



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

CONTROL DE FILTRACIONES A BASE DE INYECCIONES DE MEZCLA
BENTONITICA EN TUNELES DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

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

PRESENTA:
JAVIER RUIZ VELASCO HERNANDEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. JESUS HUGO MEZA PUESTO
FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

MÉXICO, D. F. AGOSTO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE GENERAL

PAGINAS

INTRODUCCIÓN.

OBJETIVO GENERAL.

HIPÓTESIS.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1. Mezclas para inyección.....	7
1.2. Tipos de arcillas.....	8
1.2.1. Grupos de arcillas.....	9
1.2.2. Principales usos de las arcillas.....	12
1.3. Tipos de mezclas.....	12
1.3.1. Mezclas estables.....	12
1.3.2. Mezclas inestables.....	13
1.3.3. Mezclas con aditivos.....	13
1.4. Tipos de inyección.....	13
1.5. Filtraciones.....	14

CAPÍTULO 2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA MEZCLAS DE INYECCIÓN

2.1. Materiales empleados en las mezclas.....	16
2.1.1. Bentonita.....	16
2.1.2. Cemento.....	19
2.1.3. Agregados.....	20
2.1.4. Agua.....	23
2.1.5. Aditivos y adiciones.....	23
2.1.6. Acelerantes.....	24
2.1.7. Aceleradores libres de álcalis.....	26
2.2 Propiedades y características de las mezclas de inyección.....	26

2.2.1. Viscosidad.....	26
2.2.2. Densidad.....	26
2.2.3. Decantación.....	27
2.2.4. Tixotropía.....	27
2.2.5. Reopexia.....	28
2.2.6. Reología.....	28
2.2.7. Fraguado.....	29
2.2.8. Resistencia al corte.....	29
2.2.9. Contenido de agua.....	29
2.2.10. Permeabilidad.....	30
2.3. Dosificación y proporción de mezclas de inyección.....	30
2.4. Técnicas de inyección.....	31
2.4.1. Inyecciones para impermeabilizar.....	31
2.4.2. Inyecciones para consolidar.....	32
2.4.3. Inyecciones para contacto.....	32
CAPÍTULO 3. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE FILTRACIÓN EN UN SISTEMA BASE BENTONITA – CEMENTO COMO CONTROL DE LAS FILTRACIONES PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO.	
3.1. Propiedades de filtración.....	34
3.1.1. Enjarre.....	34
3.1.2. Espesor de enjarre.....	35
3.1.3. Permeabilidad del enjarre.....	38
3.2. Filtro prensa.....	39
3.3. Filtración estática.....	40
3.3.1. Relación entre volumen y tiempo.....	44
3.3.2. Relación entre presión y volumen.....	47
3.4.3. Relación entre temperatura y volumen filtrado.....	49
3.4. Pruebas para la elaboración de un sistema base bentonita-cemento.....	49
3.4.1. Densidad de la mezcla.....	49
3.4.2. Comportamiento reológico.....	51
3.4.3. Pérdida de agua.....	56
3.4.4. Agua libre.....	58

CAPÍTULO 4. PROCESO DE SELLADO DE FILTRACIONES A BASE DE MORTEROS BENTONÍTICOS EN LAS PAREDES DE LOS TÚNELES DE OBRA METRO.

4.1. Trabajos preliminares.....	60
4.2. Elaboración de mezcla.....	61
4.3. Método de barrenación.....	62
4.4. Equipos.....	62
4.4.1. Equipos de inyección.....	65
4.4.2. Equipos de perforación.....	65
4.4.3. Mezcladoras.....	66
4.4.4. Líneas de circulación y obturador.....	67
4.5. Control de calidad.....	67
4.5.1. Inspección.....	68
4.5.2. Pruebas.....	69
4.5.2.1. Pruebas de laboratorio.....	69

CAPÍTULO 5. DESEMPEÑO DE MEZCLAS BENTONÍTICAS

5.1. Diagnóstico de las filtraciones en los túneles del Metro de la Ciudad de México.....	82
5.2. Mantenimiento preventivo y correctivo en túneles del transporte colectivo Metro.....	83
5.3. Ventajas de la inyección de mezclas bentoníticas como sistema de control de filtraciones.....	86
5.4. Evaluación de tecnologías alternativas para el control de filtraciones en los túneles del Metro.....	87

CONCLUSIONES.

RECOMENDACIONES.

BIBLIOGRAFIA.

INTRODUCCIÓN

La construcción de túneles para las líneas del Metro de la Ciudad de México siempre ha estado condicionada a diversos factores de riesgo y dificultades de construcción, diseño y operación, debido a la problemática que presenta el subsuelo de la Ciudad de México, en particular en la zona del lago, que es donde se ubica la mayor parte de las líneas del Metro; debido a la presencia de agua freática, por lo que el problema de filtraciones hacia el interior de los túneles del Metro está casi siempre presente.

La mayor parte de los túneles de la obra Metro, operan por debajo del nivel freático, así mismo los asentamientos diferenciales constantes que sufren las líneas del metro ocasionan fisuras y grietas en su estructura propiciando hacia el interior del túnel, con el consecuente riesgo para los usuarios y para el mismo sistema.

La inyección de mezclas bentoníticas, es un proceso alternativo, eficiente y económico para el sellado de filtraciones y control de dicho problema, por lo cual se desarrolló esta investigación en base a pruebas de laboratorio y cuyos resultados forman parte de esta Tesis.

En el primer capítulo de esta Tesis se tratan los diferentes tipos de arcillas usados en la elaboración de mezclas de inyección, así como los tipos de inyección que se utilizan en la actualidad.

En la segunda parte se establecen las consideraciones que deben tomarse en cuenta en el diseño de mezclas, describiendo los materiales empleados, características y propiedades, así como las técnicas de inyección de mezclas.

El tercer capítulo se exponen las propiedades de filtración que deben determinarse en laboratorio para una mezcla de bentonita- cemento.

En el capítulo cuarto se describe el proceso de sellado con inyecciones de mezclas bentoníticas como sistema de control de filtraciones.

Para el quinto capítulo se comparan las ventajas de las mezclas bentoníticas con otros métodos de sellado de filtraciones, así como la descripción del diagnóstico correctivo y preventivo que se realiza para el Metro.

OBJETIVO GENERAL

Establecer un procedimiento para el control de filtraciones en los túneles del Metro de la Ciudad de México, por medio del sistema de inyecciones de mezclas bentoníticas, como una alternativa eficiente y económica, con el diseño de mezclas estables mediante pruebas realizadas en laboratorio.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

El método de inyección de mezclas bentoníticas es capaz de controlar las filtraciones en las estructuras de los túneles de manera rápida y eficiente, por sus cortos tiempos de ejecución y reducida mano de obra, por lo que se considera una de las mejores opciones para solucionar el problema de las filtraciones de agua en los túneles de la red del Metro de la Ciudad de México.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

Las mezclas con lodos bentoníticos comenzaron a utilizarse a principios del siglo XX en la industria de la construcción y continua siendo en la actualidad uno de los métodos más utilizados y eficientes para resolver los problemas de filtraciones que se presentan en los túneles del metro de la Ciudad de México.

El presente capítulo tiene por objetivo, exponer los tipos de mezclas de inyección más comunes para el control de filtraciones en los túneles del transporte colectivo Metro, así como los diferentes tipos de arcillas empleados en ellas.

1.1. MEZCLAS DE INYECCIÓN

En la elaboración de las mezclas de inyección, se emplean los materiales utilizados para producir un mortero tradicional de calidad, como son: agua, cemento y en este caso la adición de bentonita sódica, para lograr un sellado permanente de las filtraciones.

La bentonita es una arcilla montmorillonita con un alto límite líquido, por lo que, a pesar de añadirle mucha agua, no pierde su consistencia.

El lodo bentonítico es una mezcla de bentonita con agua, que tienen propiedades útiles para la elaboración de mezclas de inyección para la construcción: cuando un lodo bentonítico es amasado sin que se produzca variación de agua, pierde resistencia, comportándose como un fluido. Sin embargo, vuelve a adquirir esta resistencia una vez que entra en reposo.

Al agregar bentonita sódica a la mezcla se obtienen los siguientes beneficios:

1. Reducción de la fricción interna.
2. Aumento de plasticidad y bombeabilidad del mortero.
3. Mejoramiento de la cohesión de la mezcla.
4. Reducción en la cantidad de agua libre y a la segregación.

1.2. TIPOS DE ARCILLAS

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos debido a que son productos finales de la meteorización de los silicatos que formados a mayores presiones y temperaturas en el medio exterior se hidratan y son partículas menores de 0.06 mm de diámetro, procedentes de la descomposición de rocas feldespáticas.

¹Las arcillas comerciales son aquellas que sirven como materia prima industrial, por lo que un 90% de la producción se utiliza en la fabricación de materiales de construcción y agregados, y desempeña un papel importante como materia prima en la fabricación de cementos.

El primer tipo de las arcillas que se utilizan para la fabricación de materiales de construcción y agregados, se les llama arcillas comunes o arcillas para la construcción, estas son arcillas formadas por dos o más minerales del tipo illita y esmectita, combinados con otros minerales no filosilicatos

Las arcillas especiales son las del segundo tipo las cuales son arcillas formadas por un solo mineral y sus propiedades dependen de las características de ese mineral. Estas arcillas se dividen en caolines, bentonitas, sepiolita y paligorskita.

En la República Mexicana existen importantes depósitos de arcilla en la zona norte y centro, en su mayor parte del tipo montmorilonítico.

La explotación de las arcillas generalmente se efectúa a cielo abierto con medios mecánicos convencionales para la molienda y eliminación de la humedad, dependiendo del uso de la arcilla y en la mayoría de los yacimientos son menores a los 15 metros de profundidad.

¹ G.L. DE PABLO, "Las arcillas. clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales", Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, México, 1994, pág. 49.

1.2.1. Grupos de arcillas

Existen diferentes grupos o familias de arcillas dependiendo de su estructura, las cuales se mencionan a continuación:

a) Grupo de las Caolines

La palabra caolín proviene de un nombre del cerro situado al norte de China llamado Kau-Ling, que era un lugar donde se extraía arcilla desde el siglo VIII D.C., para la fabricación de porcelana. El tipo de la estructura que presenta el caolín es bilaminar; una hoja de tetraedros de silicio-oxígeno unida a otra hoja de octaedros de aluminio-oxígeno, dando como origen al grupo de los caolines.

Los caolines son arcillas primarias que se originan en el sitio por la alteración de los feldespatos de rocas ígneas. El grupo de los caolines presentan la siguiente composición química por cada unidad estructural: $\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$

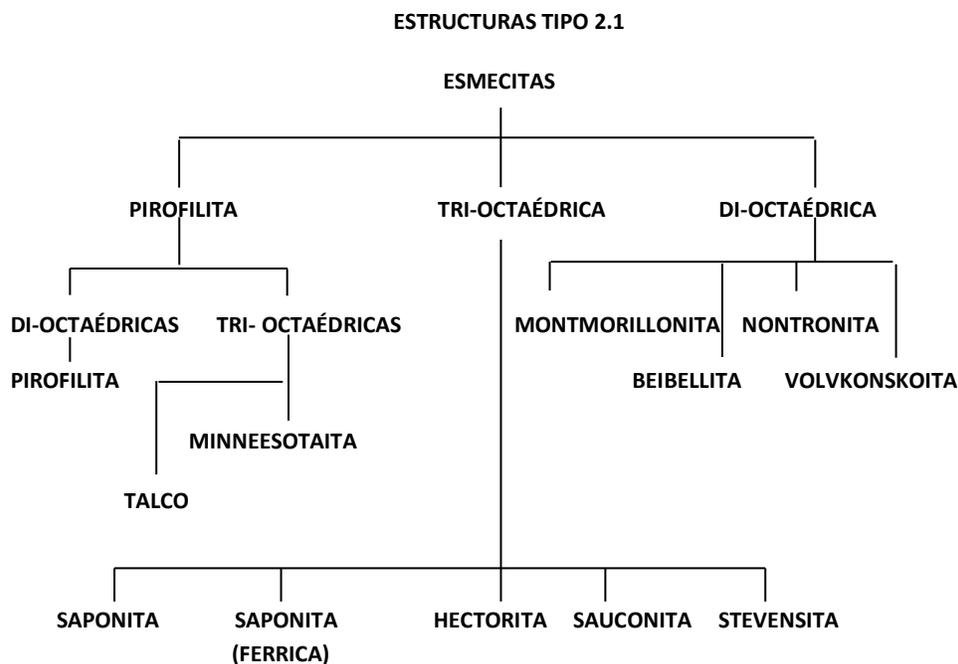
El caolín es una arcilla compuesta de minerales del grupo caolín (cuarzo, feldespatos, micas) esta no se procesa, es usada tal cual se obtiene de la explotación mineral.

b) Grupo de las Esmectitas

El grupo de las esmectitas está formada por arcillas que presentan una estructura de tipo “sándwich”, constituida por tres hojas (trilaminar). La fórmula estructural típica de estas arcillas es la siguiente: $\text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$

Dentro de la rama de las arcillas di-octaédricas destaca la montmorillonita, cuyo nombre se deriva del francés Montmorillon, que es el lugar de Francia donde se encontró esta arcilla en el año de 1874.

En la fig. 1.1 se muestra la estructura de las esmectitas.



²Fig. 1.1 Grupo de las esmectitas

Una de las propiedades más importantes de este grupo de arcilla es la hidratación y deshidratación del espacio interlaminar, la absorción de moléculas polares como el agua, así como de otros compuestos orgánicos como el caso de las aminas, las cuales al introducirse en el espacio interlaminar causan el hinchamiento de la estructura laminar de las propias arcillas.

Otro grupo de arcillas semejante a las montmorillonitas son las vermiculitas, que presentan la misma estructura de “sándwich”, pero que pueden tener un grado de sustitución mayor en la hoja octaédrica, originando mayor carga que las montmorillonitas y por lo que la atracción entre las láminas es más grande y la estructura no es tan expansible.

c) Grupo de las Micas

La familia de las micas tienen la misma estructura que las esmectitas, excepto por el grado de sustitución y la naturaleza de los cationes que se alojan

² G.L. DE PABLO, “Las arcillas. clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales”, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, México, 1994, pág. 54.

entre dichas láminas, como el caso del potasio, que hace que la carga residual sea muy alta. Con estas condiciones, las láminas se fijan unas a otras provocando que su estructura no sea expansible, ni sus cationes interlaminares intercambiables.

Actualmente existen diversas aplicaciones para estos grupos de arcillas naturales, debido principalmente a las siguientes propiedades físico-químicas:

1. Tamaño de partícula inferior a $2\ \mu\text{m}$
2. Morfología laminar filosilicatos
3. Sustituciones isomórficas (espacio interlaminar)

Por otra parte, como consecuencia de estos factores, las arcillas presentan una área superficial grande, por lo que tienen un comportamiento plástico en mezclas arcilla – agua, con elevada proporción sólido/líquido y que, en algunos casos, tienen capacidad de hinchamiento en las suspensiones acuosas, debido a la hidratación en el espacio interlaminar.

Las arcillas presentan una elevada superficie específica, lo cual es importante para ciertas aplicaciones industriales, en los que la interacción sólido – fluido es importante. Los valores de superficie específica de algunas arcillas son:

1. Caolinita de elevada cristalinidad hasta $15\ \text{m}^2/\text{g}$
2. Caolinita de baja cristalinidad hasta $50\ \text{m}^2/\text{g}$
3. Halloisita hasta $60\ \text{m}^2/\text{g}$
4. Illita hasta $50\ \text{m}^2/\text{g}$
5. Montmorillonita $80\text{-}300\ \text{m}^2/\text{g}$
6. Paligorskita $100\text{-}200\ \text{m}^2/\text{g}$

El área superficial (superficie específica) de una arcilla, es la relación que existe entre el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las propias partículas, por unidad de masa expresada en m^2/g .

1.2.2. Principales usos de las arcillas

Las arcillas caolinitas son utilizadas para la cerámica, porcelana, loza, azulejos, tejas y alfarería tradicional. Por sus propiedades refractarias son empleadas como aislante térmico y en la manufactura de los cementos a los cuales les proporciona alúmina y sílice.

También se utilizan en la industria papelera para proporcionar un acabado superficial al papel, como elemento inerte en cosméticos, resina en pinturas y como carga de alimento para animales, abonos y en la fabricación de sulfato, fosfato y cloruro de aluminio.

Por otra parte dentro de las esmectitas, se encuentran diversos usos de las bentonitas como; arenas de moldeo para la fabricación de los moldes de fundición, ya sea bentonita sódica para la fundición de acero y la bentonita cálcica para la fundición de metales no féreos; la proporción de bentonita en estos tipos de moldes es de 5 a 10%.

Una aplicación muy importante de la bentonita es como lodo de perforación y fluido estabilizador de excavaciones.

1.3. TIPOS DE MEZCLAS

³ Existen diferentes tipos de mezcla de acuerdo a los materiales y dosificaciones de bentonita utilizados, modificando o mejorando algunas de sus propiedades, como viscosidad, permeabilidad y tiempo de fraguado.

Dependiendo de su comportamiento reológico, las mezclas de inyección fabricadas con cemento se dividen en dos clases.

1.3.1. Mezclas estables

Son todas las mezclas de cemento – bentonita, en que los granos de cemento se mantiene en suspensión por un periodo de tiempo prolongado, y las

³ JESUS VARELA C. "Procedimientos de inyección del subsuelo, tipos de mezclas y equipo adecuado para llevarla a efecto", México, 1992, Pág. 17.

cuales son aplicadas en aquellos sitios donde circulan fuertes corrientes de agua, en esos sitios la bentonita absorbe varias veces su peso en agua (12 a 15 veces su peso), cuando se trata de rellenar fisuras u oquedades muy grandes generalmente se le adiciona arena.

Las mezclas estables son aquellas que tienen agua libre menor o igual al 5%.

1.3.2. Mezclas inestables

Las mezclas inestables tienden a presentar una exudación y segregación mayor que las estables. Al mismo tiempo, pueden tener la siguiente problemática:

- Dificultades de bombeo
- Taponamiento de las líneas de inyección
- Endurecimiento retardado de la mezcla

Se consideran mezclas inestables, aquellas que durante la prueba de decantación tienen más del 5% de agua libre.

⁴En la actualidad se emplean, en la mayoría de los tratamientos de inyección y consolidación, las mezclas estables debido a que poseen mejores características reológicas.

1.3.3. Mezclas con aditivos

A estas mezclas se les adiciona un pequeño porcentaje de aditivos para modificar algunas de las propiedades que generalmente acortan la velocidad de fraguado y en algunos casos su comportamiento reológico.

1.4. TIPOS DE INYECCIÓN

La inyección es el proceso por medio del cual se introduce un fluido a presión, en este caso en los muros del Metro, con el objeto de sustituir el aire o el

⁴ Manual de Construcción Geotécnica, Tomo II, SMMS, México, 2002, Pág. 565

agua en las fisuras y grietas con una mezcla, la cual reducirá o controlará el flujo de agua en dicha zona (impermeabilización).

⁵Existen tres tipos comunes de inyección de mezclas:

- Inyección directa
- Inyección progresiva
- Inyección progresiva – continua

Para el sello de las filtraciones en los túneles del Metro se utiliza la inyección directa, la cual tiene una baja presión de inyectado y se realiza durante un periodo corto de tiempo (5 – 7 minutos) por barreno.

1.5. FILTRACIONES

Las filtraciones se caracterizan por los flujos de agua en los túneles del Metro de la Ciudad de México, que ocurren a través de las fisuras o grietas en las paredes por escurrimientos constantes de agua y en algunos casos manchas de salitre, provocando la degradación continua de las estructuras de concreto.

La mayoría de los problemas que se presentan en los túneles del transporte colectivo Metro de la Ciudad de México, son las filtraciones en las paredes del túnel o cajón. Estas se deben al constante hundimiento o asentamiento diferencial que se presenta a lo largo de las líneas, ocasionando fisuras y grietas en la estructura de los túneles del metro y posteriormente el flujo de agua a través de ella, ya que en la mayoría de los casos dichas estructuras se localizan por debajo del nivel freático, así mismo la mayor parte de las líneas del metro se ubican en zona de lago (arcillas parcialmente saturadas) provocando así la infiltración del agua al interior de los túneles del metro de la Ciudad de México.

