se abre y ajusta gradualmente hasta que el valor de la presión sea estable. (U.S. Department of the Interior, 2014)

A medida que la válvula de control (2), se abre lentamente, la lechada comienza a fluir hacia el orificio de inyección. Por lo general, se debe mantener cierto flujo de retorno al tanque agitador. A medida que la etapa de inyección se aglutina para rechazarla, la presión aumentará gradualmente, lo que requiere abrir lentamente la válvula de retorno (3), cerrar la

válvula de suministro (1), y cerrar pausado la válvula de control (2), en el colector manteniendo una presión uniforme, hasta obtener la presión de rechazo. Véase figura 32.

(U.S. Department of the Interior, 2014)

Circuito de inyección en hueco.

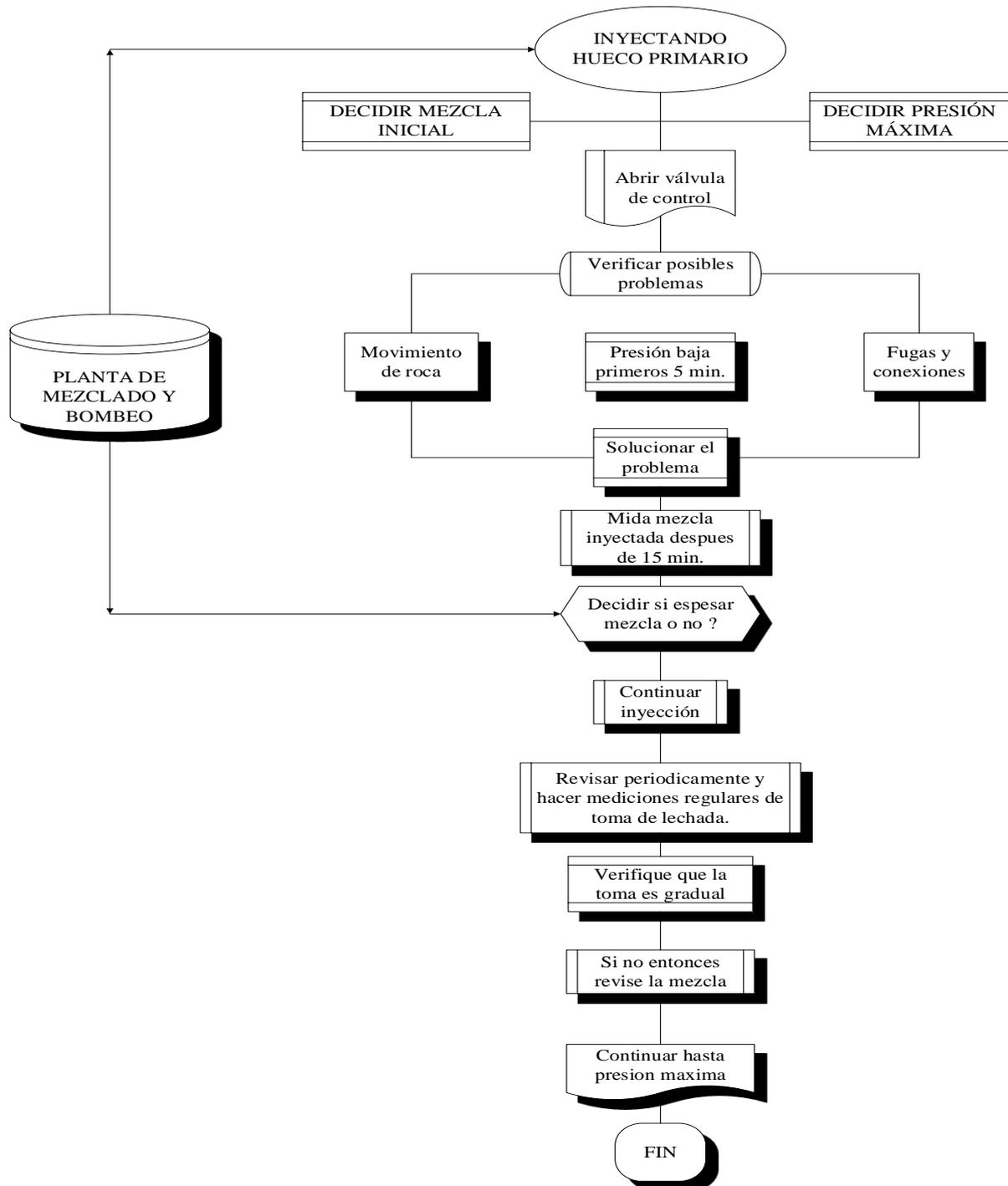


Figura 32. Esquema de inyección típico para un hueco de Anillo radial. Fuente: Elaboro Autor. Adaptado Desing of Grouting.A.C. Houlby. p.153.

17. PRESIÓN DE INYECCIÓN.

17.1 Criterios básicos.

Es preciso conocer los criterios que se han tenido en cuenta para la selección de las presiones de inyección de las lechadas usadas específicamente en los túneles que son diferentes a las usadas en la inyección de cortinas de presas. La regla de los Estados Unidos la cual establece que la presión de inyección debe ser de (1 lb/ pulg²) / por pie de profundidad del intervalo a tratar y la regla europea la cual indica que la presión de inyección de las mezclas sería de 1 kg/cm² por metro de profundidad. La recomendación europea permite utilizar presiones de inyección suficientes para agrandar las fracturas finas de tal manera que se garantice la admisión de la lechada como también lo indica Cambefort (1977) con la siguiente declaración: “Si no deseamos impedir la inyección de una fisura, la presión de rechazo deberá ser lo suficientemente alta como para agrandar la fisura”. (Weaver, 2007, p. 185)

Durante el proceso de inyección, la presión hace que las fisuras en la roca se abran, las partículas de las lechadas se depositan en las paredes de la fisura durante la inyección y, cuando se libera la presión, la fisura tiende a cerrarse contra la lechada inyectada, por lo tanto, produce una unión muy fuerte entre la lechada de cemento y la roca. (Weaver, 2007, pp. 185-186)

Los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas en Austria demostraron que la presión mínima requerida para iniciar la penetración de la lechada en una fractura puede, sin riesgo, parecer mucho mayor de lo que indicarían las diversas reglas generales. Los resultados de la prueba indicaron que la presión necesaria para iniciar el flujo de lechada en una diaclasa depende no solo del ancho de la diaclasa sino también de la forma de la

intersección del orificio de la cortina, con la diaclasa, el tipo de lechada, las propiedades reológicas, el grano y tamaño de las partículas en la lechada. (Weaver, 2007)

17.2 Presiones de inyección permitidas.

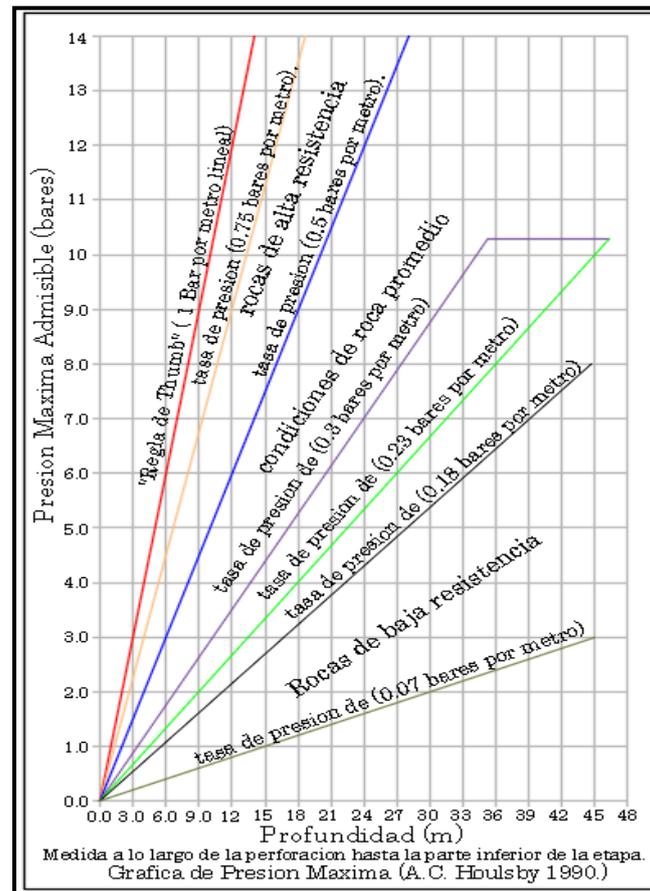


Figura 33. Presiones de inyección permitidas. Fuente: Elaboro autor. Adaptado Desing of Grouting.A.C. Housby. P. 152

En la Figura 33. Housby muestra las presiones de inyección permitidas promedio para condiciones de rocas de alta resistencia, rocas de resistencia moderada y rocas de baja resistencia. El gráfico muestran los valores de las presiones máximas sugeridas para diferentes características de resistencias y profundidades. Por ejemplo, en unas condiciones de roca de resistencia moderada a una profundidad de 12 metros, la presión máxima medida en el fondo de la etapa sería de 3.5 bares, y si las condiciones de roca son de resistencia dura en la misma profundidad, la presión máxima requerida sería de 12 bares, de acuerdo con la

“Regla de Thumb”, La idea es utilizar la presión de inyección más adecuada que permita garantizar las tomas de lechadas necesarias en orden de obtener un máximo de penetración dentro del macizo rocoso y evitar el fracturamiento de la roca considerando el estado de esfuerzos del macizo a profundidad (HOULSBY, 1990). (Construction and Design of Cement Grouting. A.C. Houlsby. pp. 151-154).

18. TASA DE INYECCIÓN.

18.1 Escenarios durante el proceso.

- Disminución repentina de presión.

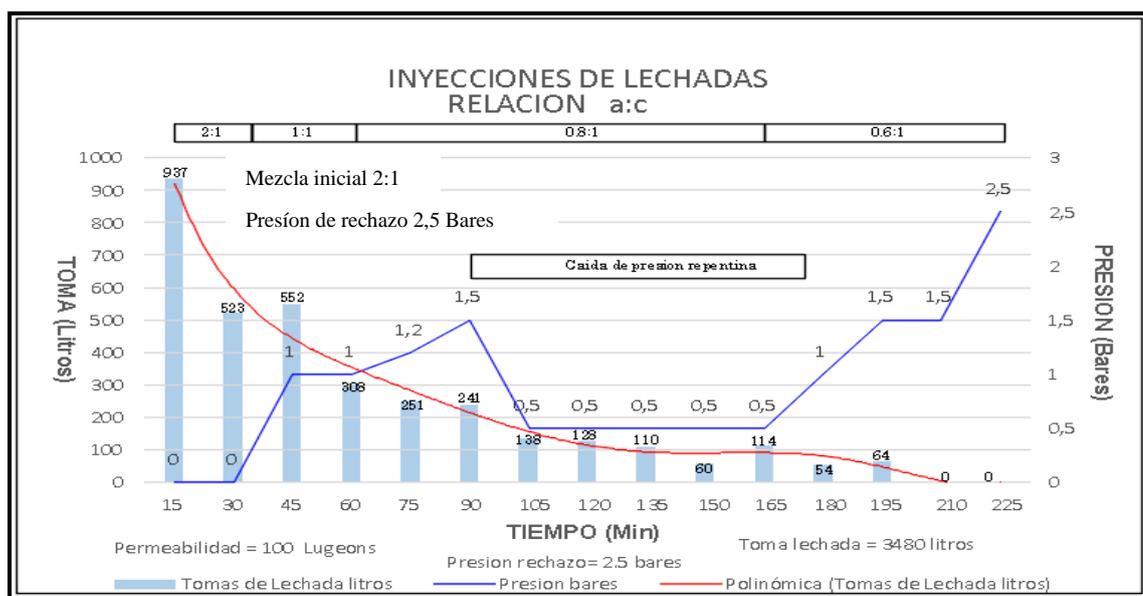


Figura 34. Escenario de pérdida repentina de presión durante el proceso. Fuente: Elaboro autor. Adaptado Construction and Design of Cement Grouting (A.C. Houlsby). pp. 186-187

En la figura 34, se aprecia en este escenario, una disminución gradual de la tasa de inyección desde el comienzo hasta el final del proceso y también se observa que el comportamiento de la presión de inyección fue relevante en la toma de decisiones, con referencia a la metodología del proceso y a las recomendaciones direccionadas al engrosamiento de las mezclas de lechada. La relación de mezclas utilizadas están entre un

rango de 2:1 y 0.6:1, y el criterio adoptado fue de engrosamiento continuo de la mezclas; en la gráfica se muestra que en los primeros 30 minutos se mantuvo un valor de presión nula y este resultado fue el indicador de que la mezcla de lechada debería espesarse, con relaciones 1:1, y 0.8:1 y consecuentemente, lograr que la presión se incrementará hasta 1.5 bares, en los siguientes 60 minutos; pero desafortunadamente por debilidad de la roca y el aumento de la presión hizo que el macizo rocoso se moviera y esto ocasionó la liberación repentina de la presión hasta llegar a 0,5 bares, y se mantuvo así durante la siguiente hora de inyección, hasta nuevamente espesar la lechada a 0.6:1, y producir el desenlace del proceso, hasta lograr la presión de rechazo previamente establecida (HOULSBY, 1990).

- **Disminución gradual de la tasa de inyección.**

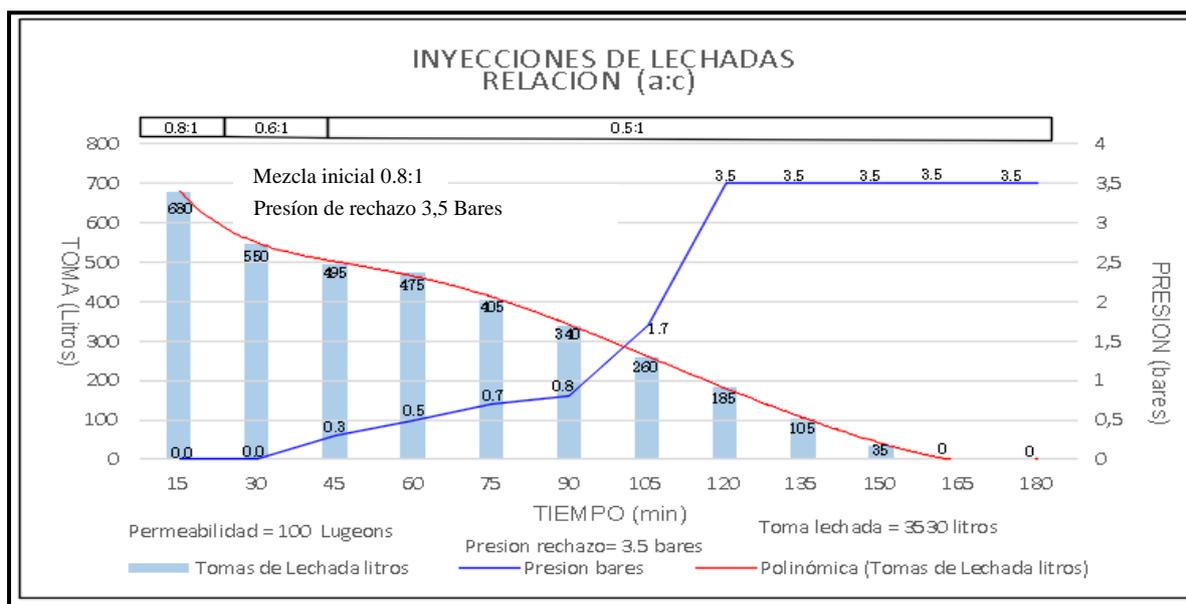


Figura 35. Disminución gradual de la tasa de inyección. Fuente: Elaboro Autor. Adaptado Construction and Design of Cement Grouting (A.C. Houlsby). pp. 184-185.