⁵ MANUEL HERRERA, Mortero de larga vida y relleno fluido, México, 2002, pág. 19.

De acuerdo a su tratamiento las filtraciones pueden clasificarse en:

- Filtraciones que ocasionan afloramiento de humedad en el revestimiento o paredes del túnel.
- Filtraciones que provocan escurrimientos en el revestimiento o paredes del túnel.
- Filtraciones que provocan flujo de agua a presión en el revestimiento o paredes del túnel.

Para el control y/o sellado de filtraciones en las paredes de los túneles del Metro se utilizan inyecciones a base de una mezcla estable de cemento – bentonita sódica, dada la impermeabilidad que tiene esta última.

CAPÍTULO 2

CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA MEZCLAS DE INYECCIÓN

Gracias a los avances que ha tenido la tecnología de los materiales, es posible sellar filtraciones en túneles mediante el proceso de inyecciones con mezclas bentoníticas, cuyo tipo estaría determinada por diversos factores, como: disponibilidad del material y equipo, acceso a la obra, economía, entre otros.

El objetivo de este capítulo, es determinar los materiales necesarios para la elaboración de una mezcla de inyección, así como las propiedades que deben tomarse en cuenta para obtener una mezcla adecuada a los tipos de filtración que se presentaran en los túneles del transporte colectivo Metro, de la Ciudad de México.

2.1. MATERIALES EMPLEADOS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE INYECCIÓN.

⁶En la elaboración de las mezclas de inyección, se emplean los mismos materiales que los utilizados para producir un mortero o una mezcla cementante tradicional de calidad, como son: agua, cemento, agregados, aditivos y adiciones. Las mezclas cementantes van a variar según la relación sólido/líquido empleada en aquellas, debido a la naturaleza propia del cemento.

La facilidad con la que se mezcle la lechada cementante en condiciones de laboratorio será un indicativo de la facilidad o dificultad con la que se realizará la mezcla durante la cementación en campo.

Los materiales que se utilicen para las inyecciones deben de cumplir ciertas características de acuerdo a lo establecido en las normas o especificaciones para cada proyecto.

2.1.1. Bentonita

El nombre de bentonita proviene de Fort Benton, Wyoming EUA, donde W. C. Knight descubrió en 1896 un enorme yacimiento de este tipo de arcilla. En la actualidad la mayor parte de la bentonita cálcica norteamericana se explota cerca del Golfo de México denominándose “bentonita tipo Wyoming”.

La bentonita se comenzó a utilizar en el campo de la ingeniería civil en Europa en los años 50 y posteriormente en Estados Unidos. Actualmente tiene entre sus aplicaciones las siguientes:

1. Rellenar y cementar grietas y fisuras en rocas.
2. Formar membranas impermeables en suelos.
3. Estabilizar en excavaciones y frentes de túneles.
4. Aumentar la plasticidad y viscosidad de los cementos.
5. Transportar materiales excavados en suspensión.

⁶ MANUEL HERRERA, “Mortero de larga vida y relleno fluido”, Tesis, México, 2002, pag.15.

⁷Es una arcilla coloidal, del grupo de las montmorillonitas. Esta es capaz de absorber hasta 5 veces su peso propio en agua. La bentonita es adicionada a la lechada para estabilizar la mezcla y reducir la sedimentación de las partículas, incrementando su viscosidad y cohesión de la lechada.

La bentonita presenta un alto límite líquido y muy densa se hincha al mezclarse con el agua y puede aumentar hasta 12 veces su volumen, presentando excelentes propiedades tixotrópicas; se utiliza generalmente en la construcción de muros pantalla durante la construcción de túneles y en este caso para el control de filtraciones que se presentan en las paredes de los túneles del Metro.

La bentonita se calcula como un porcentaje del peso del cemento agregado a la lechada, que normalmente está entre el 1 y 4% del peso del cemento.

Las bentonitas se clasifican de acuerdo a su comportamiento y propiedades físico-químicas:

1. Bentonitas altamente expansivas o sódicas
2. Bentonitas moderadamente expansivas o intermedias
3. Bentonitas poco expansivas o cálcicas

La adición de bentonita sódica a las lechadas de cemento Portland proporcionan a éstos lo siguiente:

- Aumento de resistencia
- Disminución del tiempo de fraguado
- Disminución de la permeabilidad
- Acción plastificante
- Disminución en la segregación de la mezcla

Existen diferentes tipos y marcas de bentonita en México, las cuales se muestran en la tabla 2.1

⁷Manual de Construcción Geotécnica, Tomo II, SMMS, México, 2002, Pág. 499.

Marca	Bentonita en %	Viscosidad Marsh (s)	Sedimentación(24 horas)
Lodbent	10	35	Mínima
Ferragel	10	27	Menos de una hora
Bentonita cálcica	10	29	Casi inmediata
Perfobent	10	110	Casi nula
Bentonita sódica	10	40	Mínima
Volvent	10	26	Menos de una hora
Bentonita M	10	37	Ocho horas
Bentonita 50/50	10	46	Ocho horas
Bentonita sin aditivo	10	40	Ocho horas

⁸Tabla 2.1 Bentonitas disponibles en México

Los lodos bentoníticos se obtienen mezclando bentonita con agua y presentan una propiedad muy importante que los hace muy útiles en construcción: cuando un lodo bentonítico es amasado sin que se produzca variación de agua, pierde resistencia, comportándose como un fluido. Sin embargo, vuelve a adquirir esta resistencia una vez que entra en reposo, esto implica que a pesar de que se le añada mucha agua, la mezcla no pierde estabilidad o consistencia.

⁸ Manual de Construcción Geotécnica, Tomo I, SMMS, México, 2002, Pág. 83.

Generalmente la concentración de bentonita varía entre el 5 y 10% en peso, ya que porcentajes más altos generan una viscosidad excesiva y la resistencia del gel dificulta su manejo.

2.1.2. Cemento

Para la elaboración de la mezcla cementante se utilizan aquellos cementos Portland que cumplan con la norma ASTM C150 o un cemento puzolánico de acuerdo a las necesidades particulares de la obra.

Se recomienda emplear cemento de un mismo tipo y marca, debido a las diferencias en las materias primas y procedimientos que se utilizan en su fabricación.

En el caso de que la mezcla vaya a estar expuesta a la acción de agua con alta concentración de sulfatos disueltos, debe emplearse cemento resistente a los sulfatos el tipo RS.

Cuando se requiera de resistencia rápida, se debe de emplear un cemento Portland de endurecimiento rápido.

⁹Los cementos según clasificación API (American Petroleum Institute) tiene propiedades físicas específicas para cada clase de cemento las cuales básicamente definen sus características.

Dentro de las principales propiedades físicas de los cementos se encuentran; la gravedad específica, es el peso por unidad de volumen sin tomar en consideración otros materiales como al aire o el agua; es decir, el peso de los granos de cemento en t/m^3 .

Peso volumétrico, es el volumen por unidad de masa, tomando en consideración al aire contenido entre los granos de cemento su unidad es t/m^3 .

⁹ Prácticas Recomendadas por API, API-RP-10B, 13 Edition, March, 1987.

Blaine, es la fineza de los granos del cemento, que indica el tamaño de sus granos y que tiene gran influencia en el requerimiento de agua para la preparación de la mezcla. Esta característica es un factor determinante para la clasificación de los cementos, con unidades cm^2/g y m^2/kg y representa el área expuesta al contacto con el agua, determinada como una función de permeabilidad del aire. Se recomienda un Blaine de 4200 a 5100 cm^2/g no hidratado.

2.1.3. Agregados

Los agregados son materiales de construcción unidos por medio de un cementante, sin que sea completamente inerte, donde sus propiedades físicas, químicas y térmicas influyan en el comportamiento de la mezcla.

¹⁰Generalmente los agregados finos ocupan del 60% a 75% del volumen del concreto (70% a 85% en peso), por lo que su calidad es de suma importancia e influyen notablemente en sus propiedades recién mezclado y endurecido, así como en las proporciones de la mezcla y en la economía. Los agregados finos consisten en arena natural o piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores de 5mm. El agregado triturado se obtiene triturando roca de cantera, piedra bola y grava de gran tamaño. En ocasiones la escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se utiliza como agregado fino.

Los agregados de calidad deben cumplir ciertas reglas para darles un uso óptimo, deben ser partículas durables, limpias, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta del cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables. Los agregados que contengan cantidades apreciables de esquistos o de otras rocas esquistosas, de materiales suaves y porosos, deberán evitarse, puesto que tienen baja resistencia al intemperismo y pueden ser causa de defectos en la superficie del mortero.

¹⁰ KUMAR MEHTA P, "Avances en la Tecnología del Concreto", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 2001, Pág. 37.

Las pruebas o ensayos de los agregados deben de cumplir con los requerimientos de la norma ASTM C 33.

Las funciones principales de los agregados son:

- a) Dar un relleno económico para el material cementante.
- b) Proveer una masa de partículas aptas para resistir la acción de cargas aplicadas, la abrasión, el paso de humedad y la acción climática.
- c) Reducir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado y endurecimiento en la pasta de cemento.

¹¹Se recomienda que la combinación de agregados finos cumpla con una granulometría especificada por el ACI 506 R-05 para la elaboración de mortero, la cual se reproduce en la tabla 2.2

Mallas	% en la Mezcla
$\frac{3}{4}$ " (19 mm)	
$\frac{1}{2}$ " (12 mm)	
$\frac{3}{8}$ " (10 mm)	100
No. 4 (4.75 mm)	95- 100
No. 8 (2.4 mm)	80- 100
No. 16 (1.2 mm)	50- 85
No. 30 (600 μ m)	25- 60
No. 50 (300 μ m)	10- 30
No.100 (150 μ m)	2- 10

¹²Tabla 2.2 Granulometría recomendada por ACI 506 R-05

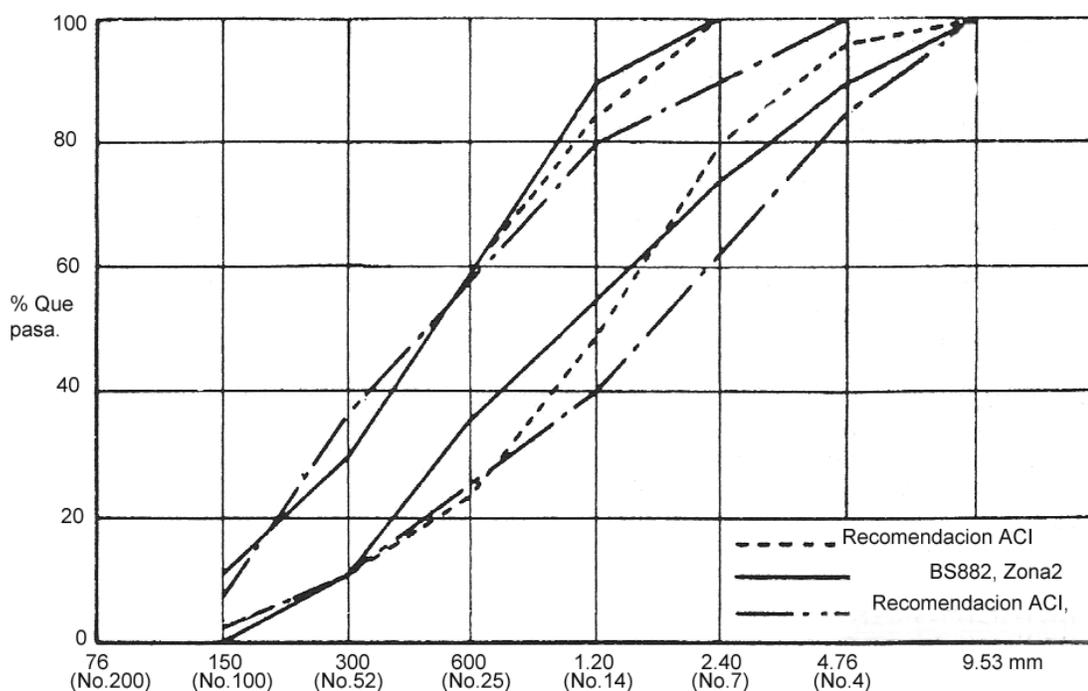
¹¹ American Concrete Institute, "Guide to shotcrete", Estados Unidos, ACI 506 R90, 1999. Pág. 70.

¹² American Concrete Institute, "Guide to shotcrete", Estados Unidos, ACI 506 R90, 1999. Pág. 71.

Esta mezcla es básicamente agregado fino, la cual se emplea para la inyección de un mortero fluido, pero pueden utilizarse arenas más finas que las citadas en la tabla.

Pueden emplearse agregados que no cumplan con ciertas especificaciones, siempre y cuando se hayan realizado pruebas previas que demuestren un comportamiento satisfactorio.

En la gráfica 2.1 se muestran las curvas granulométricas de las arenas que deben de emplearse para la elaboración de la mezcla, según recomendación del ACI.



¹³ Fig. 2.1 Gráfica granulométrica de las arenas

Se recomienda que la arena debe tener un módulo de finura del 2.8 ± 0.2 . El 100% del material debe pasar la malla de 9.54 mm y la pérdida por lavado estará determinada por la norma ASTM C-117, la cual no debe exceder del 5%. La arena para su empleo debe tener una humedad comprendida del 4 al 8%, a fin de evitar taponamientos durante la inyección de la mezcla.

¹³ ACI 506. 2-95, "Specification for Shotcrete", Estados Unidos, 1995, Pág. 28.

2.1.4. Agua

En la elaboración de las mezclas el agua tiene la función de iniciar la reacción química del cemento, produciendo el fraguado y endurecimiento del mortero.

Se recomienda utilizar siempre agua de una buena calidad. Un agua de mala calidad puede provocar la disminución de la resistencia de la mezcla, el fraguado o endurecimiento, una reducción de la durabilidad y disminución de la viscosidad de la bentonita.

El agua debe ser potable, sin olor, sabor, y con un pH de 7. El agua no potable también puede ser utilizada para elaborar una mezcla, siempre y cuando tenga una calidad adecuada.

Los requisitos de calidad del agua de mezclado básicamente se refiere a sus características físicas y químicas, y sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades de la mezcla.

Lo anterior debe prevenirse con un análisis químico del agua antes de emplearla, verificando que no contenga cantidades notorias de: sulfatos, cloruros y de bióxido de carbono.

El carbonato de sodio causa fraguados muy rápidos, en tanto que lo bicarbonatos aceleraran o retardan el fraguado. En concentraciones fuertes estas sales reducen significativamente la resistencia de la mezcla. Cuando la suma de las sales disueltas exceda 1,000 ppm, se deben realizar pruebas para analizar su efecto sobre el tiempo de fraguado y sobre la resistencia a los 28 días.

2.1.5. Aditivos y adiciones

Los aditivos para mortero son sustancias orgánicas y/o inorgánicas en estado líquido o sólido, los cuales reaccionan con la hidratación del cemento ya sea en forma química y física. Por lo general estos productos se agregan al final del mezclado, con el fin de modificar una o más de las propiedades del concreto

en estado fresco, de fraguado o endurecido, de tal manera que se adapte mejor a las condiciones y necesidades de la obra.

¹⁴Los aditivos no se consideran dentro del cálculo de diseño de mezclas debido a que su dosificación es en cantidades menores al 5% del peso del cemento, con excepciones cuando se dosifican en proporción del agua de mezclado, cuando su dosificación es mayor al 5% del peso del cemento y su volumen, las adiciones deben de tomarse en cuenta en el cálculo de diseño de mezclas.

Las adiciones y los aditivos, modifican algunas características del concreto, al utilizar un aditivo se debe tener cuidado de:

1. No usar aditivos viejos o de baja calidad
2. No mezclar aditivos de diferentes marcas
3. Almacenarlo adecuadamente

Debe tenerse en cuenta que el uso de un aditivo no soluciona los problemas que se presentan en un mal diseño de mezcla.

2.1.6. Acelerantes

Los acelerantes son esenciales para ciertos diseños de mezcla, principalmente cuando se necesita un rápido desarrollo de resistencias en un corto tiempo. Los aditivos acelerantes acortan el tiempo de fraguado y aumentan la rapidez de endurecimiento del concreto. Son productos solubles en agua, que actúan químicamente, acelerando las reacciones químicas iniciales como formación de Etingrita (sulfoaluminato tricálcico), o acelerando la hidratación por el incremento en la liberación de calor. Este tipo de aditivos, permite disminuir los tiempos de fraguado y obtener resistencias elevadas a edad temprana, aunque la resistencia final puede mantenerse o disminuir, según el tipo de acelerante y la dosis empleada.

¹⁴ ASTM C494, "Standard specification for chemical admixtures for concrete", International C494/C494M, 2008.

Sin embargo los acelerantes tienen un efecto secundario que es la reducción de la resistencia final (28 días) Esta caída de resistencia puede ser mayor dependiendo la composición química del acelerante, por lo tanto siempre se debe mantener al mínimo su dosificación, ya que una sobredosificación puede generar pérdidas de resistencia.

¹⁵Los tipos de acelerantes más utilizados son los siguientes:

- Silicato de sodio
- Aluminatos (de sodio o potasio o mezcla de ambos)
- Libres de Álcalis

Es importante siempre hacer mezclas de pruebas para determinar el comportamiento del aditivo en el mortero, con materiales de trabajo en condiciones climáticas similares y con los procedimientos de colocación y técnicas de inyección.

Una de las adiciones que se usan es el microsílíce, es un subproducto industrial que proviene de la reducción de cuarzo por carbón en hornos de arco eléctrico, en la producción del silicio o ferrosilicio.

La aplicación de microsílíce en los morteros se inició en Noruega en 1950, pero su difusión en Europa y E.U.A. se produjo alrededor de los años 80.

La adición de microsílíce al mortero en estado fresco provoca una fuerte cohesión, menor segregación, reducida exudación y un color más oscuro. Tiene mayor trabajabilidad combinado con aditivos y en reposo presenta menor revenimiento; sin embargo, ante la acción vibratoria tiene mayor fluidez.

Por otra parte, con la adición de microsílíce entre el 5 al 15% del peso del cemento, al mortero en estado endurecido, se reduce la porosidad de la pasta, se obtienen altas resistencias, menor permeabilidad, mayor durabilidad, mayor resistencia a la corrosión y al ataque químico.

¹⁵ ASTM C494, "Standard specification for chemical admixtures for concrete", International C494/C494M, 2008.

2.1.7. Acelerantes libres de álcalis

Hoy en día existen aditivos acelerantes libres de álcalis, que proporcionan una mejor calidad en la mezcla que los tradicionales aluminatos o silicatos.

Con los aditivos libres de álcalis puede obtenerse una ganancia de 10 kg/cm^2 por hora. Existen aditivos de marca reconocida, con resistencia final muy superior (hasta 50% mayor) y mejor ambiente de trabajo (menos nocivos para la salud) que los acelerantes tradicionales.

La química de los aditivos libres de álcalis es mucho más compleja, por lo que son más caros que los acelerantes tradicionales.

2.2 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS DE INYECCIÓN.

2.2.1. Viscosidad

Esta propiedad es una medida de la resistencia interna de la mezcla, a mayor viscosidad mayor resistencia.

¹⁶La prueba que se realiza para determinar la viscosidad de la mezcla es mediante el cono de Marsh; se hace con la mezcla, tomando el tiempo de flujo necesario en segundos para el vaciado de un volumen de 946 cm^3 del mismo, escurra a través de un orificio circular de 5mm de diámetro.

Generalmente el rango recomendado para una mezcla de inyección es de 32 a 40 seg. pero esta va a depender de las necesidades específicas de cada obra.

2.2.2. Densidad

La densidad es una de las propiedades más importantes en una mezcla para inyección, ya que de ella depende la presión hidrostática que se ejerce sobre la

¹⁶ PEMEX, "Procedimiento para el diseño de la cementación de tuberías de revestimiento", Exploración y producción, México, 2005.

formación. En zonas de baja presión de formación, deberá ser lo suficientemente ligera para no fracturar o causar daño a ésta y en zonas con alta presión de poro, deberá generar la presión hidrostática necesaria para controlar la presión de, impidiendo que la formación aporte fluidos sin que se genere un daño.