En este escenario, de la figura 35, se tomaron registros de toma de lechada cada 15 minutos, se muestra un consumo moderado de la toma, la etapa presenta un comportamiento normal de la mezcla con disminución gradual de la tasa de inyección, como se indica en la curva de gasto (curva polinómica). Así mismo la curva de presión se mueve en la dirección de rechazo, no se presentaron inconvenientes y la tendencia mostrada desde el inicio, se ve

reflejada con la disminución gradual de la tasa de inyección y en el engrosamiento de la mezcla hasta la relación 0.5:1. El engrosamiento gradual se produce en las mezclas a partir de los primeros 30 minutos, con relaciones a:c, desde 0.8:1 a 0.5:1, hasta conseguir la presión de rechazo establecida de 3.5 bares (HOULSBY, 1990).

- **Aumento y disminución gradual de la tasa de inyección.**

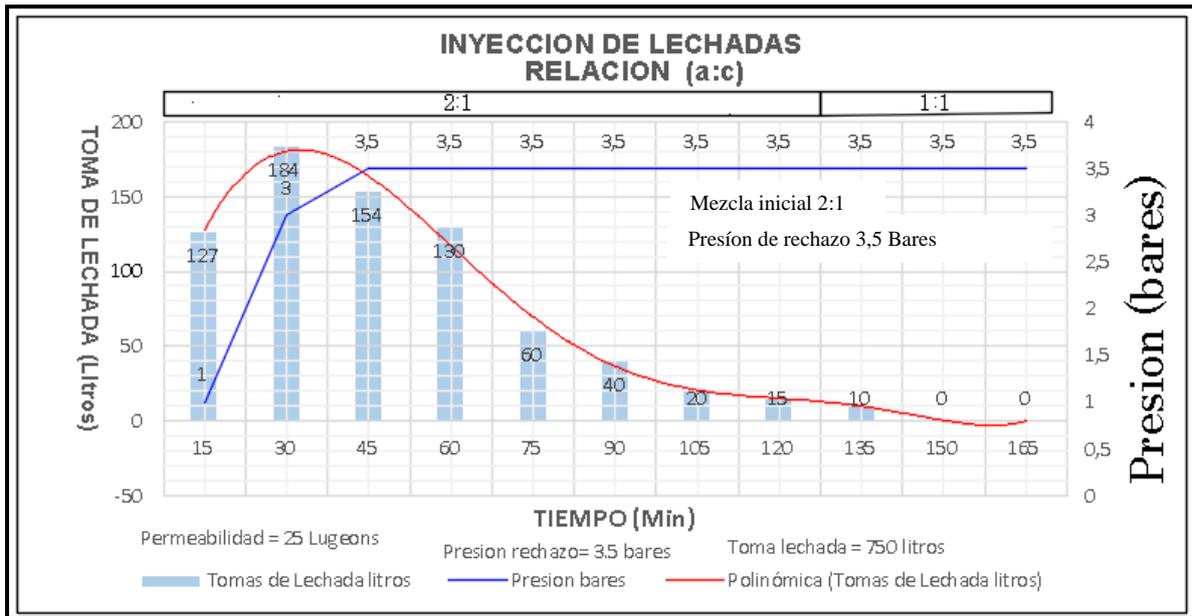


Figura 36. Aumento y disminución gradual de la tasa de inyección. Elaboro autor. Adaptado Construction and Design of Cement Grouting (A.C. Houslby).p. 183.

En el escenario de la figura 36, la permeabilidad de la roca en el entorno del orificio fue de 25 lugeon y la roca en la etapa que se está consolidando es uniforme, no hay fugas o conexiones a otros orificios de lechada abiertos, que puedan causar pérdidas; estos indicadores son el resultado de las pruebas de agua. El consumo de lechada es de moderado a bajo y llega hasta 750 litros (HOULSBY, 1990).

Con base en los valores de permeabilidad se determinó iniciar con una relación delgada con mezcla 2:1 y se engrosó posteriormente a 1:1 después de 2 horas, hasta alcanzar la presión de rechazo de 3.5 bares. Al inicio de la inyección la tasa de consumo se incrementó hasta llegar al pico máximo en los primeros 30 minutos y continuó el consumo en forma

descendente. Por otra parte, a pesar de que la presión de diseño se consiguió en la primera hora del proceso se prosiguió con la inyección teniendo en cuenta que la tasa de consumo se mantuvo así, con una disminución gradual en la tasa de inyección, hasta llegar al gasto nulo. (HOULSBY, 1990, p. 183)

Los tres escenarios anteriores para estos casos puntuales, nos permiten interpretar la correlación del espesor de las lechadas utilizadas, con los valores de Lugeon presentados para cada uno de los procesos analizados. Se observa que para valores con permeabilidad de 100 Lugeon, las lechadas delgadas no fueron las más acertadas y las gruesas dieron mejor resultado. Por el contrario, para valores de permeabilidad de 25 lugeon las lechadas delgadas se comportaron mejor. En este tipo de trabajos la experiencia juega un papel muy importante para lograr que los procedimientos y los criterios escogidos sean los más convenientes y llevar a buen término la inyección. (Fuente: elaboración propia).

A continuación, se explican otros escenarios que podrían igualmente presentarse durante el proceso de consolidación y/o impermeabilización del macizo rocoso:

- **Velocidad constante tasa de inyección.**

Cuando la tasa de inyección de lechada continúa durante un período prolongado de tiempo sin disminuir, generalmente indica que la mezcla de lechada debe espesarse. El punto en el que se toma la decisión de espesar variará, dependiendo de la tasa de toma de lechada. En una etapa con una velocidad de inyección lenta, puede ser apropiado inyectar durante una hora o más antes de cambiar las mezclas. En una etapa con una tasa de inyección relativamente alta, la decisión de espesar la mezcla se puede tomar después de inyectar tres o cuatro bachadas de la mezcla inicial. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

- **Disminución repentina de la toma.**

La disminución repentina en la toma generalmente indica que la lechada era demasiado espesa inicialmente (si la disminución repentina ocurrió con la mezcla inicial) o que el espesamiento de la mezcla no era el apropiado para las fracturas. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

- **Aumento repentino de la toma.**

El aumento repentino en la toma podría indicar uno de los siguientes tipos de condiciones: (1) dilatación de fracturas del macizo roco, (2) ruptura de fugas en la superficie o conexiones a otros agujeros, (3) Fracturamiento hidráulico.

(Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

19. CORTINAS Y ABANICOS DE INYECCIÓN.

19.1 Tratamiento de pos consolidación.

- **Sistema de cortinas radiales de inyección.**

La pos consolidación es un tratamiento que se realiza posterior a la excavación del túnel, en los sectores en donde se evidencian indicadores de baja calidad de la roca, puntualmente en los terrenos TIPO III, TIPO IV y TIPO V, (RMR), en donde los valores de índice de calidad son bajos. Básicamente el tratamiento además de fortalecer el material de base de la excavación es indispensable para mitigar la filtración excesiva de agua. En la figura 37 se muestran un detalle típico de la distribución de una cortina de inyección compuesta de cinco (5) anillos radiales, cada uno de 12 sondeos con una profundidad de valor equivalente al diámetro del tunel y corresponde a la zona elastoplástica producto de la excavación (Henn, 2010).

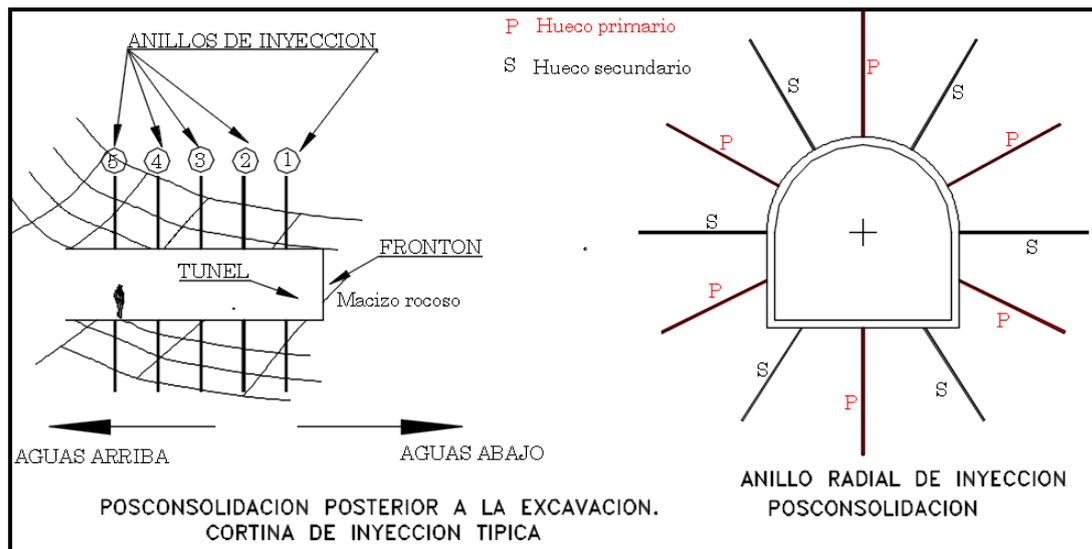


Figura 37. Posconsolidación Cortina Radial. Fuente: Elaboro Autor. Adaptado Practical Guide to Grouting of Underground Structures. Raymond W Henn. pp. 142-145.

La función principal del tratamiento es la ejecución del llenado con lechadas estables de las diaclasas abiertas, los planos de estratos separados, las zonas con fallas, las cavidades y defectos en la roca, hasta una profundidad o radio máximo de penetración. (Henn, 2010)

En el caso de túneles y pozos verticales de agua a alta presión interna (Centrales hidroeléctricas), la lechada de pos consolidación minimiza el flujo de agua hacia afuera a través del revestimiento de la estructura hacia la roca circundante después de que el proyecto se haya puesto en servicio, como en el caso específico de las Centrales Hidroeléctricas de Chivor Etapa I y II, la Central Hidroeléctrica del Guavio y otras localizadas en Colombia. (Fuente: Elaboración propia).

Independiente del índice de calidad de la roca establecido en determinado sector del túnel hay que considerar y tener en cuenta dentro del tratamiento de pos consolidación, que las superficies excavadas se relajan (zona elastoplástica), como se ha explicado anteriormente y adicionalmente se ocasionan mayores agrietamientos, aberturas de los sistemas de diaclasas, planos de estratificación más separados, todo esto como resultado de las vibraciones y las presiones de gas en expansión debidos a las voladuras convencionales y/o

excavadoras mecánicas con equipos Fresadoras, Rozadoras o Rice Boring. (Bieniawski (1989) sugiere que trabajos de voladuras controladas reducen el RMR en un 20%). (Henn, 2010, pp. 142-145)

Ahora bien, las cortinas de inyección, se plantean con un patrón predeterminado y bien definido en donde se establecen el número, localización y espaciamiento de los anillos radiales, las profundidades de los sondeos y el diámetro de las perforaciones el cual generalmente es entre 32 y 63 mm (1 ¼” y 2 1/2”). La cantidad de anillos de pos consolidación varían entre tres y cinco unidades radiales medidas horizontalmente con una distancia de cinco metros y la longitud entre los anillos exteriores se define como el “ancho de la cortina”. Cada anillo radial o “anillo de lechada” se identifica por tener un número de perforaciones o sondeos con profundidad equivalente a un diámetro del ancho del túnel y una distribución radial de orificios con orientación angular en grados que se emplean para identificar durante el proceso de inyección cuales serían los huecos primarios y secundarios el cual su uso se explica más adelante. (Henn, 2010, pp. 142-145)

Por otra parte, las cortinas de lechada para cámaras subterráneas, como centrales eléctricas y depósitos, se instalan simétricamente alrededor del perímetro. Véase figura 13. El "espacio entre perforaciones" se refiere a la distancia entre los centros de las perforaciones de lechada. Normalmente se perforan varios sondeos radialmente con las manecillas del reloj y en estaciones específicas a lo largo de la alineación del túnel. Esta agrupación de huecos se conoce como "anillo de lechada". (Henn, 2010)

Debido al gran número de perforaciones requeridas para el enlechado de las cortinas, el diseñador debe considerar cuidadosamente la posibilidad de consolidar las cortinas de lechada desde la superficie. Por lo general, esto solo es posible en las áreas del portal, ya que la mayoría de los túneles de presión, depósitos y centrales eléctricas subterráneas

generalmente se encuentran demasiado profundos para que la perforación de superficie sea práctica.

(Henn, 2010, pp. 142-145)

- **Sistema de abanicos radiales en nichos.**

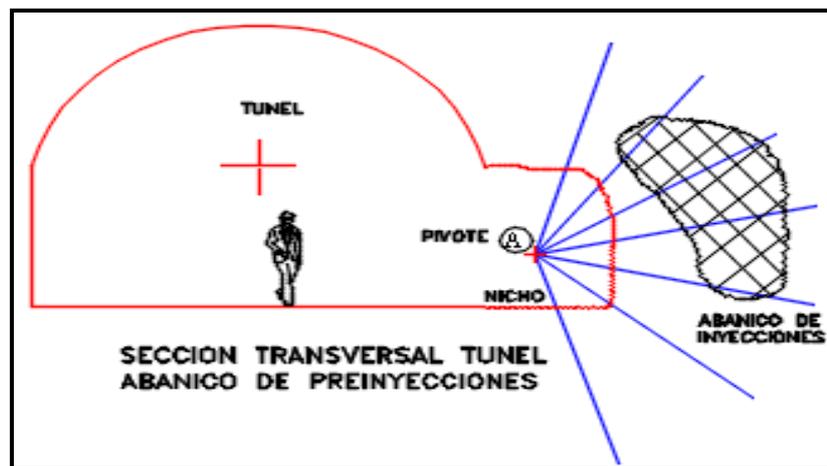


Figura 38. Abanico de Inyecciones tipo radial en Nicho. Fuente: Elaboro Autor. Adaptado Construction and Design of Cement Grouting.A.C. Houslby

Los diseños de los abanicos radiales en nichos, donde todos o la mayoría de los orificios irradian desde un punto; son una solución donde el acceso es ilimitado. Un abanico típico se muestra en la Figura No 38. Esta es una sección transversal con nicho lateral a través de un lugar incomodo donde cualquier otro diseño sería difícil. (HOULSBY, 1990)

Todos los orificios divergen desde un eje, (véase punto A en la figura 38) comúnmente a un metro cincuenta (1,5 m) del borde del piso y a la misma distancia de la cara, para que se proporcione un espacio y se disponga un taladro con el tamaño adecuado, en el punto del pivote (A). Véase Figura No 38. (HOULSBY, 1990, p. 245)

- Sistema de abanicos radiales en sección completa.