¹⁷ La densidad debe ser suficiente para detener la presión del agua subterránea, y mantener la estabilidad de los barrenos realizados. La densidad promedio de una bentonita recién preparada es de aproximadamente 1.041 t/m^3 .

La densidad máxima del lodo antes de mezclarlo no debe exceder de 1.361 t/m^3 . Al exceder esta densidad, es posible que el lodo no tenga una fluidez óptima.

2.2.3. Decantación

Es la condición que tienen las mezclas con bentonita en la que se acumulan sedimentos en la parte inferior de aquellas, debido al reposo de las mismas. La decantación se mide de acuerdo al volumen de sedimentos acumulados.

¹⁸ Cuando es muy pequeña la adición de bentonita a la mezcla es del orden del 2 al 4% y la bentonita tiene límite líquido del orden de 400 – 500%, ayudará a la disminución de la decantación de la mezcla pero sin reducir su resistencia.

2.2.4. Tixotropía

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide al amasarlo y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas o agitadas se convierten en un líquido reduciéndose su viscosidad; si a continuación, se les deja en reposo, recuperan su cohesión, así como el comportamiento sólido obteniendo una estructura de gel. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial

¹⁷ PEMEX, “Procedimiento para el diseño de la cementación de tuberías de revestimiento”, Exploración y producción, México, 2005.

¹⁸ PEMEX, “Procedimiento para el diseño de la cementación de tuberías de revestimiento”, Exploración y producción, México, 2005.

comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico

2.2.5. Reopexia

Es la propiedad de algunos fluidos de aumentar su viscosidad a medida que se le agita constantemente. Este comportamiento es opuesto a la tixotropía, en el que los fluidos se hacen menos viscosos cuando más se les agita.

2.2.6. Reología de una lechada

La reología de una lechada de cemento está relacionada con el líquido de soporte, la fracción volumétrica de los sólidos (volumen de partículas/volumen total) y la interacción entre las partículas. La reología es la bombeabilidad que tiene una mezcla.

¹⁹Las lechadas de cemento son suspensiones altamente concentradas de partículas sólidas disueltas en el agua. El contenido de sólidos en una lechada de cemento puede llegar a ser hasta un 70% de su contenido. El fluido intersticial de una lechada de cemento es una solución acuosa, de varias clases de iones y aditivos orgánicos. Por lo tanto, la reología de la lechada difiere de la reología del agua; así mismo, que los sólidos en una lechada están en función directa a su densidad. Sin embargo, los dispersantes del cemento, también conocidos como superplastificantes, ajustan las cargas superficiales de las partículas para obtener las propiedades reológicas deseadas de una lechada.

Por otra parte, cuando se mezcla el cemento con el agua se forma una estructura de gel en toda la lechada, que impide flujos con esfuerzo cortante menor al esfuerzo de corte dado por el valor de cedencia. Esto es resultado de la interacción electrostática entre las partículas. A esfuerzos de corte menores al valor de cedencia, la lechada se comporta como un sólido. Esto puede originar

¹⁹ PEMEX, "Procedimiento para el diseño de la cementación de tuberías de revestimiento", Exploración y producción, México, 2005.

algunas deformaciones finitas, de compresión o, eventualmente, de deslizamiento, pero no fluye. La viscosidad aparente es representada por la relación entre el esfuerzo de corte/velocidad de corte, la cual no es una constante; en su lugar ésta disminuye con el incremento del esfuerzo de corte. Una vez que el valor de cedencia es rebasado, la lechada de cemento se rompe en partes y agregados de partículas que se mueven entre unas y otras. Estos agregados contienen agua intersticial, lo que da como resultado que el volumen efectivo de la fase dispersa sea mayor que el volumen de los granos de cemento. El volumen de la fase dispersa es el factor clave para determinar la reología de la dispersión.

2.2.7. Fraguado

El fraguado es una de las características de mayor importancia que debe de considerarse en el diseño de mezclas, ya que va a depender de la cantidad de flujo de agua que se presenta en la filtración de un túnel.

El tiempo de fraguado se debe ajustar empleando un agente retardador o un acelerador dependiendo del tiempo necesario para efectuar la operación completa de sellado, que comprende: el tiempo para agitar y bombear la lechada al barreno.

2.2.8. Resistencia al corte

La resistencia de la mezcla es igual a la de un concreto, la cual va a depender de la relación agua – cemento; la adición o la influencia de la bentonita es notable y favorable cuando la dosificación del cemento es baja.

2.2.9. Contenido de agua

Es la cantidad de agua requerida para la elaboración de una mezcla con características apropiadas de fluidez y de viscosidad de acuerdo a las necesidades específicas que se presenten en la obra.

2.2.10. Permeabilidad

La permeabilidad de la mezcla es directamente proporcional a la cantidad de bentonita sódica que se le adiciona; a mayor contenido de bentonita, menor permeabilidad va a presentar la mezcla, esto con el fin de obtener un resultado óptimo en el sellado de filtraciones.

2.4. DOSIFICACIÓN Y PROPORCIÓN DE MEZCLAS DE INYECCIÓN.

Para las dosificaciones y preparaciones de las mezclas para la inyección, debe de cumplirse con la resistencia establecida en el proyecto, así como las características mencionadas anteriormente.

En la tabla 2.3 contiene los tipos de mezclas más comunes.

MEZCLA	ORDEN DE LOS MATERIALES
Agua – cemento -bentonita	Lodo bentonítico Cemento
Agua – cemento – arena - bentonita	Lodo bentonítico Cemento Arena
Agua – cemento – arena – silicato de sodio	Agua Silicato de sodio Cemento Arena
Agua – cemento – arena – bentonita – silicato de sodio	Agua Silicato de sodio Lodo bentonítico Cemento Arena

²⁰TABLA 2.3 Tipos de mezclas de inyección

La mezcla se debe mantener en agitación dentro del mezclador por un lapso no menor de dos minutos, contado a partir de que haya adicionado el último componente. Posteriormente, se envía la mezcla hacia los agitadores de baja

²⁰ JESUS VARELA C. "Procedimientos de inyección del subsuelo, tipos de mezclas y equipo adecuado para llevarla a efecto", México, 1992, Pág. 46.

velocidad de las estaciones de inyección de 60 rev/min. Las estaciones de inyección se deben de mantener en agitación mientras dure el proceso de inyectado o durante la vida útil de la mezcla.

2.5. TÉCNICAS DE INYECCIÓN.

Las inyecciones son tratamientos que consisten en introducir al terreno mezclas cementantes, como lechadas de cemento, morteros, productos químicos o la combinación de ambos, con el fin de mejorar alguna propiedad mecánica o hidráulica del terreno, proporcionar cohesión entre los bloques de roca o llenar fisuras o grietas. De acuerdo a la función de los tratamientos de inyección se clasifican en los siguientes:

2.5.1. Inyecciones para impermeabilizar

Las inyecciones para impermeabilizar son aquellas que se aplican para reducir la permeabilidad del terreno o eliminar el flujo de agua subterránea a través de discontinuidades como fisuras, grietas u oquedades.

Para estos casos se deben de utilizar mezclas estables de agua, cemento, bentonita y un aditivo acelerante de fraguado y con las características señaladas en la tabla 2.4

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN
Decantación	Menor o igual a 5%
Viscosidad	Entre 30 y 35 segundos Marsh
Cohesión con placa	Menor o igual a 0.03 gr/cm ²
Tiempo de fraguado	Requerido para el sellado
Resistencia a la compresión axial	Mayor o igual a 5 kg/cm ²

²¹TABLA 2.4 Características de las mezclas impermeables

²¹ STC, "Normas para los trabajos de sellado de filtraciones", México, 2004.

2.5.2. Inyecciones para consolidar

Las llamadas inyecciones para consolidar, se realizan para mejorar las propiedades de deformabilidad o mejorar la resistencia del terreno natural, aumentando su capacidad de carga.

Generalmente la profundidad de inyección es de 5 a 10 m y se realiza cubriendo una superficie que está determinada por la obra.

Este tipo de mezcla debe ser estable. Está formada por agua, cemento y bentonita, con las especificaciones señaladas en la tabla 2.5

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN
Decantación	Menor o igual a 5%
Viscosidad	Entre 30 y 32 segundos Marsh
Cohesión con placa	Menor o igual a 0.03 gr/cm ²
Resistencia a la compresión axial	Mayor o igual a 5 kg/cm ²

²²TABLA 2.5 Especificaciones de las mezclas para consolidación

2.5.3. Inyecciones de contacto

²³Estas inyecciones tienen por objetivo rellenar las oquedades que quedan entre el revestimiento de concreto de un túnel o una cimentación y la roca para garantizar la adecuada transmisión de los esfuerzos de la estructura al terreno.

Se deben de emplear mezclas estables de agua, cemento, bentonita, arena y un aditivo acelerante de fraguado, con las propiedades de la tabla 2.6

²³ Manual de Construcción Geotécnica II, SMMS, México, 2002, Pág. 564.

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN
Decantación	Menor o igual a 5%
Viscosidad	Entre 30 y 40 segundos Marsh
Cohesión con placa	Menor o igual a 0.03 gr/cm ²
Tiempo de fraguado	Requerido para el sellado
Resistencia a la compresión axial	Mayor o igual a 5 kg/cm ²

²⁴TABLA 2.6 *Propiedades de la mezclas para inyecciones de contacto*

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE FILTRACIÓN EN UN SISTEMA BASE BENTONITA-CEMENTO

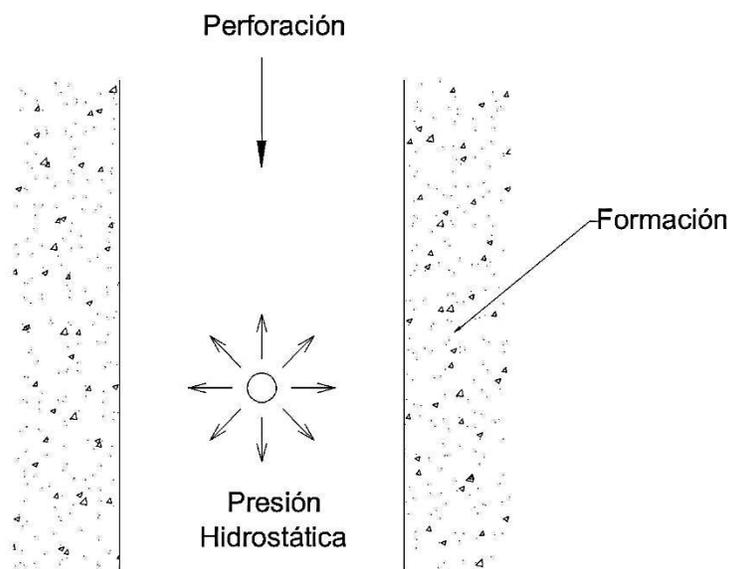
El uso de la bentonita para la formación de membranas impermeables se ha venido utilizando desde hace 50 años en diversos sectores, debido a una de sus propiedades de mayor importancia que es la baja permeabilidad, para el diseño de los lodos fraguantes.

Este capítulo tiene por objetivo describir cada una las pruebas que se realizan en laboratorio y que se aplican usualmente a las mezclas de bentonita-cemento, para obtener sus propiedades de filtración.

²⁴ STC, "Normas para los trabajos de sellado de filtraciones", México, 2004.

3.1. PROPIEDADES DE FILTRACIÓN

Para prevenir que los fluidos de la formación del suelo que rodea dicha estructura entren al interior del túnel, la presión hidrostática de la columna del fluido que se presenta en la fisura o grieta de la estructura de concreto, debe de ser mayor a la presión de los fluidos que se presentan en los poros de dicha formación (presión de poro), la cual se indica en la fig. 3.1.



²⁵Fig. 3.1 Presión de poro

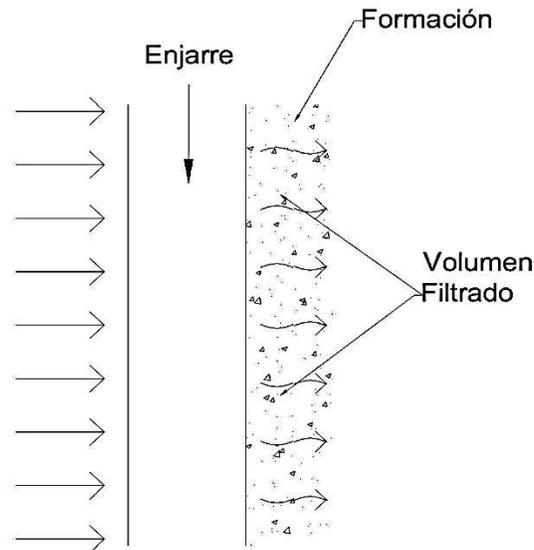
3.1.1. Enjarre

²⁶Se le llama enjarre a la capa o película formada por los sólidos de una mezcla de inyección, la cual se deposita en las fisuras de las paredes de la

²⁵ RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 194.

²⁶ PEMEX, "Procedimiento para el diseño de la cementación de tuberías de revestimiento", Exploración y producción, México, 2005.

estructura de una perforación o excavación, cuya permeabilidad es relativamente baja; por lo cual a través de ella solo fluye un fluido filtrado, como se muestra en la fig. 3.2



²⁷Fig. 3.2 Enjarre

Las mezclas bentoníticas deben diseñarse para mantener una permeabilidad nula y estable, con el fin de sellar y evitar la filtración del agua hacia el interior de la excavación, en este caso de la estructura del Metro.

3.1.2. Espesor de enjarre

²⁸La permeabilidad del enjarre estará en función a su espesor, lo que significa que, la permeabilidad de un enjarre es directamente proporcional a un enjarre grueso, el cual se indica en la fig. 3.3

²⁷ RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 195

²⁸ RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 289

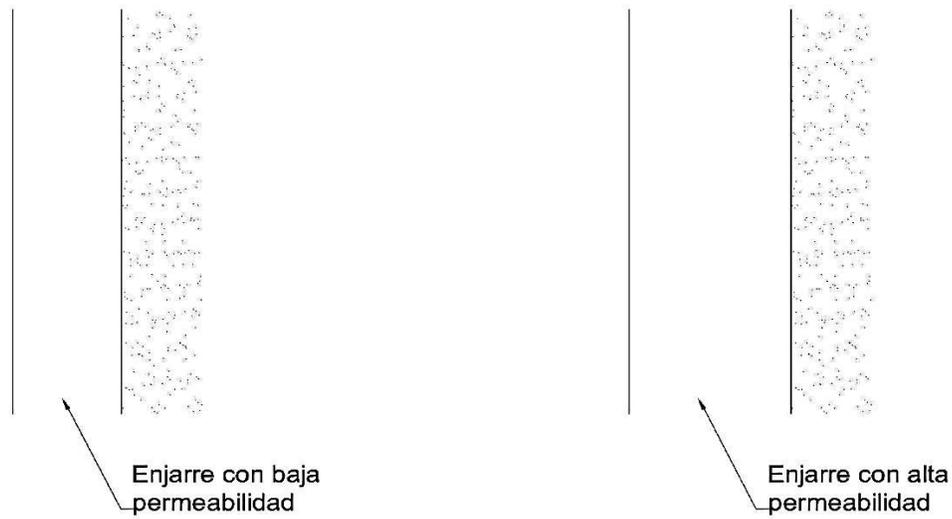


Fig. 3.3 Espesores de enjarre

²⁹Sin embargo, en los enjarres gruesos, se tiene de manera directa que el espesor del enjarre reduce el espacio anular que tiene como consecuencia algunos problemas asociados, tales como:

1. Reducción de la permeabilidad en la mezcla
2. Incremento en la velocidad de flujo por el espacio anular
3. Mayor caída de presión en el flujo
4. Menor adherencia en las paredes de la estructura

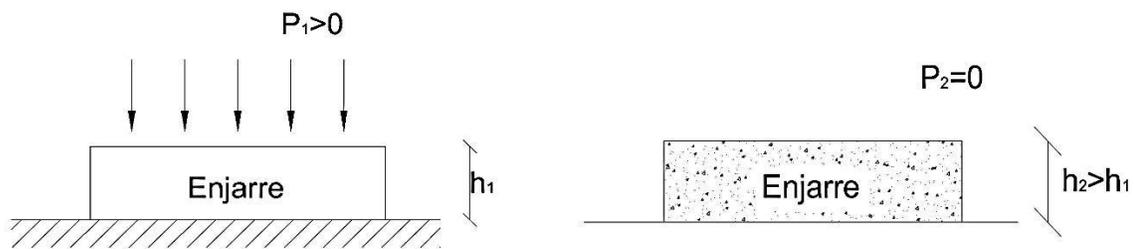
El espesor del enjarre es un factor importante para el sellado de las filtraciones, en el cual se asume que el espesor es proporcional al volumen de filtración. A pesar de que está relacionado el espesor con la filtración no es de

²⁹ PEMEX, "Procedimiento para el diseño de la cementación de tuberías de revestimiento", Exploración y producción, México, 2005.

manera directa, ya que la ecuación fundamental depende de la concentración de sólidos en la mezcla bentonítica y de la cantidad de agua en el enjarre.

Por otra parte si se agregan sólidos, como es el caso de la bentonita para la reducción del filtrado; simultáneamente se incrementa el espesor del enjarre. Este ejemplo permite deducir que no existe una relación directa entre ambos fenómenos.

Así mismo, el espesor del enjarre es difícil de determinar con exactitud, ya que por una parte no se logra definir la frontera entre la mezcla y el propio enjarre, lo que se complica al considerar que este es un material compresible, el cual varía su espesor al retirar la presión quedando como muestra la fig. 3.4



³⁰Fig. 3.4 Espesor de enjarre – presión

Se han propuesto algunos métodos para la determinación de un espesor del enjarre más preciso, pero estos son muy complicados.

³⁰ RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 271.

3.1.3. Permeabilidad del enjarre

La permeabilidad del enjarre es un parámetro fundamental que controla la filtración, más que otro parámetro y tiene como ventaja que no depende tanto de la concentración de sólidos como el volumen de filtrado.³¹ El orden de permeabilidad se ha medido en valores del 0.2 al $0.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, por lo que la permeabilidad tiene varios órdenes de magnitud menor que las formaciones rocosas y que en los suelos.

La permeabilidad se va a obtener de las pruebas de filtración, aplicando la ecuación fundamental ordenándola como sigue:

$$K = Q_w Q_c \frac{\mu}{2tPA^2} \quad (1)$$

Donde:

K = coeficiente de permeabilidad del enjarre

Q_w = volumen filtrado

Q_c = volumen del enjarre

μ = viscosidad del fluido

t = tiempo

P = presión

A = área

Cuando Q_w y Q_c se den en cm, μ en cp, P en atm, A en cm^2 , t en seg y K en md en un filtro prensa estándar API.

$$K = 1.99 \times 10^{-3} Q_w Q_c \mu \quad (2)$$

En donde Q_c es determinado a partir de diferentes combinaciones de pruebas en el filtro prensa; una alternativa no muy exacta para medir directamente el espesor

³¹ RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 277

del enjarre y obtenerlo con la ecuación fundamental ordenada de la forma siguiente:

$$K = \frac{Q_w h \mu}{2t PA} \quad (3)$$

Con las unidades mencionadas arriba y h en mm quedando:

$$K = 8.95 \times 10^{-3} Q_w h \mu \quad (4)$$

3.2. FILTRO PRENSA

Las propiedades de filtración se evalúan con pruebas realizadas en un dispositivo llamado “filtro prensa API” (fig. 3.5), en el cual se lleva a cabo una prueba de filtración estática de la mezcla diseñada, con el fin de apreciar e interpretar los resultados dados.

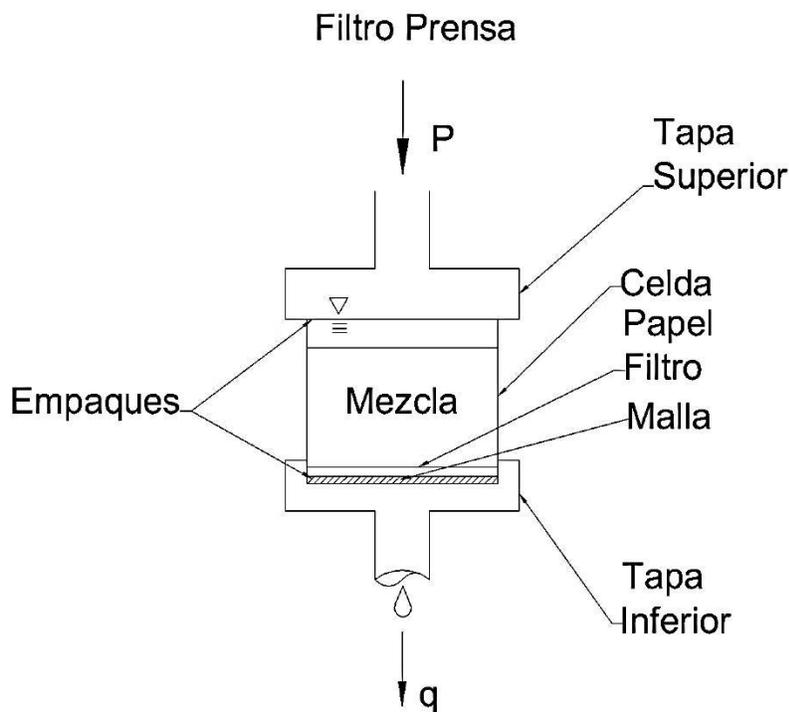


Fig. 3.5 Filtro prensa API

3.3. FILTRACIÓN ESTÁTICA

Existe una filtración que se presenta en los túneles del Metro de la ciudad de México, llamada filtración estática. Esta filtración se presenta cuando la mezcla bentonítica no está circulando y el enjarre crece sin perturbación, la cual se muestra de la siguiente forma:

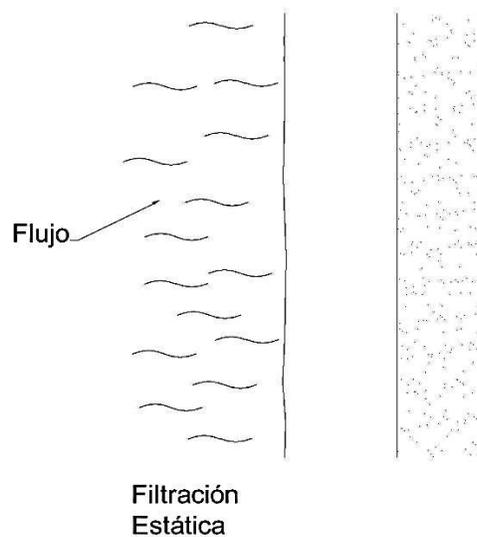


Fig. 3.6 Filtración estática

La teoría de la filtración estática se determina de la siguiente manera:

³²Si un volumen unitario de una suspensión estable es filtrado a través de un material permeable, X representa el volumen filtrado, entonces $1 - x$ representa el volumen del enjarre (sólidos y líquido) depositado, como se indica en la fig. 3.7

³² RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 280

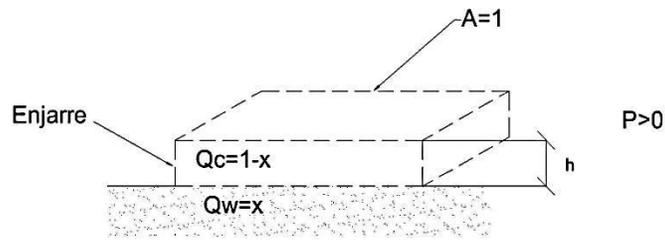
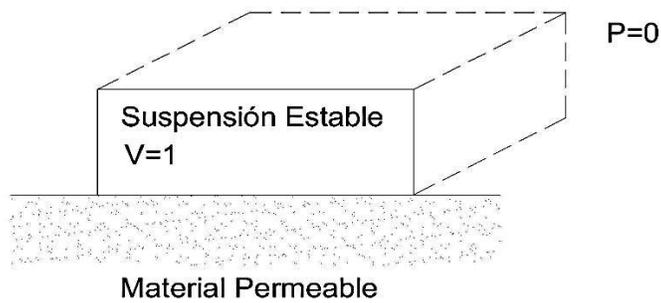


Fig. 3.7 Presión- volumen



³³Fig. 3.8 Suspensión estable

Con lo que Q_c es el volumen del enjarre y Q_w el volumen filtrado, por lo cual:

$$\frac{Q_c}{Q_w} = \frac{1-x}{x} \quad (5)$$

³³ RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 283.

Consecuentemente, el espesor del enjarre para un área unitaria en un tiempo unitario, es decir:

$$t = 1$$

$$A = 1$$

$$\text{gasto} = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}}$$

$$\text{si tiempo} = 1$$

$$\text{gasto} = \text{volumen}$$

$$\text{volumen} = \text{area} \times \text{altura}$$

$$\text{si Area} = 1$$

$$\text{Volumen} = \text{altura}$$

$$h = Qc \tag{6}$$

$$Qc = \text{volumen del enjarre}$$

$$h = \frac{1-x}{x} Qw \tag{7}$$

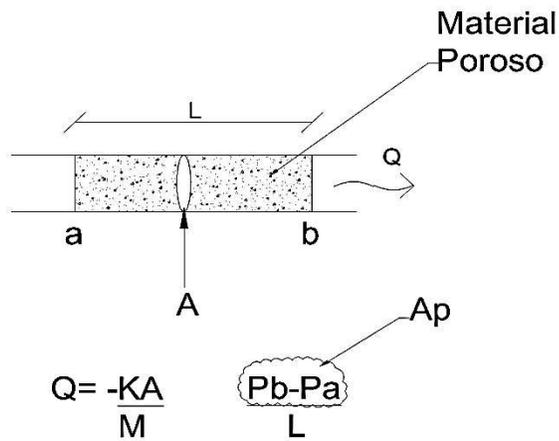
$$Qw = \text{volumen filtrado}$$

Sin embargo la ley de Darcy establece que:

$$(A = 1)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{KP}{\mu h} \tag{8}$$

Ley de Darcy

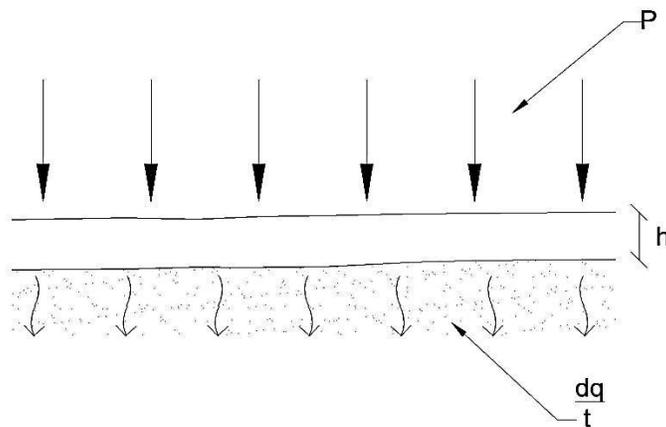


$\frac{dq}{dt}$ = gasto a través del filtrado

$\frac{P}{h}$ = gradiente de presión

μ = viscosidad del fluido

K = coeficiente de permeabilidad del enjarre



³⁴Fig. 3.9 Volumen filtrado

³⁴ RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 297

Con lo que cambiando el término del espesor:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{KP}{\mu Q_w} \frac{x}{1-x} \quad (9)$$

Al integrar

$$Q_w^2 = \frac{2KP}{\mu} \frac{x}{1-x} t \quad (10)$$

Como

$$\frac{Q_c}{Q_w} = \frac{1-x}{x} \quad (11)$$

$$Q^2_w = \frac{2KP}{\mu} \frac{Q_w}{Q_c} t \quad (12)$$

Si el área del enjarre es A

$$Q^2_w = \frac{2KPA}{\mu} \frac{Q_w}{Q_c} t \quad (13)$$

Esta es la ecuación fundamental que gobierna la filtración bajo condiciones estáticas.

Por otra parte los cambios de temperatura también afecta el equilibrio electroquímico de los que depende el grado de floculación y segregación de la mezcla, con lo que se altera la permeabilidad de dicho enjarre. También otro cambio se debe a la degradación de algún componente que se encuentra en la mezcla bentonítica, cuando estos componentes alcanzan una temperatura de 100°C, haciendo variar la filtración y no se mantiene adecuadamente, como el caso de la arcilla, polímeros orgánicos y resinas.

3.3.1. Relación entre volumen y tiempo

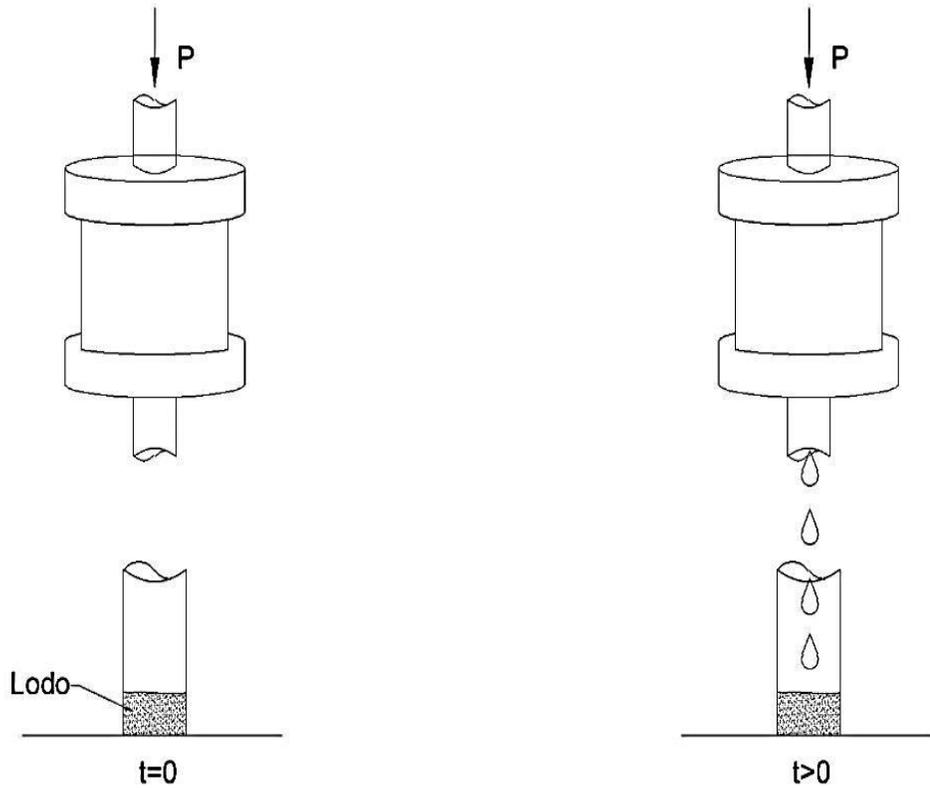
Anteriormente se observó que existe una relación proporcional entre el cuadrado del volumen filtrado y el tiempo expresándose de la siguiente manera:

$$Q^2_w \propto t \quad (14)$$

O lo que es igual a:

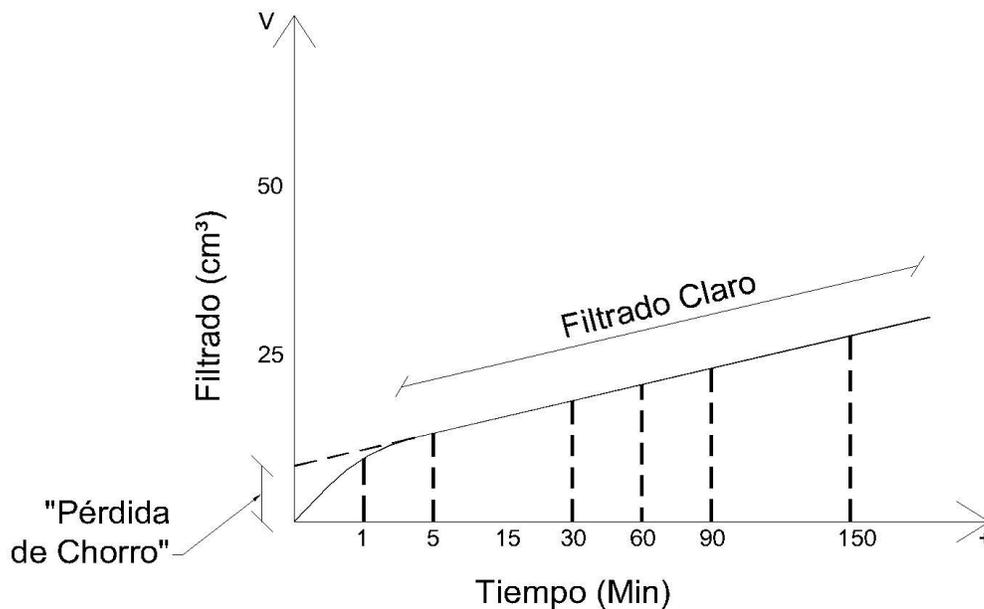
$$Q_w \propto \sqrt{t} \quad (15)$$

Por lo que experimentalmente esto se cumple fuera de un error para $t = 0$



³⁵Fig. 3.10 Volumen de filtrado en filtro prensa

³⁵ RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 299



³⁶Fig. 3.11 Filtrado vs tiempo

Al graficar el volumen filtrado respecto a la raíz del tiempo, se observa que presenta un comportamiento lineal, el cual intercepta el eje vertical en el valor llamado error de cero o pérdida de chorro; causado por el lodo o la mezcla que tiende a pasar por el papel filtro, mientras que sus poros son tapados, después que estos son tapados sólo el filtrado puede pasar y la curva se vuelve lineal y el filtrado claro.

Con la mayoría de las mezclas bentoníticas el error de cero es muy pequeño y despreciable, pero este puede ser considerable cuando la filtración se da a través de los poros de la estructura.

³⁶ RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 302

En algunos tipos de lodos o mezclas el papel filtro se taponea instantáneamente y el error de cero es negativo y representa el volumen entre el papel y el tubo de descarga.

Existe una relación experimental para el volumen filtrado dado:

$$Q_w - q_0 = A\sqrt{Ct} \quad (16)$$

En donde q_0 es el error de cero y C una constante dada por:

$$C = \frac{2k_p}{\mu} \frac{Q_w}{Q_c} \quad (17)$$

Por lo que las propiedades de la filtración pueden ser evaluadas midiendo el volumen acumulado en un tiempo dado.

3.3.2. Relación entre presión y volumen

Conforme a nuestra ecuación fundamental el volumen filtrado es proporcional a \sqrt{P} por lo que una grafica log -log de P vs Q_w tendrá una pendiente de 0.5 si se mantienen constantes todas las demás variables. Este fenómeno nunca se observa, debido a que el enjarre es compresible con lo que la permeabilidad disminuye con la presión.

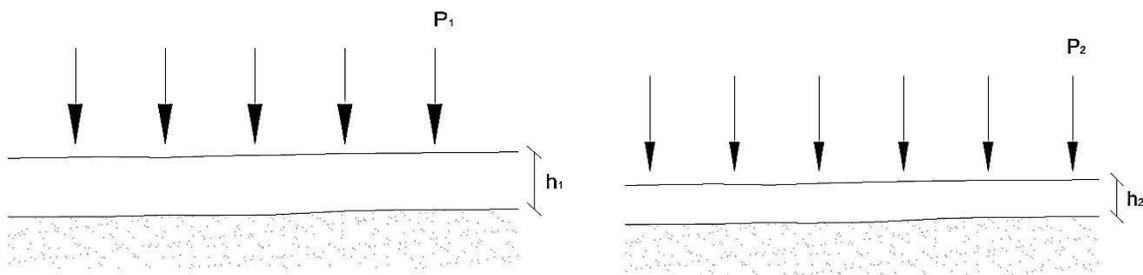
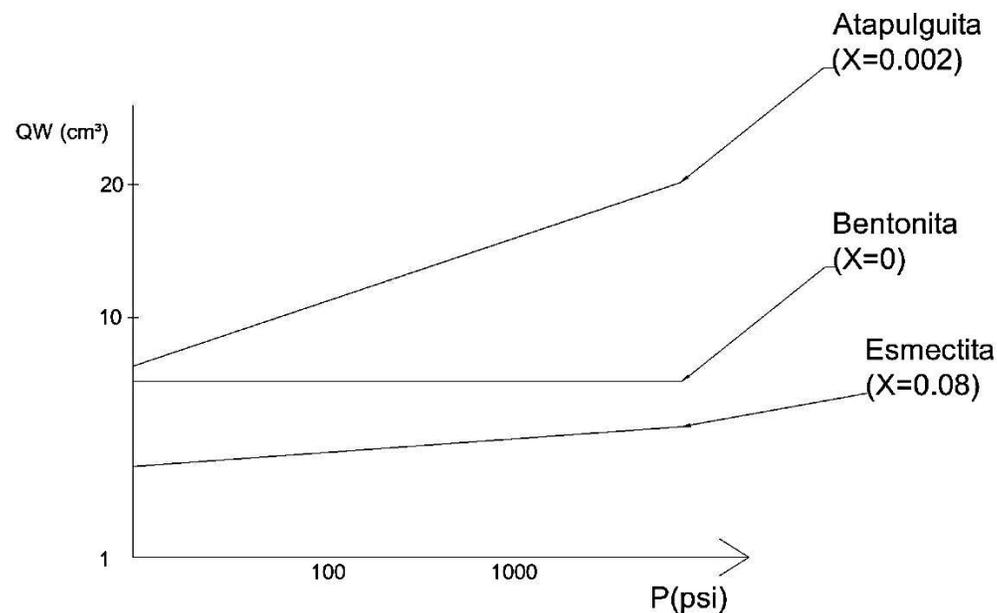


Fig. 3.12 Presión- volumen

Si $P_1 < P_2 \therefore h_1 > h_2 \rightarrow K_1 > K_2$

Con lo que: $Q_w \propto p^x$ (18)

Donde x es la pendiente de la gráfica $\log Q_w - \log P$ y siempre será menor a 0.5, x depende principalmente de la forma y tamaño de las partículas sólidas de la mezcla.



³⁷Fig. 3.13 Valor de x de acuerdo al tipo de arcillas

Se ha observado que el exponente x varía de 0 a 0.02 con lo que el volumen de infiltración es relativamente insensible a los cambios de presión. A pesar de esta variación despreciable puede ser conveniente realizar pruebas a la presión de interés para poder pronosticar el comportamiento de dicha mezcla.

³⁷ RYEN CAENN, "Composition and properties of drilling and completion fluids, Sixth edition, 2007, Page 304

3.3.2. Relación entre temperatura y volumen filtrado

El incremento en la temperatura de la mezcla va a incrementar el volumen de filtrado de diversas maneras. En primer lugar se reduce la viscosidad de la mezcla con el incremento de la temperatura en la mezcla, con lo que de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_{w_2}}{Q_{w_1}} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\mu_2}} \quad (19)$$

$$Q_{w_2} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\mu_2}} Q_{w_1} \quad (20)$$

Por lo tanto, el volumen filtrado se incrementa al disminuir la viscosidad.

3.4. PRUEBAS PARA LA ELABORACIÓN DE UN SISTEMA BASE BENTONITA-CEMENTO

Durante la elaboración de un lodo fraguante, es necesario mezclar la bentonita sódica con el agua agitándola durante unos 15 minutos, esto con el fin de que se obtenga una buena homogenización de la mezcla y después dejarla reposar conforme a las recomendaciones del fabricante para obtener una adecuada hidratación y posteriormente adicionarle el cemento y aditivos que se calcularon para el diseño de la mezcla conforme al tipo de filtración que se presenta en la estructura del túnel del Metro.

3.4.1. Densidad de la mezcla

La densidad es una de las propiedades importantes en la mezcla bentonítica, esto se debe porque de su magnitud depende la carga hidrostática que se ejerce sobre la estructura; por lo que debe de ser lo suficientemente pesada para controlar la presión y prevenir un brote, sin llegar a fracturar, así

como también tener una mínima contaminación de la mezcla con el agua de la filtración.

Por tal motivo cuando se está diseñando una mezcla, la densidad puede calcularse para que ejerza una carga hidrostática conveniente y así controlar el problema de filtrado, a partir de la cantidad, la densidad específica y del volumen absoluto de cada uno de los elementos que conforman la mezcla.

Con las pruebas de laboratorio se pueden confirmar si la densidad medida concuerda con la densidad calculada dentro de una tolerancia aceptable de $\pm 0.05 \text{ lb/gal}$.