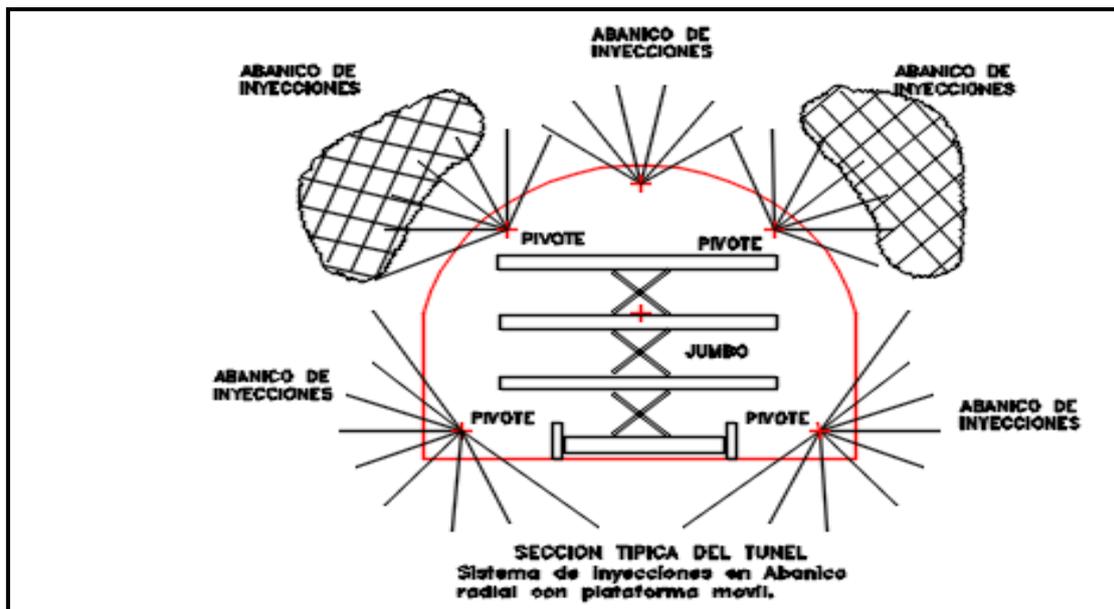


Figura 39. Túnel de Sección Grande con sistema de Abanicos de Inyecciones Radiales utilizando un equipo Jumbo con plataforma móvil. Fuente: Elaboro Autor. Adaptado Construction and Design of Cement Grouting.A.C. Houlsby

El sistema de abanicos radiales se ejecuta alrededor de la sección en túneles de grandes dimensiones, con anchos de excavación mayor a seis (6) metros de longitud, toda vez que su gran tamaño requiere tratamientos más puntuales dirigidos con ejes de proyección predefinidos. (HOULSBY, 1990, p. 246)

Para la consolidación de un túnel grande, pueden ser útiles grupos de abanicos. En la Figura No 39, se utiliza un EQUIPO JUMBO de dos pisos (equipo móvil vertical), y funciona como una plataforma para hacer las perforaciones y las inyecciones de lechada, así mismo se muestran tres puntos de pivote en cada lado localizados de tal forma que se puedan adaptar a los tamaños de los taladros (HOULSBY, 1990) .

19.2 Tratamiento preconsolidación.

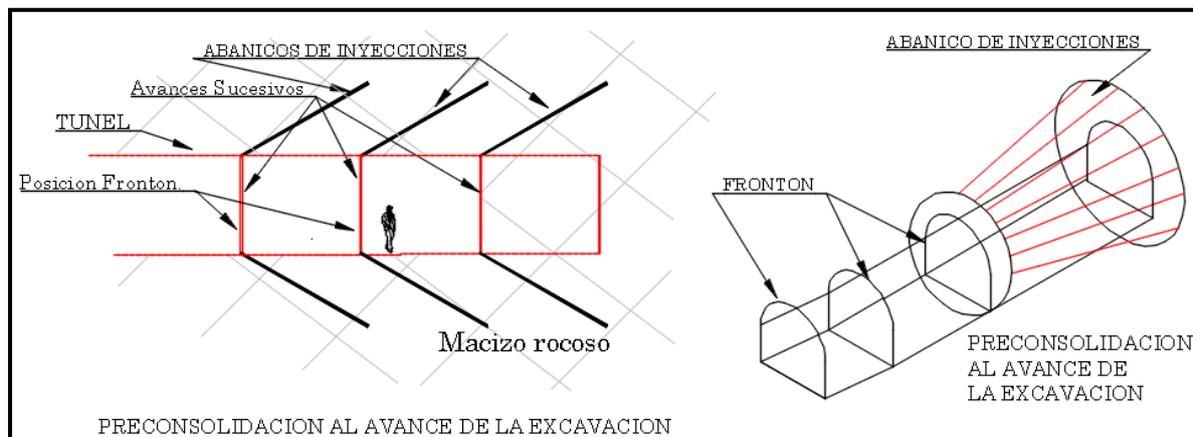


Figura 40. Sistema de Preconsolidación Abanico de Inyecciones Proyectado Túnel, Patrón repetitivo. Fuente: Elaboro del Autor.

- **Sistema de abanico proyectado desde el frontón del túnel.**

Este sistema de preinyección, se realiza con la metodología de avances cortos sucesivos y con proyección en la dirección de la excavación, cuando la estabilidad y la seguridad del personal del túnel está comprometida por continuos derrumbes y avalanchas. Su objetivo fundamental, es fortalecer la masa de roca y mitigar el exceso de filtraciones presentes durante la intervención del túnel. El sistema proporciona una cobertura en forma de abanico cubriendo el techo y las paredes del túnel; en la figura 40 se muestra una secuencia típica en donde cada avance está sujeto, primero a construir un abanico de inyecciones y luego ir avanzando con las excavaciones. El método interrumpe el desarrollo normal de las actividades de progreso del túnel en consecuencia a que las faenas de inyección se ejecutan previamente al avance programado. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

La profundidad y orientación de los orificios se estiman de acuerdo con la información referente a la caracterización de la roca definida por los sondeos de exploración

que se hacen previos a la ejecución de las preinyecciones. Generalmente la idea es reforzar la clave y paredes del túnel con un mínimo de longitud de avances de excavación, definido con base en el sistema de construcción si este se realiza de forma mecánica o el avance se efectúa con sistemas convencionales de voladura controlada. De conformidad con las cortinas de inyección radiales, los abanicos se inyectan con los mismos procedimientos descritos y se realizan huecos primarios y secundarios, para definir la secuencia base de la inyección y verificar su efectividad. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

- **Sistema de inyecciones desde las caras laterales del túnel.**

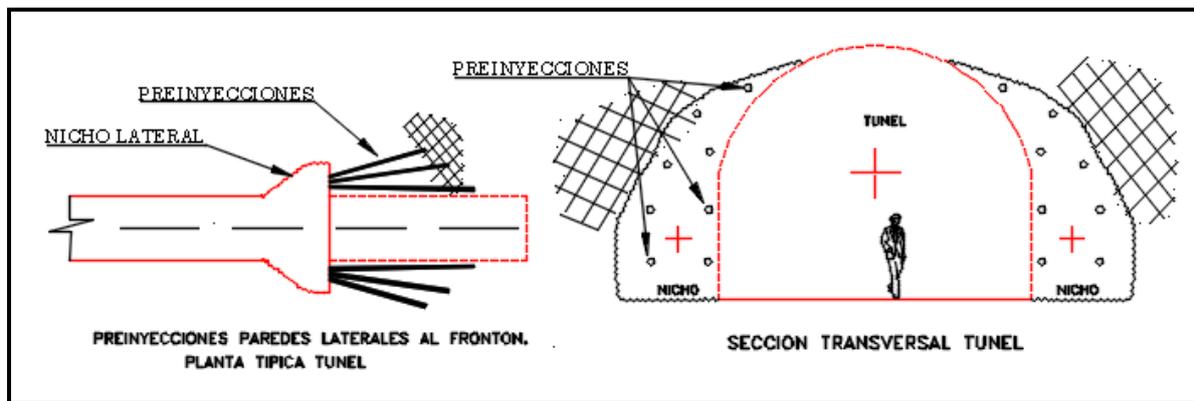


Figura 41. Preinyecciones laterales al frente de excavación. Fuente: Elaboro autor. Adaptado Construction and Design of Cement Grouting.A.C. Houlsby

El método de la figura 41. esta direccionado a reducir los tiempos de avance de las excavaciones con inclusión de un sistema apropiado de inyecciones a partir de las caras laterales. Es un sistema alternativo que puede ser usado paralelamente, al avance de la excavación del túnel con métodos tradicionales de voladura controlada, el cual el avance se activa una vez que las inyecciones han sido ejecutadas. (HOULSBY, 1990)

20. ANÁLISIS REOLÓGICO.

Previamente a los trabajos de inyecciones, es imprescindible disponer de los elementos de investigación de laboratorio y los insumos básicos incluyentes para lograr un óptimo estudio reológico de los fluidos y una preparación óptima de lechadas y de esta manera alcanzar los objetivos de la estabilidad de las mezclas. Para tal fin se deben efectuar todos los ensayos de laboratorio especificados según las normas para este tipo de trabajos (Mencionados en el capítulo 1). Las proporciones correctas de las mezclas de agua: cemento equilibradas se logran, con la inclusión adecuada de aditivos estabilizadores y plastificantes. (Fuente: Elaboración propia).

Las mezclas con relación agua: cemento, recomendadas y utilizadas en túneles, se encuentran en rangos de dosificación en volumen que varían entre 2:1 a 0.5:1 y son aquellas que presentan baja viscosidad con tiempo menor de < 50 segundos, en el ensayo del Cono de Marsh y baja exudación menor de < 5% (Weaver, 2007).

Estos compromisos técnicos se deben realizar con la participación de diferentes marcas de cementos existentes en el medio a ejecutar el trabajo, en razón a que las deducciones y conclusiones que se derivan de estos estudios permitan identificar cuales cementos se acomodan mejor a las necesidades técnicas solicitadas para este tipo de trabajos. (Fuente: Elaboración propia).

El uso de la bentonita, como aditivo estabilizante deberá tener un manejo adecuado toda vez que antes de usarla es preciso hidratarla entre 8 y 12 horas y durante este proceso mezclar el producto continuamente con el fin de evitar la formación de grumos para que en el momento de combinarse con el tipo de cemento seleccionado los resultados sean óptimos. (Fuente: Elaboración propia).

20.1 Factores que influyen en la efectividad de la lechada.

- **La Exudación.**

El objetivo de este ensayo, se realiza para deducir, cuáles de las mezclas serían las más convenientes desde el punto de vista de “estabilidad “con referencia a la exudación o sangrado de las lechadas. En la figura 42, se muestran los resultados de pruebas en “CONO DE MARSH”, obtenidos de la tabla 6 (cap. 1), y vinculados en las gráficas mostradas.

(Weaver, 2007).

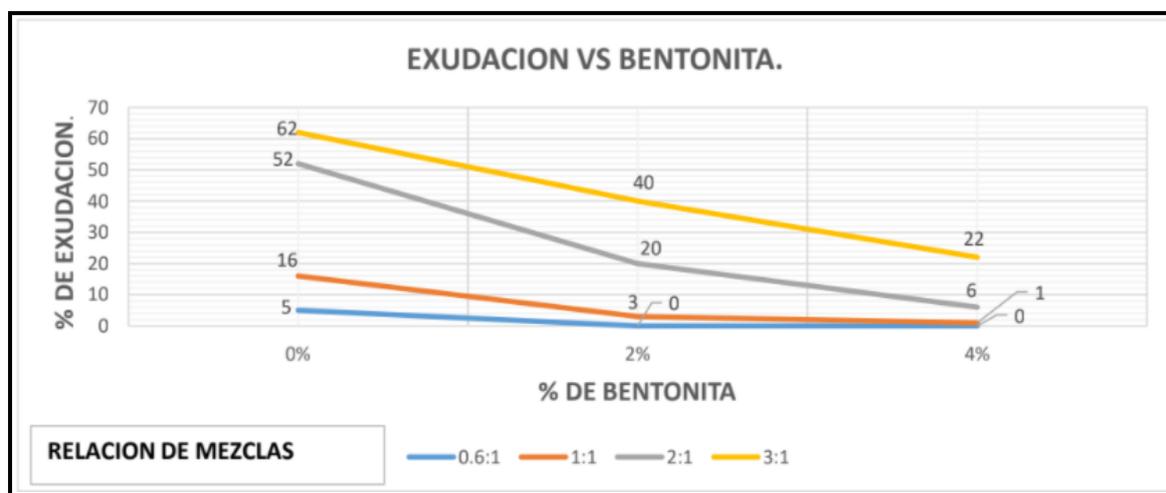


Figura 42. Variación del (%) Exudación vs (%) de Bentonita en Lechadas (A: C). Graficas vinculadas de Dam foundation grouting Weaver, (2007). Fuente: Elaboro Autor. Tabla 6 fase 1

En esta figura, se observa que las lechadas que mejor se ajustarían, en términos calificativos de “lechadas estables” serían las que aportaron datos menores de exudación. En este caso específico de estudio, los resultados condujeron a que la relación 2:1 (a:c), con proporción de bentonita del 4%, aportó el 6% de exudación, levemente por encima de la norma (5%), la relación 1:1 (a:c), con proporción de bentonita del 2% y 4%, aportaron el 3% y el 1%, de exudación respectivamente y con valores inferiores a la norma, y la relación 0.6:1 (a:c), con proporción de bentonita del 0%, 2% y 4%, aportaron 5% y 0% de exudación, inferiores igualmente a la norma, en conclusión se consideraron las mezclas indicadas

competentes para la buena efectividad y desarrollo de las inyecciones y que se ajustan con las especificaciones. (Weaver, 2007)

Por otra parte, los comportamientos de las curvas inducen que, a un mayor incremento en el porcentaje de bentonita y con un engrosamiento adecuado de la mezcla, el indicador del “sangrado” disminuye su valor; sin embargo, es importante revalidar estos datos, con otros indicadores, debido a que también hay que considerar en paralelo con estos ensayos, por ejemplo el valor de la resistencia a la compresión de las mezclas, ya que utilizar dosis muy altas de bentonita induce a bajar considerablemente las resistencias de las lechadas y esto no es conveniente, para el equilibrio de los resultados perseguidos. En consecuencia, lo que se busca es confrontar todos los resultados de los diferentes ensayos de laboratorio normativos para llegar a calificar una lechada con características de “estable”. (Fuente: Elaboración propia).

- **La Viscosidad.**

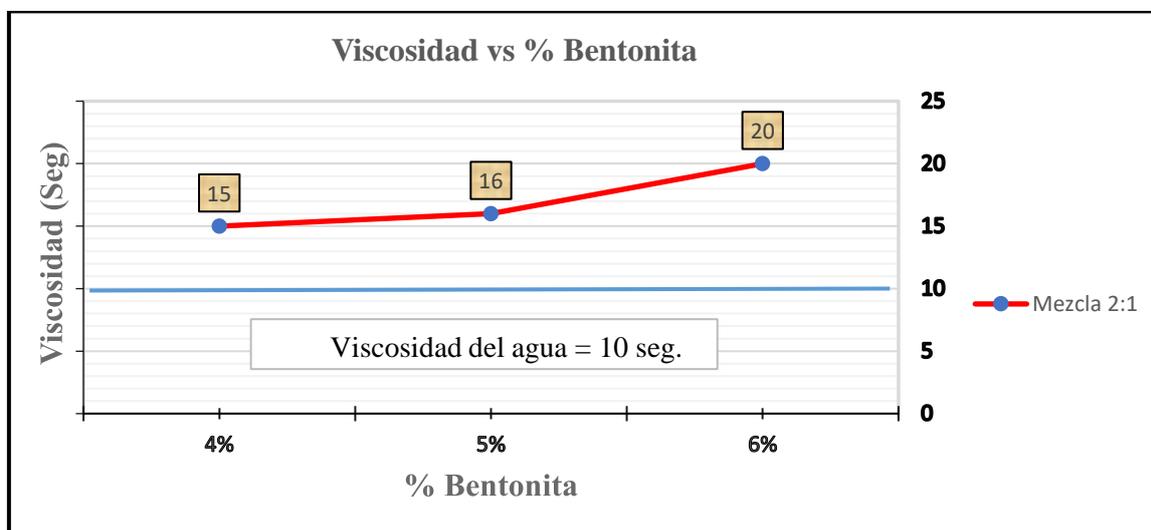


Figura 43. Variación del (%) Viscosidad vs (%) de Bentonita en Lechadas (A: C). Graficas vinculadas de Dam foundation grouting Weaver, (2007). Fuente: Elaboro Autor. Tabla 6. Cap. 2.

La viscosidad es una propiedad reológica muy relevante y en la Figura 43 se presenta la variación con el tiempo de las viscosidades determinadas en el cono de Marsh con una mezcla agua: cemento, relación 2:1 (tomada como ejemplo), utilizando tres valores en

porcentaje de bentonita dosificados en peso de cemento y se correlaciona con la viscosidad del agua que se obtuvo con un equipo específico (cono de Marsh) y se obtiene un valor de 10 segundos; si analizamos la variación con respecto al incremento en la porción de aditivo bentonita se observa que la lechada se hace más viscosa con el aumento de este aditivo y es un indicativo valorado de las propiedades de la bentonita para contribuir con la estabilidad de las mezclas usadas para el tratamiento con inyecciones. (Fuente: Elaboración propia).

- **La Resistencia a la Compresión.**

La resistencia a la compresión es un factor, que se vincula en la obtención de lechadas equilibradas, toda vez que su valor es directamente proporcional, con las distintas relaciones de agua: cemento y porcentajes de aditivos usados. En la Figura 44, se muestra una representación característica de la variación de este indicador, sobre lechadas con contenidos variables de bentonita. Los resultados evidencian que la bentonita mitiga la resistencia de las lechadas en la medida que aumenta el porcentaje del aditivo. Igualmente se deduce que las mezclas más espesas (1:1) y (1.25:1) con bajos contenido de bentonita (2%) y (2.5%), alcanzaron las resistencias más altas con valor de 9.4 Mpa y 6.3 Mpa a la edad de 28 días y las relaciones más delgadas (2/1, 1.5/1), aportaron resultados de resistencia muy inferiores, con valores más altos del aditivo bentonita (5%). (Fuente: Elaboración propia).

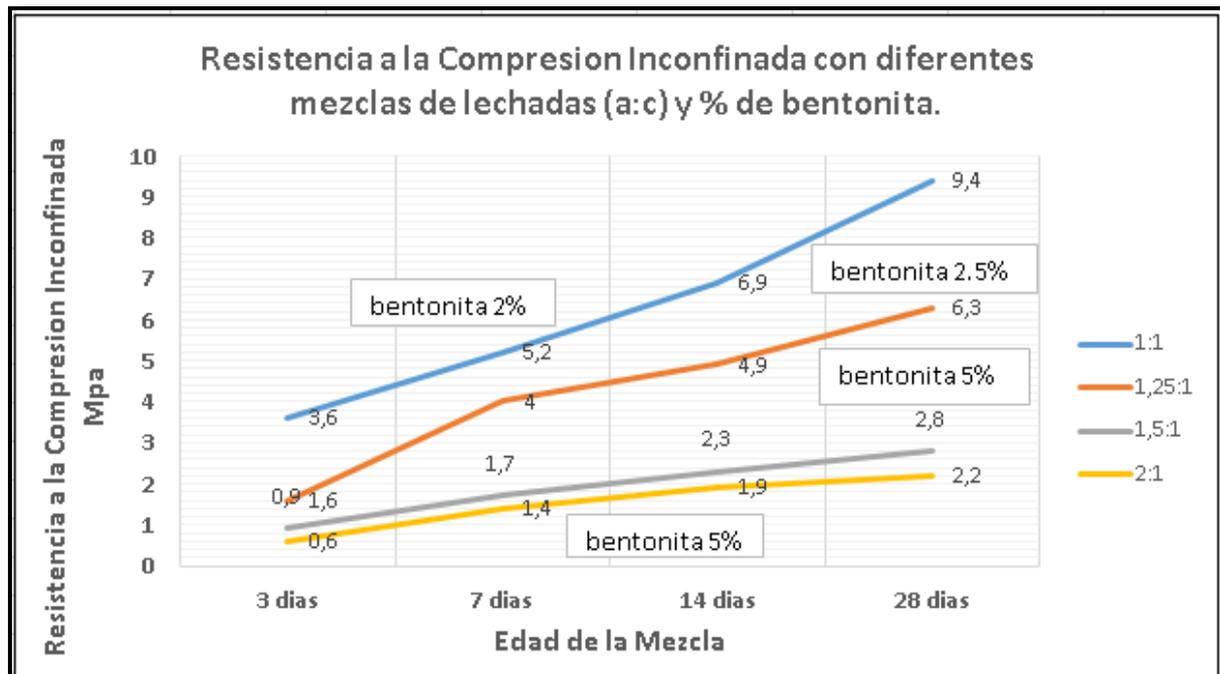


Figura 44. Resistencia a la Compresión Inconfinada con diferentes dosificaciones de lechadas a:c y % de bentonita . Graficas vinculadas de tabla de datos de Dam foundation grouting. Weave, (2007). Fuente: Elaboro Autor. Tabla 5. Cap. 2.

20.2 Proceso de mezcla de lechada.

- Definir la relación (a:c) y la bachada de lechada que va a preparar durante el ciclo de mezclado.
- Colocar con medidor de precisión la cantidad de agua necesaria en la mezcladora.
- Iniciar el mezclado a velocidad máxima.
- Si se van a utilizar aditivos, generalmente se colocan en el mezclador en esta etapa.
- Colocar la cantidad de cemento requerida en la mezcladora. use bolsas enteras de cementos únicamente por bachada.
- Mezcle la lechada por el tiempo especificado.

(HOULSBY, 1990)

20.3 Bachadas de lechada.

Material: Cemento

Densidad (estado suelto) = 1,15 kg/litro – 1,40 kg/litro

Densidad (asumida) = 1.25 kg/litro

Peso bolsa de cemento = 50 kg. (asumido)

$$\text{Volumen (estado suelto)} = \frac{50 \text{ kg}}{1.25 \text{ kg/litro}}$$

Volumen (estado suelto) = 40 litros. (asumido)

Volumen absoluto de cemento por bolsa de 50 kg.

Gravedad específica del cemento = 3.15 (Asumida)

$$\text{Volumen (absoluto)} = \frac{50 \text{ kg}}{3.15}$$

Volumen (absoluto) = 15.9 litros = 16 litros (asumido)

Volumen (absoluto) = 16 litros

Bolsa de cemento = 50 kg.

(HOULSBY, 1990)

Estos valores están asumidos y son datos tomados como referencia para el cálculo de las tablas de medida de los ingredientes, en consecuencia, deben ser valorados en laboratorio previamente para cada tipo y/o marca regional de cemento. Véase tablas 14 y 15.

Tabla 14

Valores característicos de una dosificación en volumen. Una bolsa de cemento

Bachada de ingredientes #1			
Volumen en (litros)		Relación (a/c) en volumen	# de bolsas de cemento (50 Kg)
Agua	Mezcla		
80	96	2:1	1
40	56	1:1	1
24	40	0,6:1	1
20	36	0,5:1	1

Fuente: Elaboro autor.

Adaptado de Construction and Design of Cement Grouting A.C. Houlsby, Batching and Measuring. pp. 69-70.

Tabla 15

Valores característicos de una dosificación en volumen. Dos bolsas de cemento

Bachada de ingredientes #2			
Volumen en (litros)		Relación (a/c) en volumen	# de bolsas de cemento (50 Kg)
Agua	Mezcla		
160	192	2:1	2
80	112	1:1	2
48	80	0,6:1	2
40	72	0,5:1	2

Fuente: *Elaboro autor.*

Adaptado de Construction and Design of Cement Grouting .A.C. Houlby, Batching and Measuring. pp. 69-70.

21. PRUEBAS DE LUGEON.

Existen dos tipos de ensayos, la prueba modificada para la exploración de macizos rocosos a profundidad y el método de versión simple en orificios para inyección de lechadas en túneles; ambos métodos para la determinación de la permeabilidad de las rocas. La diferencia entre estos dos sistemas radica esencialmente en que en el primer caso la prueba se realiza en perforaciones profundas y en un rango mayor de presiones utilizando cinco intervalos de tiempo, con una duración de 10 minutos cada uno y este caso específico esta sugerido para la exploración de macizos rocosos a profundidad; fundamentalmente para el diseño de las cortinas de inyección en fundaciones de presas. Por otra parte, en el segundo caso la prueba es de exploración simple y se realiza en orificios de poca profundidad cerca de la superficie del tunel y en consecuencia se utiliza un solo valor de presión usando tres intervalos de tiempo, con una duración de 5 minutos cada uno y se aplica como ya se indicó, previamente en los mismos orificios sugeridos, para el tratamiento de las inyecciones de consolidación. (HOULSBY, 1990)

La unidad de Lugeon es equivalente a la toma de un litro de agua, por cada metro de profundidad de perforación, en un minuto, a una presión de referencia de 10 bares (150 psi)

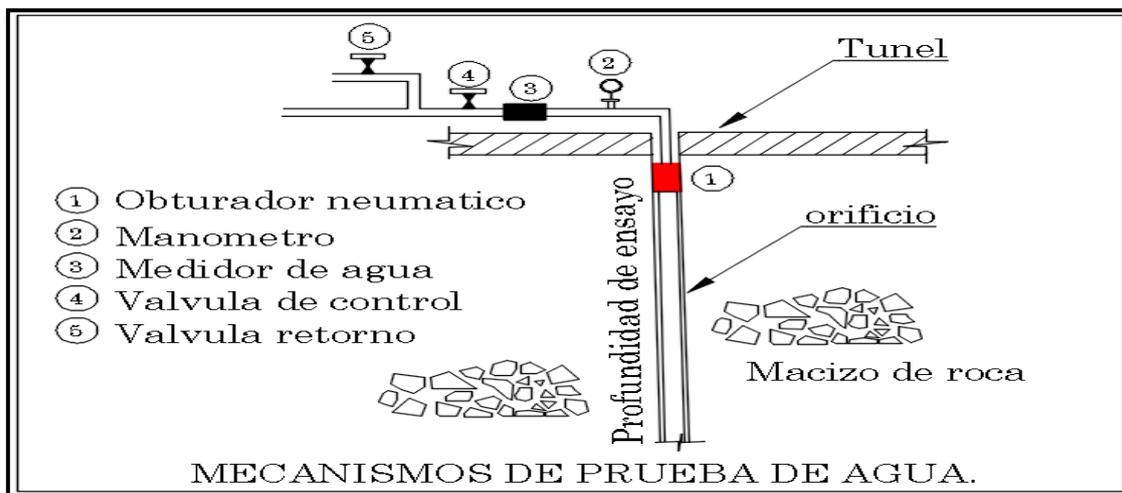


Figura 45. Esquema simplificado para la prueba de Lugeon. Fuente: Elaboro autor. Adaptado Construction and Design of Cement Grouting .A.C. Houlsby. pp. 123-126.

Paso a paso de la prueba.

- Conectar el equipo de prueba al orificio, obturador y accesorios. Pos. No 1. Fig.45
- Con la válvula de control cerrada. Pos. No 4. Fig.45
- Con la válvula de excesos o retorno (Pos. No 5) abierta parcialmente, con precaución abra la válvula de control (Pos. No 4) y regular la presión durante la prueba. Fig.45.
- Cuando se ha alcanzado la presión de prueba (Pos. No 2) comience a cronometrar el tiempo de prueba y simultáneamente lea el medidor de caudal de agua. Pos. No 3.
- Lea la toma de agua en intervalos de 5,10 y 15 minutos. Pos. No 3. Fig.45.
- Después de 15 minutos la prueba ha sido completada. desconecte el agua y retire el equipo de prueba.

(HOULSBY, 1990)

La etapa de prueba, se realiza en los huecos para inyecciones en una longitud de tres (3) metros de profundidad y además del tipo de flujo (laminar o turbulento), el ensayo

proporciona una guía de la mezcla adecuada de inicio, muestra la existencia de fugas en la superficie o entre orificios de las cortinas de inyección. (HOULSBY, 1990)

21.1 Prueba de exploración simple.

A continuación, se presentan tres casos típicos que representan el ensayo de lugeon, durante la ejecución de las pruebas de agua y así mismo se explica la interpretación de los datos:

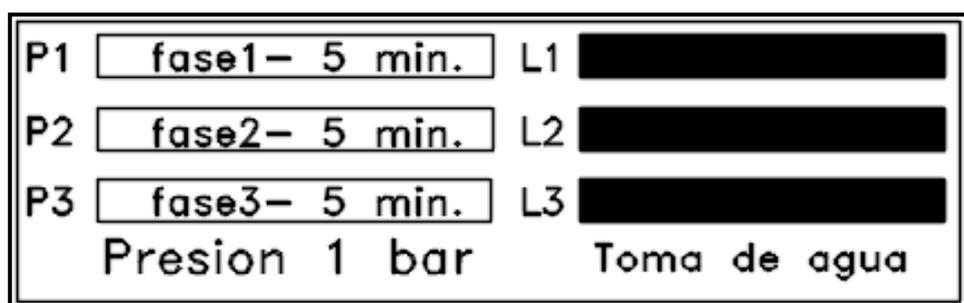


Figura 46. Caso 1. Pruebas de agua en huecos de inyección. Tomas de agua análogas. Fuente: Elaboro autor. Adaptado Construction and Design of Cement Grouting .A.C. Houlshby. pp. 123-126.