La densidad se va a medir inmediatamente después de que se ha preparado la mezcla con una balanza para lodos de la siguiente manera:

- a. Se llena completamente la copa de la balanza y se le dan unos pequeños golpes para eliminar el aire atrapado durante el mezclado.
- b. Se purga con la tapa del dispositivo dando un giro a la misma, en el momento de tapar la copa de la balanza.
- c. Se limpia la copa de la balanza de la mezcla que se escurrió al momento de realizar la purga y se coloca en su base.
- d. Posteriormente se procede a tomar la lectura en cualquiera de las escalas que tiene la balanza (lb/ft^3 ó lb/gal), hasta el momento en que se llegue a equilibrar la burbuja o nivel de la balanza con el contrapeso del extremo opuesto a la copa.

Finalmente el valor de la lectura tomada nos proporciona directamente el valor de la densidad de la mezcla bentonítica.

3.4.2. Comportamiento reológico

Las propiedades reológicas de una mezcla bentonita-cemento que se determinan en laboratorio, son:

1. Viscosidad plástica
2. Punto de cedencia
3. Índice de consistencia
4. Índice de comportamiento de flujo

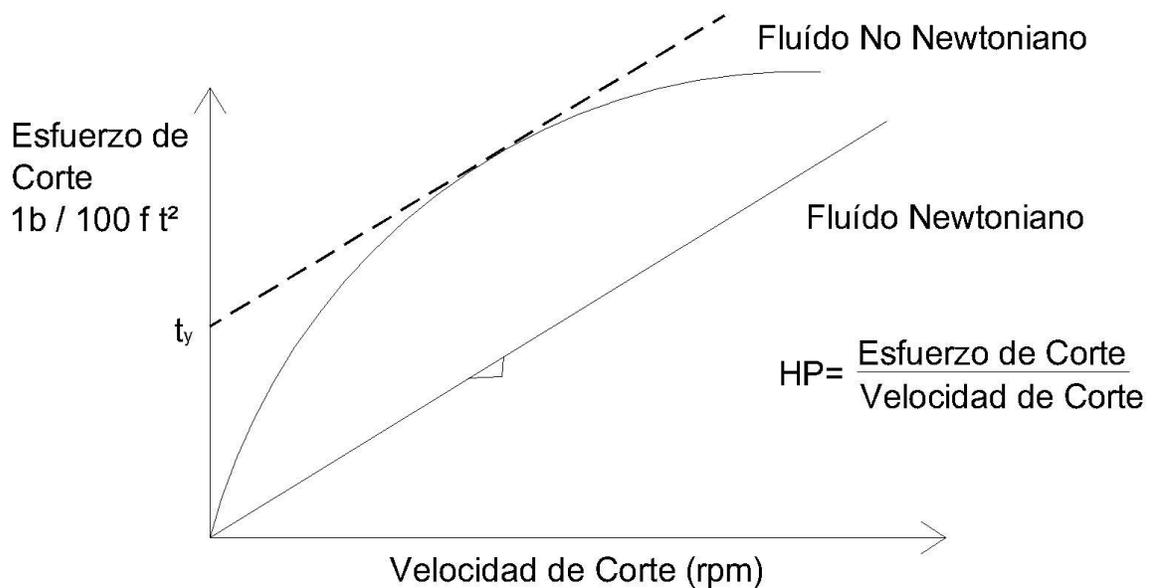
³⁸Estas propiedades sirven para determinar el comportamiento o patrón de flujo de la mezcla (laminar, turbulento o tapón), requeridos para el control de filtración. Durante el trabajo de sellado, la mezcla bentonítica debe de presentar un flujo laminar al desplazarse por el interior de las tuberías por las cuales se va a transportar y posteriormente alcanzar un flujo turbulento en el espacio anular del barreno, con el propósito de remover el enjarre del lodo que se encuentra en las paredes del túnel del metro, logrando así una mejor adherencia de la mezcla con el concreto de la estructura y evitando al mismo tiempo la migración de fluidos.

El comportamiento de una mezcla bentonítica es de un fluido no newtoniano (plástico de Binham); es decir que, el esfuerzo de corte no es proporcional a la velocidad de corte, por lo cual es difícil predecir las propiedades reológicas de la mezcla.

Existen dos modelos matemáticos diferentes que se usan comúnmente para describir el comportamiento de los fluidos no newtonianos que son: el plástico de Binham y la ley de potencias. Los dos términos que describen el comportamiento de un plástico de Binham son el punto de cedencia (τ_y) y la viscosidad plástica (μ_p).

³⁸ PEMEX, "Procedimiento para el diseño de la cementación de tuberías de revestimiento", Exploración y producción, México, 2005.

La viscosidad plástica es la pendiente de la línea recta de extrapolación (en la curva de comportamiento de flujo) y el punto de cedencia (τ_y) es la intersección de esta línea con el eje de esfuerzo de corte, como se muestra en la siguiente gráfica:



³⁹Fig. 3.14 Esfuerzo de corte vs velocidad de corte

Para determinar la curva de esfuerzo de corte y velocidad de corte vamos a emplear el viscosímetro rotacional Fann 35-A, con el que se obtienen lecturas de 100, 200, 300 y 600 rpm, así mismo para determinar esta curva de la mezcla bentonítica se va a realizar en el laboratorio de la siguiente forma:

- a. Se vacía la mezcla en la celda del consistómetro atmosférico hasta el nivel marcado.

³⁹ CARLOS ISLAS SILVA, "Prácticas de cementación" IPM, México, 2001, Pág. 16.

- b. Después se tapa la celda, cuidando que la propela se encuentre fija a la tapa y que los seguros queden bien asentados en la celda, se coloca en el compartimiento del consistómetro asentando nuevamente el seguro y se enciende el motor para que se agite la mezcla durante unos 20 min.
- c. Se saca la mezcla del dispositivo y se coloca en el vaso del viscosímetro rotacional llenándolo hasta el nivel marcado.
- d. Posteriormente se coloca el vaso abajo del viscosímetro Fann 35-A y se enciende a una velocidad de 300 rpm.
- e. Se sube el vaso hasta que el nivel de la mezcla en el vaso alcance el nivel inscrito en el rotor y se inicia el conteo con el cronómetro, realizando estos pasos lo más rápido posible.
- f. La lectura inicial en el dial a 300 rpm, se toma a los 60 seg. Las lecturas de 200 y 100 rpm, respectivamente se toman en orden decreciente a intervalos de 20 seg. Cada lectura en el dial se debe de tomar justo antes de cambiar a la siguiente velocidad.

Finalmente con las lecturas de velocidad de corte tomadas en el viscosímetro rotacional y el esfuerzo de corte calculado para cada velocidad, se obtienen los datos suficientes para trazar la curva de comportamiento de flujo: en donde la pendiente nos representa la viscosidad plástica y la ordenada al origen nos representa el punto de cedencia que se mencionó anteriormente.

Por otra parte, el concepto de la ley de potencias describe con mayor aproximación las propiedades reológicas de la mezcla de bentonita – cemento, que el modelo matemático de plástico de Binham.

Con la aplicación del método de la ley de potencias se simplifica el procedimiento para calcular estas propiedades, utilizando la siguiente ecuación:

$$\tau = K^2(R)^{n^2}$$

En donde:

τ = esfuerzo de corte (lbf/ft²)

R = velocidad de corte (seg⁻¹)

n^2 = índice de comportamiento de flujo

K^2 = índice de consistencia

En el concepto de ley de potencias se deben determinar dos parámetros para poder estimar las pérdidas de presión por fricción durante el desplazamiento de la mezcla hacia el barreno y la velocidad requerida para alcanzar el flujo turbulento, los cuales son: el índice de comportamiento de flujo y el índice de consistencia.

Sin embargo las lecturas en el dial del viscosímetro Fann a 300, 200 y 100 rpm. se convierten a esfuerzo de corte (τ) y las velocidades en rpm. se convierten a velocidad de corte (R) de la siguiente forma:

$$\tau \text{ (lbf/ft}^2\text{)} = \text{Lect. dial} \times 0.01065 \times N$$

$$R \text{ (seg}^{-1}\text{)} = \text{Vel. en rpm Fann} \times 1.7023$$

Así mismo n^2 y k^2 se van a calcular con las lecturas de 300 y 600 rpm. de la siguiente manera:

$$n^2 = 3.32 \log_{10} \frac{\text{Lect 600 rpm}}{\text{Lect 300 rpm}}$$

$$k^2 = \frac{N (\text{Lect 300 rpm}) 1.066}{100 (511) n^2}$$

Dónde:

N = Factor de rango de extensión del torque del resorte Fann (usualmente N=1)

Si $n^2 = 1.0$, entonces la mezcla se comporta como fluido Newtoniano y la viscosidad será constante a cualquier gasto de flujo. Para la mayoría de las mezclas bentoníticas, el valor de n^2 es considerablemente menor de 1.0, por lo que la viscosidad plástica se incrementa conforme la velocidad de flujo disminuye.

Para calcular la viscosidad plástica (μ_p) se va a calcular de la siguiente forma:

$$\mu_p = \left[\frac{\tau_{300} - \tau_{200}}{R_{200}} \right] 47\,880 \text{ [cp]}$$

Dónde:

τ_{300} = esfuerzo de corte a 300 rpm.

τ_{200} = esfuerzo de corte a 200 rpm.

R_{200} = velocidad de corte a 200 rpm.

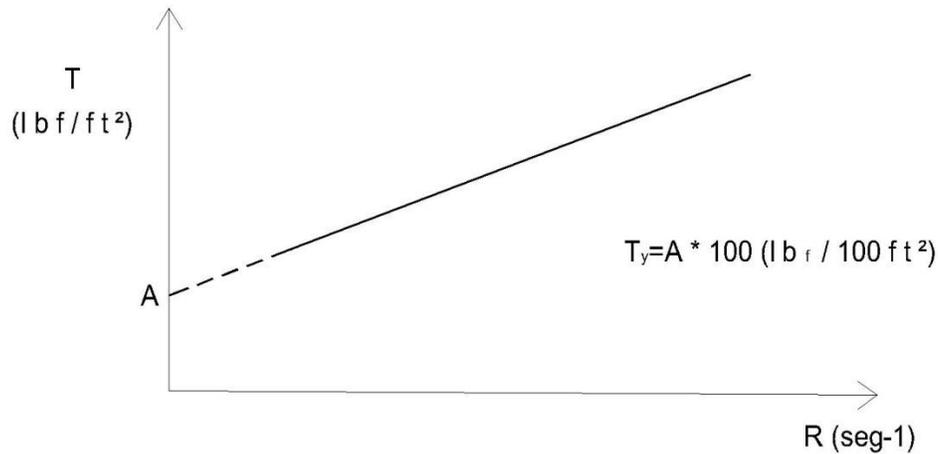
Así mismo con las lecturas obtenidas del viscosímetro Fann de 100, 200 y 300 rpm. se deberá de hacer la tabla 3.1

N (rpm. Fann)	Lect. dial	R (seg^{-1})	τ (lbf/ft^2)
300	X1	510.69	0.01065 x1
200	X2	340.46	0.01065 x2
100	X3	170.23	0.01065 x3

⁴⁰ *Tabla 3.1 del viscosímetro Fann*

Posteriormente se grafican en un sistema de ejes cartesianos, como se muestra a continuación:

⁴⁰ CARLOS ISLAS SILVA, "Prácticas de cementación" IPM, México, 2001, Pág. 20



⁴¹Fig. 3.15 Esfuerzo de corte vs velocidad de corte

3.4.3. Pérdida de agua

La pérdida de agua de una mezcla se debe a la aplicación de una presión diferencial sobre la interfaz permeable, por lo que esta presión libera agua de la mezcla cambiando las características de la misma.

Sin embargo la pérdida de agua o filtrado de una mezcla bentonítica es particularmente importante durante la operación de bombeo, ya que se debe de mantener fluida la mezcla desde el comienzo del bombeo hasta colocarla en el barreno donde se localiza la filtración. Generalmente el método que se utiliza para asegurar el tiempo bombeable de diseño es mediante la aplicación de un aditivo reductor de pérdida de agua, el cual también nos previene la deshidratación prematura del cemento y nos mantiene fluida la mezcla.

⁴¹ CARLOS ISLAS SILVA, "Prácticas de cementación" IPM, México, 2001, Pág. 20

La prueba de pérdida de agua en el laboratorio se realiza con un filtro prensa API con el siguiente procedimiento:

1. Se coloca una malla especial del filtro prensa sobre la parte inferior de la celda (tapa), enseguida se coloca un papel filtro junto con un aro sello (o'rin) para evitar fugas entre la tapa y el cuerpo de la celda.
2. Una vez preparada la mezcla conforme a las especificaciones de diseño, se vacía en la celda del filtro prensa llenándolo hasta dejar un espacio en la parte superior de 1.00 cm aprox.
3. Se coloca en la base del filtro prensa y se tapa la celda mediante un tornillo haciéndolo girar hasta que asiente y selle perfectamente la tapa.
4. Se coloca una probeta de 50 ml debajo de la espiga de drenaje del filtro prensa y se abre la espiga superior.
5. Se le aplica una presión de 100 kg/cm^2 en la parte superior de la celda, abriendo la válvula del tanque que se encuentra conectada al dispositivo.
6. En el momento de abrir la válvula, se comienza a registrar el tiempo con el cronómetro (el periodo de la prueba es de 30 min).
7. Se anotan varios intervalos de tiempo con respecto al volumen filtrado.
8. Si la deshidratación de la mezcla ocurre antes de los 30 min, se registra el tiempo en el cual sucedió.
9. Una vez terminada la prueba se procede a cerrar la válvula y se desfoga la presión del filtro prensa, para extraer la celda y apreciar el enjarre de la mezcla diseñada.



Fig. 3.16 Filtro prensa

Con esta prueba se obtiene el volumen total del agua filtrada en cm^3 y el tiempo en el cual ocurre la deshidratación de la mezcla bentonítica.

3.4.4. Agua libre

⁴²Es la cantidad de agua que desarrolla una mezcla en la parte superior de una probeta de 250 ml. después de que ha permanecido sin ningún movimiento durante dos horas.

Cuando la mezcla se deja en reposo, el agua libre se acumula en la parte superior debido a la precipitación de las partículas de cemento dentro de la mezcla. Conforme se sedimentan las partículas, estas tienden a “puentearse” y justo debajo de cualquier área de puenteo, se encuentra una grieta o hendidura las cual permanece después de que el cemento ha fraguado. Por ello existe un gran número de ellas en la columna de la mezcla, se formará un canal potencial que puede causar que la envoltura del cemento falle al someterlo a presión, así

⁴² CARLOS ISLAS SILVA, “Prácticas de cementación” IPM, México, 2001, Pág. 30.

como problemas de adherencia del cemento en las perforaciones o barrenos realizados donde existe la filtración. Por este motivo la API ha establecido un valor máximo de agua libre de 3.5 ml para cementos empleados en la cementación de pozos petroleros.

La determinación del agua libre de la mezcla se realiza de la siguiente forma:

1. Se vacía la mezcla en la celda del consistómetro atmosférico hasta alcanzar el nivel que tiene inscrito y se tapa.
2. Se coloca la celda en la base del consistómetro y se agita durante 15 minutos.
3. Se retira la mezcla del consistómetro y se coloca en un agitador con mayor velocidad para agitarla durante 20 segundos.
4. Se llena la probeta de 250 ml y se tapa para dejarla reposar durante 2 horas.
5. Posteriormente se retira el agua acumulada en la parte superior de la mezcla con una jeringa o por decantación para medirla en una probeta de 10 ml.

La estabilidad de una mezcla se determina mediante la prueba de decantación. De esta forma se calcula el valor del agua libre que desarrolla la mezcla diseñada, anotando a continuación de este valor entre paréntesis si la mezcla sale fluida, semifluida o pastosa y si se llegan a observar algunas grietas a través de la probeta.

CAPÍTULO 4

PROCESO DE SELLADO DE FILTRACIONES A BASE DE MORTEROS BENTONÍTICOS EN LAS PAREDES DE LOS TÚNELES DE OBRA METRO

Para lograr el sellado exitoso de las filtraciones que se presentan en las paredes de los túneles del Metro, es necesario una buena planeación y ejecución en el proceso, contar con equipo adecuado, personal capacitado, supervisión y control de calidad.

En este capítulo se exponen los trabajos que deben realizarse para el control de las filtraciones que se presentan en los túneles del Metro, conforme a los requerimientos marcados por el Sistema de Transporte Colectivo Metro (STCM).

4.1. TRABAJOS PRELIMINARES

Se realiza un recorrido a lo largo del tramo del túnel afectado y de manera visual se detecta y luego se localiza el origen de la filtración que se presente en las paredes. Luego se desprenden de las falsas adherencias y sarro que acarrea el agua.

Posteriormente de acuerdo al proceso del STCM se aplican los siguientes criterios:

1. Donde la extensión de la filtración o humedad sea mayor a 1.50 m².
2. Donde existan filtraciones medianas o pequeñas agrupadas, filtraciones aisladas con interferencias.
3. Donde el muro no presente grietas mayores a 5 mm y tenga apariencia sana.
4. Cuando la superficie sea firme y no presente desmoronamientos.
5. Cuando el muro se encuentre degradado superficialmente en un espesor máximo de 5cm; para este último caso, si el acero de refuerzo se encuentra expuesto, deberá notificarse para la definición del tratamiento superficial.

El tratamiento superficial se realizará de la forma convencional, comenzando por la limpieza de la zona afectada. Luego se realiza un ranurado hasta encontrar el concreto sano para posteriormente sellar o calafatear la zona de la filtración con una mezcla de cemento-arena-agua. En la mayoría de los casos se emplea un cemento de fraguado rápido. Que se aplica directamente en la zona afectada ejerciendo presión mientras fragua. Toda la mezcla es aplicada a lo largo del hueco que se hizo en un principio, con el fin de reparar la zona afectada por la filtración.

Otro aspecto importante de la preparación del sitio de tratamiento es la colocación de protecciones que impidan que el polvo y los derrames de la mezcla dañen los equipos, instalaciones y estructuras adyacentes, incluidas las superficies donde posteriormente se inyectará la mezcla bentonítica.

Eventualmente la protección se puede hacer aislando las áreas susceptibles a daños de los trabajos de sellado de las filtraciones. Las protecciones con cubiertas pueden ser de madera, metal, láminas de polietileno o son recubrimientos temporales, como cubiertas de plástico, fundas, y otros elementos que pueden removerse sin dificultad. En ocasiones no es posible proteger las superficies, por lo que se debe realizar la limpieza y lavado de la superficie antes de que endurezca la mezcla.

Es necesario tener los equipos y herramientas adecuados para el retiro de los residuos producto de la inyección de mezcla.

4.2. ELABORACIÓN DE MEZCLA

Para la elaboración de la mezcla bentonítica de acuerdo a las especificaciones del STCM, se utiliza agua, bentonita y cemento con la dosificación de la tabla 4.1.

AGREGADO	PORCENTAJE
Agua	72% (910 l/m ³)
Bentonita	8% (100 kg/m ³)
Cemento Portland ordinario	20% (250 kg/m ³)

TABLA 4.1 Dosificación para mezclas bentoníticas conforme a las especificaciones del STCM.