La prueba tiene una duración de 15 minutos, y en cada margen de tiempo se mide el valor de la toma de agua. La presión de toda la prueba es de 1 bar (15psi). En la figura 46 se muestra que las tomas de agua en las tres fases de tiempo son similares, y es un indicador de que el flujo de agua es uniforme (HOULSBY, 1990).

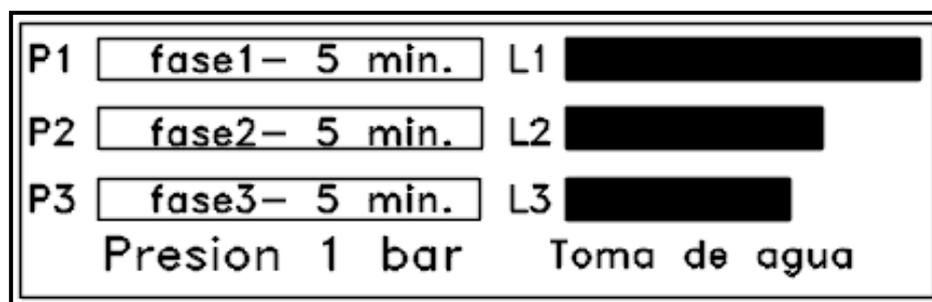


Figura 47. Caso 2. Pruebas de agua en huecos de inyección. Obstrucción de fracturas. Fuente: Elaboro autor. Adaptado Construction and Design of Cement Grouting .A.C. Houlshby. pp. 123-126.

En la figura 47, igualmente, que en el caso anterior la prueba tiene una duración de 15 minutos, y una presión para toda la prueba de 1 bar (15 psi). En este caso la prueba presenta una disminución progresiva de agua en los tres intervalos, y se estima que las fracturas se están obstruyendo con el tiempo.

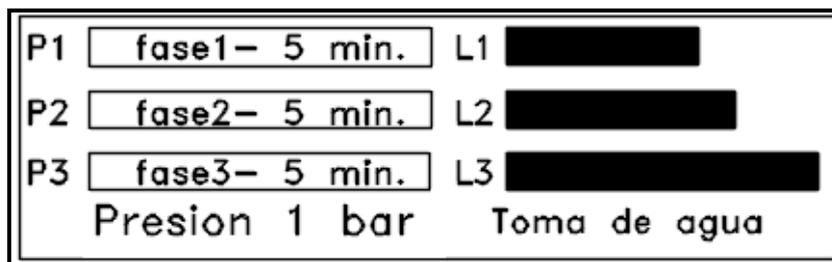


Figura 48. Caso 3. Pruebas de agua en huecos de inyección. Tomas de agua en aumento. Fuente: Elaboro autor. Adaptado Construction and Design of Cement Grouting .A.C. Houlsby. pp. 123-126.

Semejante a los casos anteriores, la duración de la prueba es de 15 minutos, compresión de 1 bar para toda la prueba, sin embargo, a diferencia las tomas de agua presentan un aumento progresivo en los tres intervalos, como se indica en la figura 48. Es un indicativo de la dilatación de las fracturas con el tiempo. (HOULSBY, 1990)

Cuando la prueba se realiza con una presión de 1 bar, el valor de lugeon se calcula con caudal de la toma en litros y longitud de la etapa en metros así:

- “Valor de lugeon = 2 x Toma de agua (litros/metro)”, en el intervalo de x 5 minutos.

Ejemplo: Si la toma de agua fue de 30 litros en una etapa de ensayo de 3 metros de longitud (intervalo de tiempo= 5 min):

El valor de lugeon = $2x (30 \text{ litros}/3 \text{ metros}) = 2x (10 \text{ lts}/\text{m}) = 20 \text{ lugeon}$. (respuesta)

Para diferentes presiones de ensayo, se utiliza el siguiente calculo:

Valor de Lugeon = (toma litros/metro/minuto) x (10 bares/presión en bares).

(HOULSBY, 1990, pp. 123-126)

21.2 Prueba de exploración modificada.

Se elaboran cinco pruebas de presión escalonadas y consecutivas de agua (bombeo), cada una de diez minutos de duración; los primeros 10 minutos están a baja presión - (presión "Pa" = 0.4 psi x profundidad (pies), (máx. 3.5 bares)), los segundos 10 minutos corren a una presión media - (presión "Pb" = 0.7 psi x profundidad (pies), (máx. 7 bares)), los terceros 10 minutos corren a una presión máxima o de referencia - (presión "Pc" = 1 psi x profundidad (pies) (máx. 10 bares)), la cuarta carrera de 10 minutos es a presión media - (presión "Pb" nuevamente), la quinta carrera de 10 minutos es a baja presión - (presión "Pa" nuevamente).

Cuando se usa la prueba modificada es necesario convertir los resultados en valores que habrían sido obtenido (supuestamente) si la presión de definición (10 bares) hubiera sido utilizada. Los valores de lugeon resultan de esta conversión. (HOULSBY, 1990, pp. 302-307)

Luego se calcula un único valor de lugeon para cada una de estas cinco pruebas, usando la siguiente ecuación:

$$\text{Valor de lugeon} = \frac{Q}{L} \times \left(\frac{P_o}{P} \right)$$

Ecuación 7 Cálculo del valor de Lugeon

Q = toma de agua en litros/ min

L = Longitud intervalo en estudio en metros. (5m < Long. < 6m)

P_o = presión de referencia = 10 bares

P = presión aplicada en la prueba en bares (Pa, Pb y Pc)

Una vez calculados los cinco valores de lugeon, se inspeccionan y comparan, y se puede tomar una decisión apropiada sobre cuál de los cinco valores se acepta como la permeabilidad informada en la prueba. (HOULSBY, 1990, pp. 302-307)

“La longitud de la etapa de prueba en el método modificado, debe ser aproximadamente entre cinco (5) metros y seis (6) metros, sin embargo, si se requiere mayor precisión o si las características geológicas deben ser investigadas más a fondo, entonces estas longitudes pueden ser reducidas al criterio del estudio” (HOULSBY, 1990, p. 219).

22. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS PRUEBA MODIFICADA.

La versatilidad del valor de Leugon a diferentes presiones suministra información sobre la familia de los sistemas de fractura. Se debe realizar un número suficiente de pruebas de presión escalonadas para que se comprenda la caracterización de cada unidad geológica. Los casos 1 a 5 muestran ejemplos esquemáticos de modos de comportamiento característicos ideales, junto con su interpretación. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

22.1 Caso 1. Flujo laminar.



Figura 49. Prueba de lugeon. Caso flujo laminar. Fuente: Elaboro Autor. Adaptado de U.S. Army Corps of Engineers. 15.17-15.21.

En la figura 49 se muestra el comportamiento típico del flujo laminar durante todo el proceso. Cuando el elemento de prueba (macizo rocoso), se constituye de fracturas limpias y más finas, normalmente habrá poca variación del valor de Lugeon con la presión porque está

dominada por un flujo laminar simple. La permeabilidad es constante dentro del rango de presiones utilizadas. Se toma como el promedio de los cinco valores.

(Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017, p. 15.18)

22.2 Caso 2. Flujo turbulento.

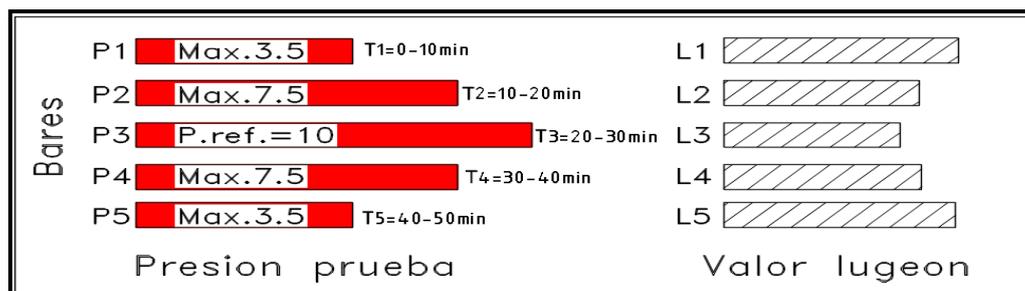


Figura 50. Prueba de lugeon. Caso flujo turbulento. Fuente: Elaboro Autor. Adaptado de U.S. Army Corps of Engineers. 15.17-15.21.

Cuando los valores de Lugeon disminuyen con el aumento de la presión, pero luego aumentan a valores anteriores a medida que la presión se reduce, generalmente indica la presencia de fracturas más grandes con flujo turbulento, lo que provoca una mayor pérdida de carga en la fractura y una menor permeabilidad a las presiones más altas. Se asume el valor de lugeon calculado para la presión máxima ("10 bares). (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017, p. 15.18)

22.3 Caso 3. Dilatación de fracturas.

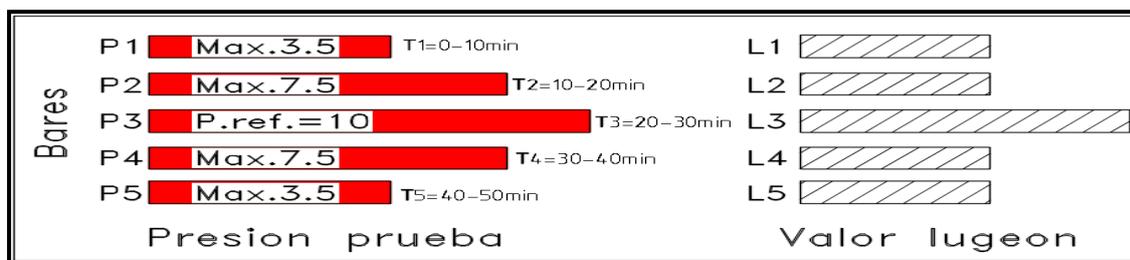


Figura 51. Prueba de lugeon. Caso dilatación fracturas. Fuente: Elaboro Autor. Adaptado de U.S. Army Corps of Engineers. 15.17-15.21.

Cuando los valores de Lugeon aumentan abruptamente a un incremento de presión particular, pero luego regresan a un valor constante más bajo a presiones menores, indica dilatación de las fracturas seguido de un retorno a la condición normal después de reducir la presión. Se deberá usar el valor de lugeon para las presiones más bajas o medias. Véase figura 51. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017, p. 15.19)

22.4 Caso 4. Lavado del material relleno de diaclasas

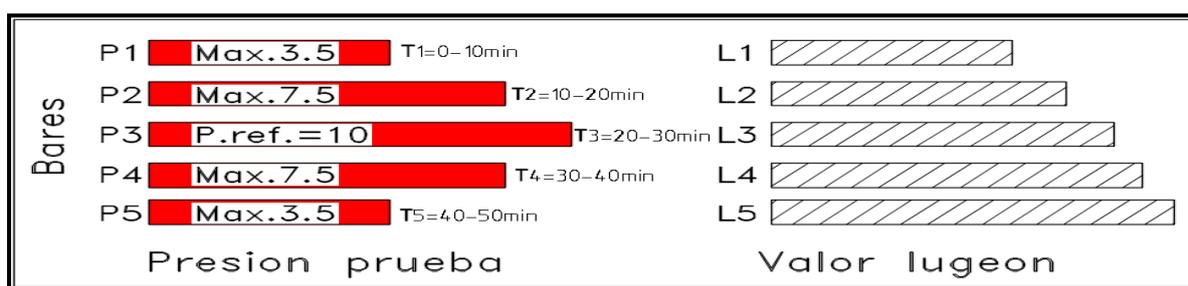


Figura 52. Prueba lugeon. Caso lavado de diaclasas. Fuente: Elaboro autor. Adaptado de U.S. Army Corps of Engineers. 15.17-15.21.

Cuando los valores de Lugeon aumentan continuamente (Figura 52), a lo largo de la secuencia de prueba, sugiere que el lavado del material ocurre con el tiempo. Se asume el valor de lugeon más alto. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017, p. 15.19)

22.5 Caso 5. Obstrucción con material de relleno de las diaclasas.



Figura 53. Prueba de lugeon. Caso obstrucción con rellenos. Fuente: Elaboro autor. Adaptado de U.S. Army Corps of Engineers. 15.17-15.21.

Cuando los valores de Lugeon disminuyen (Figura 53), continuamente a través de la secuencia de prueba, sugiere que la fractura se está obstruyendo con el tiempo. asumir el valor de lugeon final de la prueba. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

23. MAQUINARIA Y EQUIPO.

23.1 Planta dosificadora de mezclas.

Usualmente, los mezcladores de lechada, agitadores, bombas y equipos auxiliares se agrupan para crear una sola planta grande o una o más plantas de lechada pequeñas. Hay tres tipos básicos de plantas de lechada: plantas estacionarias (o centrales), plantas modulares (o en contenedores) y plantas de "bolsas" (cemento en bolsas y se coloca en los mezcladores manualmente). (Weaver, 2007, pp. 278-280).

- Plantas de bolsas de cemento.

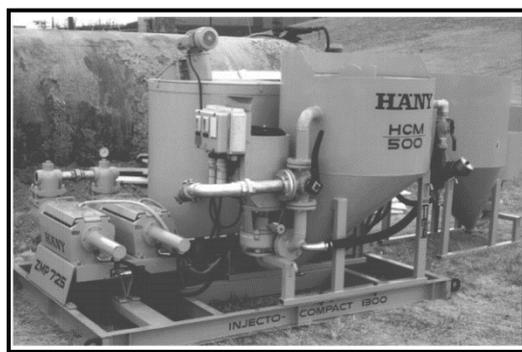


Figura 54. Planta móvil de Lechada. Hany HCM500. Con Agitador y mezclador de alta turbulencia y cizallamiento. (Fuente: Weaver, 2007)

Estas plantas de inyección (figura No 54) son relativamente pequeñas y compactas, constan de un mezclador coloidal de alta velocidad, y un agitador de mezcla. se recomiendan para usarse en túneles por su gran versatilidad en los tamaños, pesos y facilidad en el transporte. El mezclador de la figura No 56, es un tanque cónico activado por un rotor

localizado en la base girando entre 1500 y 2000 rpm, esto hace que genere una alta fuerza de cizallamiento de la lechada a través de la carcasa del rotor y luego recircula la mezcla hasta el tanque veáse figura 55. Este tipo de mezclador es de alta eficiencia toda vez que la lechada se perfecciona en un minuto después que todos sus componentes se encuentren en el mezclador. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

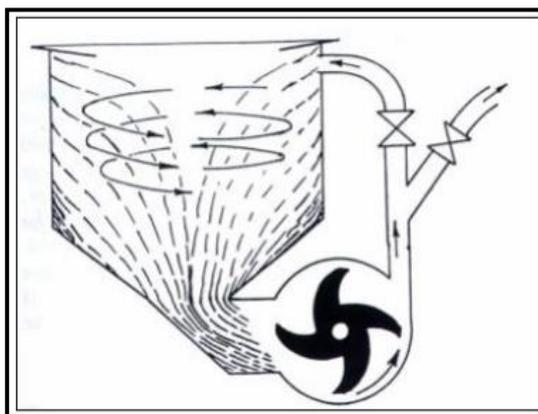


Figura 55. Tolva cónica y rotor mezclador. Hany HCM. Fuente: (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

Véase tabla 16, los modelos típicos de mezcladores con sus características técnicas.

Tabla 16
Modelos típicos de mezcladores

MODELO	HCM 100	HCM 300	HCM 600
Producción aprox. (M3/hora)	2	5	8
Capacidad de circulación (lts/min)	540	1100	1400
Volumen útil (lts)	100	260	550
Diámetro conexión de agua (mm)	19	25.4	38
Longitud (mm)	800	1150	1360
Ancho (mm)	640	820	1010
Altura total (mm)	1075	1140	1500
Altura de mezcla (mm)	870	1000	1360
Peso (kg)	115	250	320

Equipos de mezcladores. Hany HCM. Recuperado de (Weaver, 2007)

El agitador de la (Fig. 56), es un tanque cilíndrico con una o más paletas y se encuentra anexo a la planta compacta con el propósito de mantener en suspensión la lechada previamente mezclada a una velocidad de aproximadamente 60 rpm. Consta de un motor instalado en la parte superior con capacidad de girar las paletas hasta 100 rpm y el tanque está equipado con deflectores para evitar la formación turbulencias o remolinos del fluido. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

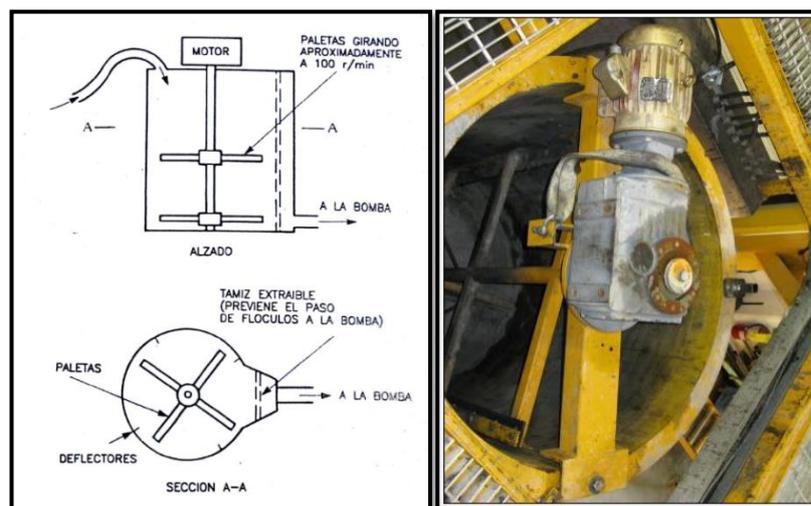


Figura 56. Tanque agitador. Fuente: Manual de túneles y obras subterráneas - Reclamation managing water in the west (10-5).

Los dispensadores de la (Fig.57), aportan la medición y dispensación precisa de los aditivos y son esenciales para la obtención de mezclas estables, de buena consistencia y calidad del producto. Los dispensadores pueden ser operador por aire o simplemente por gravedad. Estos últimos se encuentran integrados con el equipo de inyección y se componen de un tanque con capacidad de 15 litros para el aditivo químico y otro tanque para la bentonita con capacidad de 200 litros. Se alimentan por gravedad de forma manual o con equipos de bombeo acoplados al sistema. La figura 57 muestran los tanques de dosificación incorporados a un mezclador. (Weaver, 2007)



Figura 57. Equipo dispensador de aditivos. Hany HCM. Fuente: (Weaver, Dam Foundation Grouting , 2007).

23.2 Bombas de inyección de lechadas.

El equipo de bombeo, es una parte importante del sistema de inyección y su objetivo principal además de permitir y vigilar el flujo de lechada es el de controlar la presión y la velocidad durante el proceso de inyección. Por otra parte, las bombas deberán estar especificadas apropiadamente para sostener las presiones y caudales requeridas en un proyecto específico. Existen dos tipos de bombas las de cavidad progresiva y de pistón Las bombas tipo pistón usan un sistema hidráulico que genera altas presiones cíclicas con una diferencia de presión significativa entre valores máximos y mínimos en la medida que las válvulas se abren y cierran durante el ciclo del pistón. Las bombas tipo pistón mejoran la penetración de la lechada a diferencia de los equipos de bombeo con presión constante. En la figura 58 se muestra una bomba neumática tipo pistón de alta presión y velocidad.

(Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)



Figura 58. Bomba Neumática tipo pistón. Fuente: (TECOP, 2019)

Las bombas de cavidad progresiva o de rotor helicoidal (Fig. 59), mantienen la presión y velocidad constante durante el bombeo. La lechada entra en la garganta de la bomba desde el agitador y se mueve a lo largo con un movimiento similar a un tornillo, entre el estator y el rotor. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017) Us Army corp. Engineers. (10-7) (10-8)

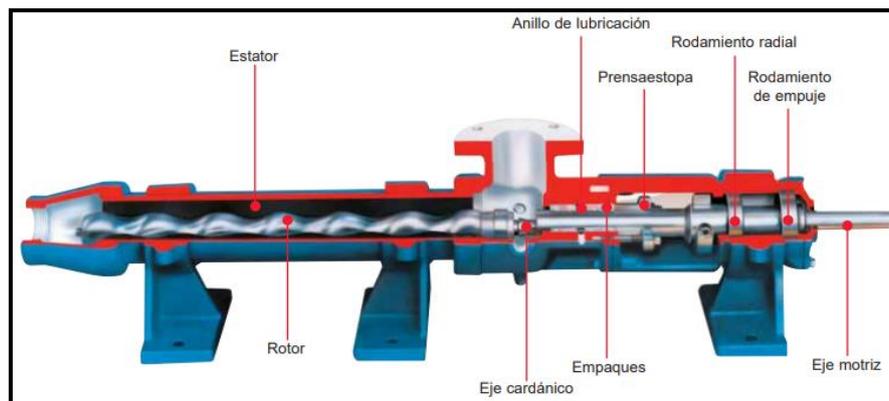


Figura 59. Bomba de cavidad progresiva. Fuente: (Bombas Moyno Serie L, 1997)

23.3 Perforación.

La selección del equipo y método de perforación depende de las características geométricas del tunel, de la caracterización de la roca a perforar, la profundidad de la perforación y el acceso a la ubicación del sector a inyectar. (Fuente: Propia)

- **Taladro jumbo hidráulico.**

Esta máquina se utiliza en la excavación de túneles en roca dura con secciones mayores a 12 m², el equipo es apto para realizar los trabajos de perforaciones verticales, inclinadas y horizontales necesarios para el tratamiento con inyecciones de lechadas. Posee un brazo universal con excelente cobertura de secciones y una barra de avance que puede girar 360°, lo cual favorece el posicionamiento de la perforación. En la figura No 60 se muestra un taladro jumbo hidráulico y se especifica cada uno de sus componentes.

(KAISHAN, 2019)

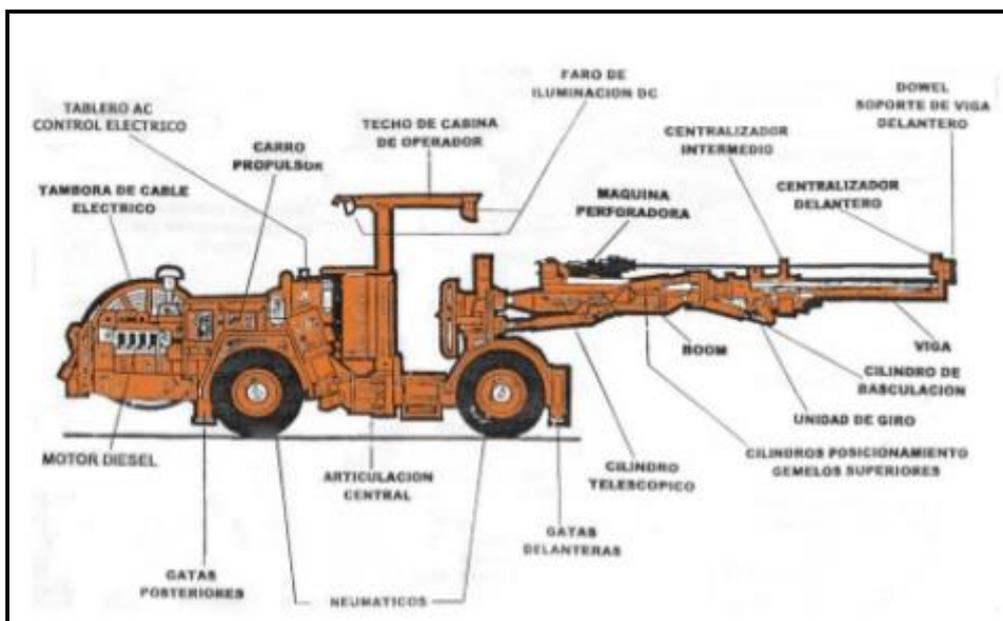


Figura 60. Taladro Jumbo hidráulico de percusión rotación. Fuente: (Introducción al jumbo hidráulico, 2014)

Existen dos métodos comunes de perforación en roca; la percusión y la rotación. El método de percusión usualmente es para aplicarlo en perforaciones de manera efectiva en profundidades de orificios hasta aproximadamente 18 m (60 pies), y el método de rotación se adecua para perforaciones más profundas mayores a 18 m. (Pernia, 1987)

La perforación por rotación de alta velocidad es un método no destructivo, utiliza brocas diamantadas, los agujeros son más rectos y deja las paredes del agujero más lisas. La perforación por percusión es un método más destructible, puede producir fracturas en la roca y generar virutas por el impacto o la acción de astillado. Esta circunstancia puede ser mejorada al momento de realizar un lavado a fondo del agujero con agua para eliminar los recortes realizados en el proceso de la perforación de percusión. (Pernia, 1987).

El método de percusión - rotación (Fig. 61 y Fig. 62), utiliza un martillo para impartir la energía de percusión a la broca a partir de la barra de perforación mientras que el cabezal de perforación imparte una rotación lenta. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017) Us Army Corp. Engineers (9-5)

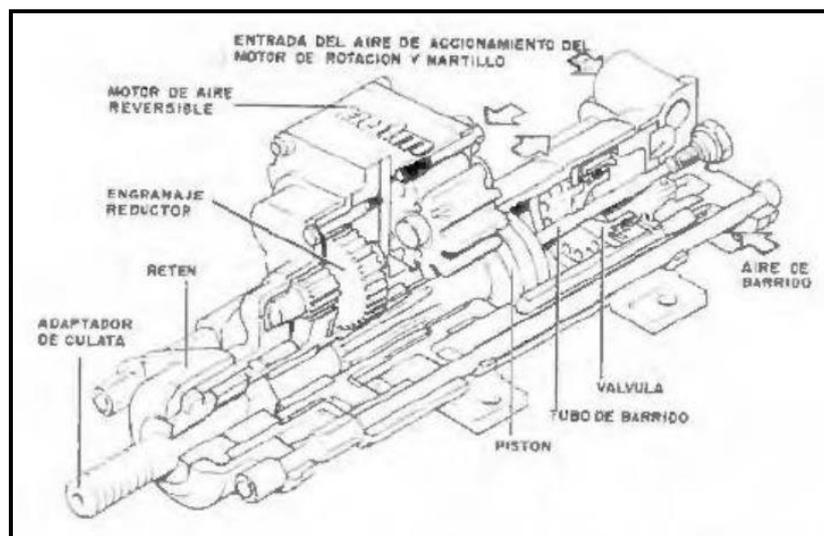


Figura 61. Máquina perforadora. Tomada de: Manual de perforación y voladura de rocas.

- Martillo en cabeza: En estas perforadoras de las acciones básicas, rotación y percusión, se producen fuera del barreno, se transmite a través de una espiga y del varillaje. Los martillos pueden ser de accionamiento neumático o hidráulico. (Pernia, 1987, p. 25)

- Martillo en fondo: La percusión se realiza directamente sobre la perforación de la boca del orificio, mientras que la rotación se efectúa en el exterior del barreno. El accionamiento del pistón se lleva a cabo neumáticamente, mientras que la rotación puede ser neumática o hidráulica. (Pernia, 1987, p. 25)
- La perforadora realiza una fuente de energía mecánica, el varillaje transmite esa energía, la boca ejerce sobre la roca dicha energía y el fluido de barrido realiza la limpieza y la evacuación del detrito efectuado. (Pernia, 1987, p. 25)

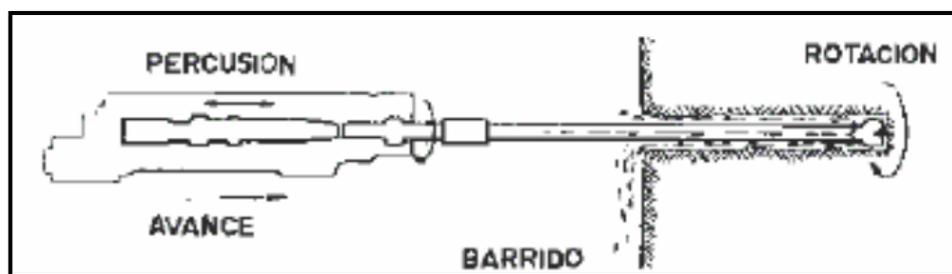


Figura 62. Proceso percusión – rotación y barrido. Recuperado de Manual de perforación y voladura de rocas.

23.4 Taladro manual neumático.

El taladro de pierna (Jack leg) (Fig.63), se acciona neumáticamente y es operado por un trabajador. Estos taladros de percusión son utilizados para tratamientos con inyecciones, especialmente para taladrar agujeros poco profundos hasta 3.6 metros de profundidad en excavaciones con secciones menores a 12 m² y con diámetros de perforación pequeño. Las longitudes de varillas que maneja el taladro de acero generalmente van desde 0,6 m a 3,6 m en incrementos de 0.6 y las brocas son generalmente de tipo cincel y varían de 25 a 50 mm de diámetro. (Raymond, 2013.)



Figura 63. Taladro Jack leg neumático. Tomado de: Practical guide to grouting of underground structures.

24. LÍNEAS DE CIRCULACIÓN.

Las líneas de circulación están compuestas por tuberías que se encargan en transportar el fluido. Hoy en día existen dos sistemas de líneas de circulación, las que tienen retorno y las que carecen de él. (Aduvire, 1997).