4.3. METODO DE BARRENACIÓN

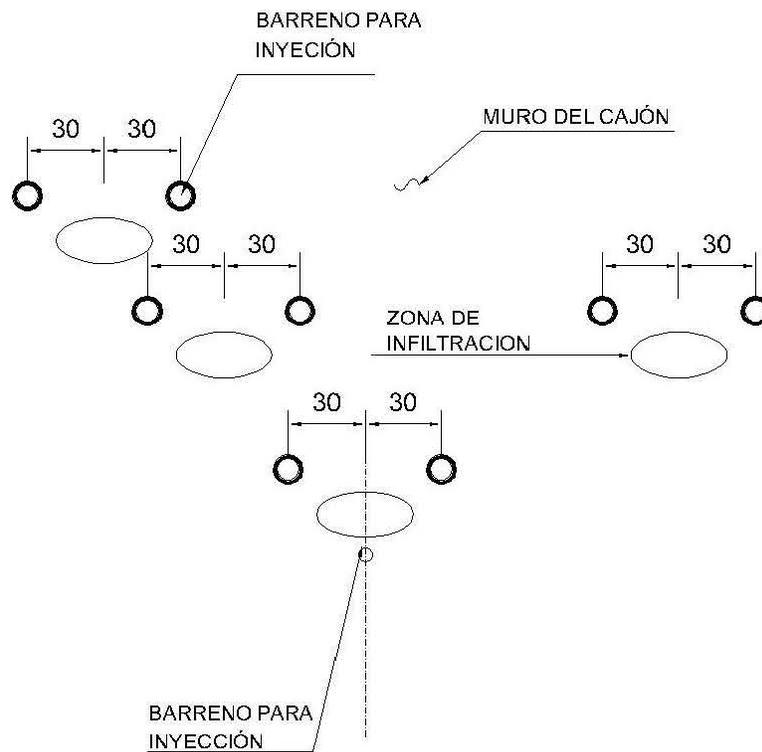
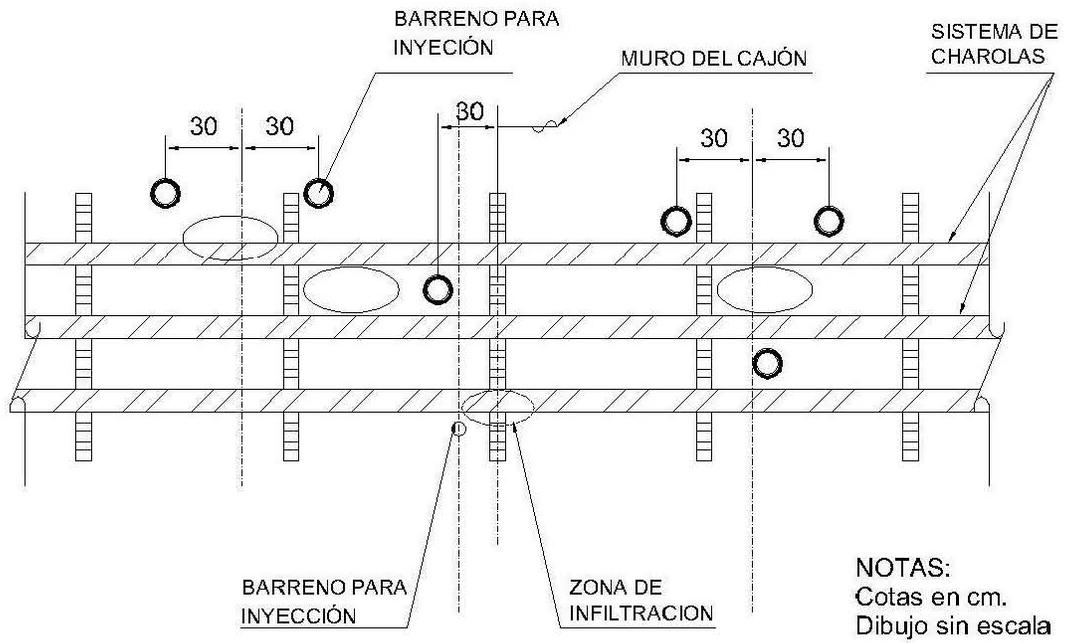
Las especificaciones del STCM, marcan la forma en que se deben hacer las perforaciones en los muros, para la inyección de la mezcla bentonítica como se muestra en las figs. 4.1 y 4.2.

4.4. EQUIPOS

Para realizar el sellado de filtraciones en los túneles del metro se requiere contar con el equipo adecuado, el cual se menciona a continuación:

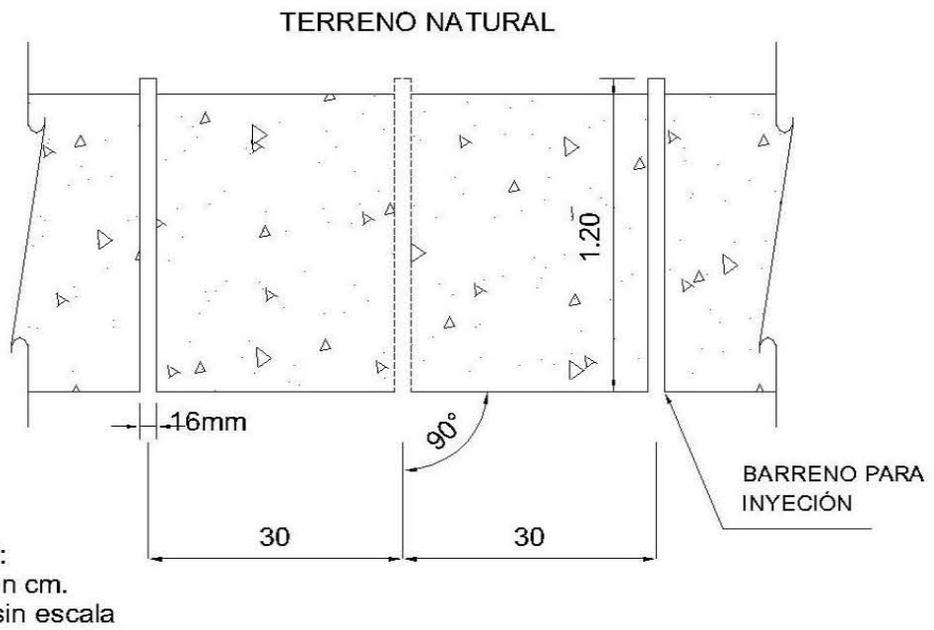
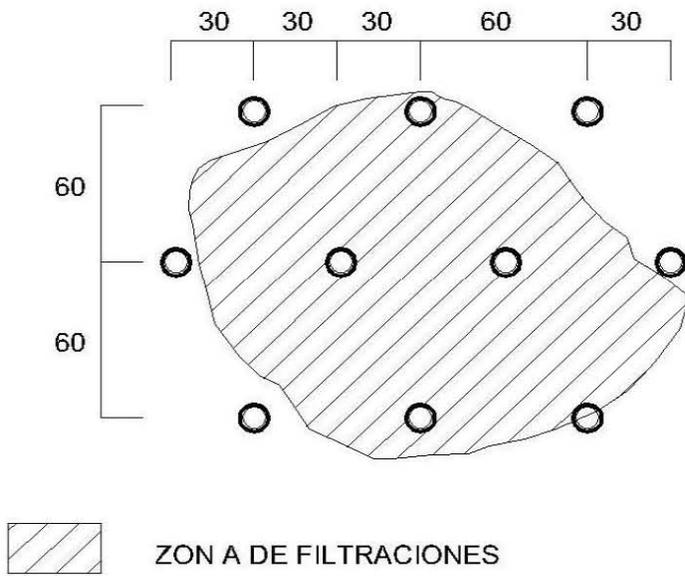
- Estaciones de inyección
- Mezcladores
- Dosificadores
- Bombas
- Manómetros
- Tuberías
- Obturadores

El equipo se coloca lo más cercano al lugar del muro afectado para minimizar los tramos de manguera que se utilicen. Se recomienda colocar el equipo al centro para evitar los posibles movimientos del mismo para terminar el trabajo. Es necesario colocar el equipo de tal forma que facilite la alimentación del mismo para evitar el sobre manejo del lodo bentonítico.



⁴³Fig. 4.1 Barrenación para inyección de mezcla bentonítica

⁴³ STC, "Normas para los trabajos de sellado de filtraciones", México, 2004.



⁴⁴Fig. 4.2 Disposición de barrenos en muros, para el tratamiento de filtraciones.

⁴⁴ STC, "Normas para los trabajos de sellado de filtraciones", México, 2004.

4.4.1. Equipos de inyección

El equipo de inyección está formado por dos motobombas de alta presión, una para operación y otra auxiliar, cada una con capacidad para operar a 30 l/min, sin fluctuaciones bruscas en la presión de inyección de la mezcla bentonítica.

La presión de inyección debe ser suficiente para vencer la presión hidráulica y así mismo permitir el flujo adecuado de la mezcla hacia el interior de la grieta o fisura.

⁴⁵De acuerdo con los estudios reológicos de la mezcla debe de estar en régimen turbulento. Donde no sea posible lograrlo, debido al diámetro de la tubería o al límite de presión de fractura o fisura de la formación, se debe inyectar el mayor gasto posible.

También se ha establecido en las investigaciones reológicas que para tener una buena eficiencia en el desplazamiento del fluido al espacio anular durante el sellado de las filtraciones, las mezclas bentoníticas deben de viajar a una velocidad mínima de 80 *ml/min* o hacerlo a una mayor velocidad posible.

La reología de la lechada se puede modificar por medio de aditivos, con el fin de adecuar sus parámetros a las características que se consideren más apropiadas para cada trabajo de sellado.

La inyección se inicia por el punto más bajo, hasta que rebose por el siguiente. Se tapa la boquilla inferior y se continúa la inyección desde la boquilla que ha rebosado. Posteriormente se repite el proceso hasta que toda la fisura esté completamente inyectada.

4.4.2. Equipos de perforación

Para la perforación o barrenación de los muros del túnel del metro, se utilizan taladros eléctricos de alto torque (2.4 hp) o se pueden utilizar taladros con mayor

⁴⁵ PEMEX, "Procedimiento para el diseño de la cementación de tuberías de revestimiento", Exploración y producción, México, 2005.

torque, esto con el fin de evitar que la broca se llegue a trabar debido al espesor del muro de concreto.

A estos taladros se les instalan brocas para concreto de 1.6 cm para la realización de los barrenos como se indica en la fig. 4.2. Sin embargo se recomienda utilizar brocas de buena calidad o de alta resistencia, para evitar rupturas en la misma y ocasionar atrasos en el proceso.

Se deben de revisar los taladros para su correcto funcionamiento antes de comenzar con los trabajos de barrenación, así mismo se debe de contar con equipo suficiente de repuesto.

Hay que tener especial cuidado al momento de realizar la barrenación, manteniendo la inclinación correcta desde el inicio hasta el final, ya que la variación en el ángulo de inclinación ocasiona el sobre esfuerzo en la broca rompiéndola fácilmente.

4.4.3. Mezcladoras

Los equipos empleados para el mezclado, consisten en:

1. Un depósito de capacidad apropiada para los lodos bentoníticos, usualmente 200 l.
2. Un depósito asistido con una unidad de pesaje, de preferencia electrónico, para controlar en todo momento el peso de los materiales de la mezcla.
3. Un agitador mecánico de aspas de alta velocidad para homegenizar la mezcla antes del inyectado.

Para elaborar el lodo bentonítico se requiere de un agitador mecánico el cual puede ser coloidal o de paletas. La velocidad mínima de la mezcladora coloidal es de 1500 rpm y para la mezcladora de paletas es de 400 rpm. La mezcla deberá tener una dosificación de 1 parte de bentonita por 8 partes de agua, medido en peso, la cual después es agitada la mezcla hasta que presente un color uniforme sin grumos. Esta mezcla se dejará en reposo 12 horas como

mínimo antes de la elaboración de la mezcla con el lodo fraguante. Se recomienda dejar en reposo el lodo bentonítico unas 48 horas, para que la bentonita tenga una buena hidratación.

Se recomienda utilizar un mezclador de alta velocidad no menor de 1300 rpm, con sistema de recirculación y vórtice de alta turbulencia. El mezclador deberá estar equipado con un dispositivo medidor de agua calibrado para dar lecturas en litros y así tener un mejor control en la mezcla.

Posteriormente se realiza el mezclado de todos los materiales considerados para el diseño de la mezcla. La mezcla debe tenerse en agitación constante antes de inyectarse, con la finalidad de obtener una mezcla homogénea y estable.

4.4.4. Líneas de circulación y obturador

Las líneas de circulación están constituidas por mangueras de alta presión por las cuales transporta la mezcla bentonítica del depósito hasta el barreno situado en el muro donde se va a rellenar la fisura. Estas líneas por lo general tienen una distancia máxima de 20 m, con el fin de evitar taponamientos y tener las menores pérdidas de presión, que son los factores más importantes durante la inyección de la mezcla bentonítica.

Los obturadores son válvulas de paso que se instalan en las salidas de los orificios de los barrenos que se realizaron, con el fin de evitar que fluya o se salga la mezcla después de que se haya llenado la grieta o fisura.

4.5. CONTROL DE CALIDAD

La calidad de la inyección de la mezcla bentonítica, depende en gran medida fundamentalmente de las habilidades y conocimientos del personal, por lo que es muy importante que esté capacitado y tenga suficiente experiencia. Se debe de disponer del entrenamiento y la organización necesaria para conformar un equipo orientado a obtener mezclas bentoníticas con las especificaciones requeridas.

En campo, cada sitio que requiera de la inyección de lodo bentonítico deberá contar con el equipo de laboratorio necesario para ensaye de lodos, a fin de poder llevar a cabo el control de calidad de la mezcla, de acuerdo a la tabla 4.2

CARACTERISTICAS	CONTROL DE CALIDAD
Viscosidad	45 s Marsh mínimo
Sedimentación	3% Máximo
Peso volumétrico	1260 kg/m ³ ± 5%

⁴⁶TABLA 4.2 Características de la mezcla bentonítica para su control de calidad

Así mismo los requisitos de calidad que deben de tener los materiales son los indicados en la tabla 4.3

MATERIAL	CALIDAD	
Cemento	Portlan ordinario Norma	Clase CPO 30 NMX-C-414- ONNCCE
Bentonita	Tipo	Sódica
Agua	Norma	NMX-C-122

⁴⁷TABLA 4.3 Parámetros de calidad de los materiales para las mezclas bentoníticas.

4.5.1. Inspección

La inspección de los trabajos realizados, se realiza después de las 12 hrs. de haber terminado la inyección de la mezcla bentonítica, con el fin de verificar

⁴⁶ STC, "Normas para los trabajos de sellado de filtraciones", México, 2004.

⁴⁷ STC, "Normas para los trabajos de sellado de filtraciones", México, 2004.

que los obturadores hayan funcionado bien (evitando fugas de mezcla) y el fraguado haya sido adecuado.

Posteriormente se retiran los obturadores y se realiza un chequeo visual para determinar el fraguado correcto y si existe aún el flujo de agua a través de la fisura.

4.5.2. Pruebas

La inyección de mezclas bentoníticas presenta ciertos problemas cuando se requieren pruebas de control o de aceptación. La comprobación de los valores de resistencia o de fraguado son obtenidos mediante la ruptura de corazones cortados, los cuales pueden tomarse de la mezcla inyectada al elemento de trabajo o de muestras representativas.

Generalmente en las pruebas de permeabilidad se aplican presiones elevadas de agua por uno de los lados de la muestra.⁴⁸ La mezcla bentonítica es impermeable, el cual puede demostrarse con una sencilla prueba en un recipiente a presión; en donde se coloca la muestra de la mezcla de 50 mm de espesor, el cual puede soportar una presión de 700 kN/m^2 sin que se aprecie filtración alguna.

La resistencia al ataque de los ácidos se determina por inmersión de diversas muestras en varias concentraciones de ácido por determinado tiempo. Para esos casos, si la obra lo requiere, se puede emplear cemento resistente a los sulfatos.

4.5.2.1. Pruebas de laboratorio

Para establecer el proporcionamiento adecuado del lodo fraguante, se realizaron diversas pruebas en laboratorio, comenzando con la dosificación de la tabla 4.1 conforme lo establecido por el Sistema de Transporte Colectivo Metro.

⁴⁸ CARLOS ISLAS SILVA, "Prácticas de cementación" IPM, México, 2001, Pág. 40.

La bentonita empleada en las mezclas es Wyoming sódica de la marca Premium Gel y el cemento es Pórtland ordinario marca Cruz Azul.

Una vez definida la proporción de la bentonita, se procede con el mezclado en un recipiente con capacidad de 2 l y se comienza agitar durante 15 minutos. Se dejó reposar 1 hora para completar el proceso de hidratación.

Una vez que el lodo bentonítico es hidratado y homogenizado, se procede con la incorporación del cemento, homogeneizándola nuevamente con un agitador a 1500 *rev/min* durante 7 minutos. En la fig. 4.3 se muestra el agitador eléctrico utilizado en laboratorio.



Fig. 4.3 Agitador eléctrico

Se procede a vaciar el lodo fraguante en el cono Marsh para medir la viscosidad obteniéndose una viscosidad Marsh de 34 segundos.

Se determina la densidad del lodo fraguante con una balanza de lodos, la cual se tiene un recipiente de 150 cm^3 en el que se vacía cuidadosamente la muestra del

lodo fraguante, en el otro extremo se encuentra la balanza cuyo equilibrio define la densidad, en la que se obtuvo una densidad de 1.22 gr/cm^3 .

Se obtiene el pH mojando el papel reactivo con el lodo fraguante, mediante la escala que se indica en la caja del papel especial, se compara el color obtenido, el cual es un pH de 13.

Se procede a determinar el agua libre del lodo fraguante por medio de una probeta graduada, en donde se coloca 250 ml de mezcla y se deja en reposo durante una hora, después se mide la cantidad de agua libre (en la parte superficial) de la probeta y se obtuvo un total de 18 ml (5.6%) de agua libre.

En la fig. 4.4 se muestra la celda en donde se vacía el lodo fraguante para la prueba de filtrado.



Fig. 4.4 Celda del filtro prensa API

Posteriormente se vació el lodo fraguante en el dispositivo (celda) del filtro prensa, para realizar la prueba de pérdida de agua o de filtrado. Una vez llenada la celda con el lodo fraguante, es cerrada y se coloca en la base de la prensa y al mismo tiempo se coloca una probeta graduada en el orificio de la parte inferior de la celda.

En la fig. 4.5 se muestra el filtro prensa en donde se realiza la prueba del filtrado en laboratorio.

Se toma el tiempo con un cronómetro inmediatamente cuando se abre la válvula de la línea del gas para comenzar a medir la cantidad de agua que se pierde para los intervalos de tiempo de 1 minuto, 5 minutos, 7.5 minutos y 30 minutos respectivamente, obteniéndose la fig. 4.6



Fig. 4.5 Filtro prensa API

Prueba Filtro - Prensa

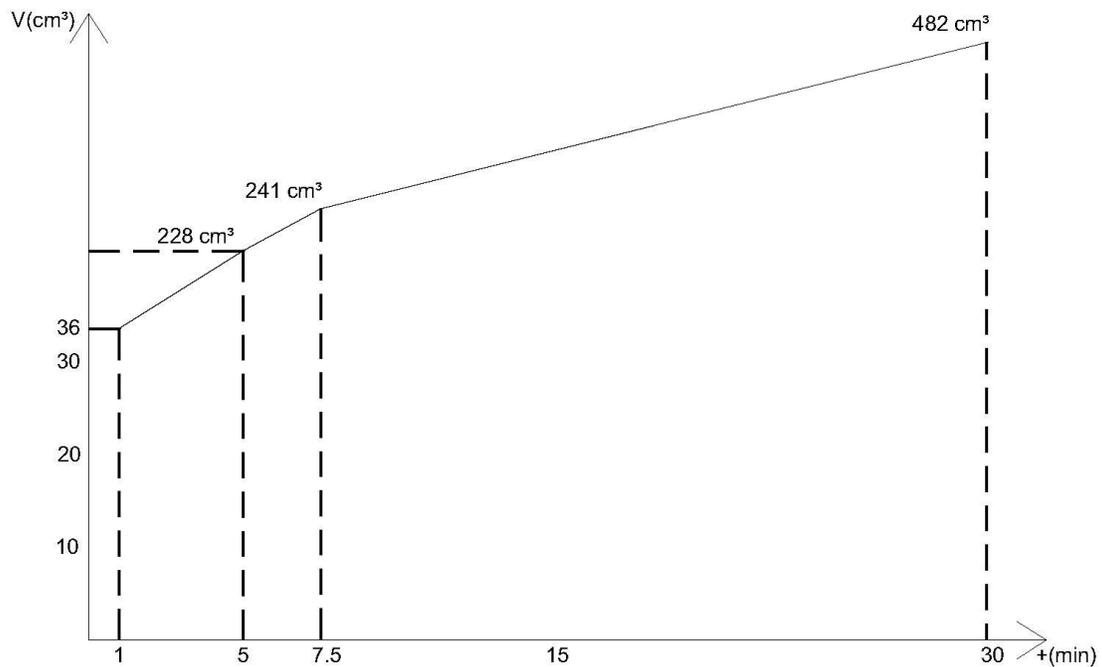


Fig. 4.6 Gráfica volumen - tiempo

Lo anterior indica que esa mezcla tiene gran permeabilidad y presenta fallas para el control de las filtraciones (no sella el filtrado), por lo que se necesita rediseñar para obtener una menor pérdida de agua.