24.1 Sistema de inyección con retorno.

En un sistema de circulación con retorno (Fig.64 y Fig.65), se presentan dos líneas: la primera es la de salida de la inyección en el sondeo y la de retorno que se une con el agitador (Bypass). Estas líneas de circulación están equipadas con manómetros de presión, válvulas de compensación y en ocasiones una llave de paso para controlar la presión en el sondeo después de inyectar la mezcla. (Aduvire, 1997)

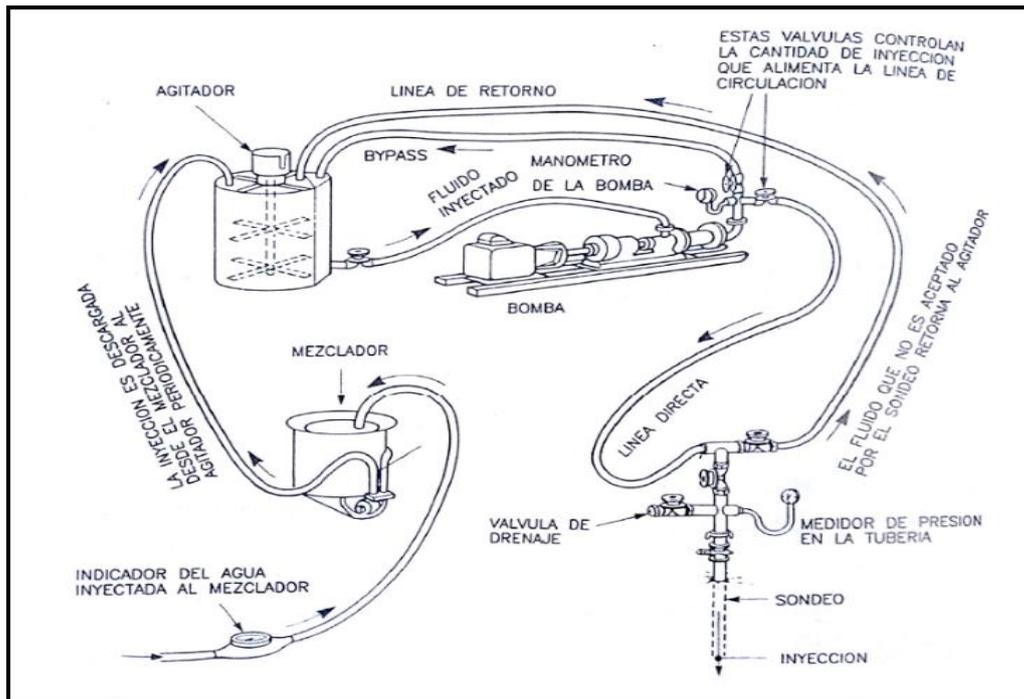


Figura 64. Línea de circulación de lechada con retorno. Tomada de Manual de túneles y obras subterráneas.

Con este sistema, la presión y el caudal son regulados con ayuda de la válvula de paso colocada en la línea de retorno, permitiendo que el fluido sobrante retorne al agitador. El diámetro de las tuberías, usualmente debe ser pequeño para conseguir altas velocidades al momento de inyectar y evitar la obturación en las líneas, el cual reduce las velocidades y las condiciones de transporte serían malas, el diámetro que usualmente se manejan en las líneas de conducción es de 25.4 mm. (Aduvire, 1997)

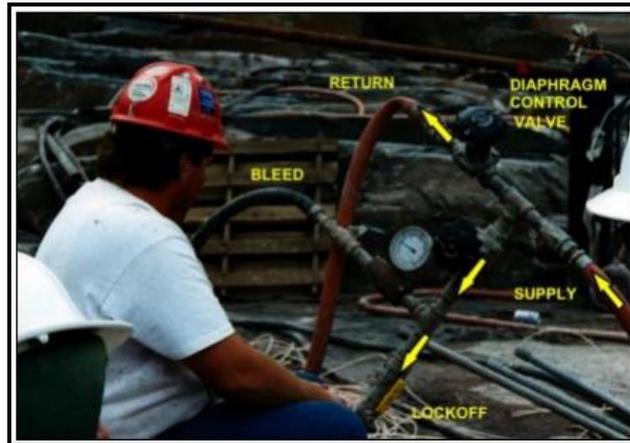


Figura 65. Técnico en control de línea de circulación con retorno. Recuperado de: (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017) (10-13)

24.2 Sistema de inyección sin retorno.

El sistema de inyección directo, implica bombear la lechada desde el agitador hasta el agujero, sin línea de retorno (Fig. 66). Este sistema no posee ningún mecanismo para controlar la presión por el agujero que no sea el cierre de la válvula del agujero inferior.

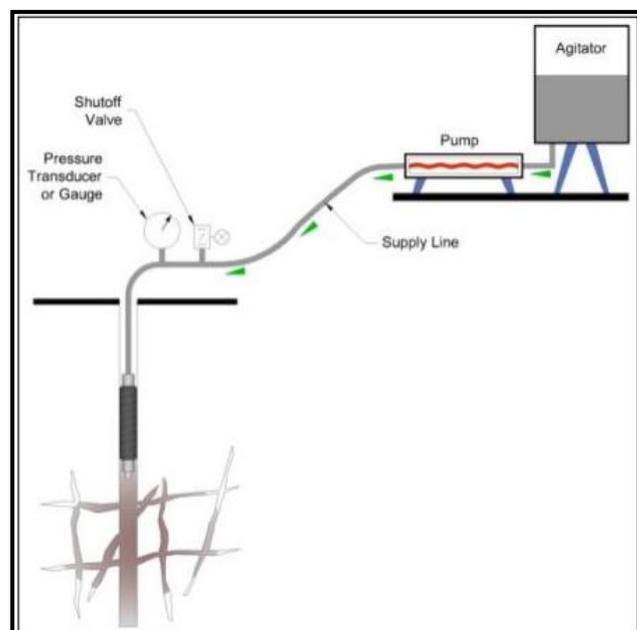


Figura 66. Línea de circulación sin retorno. Fuente: (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

En el caso de las lechadas tixotrópicas o con variación de la viscosidad, esto puede dar lugar a un cierre prematuro de la etapa o un falso rechazo de la etapa. (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017, pp. 10-15).

25. EQUIPOS DE MEDICIÓN.

El equipo de medición está compuesto por manómetros de presión y medidores de caudal, que generalmente brinda lecturas con un grupo registrador de forma simultánea, con el objetivo de seguir con todo detalle los cambios de presión y caudal que puede producirse en una lechada. (Aduvire, 1997).

25.1 Medidores de flujo.

Los Medidores de flujo (Fig. 67), inductivos relativamente simples, están diseñados para pruebas de agua y tomas de lechadas, el volumen total inyectado se mide en un convertidor electrónico equipado con un botón de reinicio. Deben ser capaces de medir los caudales en el rango de 5 L/min hasta 1 L/min, con una precisión en el rango del 1% a caudales elevados al 5% a caudales relativamente bajos. Sin embargo, Wilson y Dreese (1998) observó que la precisión de los medidores de flujo puede bajar al rango del 25% para caudales inferiores a 0,25 L/min. (Weaver, 2007, p. 277)

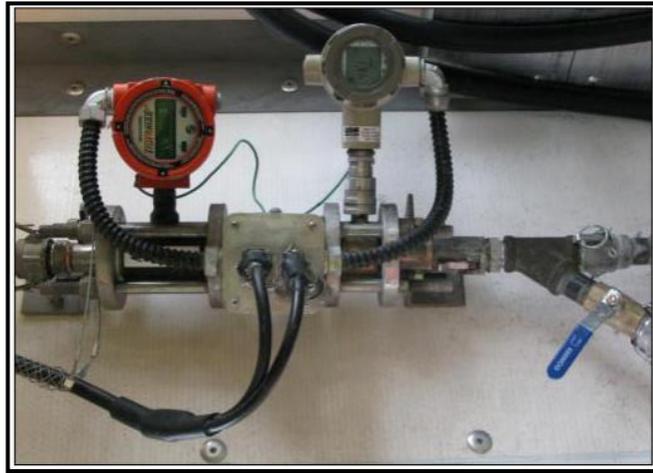


Figura 67. Medidor de flujo y presión. : (Department of the army U.S Army Corps of Engineers, 2017)

25.2 Medidores de presión.

Los manómetros (Fig. 68), se utilizan para controlar la presión de inyección de la lechada entregada al agujero. El manómetro ayuda a asegurar que la máxima presión permitida se está aplicando para lograr los resultados deseados del diseño del programa de inyecciones. También ayuda a prevenir la aplicación de presiones de inyección demasiado altas que podrían alterar los esfuerzos de la roca que se está consolidando. En los Estados Unidos, los manómetros se calibran en libras por cuadrado (psi) y la cara del medidor debe tener un diámetro mínimo de 75 mm (3 in.), este requisito de tamaño del dial es importante, teniendo en cuenta que las condiciones de iluminación que se encuentran bajo tierra no son las más apropiadas. El rango de lectura de presión del medidor debe ser apropiado para las presiones de lechada que se utilizan. Por ejemplo, un medidor con un rango de presión de 0-8 bares (0-120 psi) sería apropiado para la consolidación de agujeros de lechada de hasta 9 m (30 pies) de profundidad. (Henn, 2010)

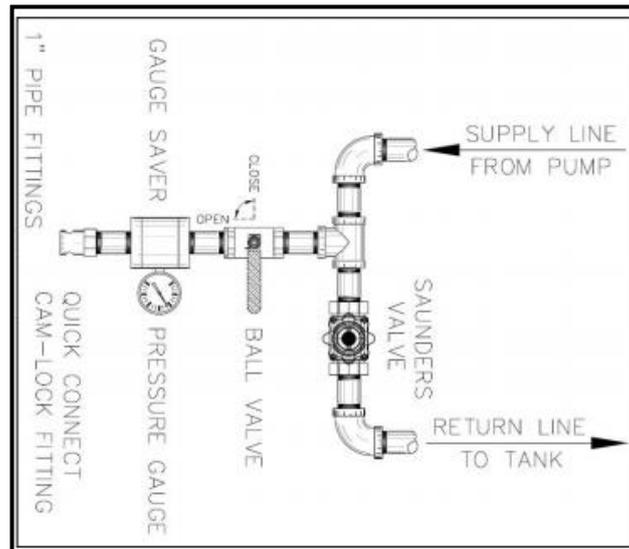


Figura 68. Medidor de presión. Recuperado de: (U.S. Department of the Interior, 2014) (15-76)

Los medidores de presión se dañan fácilmente en el entorno de construcción subterránea; por lo tanto, deben comprobarse y realizar las calibraciones al menos una vez por semana o cuando sea necesario, y considerar lecturas de presión errática o daños físicos en el medidor. Se debe mantener un medidor maestro, utilizado para comprobar las calibraciones de los medidores de producción y debe mantenerse almacenado y con protección dentro de la oficina de campo. Este medidor nunca debe utilizarse para la producción. (Henn, 2010)

Nunca se debe permitir que la mezcla de lechada entre en contacto directo con el manómetro, por lo tanto, se debe utilizar un medio de protección para separar la lechada del medidor. El protector de medidores, también llamado "diafragma" sello/" se puede utilizar para este propósito. Practical Guide to Grouting of Underground Structures. (Henn, 2010, p. 103)

25.3 Obturadores.

Los obturadores se encargan de aislar el sondeo inyectado, y existen dos tipos: neumáticos y mecánicos. El obturador neumático (Fig. 69), está constituido por un tubo de goma blanda, la cual se hincha hidráulica o neumáticamente, ocasionando una expansión contra las paredes del sondeo, así estas paredes no presenten una regularidad uniforme. Usualmente la longitud de expansión del manguito de goma es grande, como la presión de hinchado debe ser alta para lograr una buena obturación. Estos obturadores presentan un inconveniente que generalmente tienen tendencia a romperse durante el proceso de subida o bajada del sondeo. (Aduvire, 1997)

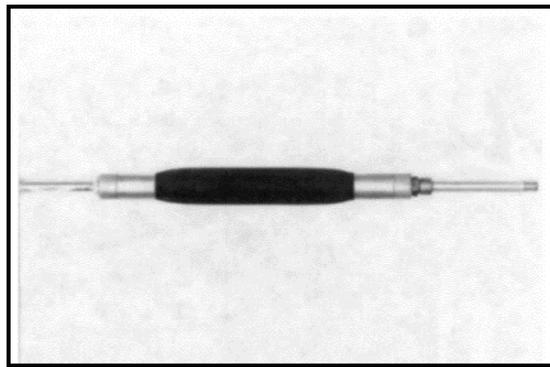


Figura 69. Obturador neumático. Tomado de (Henn, 2010)

El obturador mecánico (Fig.70), tiene una ventaja de ser más resistente, pero solamente se puede instalar en sondeos de sección circular. Este elemento está compuesto por una junta de goma gruesa, que se expande contra las paredes del sondeo aplicando una compresión longitudinal, utilizando un tornillo en la superficie. (Aduvire, 1997)

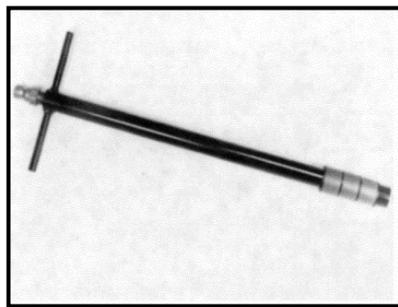


Figura 70. Obturador mecánico. Fuente: (Henn, 2010)

26. CONCLUSIONES.

- Los objetivos principales de una inyección de lechada de cemento en las excavaciones subterráneas, se puede resumir en tres aspectos básicos:

- 1.- Como método constructivo al avance de la excavación en la preconsolidación hacia adelante en rocas inestables.
- 2.- En la posconsolidación y mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los macizos rocosos alrededor de la sección del túnel.
- 3.- En el control de los flujos de agua y mitigación de los gradientes hidráulicos presenciales durante los procesos constructivos.

Una investigación geológica eficiente en una obra subterránea, podrá identificar la caracterización de las rocas, las discontinuidades, los sistemas de falla presenciales, los sistemas principales de diaclasas, así como los tipos de rellenos, y consecuentemente podrá inducir en los procedimientos de inyección más adecuados y en el manejo acertado de los tipos de lechadas agua: cemento.

- El tratamiento con inyecciones de consolidación en túneles, sería satisfactorio y eficiente toda vez que, a partir del estudio geológico, se podrán identificar y localizar todos los tipos de terrenos inestables del túnel y con base en esta información, se materialicen los diseños de las inyecciones, con respecto a la longitud de las cortinas, a la cantidad mínima

necesaria de los anillos radiales, al número de orificios por cada anillo y a la profundidad de las cortinas.

- La comprensión de la hidrogeología del sector, es fundamental para identificar los sectores críticos del túnel, con presencia de filtraciones de agua y hacer el tratamiento adecuado con inyecciones de lechadas para mitigar el gradiente hidráulico y el control del flujo de las filtraciones.
- El tratamiento de las inyecciones radiales es por etapas y el objetivo es ir creando un anillo de protección en material consolidado, de acuerdo con la metodología ascendente o descendente según la caracterización del macizo rocoso en el entorno de la excavación.
- Los criterios para el cierre o terminación de una inyección se analizan teniendo en cuenta el consumo en bolsas de cemento, el consumo de lechada en volumen y/o si se llega a la presión de cierre o rechazo establecida previamente.
- El método de inyección expuesto es el de engrosamiento progresivo a partir de una mezcla base que se engrosa variando durante el proceso las propiedades reológicas de las mezclas.
- Las presiones de cierre o de rechazo por el método de engrosamiento sucesivo son variables y se definen, de acuerdo con la caracterización del macizo para evitar Fracturamiento hidráulico de la roca.
- El control de calidad de los tratamientos de inyección, deberán realizar ensayos de laboratorios en campo previos a la ejecución de los trabajos, y se recomienda hacer pruebas de campo con diferentes tipos y marcas de cemento toda vez que el objetivo es utilizar los materiales que mejor se adapten a las solicitudes de las especificaciones técnicas vigentes en estos procesos.
- Los materiales utilizados para lograr la estabilidad de las mezclas como bentonitas y acelerantes establecen en combinación con las lechadas a:c, la variación de las propiedades

reológicas de las mezclas y su resultado en estado fluido y estado sólido (fraguado final), es un factor determinante para lograr el éxito del tratamiento con este método de inyección.