El enjarre que se obtuvo se muestra en la fig. 4.7



Fig. 4.7 Muestra de enjarre en la prueba1

En otra prueba con la misma dosificación (tabla 4.1), pero en la que se mezcló primero la bentonita y se dejó hidratar durante 24 hrs, variaron los resultados.

Se procede con la incorporación del cemento, homogeneizándola nuevamente con un agitador entre 1300 a 1500 *rev/min* durante unos minutos, hasta que tenga una coloración uniforme.

Se mide la viscosidad Marsh del lodo fraguante, obteniéndose una viscosidad Marsh de 86 segundos.

La densidad del lodo fraguante es determinada con la balanza de lodos, en la que se obtuvo una densidad de 1.17 gr/cm^3 .

El pH obtenido para esta mezcla es un pH de 13.

El agua libre determinada para este lodo fraguante es de 11.9 ml (3.7%)

Finalmente se procede con la prueba en el filtro prensa API para determinar la pérdida de agua de la mezcla y se obtuvo la gráfica que se muestra en la fig. 4.8.

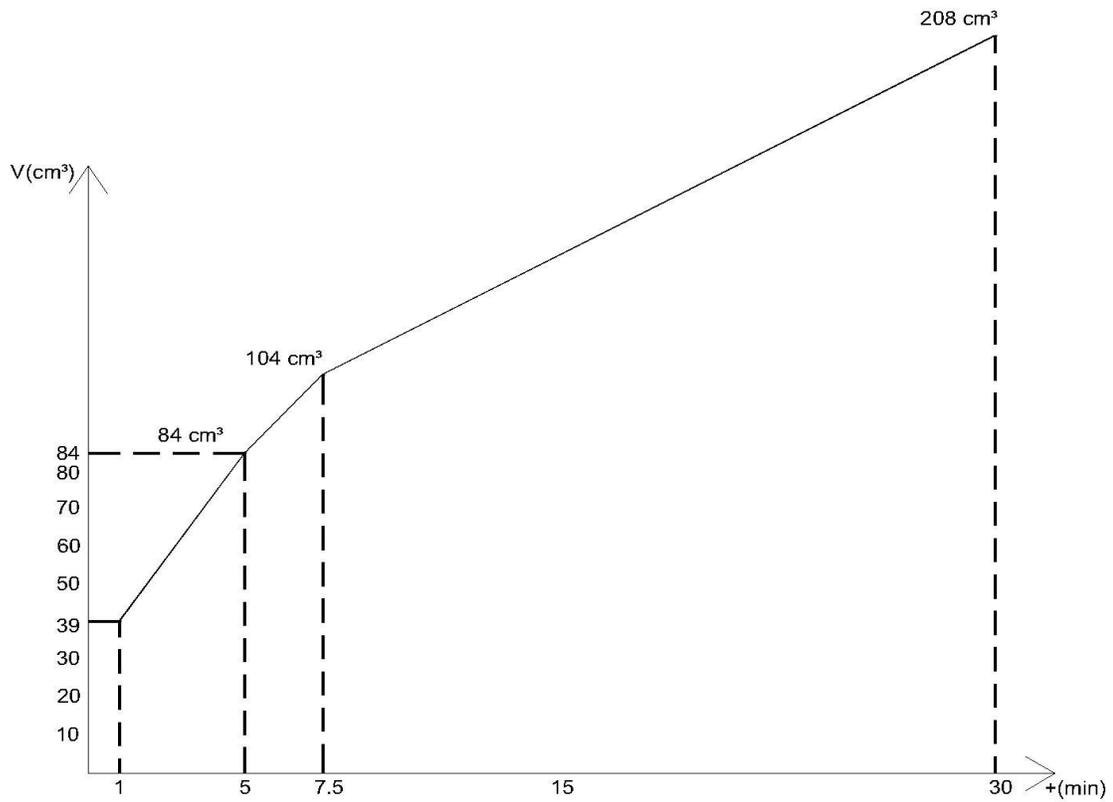


Fig. 4.8 Volumen filtrado- tiempo

Esto indica que las propiedades de la mezcla fueron modificadas por la bentonita, solo por el hecho de que ha sido previamente hidratada.

El enjarre obtenido para esta proporción de mezcla, se muestra en la fig. 4.9



Fig. 4.9 Muestra de enjarre prueba 2

Por otra parte, esta mezcla sigue presentando una pérdida de agua considerable, por lo que tiene fallas para el control de filtrado y presenta gran dificultad para bombearse debido a su alta viscosidad, esto se debe al alto porcentaje de la bentonita en la mezcla.

Se realizó una prueba con lodo bentonítico con una dosificación del 6%, para determinar el filtrado y se obtuvo la gráfica que se indica en la fig. 4.6

Esta prueba nos muestra que el comportamiento del lodo bentonítico si presenta buenas propiedades de sellado. Por otra parte se determinó que cuando se le adiciona cemento al lodo bentonítico, modifica las propiedades de la bentonita, debido a la alcalinidad que tiene el cemento.

El enjarre que se obtuvo para el lodo bentonítico se muestra en la fig. 4.10.

Dado los resultados anteriores, se realizaron distintas pruebas modificando las proporciones anteriores de la bentonita y cemento con la que se obtuvo una mezcla adecuada con la proporción indicada en la tabla 4.4

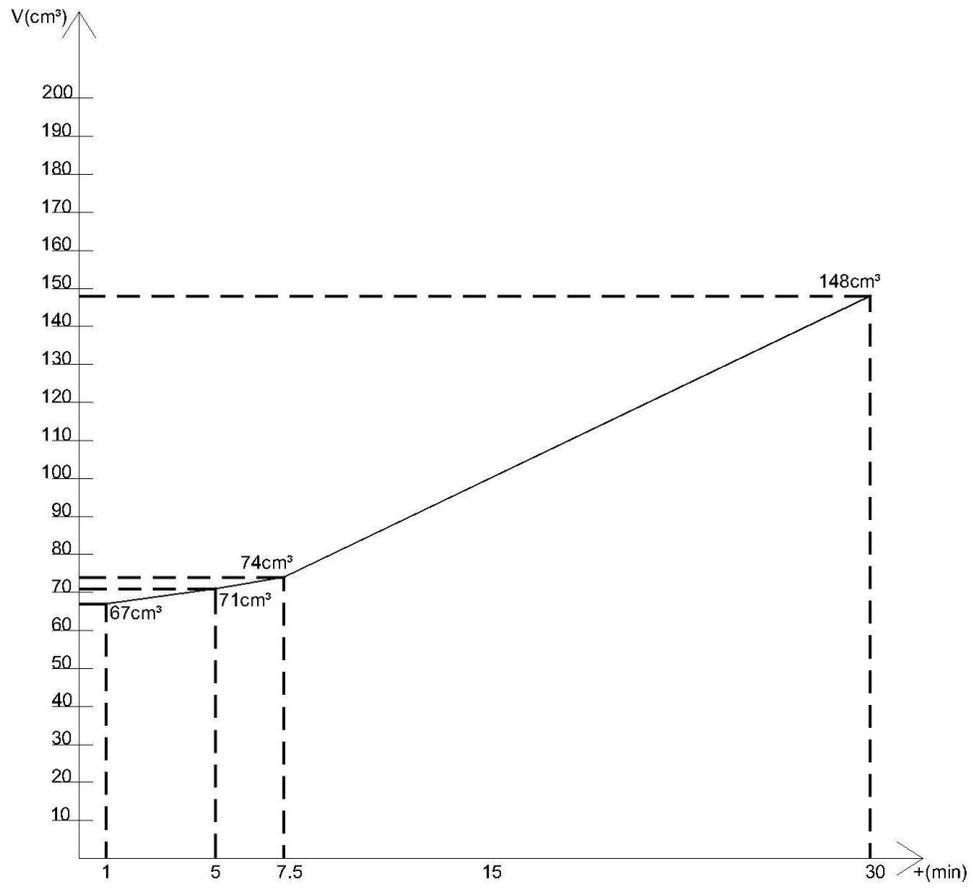


Fig. 4.6 Volumen filtrado – tiempo



Fig. 4.10 Enjarre en prueba 3

AGREGADO	PORCENTAJE
Agua	70%
Bentonita	5%
Cemento Portland ordinario	15%
Asfalto base agua	10%

⁴⁹TABLA 4.4 Dosificación propuesta para mezclas base bentonita –asfalto.

También se realizaron otras pruebas agregando una emulsión asfáltica, soluble en agua, a la mezcla, con el fin de disminuir la permeabilidad de esta. Debe tenerse especial cuidado al momento de efectuar el mezclado, ya que se tiende a crear mucha espuma cuando el agitador se coloca a altas revoluciones. Para controlar lo anterior, se le adicionó a la mezcla un aditivo reductor de aire y se obtuvieron los siguientes parámetros.

En esta prueba se utilizó la dosificación de la tabla 4.4, dejando hidratar durante 24 hrs el lodo bentonítico.

Se procede con la incorporación del cemento, homogeneizándola nuevamente con un agitador entre 1300 a 1500 *rev/min* durante unos 5 minutos y posteriormente se le adiciona el asfalto base agua.

Se mide la viscosidad Marsh, obteniéndose una viscosidad de 53 segundos.

Se obtiene la densidad del lodo fraguante con la balanza de lodos, en la que se obtuvo una densidad de 1.19 *gr/cm³*.

El pH obtenido para esta mezcla es un pH de 12.

Se procede a determinar el agua libre, en la que se obtuvo 8.6 ml (2.2%)

⁴⁹ STC, "Normas para los trabajos de sellado de filtraciones", México, 2004.

Por último se procede con la prueba en el filtro prensa API para determinar el volumen filtrado del lodo fraguante y se obtuvo la gráfica que se muestra en la fig. 4.11.

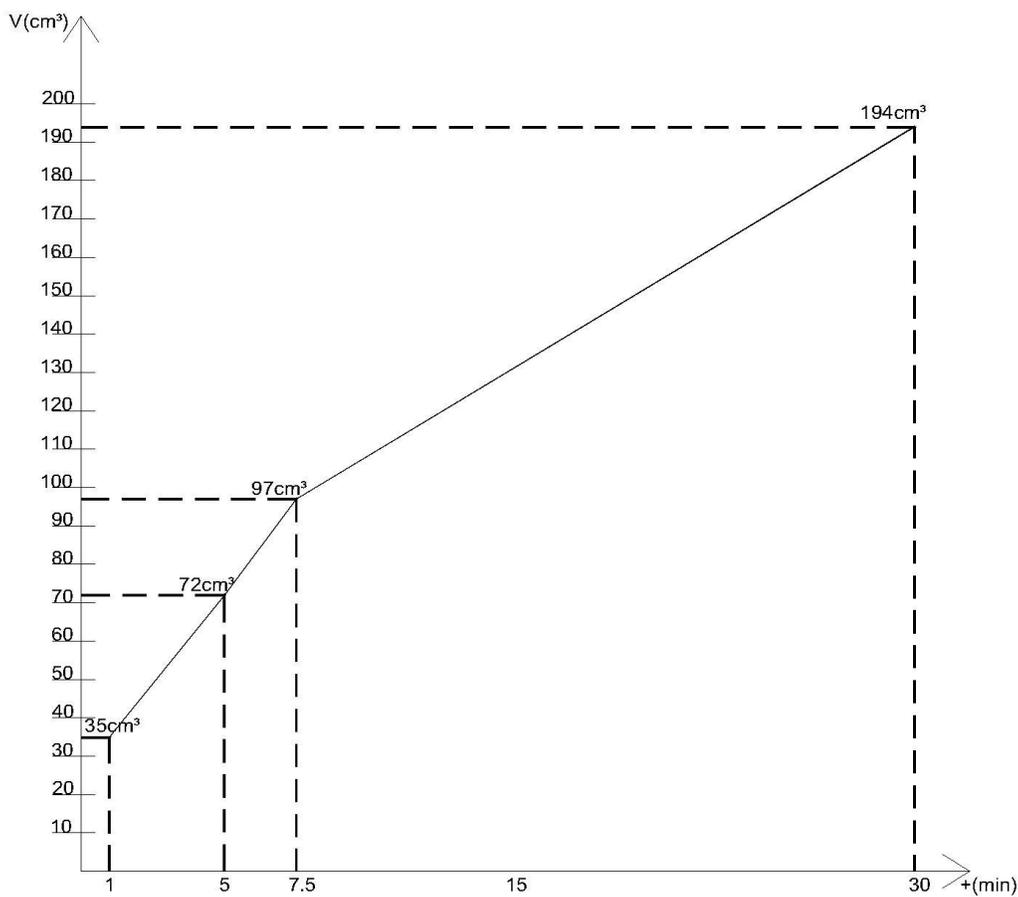


Fig. 4.11 Gráfica volumen filtrado - tiempo

También se propusieron mezclas adicionando polvo de mármol, con el fin de cerrar el poro de la mezcla y disminuir el volumen de filtrado, obteniéndose la gráfica de la fig. 4.12

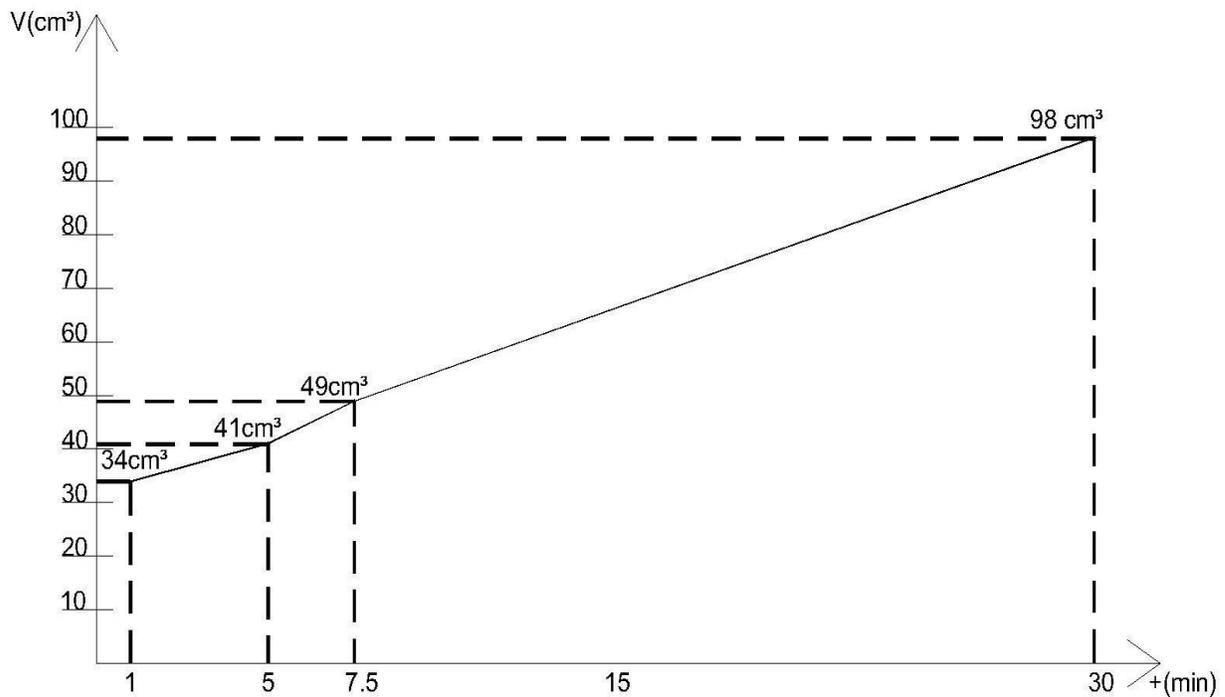


Fig. 4.12 Gráfica volumen filtrado – tiempo

Las proporciones empleadas para esta mezcla son las indicadas en la tabla 4.5

AGREGADO	PORCENTAJE
Agua	70%
Bentonita	5%
Cemento Portland ordinario	24%
Polvo de marmol	1%

⁵⁰TABLA 4.5 Dosificación propuesta para mezclas base bentonita –polvo de mármol

Una vez que el lodo bentonítico es hidratado y dejándolo en reposo durante 48 horas, se procede con la incorporación del cemento, homogeneizándola nuevamente con un agitador a 1300 *rev/min* durante 7 minutos y posteriormente se le adiciona el polvo de mármol.

Se procede a vaciar el lodo fraguante en el cono Marsh para medir la viscosidad obteniéndose una viscosidad Marsh de 49 segundos.

⁵⁰ STC, "Normas para los trabajos de sellado de filtraciones", México, 2004.

Se determina la densidad con la balanza de lodos, en la que se obtiene una densidad de 1.21 gr/cm^3 .

Se obtiene el pH, el cual es un pH de 13.

Se determina el agua, obteniéndose un total de 6.8 ml (1.7%) de agua libre.

Posteriormente se procede a realizar la prueba de filtrado en el filtro prensa API, la cual se indica en la fig. 4.8 y se obtuvo un total de 98 cm^3 .

Los datos aquí presentados están basados en los resultados de pruebas realizadas en el laboratorio de fluidos de control. Debido a los diversos factores que afectan los resultados de las mezclas, se recomienda que siempre se realice una prueba en el sitio que se presente la filtración, con la finalidad de diseñar una mezcla adecuada conforme a las condiciones que se requieran particularmente en la obra.

CAPÍTULO 5

DESEMPEÑO DE MEZCLAS BENTONÍICAS

Durante muchos años las bentonitas se han usado como material de sellado debido a sus propiedades, ya que en combinación con el cemento se obtienen mezclas de baja permeabilidad, por lo cual es un método ideal para las obras de perforación y cementación de pozos y en este caso para el sellado de las filtraciones que se presentan en los túneles del Metro de la Ciudad de México.

Este capítulo tiene por objetivo mencionar las ventajas que presentan las inyecciones de mezclas bentoníticas como sistema de control para las filtraciones, de acuerdo al diagnóstico obtenido en los túneles del Sistema de Transporte Colectivo Metro (STCM)

5.1. DIAGNÓSTICO DE LAS FILTRACIONES EN LOS TÚNELES DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Actualmente el STCM cuenta con 12 líneas las cuales tienen asignado un color y una letra o número. La extensión total de la red del Metro es de 221 kilómetros, con 195 estaciones; de las cuales 106 son subterráneas, 53 superficiales y 16 elevadas, así mismo 164 estaciones se encuentran situadas en la Ciudad de México.

Después de terminada la construcción e iniciada las operaciones de cada una de las líneas del Metro de la Ciudad de México, durante sus años de servicio continuo, posteriormente se han efectuado trabajos de mantenimiento que se realizan periódicamente en las líneas del Metro, generalmente obedecen a los hundimientos diferenciales del suelo, que es algo característico sobre todo en la zona oriente de la ciudad de México, la cual repercute en el lento avance de los trenes durante el horario de servicio.

En los últimos 20 años han ocurrido hundimientos de hasta 5.00 metros, que han afectado a cajones y vías por donde se transportan unos 380 mil pasajeros al día, de acuerdo a los registros que se tienen en el Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC). Así mismo se tiene un análisis en donde se muestra que la mayor parte del subsuelo donde se ubica gran parte de las líneas está compuesto por arcilla, arena limosa, grava de tezontle y roca, debido a esto el comportamiento heterogéneo del suelo, se producen deformaciones constantes en el cajón del Metro provocando fisuras, grietas y fracturas o fallas estructurales y deformaciones en las vías.

Según el diagnóstico del Metro, los tramos generalmente están afectados por la disgregación del concreto en la capa superficial de los muros, que da lugar a la filtración de agua en un alto porcentaje de longitud del cajón y una pérdida de soporte en algunos equipos electromecánicos y electrónicos situados en el cajón, debido a la pérdida de resistencia de los muros del túnel del Metro.

Otra de las causas que provocan en este caso las filtraciones de agua al interior del túnel del sistema de transporte colectivo metro son los movimientos constantes del subsuelo y las vibraciones sistemáticas por el paso del tren, por lo cual se le debe de dar un mantenimiento permanente durante toda la vida del STC Metro.