- Las lechadas de inyección estabilizadas, se caracterizan principalmente por su viscosidad óptima y baja exudación y se logran con mezclas a:c de consistencia media a baja con la inclusión de bentonita como aditivo fluidificante.
- Los HMG (lechadas de alta movilidad), se caracterizan por un sangrado mínimo, una resistencia superior a filtración a presión y una reología controlable, y están formulados para proporcionar una mayor penetrabilidad y durabilidad.
- Las LMG (lechadas de baja movilidad), se conocen como lechadas de compactación cuando su propósito es densificar suelos.
- La utilización del aditivo bentonita en una relación a:c, ha resultado muy beneficioso para estabilizar el sangrado de la mezcla y así lo demuestran las pruebas de exudación efectuadas sobre diferentes tipos de lechadas con variación de los porcentajes de aditivo.
- La tendencia del uso en porcentajes desmedidos del aditivo bentonita, disminuyen los resultados de la resistencia a la compresión y en consecuencia su utilización deberá ser controlada teniendo en cuenta este indicador.
- El ensayo de lugeon es un indicador de la permeabilidad de la roca, pero no existe reciprocidad entre los valores de las tomas de agua y las tomas de lechadas de cemento, toda vez que son fluidos diferentes bajo presión y con reacciones separadas y desiguales ante la presencia de macizos rocosos fracturados.
- La prueba de lugeon modificada que determina la permeabilidad de la roca y utiliza rangos de presiones variables se recomienda para perforaciones bien profundas en las que son relevantes en muchas situaciones, las condiciones hidrogeológicas que influyen en las presiones del ensayo y se emplea para fundaciones de presas y para estabilizar rocas débiles al avance de las excavaciones en túneles.

- En perforaciones poco profundas se pueden obtener resultados satisfactorios de la permeabilidad de la roca con la prueba de presión simple o presiones más bajas y se recomienda en la construcción de obras subterráneas para el tratamiento con inyecciones de los sectores críticos posteriores al avance de la excavación.
- La selección de los equipos de perforación, equipos de bombeo, el volumen y tamaño de mezcladores y agitadores de las mezclas, deberá ser proporcional con las dimensiones y características generales de las excavaciones subterráneas.
- El criterio de la inyección de consolidación es llevar el hueco inyectado siempre hasta la presión máxima de rechazo y lograr de esta manera una reducción significativa de la permeabilidad del macizo rocoso en tratamiento.
- El engrosamiento de la mezcla debe realizarse progresivamente y con especial atención, comenzando con lechadas delgadas para el lleno de las fisuras más finas y continuar con relaciones un poco más gruesas para el lleno de las fisuras o grietas más abiertas y así hasta obtener la máxima presión de rechazo.
- El período más importante del tratamiento es el tiempo que se ha acumulado hasta llegar a la presión de rechazo, sin embargo, si se llega a este valor y existe una ingesta de lechada importante se deberá continuar con el bombeo de la inyección por un tiempo adicional de 10 minutos hasta lograr un mejor agrupamiento de la lechada.

27. BIBLIOGRAFÍA.

- Aduvire, O. (1997). Tratamientos del terreno. En *Manual de túneles y obras subterráneas* (págs. 579-612). Madrid: Entorno Gráfico S.L.
- ANI. (11 de enero de 2016). *Especificación técnica de construcción. Inyecciones de consolidación*. Obtenido de Portal ANI:
<ftp://ftp.ani.gov.co/Ruta%20del%20Sol%20I/Tramo%20Villetas%20%20-%20Guaduas/ENTREGA%20FINAL/disco28/ANEXO%20B%20-%20ESPECIFICACIONES/ESPECIFICACIONES%20TUNELES/EP%20-%20T109.docx>.
- Aspectos generales del Q de Barton*. (2000). Obtenido de
[http://www.bdigital.unal.edu.co/6782/13/ANEXO_A._ASPECTOS_GENERALES_DE_EL_Q_DE_BARTON_-_Perez,_D._\(2012\).pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/6782/13/ANEXO_A._ASPECTOS_GENERALES_DE_EL_Q_DE_BARTON_-_Perez,_D._(2012).pdf)
- Barton, N., & Grimstad, E. (2000). El sistema Q para la selección del sostenimiento en el método noruego de excavación de túneles. En *Ingeo túneles: Libro 3* (págs. 27-55). Madrid: Carlos Lopez Jimeno.
- Benjamin celada Tamames, J. M. (s.f.). *Investigación y caracterización geológico geotécnica para el proyecto de túneles*. Obtenido de Geomecánica:
https://www.geocontrol.es/geocontrol/images/pdf/publicaciones/1994/GEOLOGICO_GEOTECNICO_GEOCONTROL_CELADA.pdf
- Bombas Moyno Serie L. (1997). *Operación clásico de bombeo*. Obtenido de
http://www.moyno.com/dmdocuments/spanish_100F.pdf
- Cambefort, H. (1999). Inyección de Suelos. En H. Camberford, *Inyección de Suelos* (págs. 36-37). Barcelona: Omega.
- Carrion, D. A. (2019). *DOC PLAYER*. Obtenido de <http://docplayer.es/163830294-Universidad-nacional-daniel-alcides-carrion-facultad-de-ingenieria.html>
- Civil, C. (2005). *Cloruro de calcio*. Obtenido de <http://www.elconstructorcivil.com/>
- Cloruro de sodio. (2017). *Cloruro de calcio*. Obtenido de <https://clorurosodio.com/cloruro-de-calcio/>
- Department of the army U.S Army Corps of Engineers. (2017). *Engineering and Desing Grouting Technology*. Washington, DC.
- Derqui Morilla, F. (1935). *Aplicación de mezclas químicas para el endurecimiento y consolidación de terrenos*. Madrid: Juan Bravo .
- Eddy. (22 de enero de 2011). *Constructor civil*. Obtenido de
<https://www.elconstructorcivil.com/2011/01/aditivos-acelerantes.html>
- Ensastegui, M. (12 de 3 de 2013). *Propiedades reológicas*. Obtenido de
<https://es.slideshare.net/201121014/propiedades-reolgicas>.

- Equipos pesados.com* . (2017). Obtenido de <https://www.equipo pesados.com/inventario/perforadora-track-drill-compresor/>
- Fernandez, H. (9 de Marzo de 2015). *Inyecciones de suelos y rocas capitulo 6*. Obtenido de <https://de.slideshare.net/jaimeamambalzambrano/cap-6-inyecciones-de-suelos-y-rocas?nomobile=true>.
- Fomento, M. d. (2017). *Ministerio de fomento, España*. Obtenido de <https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/8AE28CFA-4425-488F-AD1E-58314D66058B/37449/Anejo5borde.pdf>
- Gabriel. (s.f.). *Leccion7 Hidratacion del cemento portland*. Obtenido de https://www.academia.edu/16703497/Leccion7_Hidratacion_CEMENTO
- Gandullo, J., Sanchez, O., Blanco, A., & Sanchez , F. (2012). *Manual de minerología y petrología*. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid: <http://www2.montes.upm.es/Dptos/dsrn/Edafologia/aplicaciones/GIMR/page.php?q=6e92d050809>
- Gokhale. (2008). *Principles of Engineering Geology*.
- Guzmán, D. S. (2000). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bogotá.
- Henn, R. W. (2010). *Practical Guide to Grouting of Underground Structures*. Reston, Virginia.
- Houlsby, A. (1990). *Construction and design of cemente grouting*. En A. Houlsby. New York.
- Introduccion al jumbo hidráulico*. (30 de 01 de 2014). Obtenido de <https://es.slideshare.net/tebanpr/el-jumbo-hidraulico>
- Jimeno, C. L. (2000). *Ingeo Túneles* . Madrid.
- J-Rohi Ingenieria, S. (2016). *Embudo viscosimetro de Marsh*. Obtenido de J-Rohi Ingenieria, S.A.S: <http://j-rohi.com/project/embudo-viscosimetro-de-marsh/>
- Kaishan. (2019). *Perforadoras hidráulicas, perforadoras DTH, equipos de perforación de pozos y compresores de aire KAISHAN*. Obtenido de <https://kaishanusa.com/>
- Laura, F. G. (2 de 7 de 2010). *Slideshire*. Obtenido de Guía de fluidos de perforación y laboratorio: <https://es.slideshare.net/Rolando000/guia-de-fluidos-de-perforacin>
- Lechadas para inyecciones*. (s.f.). Obtenido de <https://es.scribd.com/document/244003430/cap-0605-pdf>
- Lombardi, G. (04 de 2002). *GROUTING OF ROCK MASSES*. Obtenido de <https://www.lombardi.ch/es-es/SiteAssets/Publications/1181/Pubb-0361-L-Grouting%20of%20rock%20masses.pdf>
- Lopez, J. (2000). *Manual de túneles y obras subterráneas*.

- Lunardi, P. (2017). *Diseño y construcción de túneles con el sistema de análisis de la deformación controlada en rocas y suelos*. Obtenido de https://www.rocksoil.com/documents/ADECO_espanol.pdf
- Manuel Alejandro Giraldo, J. I. (29 de 09 de 2005). *EVOLUCIÓN MINERALÓGICA DEL CEMENTO PORTLAND DURANTE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000100007
- Megaw, T. M., & Bartlett, J. V. (1997). Tratamiento del terreno. En *Túneles Planeación, diseño y construcción. Volumen 2*. (págs. 113-146). México: Limusa Noriega Editores.
- Mejora del Terreno*. (2013). Obtenido de <https://studylib.es/doc/4844334/7.-mejora-del-terreno>
- Oilfield Glossary. (2019). *balanza para lodo*. Obtenido de Oilfield Glossary: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/m/mud_balance.aspx
- Pernia, J. M. (1987). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Obtenido de ProQuest Ebook Central: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaustasp/detail.action?docID=3199487>
- Pinzuar. (2019). *MOLDE TRIPLE PARA CUBOS DE CEMENTO Y MORTERO*. Obtenido de <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/concretos/molde-triple-cubos-cemento-mortero/>
- Quitian, G., & Rojas, N. (29 de octubre de 2013). Comparación de la determinación de parámetros reológicos entre el cono de Marsh. *Revista Colombiana de Materiales N. 5 pp. 19-25*, 20.
- Raymond, H. (2013.). *Guía práctica de rejunto de estructuras subterráneas*, Sociedad Americana de Ingenieros Civiles. Recuperado el 2018, de ProQuest Ebook Central: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecausta-ebooks/detail.action?docID=3115668>.
- Rivera, G. (junio de 2010). *Materiales Conglomerantes*. Obtenido de [file:///D:/Nueva%20carpeta%20-%20copia%20\(3\)/ARCHIVOS%20EDGAR%20DEF/Nueva%20carpeta%20\(2\)/Cap.%2001%20-%20Materiales%20conglomerantes%20\(1\).pdf](file:///D:/Nueva%20carpeta%20-%20copia%20(3)/ARCHIVOS%20EDGAR%20DEF/Nueva%20carpeta%20(2)/Cap.%2001%20-%20Materiales%20conglomerantes%20(1).pdf)
- Rivera, G. (s.f.). *Unicauca. Aditivos para morteros o concretos*. . Obtenido de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%202%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%20%20PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2011%20-%20Aditivos%20para%20morteros%20o%20concretos.pdf>
- Rodríguez, A. G. (22 de 05 de 2019). *Metodologías de inyección para tratamiento de macizos rocosos para obras geotécnicas*. Obtenido de [file:///D:/Nueva%20carpeta%20-%20copia%20\(3\)/tesis%20grouting/Rico%20Rodr%C3%ADguez,%20Alfonso%20Gabriel-2019.pdf](file:///D:/Nueva%20carpeta%20-%20copia%20(3)/tesis%20grouting/Rico%20Rodr%C3%ADguez,%20Alfonso%20Gabriel-2019.pdf)

- Russo, G., Kalamaras, G., & Grasso, P. (2000). Concepto sobre las clases geomecánicas. En *Ingeo túneles; Libro 3* (págs. 119-129). Madrid: Carlos Lopez.
- Sanchez de Guzman, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- SÁNCHEZ, A. S. (2008). *CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS DE TERZAGHI*. Obtenido de Academia:
https://www.academia.edu/27988992/CLASIFICACION_GEOMECA%20NICA_DE_LAS_ROCAS_METODO_TERZAGHI_CSIR_Bieniawski_Y_NGI?auto=download
- SCT. (6 de 7 de 2016). *Estudios geológicos y exploración*. Obtenido de Manual de diseño y construcción de túneles de carretera:
http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_Tuneles/CAP03.pdf
- Serrano, A. (2005). Defectos del macizo rocoso. En *Mecánica de rocas I: Descripción de las rocas* (págs. 17-37). Madrid: E.T.S. Ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Shutterstock. (2003). Obtenido de <https://www.shutterstock.com/es/search/cubo+de+cemento>
- Silva, O. J. (5 de 12 de 2017). *¿CÓMO SE PRODUCE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO?* Obtenido de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/proceso-hidratacion-del-cemento>
- Suaréz, J. (2015). *Clasificación de macizos rocosos*. Obtenido de <file:///C:/Users/davin/Downloads/CLASIFICACION%20DE%20MACIZOS%20DE%20ROCA1.pdf>
- TECOP. (2019). *Equipos de inyección neumáticos - INYECTOR NEUMÁTICO AP/A-S Y MP/A-2*. Obtenido de <https://www.tecopsa.com/producto/inyector-neumatico-ap-a-s-y-mp-a-2/>
- Tranquilino, Y. (2008). *Academia*. Obtenido de Fallas:
<https://www.academia.edu/39004489/Fallas>
- U.P.C., E. . (24 de 01 de 2019). *EL SOSTENIMIENTO DE TÚNELES BASADO EN LAS CLASIFICACIONES GEOMACÁNICAS*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6215/00.pdf?sequence=1>
- U.S. Department of the Interior. (2014). Chapter 15 Foundation grouting. En *Reclamation managing water in the west* (págs. 15-32).
- UCV, E. I. (2009). *LOS ADITIVOS*. Obtenido de <http://www.registrocdt.cl/registrocdt/www/admin/uploads/docTec/aditivos.pdf>
- Unicauca. (2007). Obtenido de RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO:
ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-410-07.pdf

Valcarce, A. G. (2000). *Mecánica de los terrenos y cimientos*. Madrid : CIE INVERSIONES EDITORIALES, Madrid.

Weaver, B. (2007). *Dam Foundation Grouting* .