Así mismo para llevar a cabo las obras de mantenimiento mayor, se realizan después de las 00:00 horas, en donde se suspende el servicio de las estaciones afectadas y se comienzan con las actividades programadas, en las que para este caso se van a realizar las inyecciones de bloqueo o para impermeabilizar la zona circundante al túnel, mediante la realización de barrenos para posteriormente bombear un mortero o una mezcla conformada por cemento, bentonita, agua y algún aditivo que se haya considerado en el diseño de la mezcla, como se describe en los capítulos anteriores.

Por lo general uno de los sectores más afectados de las líneas del STC Metro, son las que se localizan en la zona centro de la Ciudad de México, debido a que la presión hidrostática que se ejerce sobre los muros de los cajones del Metro es mayor en comparación de otros tramos de dichas líneas.

Sin embargo la problemática actual basada sobre los antecedentes descritos con anterioridad y sobre las condiciones actuales que se han obtenido durante las inspecciones realizadas en los labores de mantenimiento mayor llevados a cabo en los túneles del STC Metro, se van a identificar tres aspectos fundamentales que dan origen al problema de las filtraciones del agua freática en la mayoría de los casos, las cuales se mencionan en el siguiente tema.

5.2. MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO EN TÚNELES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO

El mantenimiento preventivo es el proceso con el cual se evaluará el potencial de las fallas que se puedan presentar en las líneas del sistema de transporte colectivo, debido a ciertos aspectos fundamentales como pueden ser:

- Medio físico natural (suelo)
- Antigüedad de la estructura
- Cantidad de usuarios transportados

Estos factores permitirán tener una perspectiva de la situación a futuro.

El medio físico natural o el tipo de suelo donde se localiza la estructura del túnel del Metro influye directamente por la calidad de agua freática, la cual nos causa un deterioro mayor debido a su elevado grado de corrosión para el concreto y el acero de refuerzo, produciendo la disolución del carbonato de calcio y ocasionando posteriormente la filtración.

Por otra parte, el flujo constante de agua que circulan en el interior del cajón del Metro, provienen de las filtraciones provocadas por las rupturas de las tuberías de agua potable cercanas al lugar a donde se encuentra la línea del STCM, las cuales se infiltran a través de las grietas y fisuras del concreto del túnel del Metro, las cuales se pueden presentar en las paredes de la estructura como goteras o escurrimientos.

⁵¹Con respecto a la antigüedad de la estructura del túnel, en la mayoría de los casos presentan una desintegración progresiva en el concreto, que al entrar en contacto con el agua infiltrada va perdiendo densidad superficial haciéndose más poroso por la dilución de la pasta de cemento y dejando el agregado depositado en el sitio.

Así mismo, con el paso de los años la combinación de las acciones físicas y químicas (filtraciones del drenaje al subsuelo, sulfatos contenidos en el suelo y la calidad del agua freática), producen un deterioro importante en los elementos que conforman las estructuras de revestimiento de las líneas del Metro.

Los trabajos que se efectúan para la reparación de las 175 estaciones del Metro que presentan problemas de filtraciones, por lo general inician en el mes de

⁵¹ CENTENO R. Problemas relativos a la filtración de aguas en los revestimientos de los túneles urbanos de caracas, Primer congreso latinoamericano de obras subterráneas, Venezuela, 1992.

marzo y con horario de trabajo de las 00:30 h. a 4:00 h, con el fin de mantener la seguridad y eficiencia del servicio.

Los mayores problemas de filtraciones que se presentan son durante la temporada de lluvias, ya que aumenta la infiltración de agua al subsuelo y así mismo contribuyen también las fugas de la red de drenaje de la ciudad de México.

Los aspectos a controlar con el mantenimiento correctivo en los túneles del metro, es controlar la permeabilidad por el espacio poroso disponible que tiene el concreto, debido a la presencia de microfisuras en el túnel, mediante la inyección de mezcla bentonítica, en las paredes de los túneles y estaciones del STCM.

Las acciones que se deben de realizar en el mantenimiento correctivo para el STCM son las obras de sellado y refuerzo en los túneles de los tramos de las líneas más afectados por las causas descritas anteriormente, sin embargo, es necesario realizar un estudio en donde se analice la situación de las líneas más antiguas, sobre todo las localizadas en la zona oriente de la ciudad de México.

Dentro de las acciones correctivas debe realizarse un estudio para detectar los problemas de las filtraciones actuales que se presentan, mediante los tres aspectos fundamentales descritos anteriormente, así como el grado de la patología del problema; a fin de tener una clasificación y diagnóstico adecuado.

Así mismo, para obtener un buen resultado en la ejecución de los trabajos de reparación considerando las acciones preventivas y correctivas, es necesario llevar acabo una adecuada planificación de los trabajos a realizar, mediante estudios previos como el empleo del geo-radar o alguna otra técnica para la detección de las posibles oquedades del terreno envolvente o la termografía para conocer el flujo de agua presente o la aplicación de cualquier otro sistema para la detección de las posibles fallas que puedan generar un mayor problema a futuro en los túneles.

Debe establecerse una estricta vigilancia en los procesos de elaboración y ejecución establecidos mediante la técnica de inyecciones de mezcla base bentonita- cemento, así como la verificación del proceso de barrenación conforme a las especificaciones del Sistema de Transporte Colectivo Metro y por otra parte supervisar los consumos, gastos y tiempos de aplicación de las mezclas para las reparaciones ocasionadas por las filtraciones, que se requieren en cada tramo del túnel, para la obtención de un costo- beneficio real mediante esta técnica.

5.3. VENTAJAS DE LA INYECCIÓN DE MEZCLAS BENTONITICAS COMO SISTEMA DE CONTROL DE FILTRACIONES.

La inyección de mezcla bentonítica ofrece ventajas sobre la inyección de polímeros y poliuretanos o resinas epóxicas para el sellado de grietas y fisuras en los trabajos de reparación y mantenimiento.

Una de las ventajas principales de este tipo de mezcla es su bajo costo en su elaboración, además de las ventajas que presentan las bentonitas sódicas como material de sellado, se basa fundamentalmente en sus propiedades y características, como son: su gran capacidad de hinchamiento o expansión, su buena plasticidad y su alta impermeabilidad, debido a esto las bentonitas se han utilizado durante años en mezclas donde se requieran disminuir la permeabilidad de las mismas. En algunos casos al emplear bentonitas sódicas de buena calidad se aplican dosificaciones bajas del 3% al 5%, en donde el gasto es menor debido a la cantidad empleada.

Sin embargo durante las pruebas de laboratorio realizadas para este trabajo, en ciertas mezclas en donde se le agregó un aditivo reductor de agua a dicha mezcla; mejoró sus propiedades incrementando su trabajabilidad y permaneciendo cohesiva la mezcla, sin afectar su resistencia y reduciendo considerablemente la relación agua – cemento de la mezcla bentonítica.

En este caso se utilizó un condensado de melamineformaldehído sulfonado (CMS), en una proporción del 1.0%, el cual es un polímero orgánico soluble en agua. Por lo general es conocido como un superfluidificante con base melanina.

Así mismo en las pruebas realizadas en el laboratorio para la elaboración del presente trabajo, se trató de diseñar una mezcla de bentonita – con una emulsión asfáltica base agua para el control de las filtraciones, en donde se obtuvo una dosificación aproximada, como una alternativa para el sellado de las filtraciones.

Otra de las ventajas que ofrece el sistema base bentonita – cemento para el sellado de las filtraciones en las estructuras de concreto del cajón del Metro, es la facilidad con que se puede disponer de la materia prima para la elaboración de la mezcla, siempre y cuando se cuente con un proveedor de bentonita de buena calidad para reducir los costos en la elaboración de dicha mezcla.

Para la elaboración y colocación de la mezcla bentonítica se necesita poca inversión en el equipo descrito anteriormente, ya que se requiere de un equipo sencillo y de una fácil operación por lo que no implica costos excesivos para la aplicación mediante esta técnica.

Por otro lado, las bentonitas es un material 100% natural, debido a que provienen de los bancos de arcillas naturales, no necesitan de procesos químicos contaminantes para la obtención de las mismas, por lo cual tienen un bajo costo para su producción.

5.4. EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS PARA EL CONTROL DE FILTRACIONES EN LOS TÚNELES DEL METRO

Actualmente existen diferentes productos y técnicas para controlar los problemas de las filtraciones que se presentan en las paredes de los túneles del Metro, siendo una de ellas la aplicación de resina epóxica.

Generalmente para la inyección de resinas epóxicas se recomienda una preparación y limpieza especial de la grieta o fisura a tratar para obtener un óptimo

sellado de la misma; así mismo, las fisuras deben de estar secas para garantizar una buena adhesión de la resina con el concreto de la estructura dañada. El procedimiento que se realiza para la aplicación de esta técnica es muy similar a la de la mezcla bentonítica, y se menciona a continuación:

- Se colocan unas boquillas en unos tubos metálicos de aproximadamente de 10 mm de diámetro, dotados de cuerda en un extremo para acoplar a ellos el inyector por el que se efectuará el sellado.
- Las boquillas quedan incorporadas a la resina de cierre, a una distancia que varía entre 30 y 100 cm, según sea el espesor de la grieta y la viscosidad de la resina.
- Si la grieta se divide, se deberá que colocar una boquilla en cada punto de separación en el que nacen nuevas fisuras
- La inyección se realiza introduciendo la resina epóxica a presión por las boquillas la resina epóxica mediante algún sistema de bombeo, ya sea manual, mecánico o con aire comprimido.

Generalmente la inyección se inicia por la boquilla más baja, hasta que la resina empieza a salir por la boquilla superior, la cual funciona como purgador de aire de la grieta. De este modo, cada perforación es testigo de la anterior.

Después de retirar el inyector de la boquilla inferior y tapar, se inicia la inyección por la boquilla siguiente (por la que salió la resina epóxica), continuando progresivamente de este modo hasta el llenado total de la grieta. Una vez finalizada la inyección y endurecida la resina, se puede quitar la capa de sellado si ésta es sólo superficial.

Después de 24 horas de terminado el proceso, se puede medir la eficiencia de la reparación mediante la extracción de testigos cilíndricos o por medio de ensayos y comprobar si existe alguna filtración a lo largo de la fisura, así como el grado de llenado que presenta.

Este método para el sellado de las filtraciones es más costoso, y es muy grande este si existen grandes grietas o huecos por rellenar.

Con el transcurso del tiempo las resinas epóxicas tienden a degradarse, perdiendo su elasticidad volviéndose rígidas y ocasionando grietas en las mismas. Por lo general presentan una vida útil corta en comparación con las mezclas base bentonita- cemento.

Por otra parte existen distintas marcas que ofrecen microcementos, los cuales son productos fabricados con cemento Portland de alta finura (Blaine de 800 o 900 m^2/kg), pero en la mayoría de los casos por recomendaciones del fabricante siempre se les debe de agregar un aditivo reductor de agua con una proporción del 1% al 3% para que funcionen adecuadamente como sellador de las filtraciones que se presenten en los muros del cajón del Metro.

La técnica de aplicación de estos tipos de productos es parecida a la inyección de las mezclas bentoníticas. Estos productos se inyectan con bombas de alta presión y se deben de inyectar en un lapso de 30 minutos después de haber realizada la mezcla para asegurar que esta mezcla penetre en las grietas o fisuras del concreto, generalmente estos productos tienen un tiempo de fraguado de 2 1/2 hrs, según los datos del fabricante.

Estas mezclas o lechadas de microcementos los han mejorado con el paso del tiempo, ya que los granos del microcemento inyectados en las grietas o fisuras tratan de que sean lo más resistentes a la dilución y que no puedan ser transportados por la corriente de la agua existente en la zona de la filtración, así mismo estos microcementos son un poco más caros que el cemento ordinario, debido a su costo en la elaboración del mismo.

Un ejemplo práctico para determinar los costos en la elaboración de una mezcla bentonítica de acuerdo a las especificaciones del STCM, utilizando la dosificación de la tabla 5.1.

AGREGADO	PORCENTAJE
Agua	72% (910 l/m ³)
Bentonita	8% (100 kg/m ³)
Cemento Portland ordinario	20% (250 kg/m ³)

TABLA 5.1 Dosificación para mezclas bentoníticas conforme a las especificaciones del STCM.

Tenemos los siguientes costos de los materiales:

1. Agua 1 m³ = \$ 16.70
2. Bentonita 1 bulto (50 kg) = \$154.00
3. CPO 1 bulto (50kg) = \$117.00

El costo total de los materiales para producir un metro cúbico de lodo fraguante sería de:

- 72% de Agua = \$12.02
- 8% de Bentonita = \$308.00
- 20% de CPO = \$585.00
- Total = \$ 905.02 m³

Se puede comparar con el costo de una resina epóxica, en el cual utilizaremos una de la marca sika el cual sería el siguiente:

Sikadur 52 (5 kg) = \$118.90

El rendimiento para este tipo de resina es de 1.1 kg para un litro de relleno. Para preparar esta resina se requiere de mezclar ambos contenidos (resina y endurecedor) de forma mecánica durante 3 minutos hasta que se homogenice la mezcla, para posteriormente inyectarla. El costo para un metro cúbico de resina sería el siguiente:

1 litro de resina Sikadur 52 = \$23.78

1 m³ Sikadur 52 = \$23.78 x 1.1 x 1000 = \$26,158.00

Por otra parte, se puede usar para el sellado de las filtraciones un mortero modificado con fibras y polímeros, en el que para este ejemplo utilizamos uno de la marca sika siendo el siguiente:

SikaTop Seal 107 (20 kg) = \$77.02

Se requiere de 1.4 kg para 1 litro

1 l de Sika 107 = \$3.85 x 1.4 = \$5.39

Por lo consiguiente:

1 m³ Sika Top Seal 107 = \$5,390.00

Este producto se mezcla revolviendo una parte que es el líquido y la otra en polvo, la cual se le va añadiendo la parte líquida al polvo hasta obtener la consistencia deseada, puede mezclarse se forma mecánica a 400 rpm durante 3 minutos, hasta que la mezcla de homogenice, para posteriormente su aplicación.

Estas alternativas siguen siendo costosas en comparación a la mezcla bentonítica, debido al costo de producción que intervienen las mismas.

En todos los procesos para el control o sellado de las filtraciones en los muros del túnel del STC Metro es necesario contar con el equipo adecuado y en perfectas condiciones de operación, además de llevar acabo una supervisión de los trabajos realizados y un control de calidad de los materiales empleados, con la finalidad de garantizar un trabajo que solucione los problemas de las filtraciones desde su raíz para evitar posibles filtraciones en las mismas zonas que se presenten un lapso de tiempo muy corto y así disminuir los gastos de mantenimiento del STC Metro de la Ciudad de México.

CONCLUSIONES CAPITULARES

En el primer capítulo se obtuvo la conclusión, que para el sellado adecuado de las filtraciones en los túneles del metro de la Ciudad de México, debemos de seleccionar una arcilla montmorilonita la cual puede ser una bentonita sódica o cálcica de buena calidad para obtener una mezcla estable e impermeable con la cual vamos a tener un óptimo resultado para el control de la filtración.

Para el capítulo 2 tenemos que la calidad de los materiales empleados para la elaboración de una mezcla bentonítica, son de suma importancia ya que de ellos va a depender el resultado de una buena mezcla y sus características deseadas a partir del diseño de la misma.

Con respecto al uso de los aditivos, hay que tener cuidado en la combinación de los mismos, ya que durante la realización de esta tesis, se llevaron acabo pruebas en donde se obtuvieron comportamientos diferentes a los deseados en la mezcla diseñada, debido a que existen algunos aditivos no son compatibles cuando se mezclan juntos.

Por otra parte, cuando se requiera agregar aditivos en la mezcla diseñada, es importante que sean adicionados o descargados de manera adecuada durante el ciclo de mezclado y en la dosificación correcta, ya que el orden en el procedimiento de mezclado puede alterar o causar problemas en las propiedades de filtración de la mezcla.

La conclusión del tercer capítulo es la siguiente: hay que tener especial cuidado en las pruebas que se tienen que aplicar en la mezcla diseñada, para determinar sus propiedades y si esta es adecuada para el control de sellado de la filtración que se presenta en la estructura del túnel del STC Metro.

Por lo general cuando se obtuvieron enjarres gruesos en las pruebas realizadas en el filtro prensa, las mezclas bentoníticas presentaron una alta filtración o pérdida de agua en la misma, por lo que la mezcla diseñada no servía para el sellado de la filtración.

Así mismo se determinó que también cuando la mezcla presenta una cantidad considerable de agua libre nos va a ocasionar problemas o fallas para el fraguado y resistencia de la misma.

Para el capítulo 4 es necesario contar con el equipo adecuado y en óptimas condiciones para llevar a cabo el proceso de sellado de las filtraciones, ya que si existe alguna falla en el mismo nos ocasionará retrasos y aumento en los costos para el control de sellado en los túneles del STC Metro, mediante el sistema base bentonita- cemento.

También se debe de contar con un personal capacitado para llevar a cabo los trabajos de sellado, ya que se presentan por lo general accidentes en la obra por la falta de conocimientos y descuidos en los trabajos por muy sencillos que sean, para el control de las filtraciones.

En el capítulo 5, se concluye que se deben de efectuar con mayor rapidez los trabajos de reparación de filtraciones que se presentan en los túneles del STC Metro, ya que si no se realizan en un periodo considerable generalmente ocasionan mayores problemas posteriores en las estructuras de los túneles y en las instalaciones del Metro, aumentando los costos para la corrección de los daños causados.

Por otra parte, el sistema base bentonita- cemento para el sellado de las filtraciones que se presentan en los túneles del Metro; no sustituye en su totalidad a otra alternativa o sistema para el control de la filtración, sólo es un sistema más económico que los que se conocen comúnmente en la actualidad, debido a su facilidad de producción y eficacia como control de filtraciones que se presenten en las estructuras de los túneles del STC Metro de la Ciudad de México.

CONCLUSIONES GENERALES

Durante la elaboración de varias pruebas realizadas en el laboratorio con distintas mezclas; aunque faltaron algunos resultados cuantitativos, se hicieron algunas observaciones sobre el comportamiento de las mismas, con las cuales logramos un análisis y evaluación del comportamiento de la mezcla bentonítica que tendrá durante su trayectoria en el control de filtración para la estructura de los túneles del Metro de la Ciudad de México.

La densidad de una mezcla bentonítica es de gran importancia durante el sellado de filtraciones, por lo que es necesario tener mucho cuidado desde su preparación y la medición de la lectura de la densidad, ya que en el caso de que no se obtenga la densidad programada, se tendrá que rediseñar la mezcla, considerando las posibles modificaciones en las demás propiedades físicas de dicha mezcla; ya sea al aumentar o disminuir la cantidad de cemento y bentonita, el agua de mezclado o el porcentaje de los aditivos que se emplean, ya sean densificantes o fluidificantes.

Por otra parte si se obtiene un valor bajo de viscosidad en la mezcla diseñada, esta tiende a desarrollar demasiada agua libre cuando permanece estática, lo cual nos provocará un asentamiento excesivo de las partículas sólidas de cemento. En caso contrario, cuando la mezcla presenta un valor alto de viscosidad se va a dificultar la operación de bombeo, requiriéndose mayor potencia en las bombas.

Si se diseñan mezclas con bajas pérdidas de agua se van a obtener mejores resultados para los trabajos de control de filtraciones en los túneles del sistema de transporte colectivo Metro.

Sin embargo durante las pruebas realizadas para el diseño de una mezcla bentonita- cemento, se determinó que existe una alteración en las propiedades de dicha mezcla; esto se debe a que la bentonita sódica tiene que estar previamente hidratada para obtener una adecuada viscosidad en la mezcla, como se mostró anteriormente en las pruebas de laboratorio.

El exceso de agua libre es fácil de prevenir en una mezcla de bentonita-cemento, mediante la disminución de la concentración del aditivo causante de este problema como el caso del aditivo retardador de fraguado. Sin embargo cuando no se estén manejando aditivos, solo hay que disminuir la cantidad de agua de mezclado o la adición de bentonita en el diseño de la mezcla.

Durante las pruebas realizadas en el laboratorio de fluidos de control, se obtuvieron diferentes resultados con las mismas dosificaciones en el diseño de las mezclas; debido a la calidad de la bentonita, por lo cual se debe de revisar la calidad de la bentonita antes de diseñar la mezcla, así mismo se determinó que si tenemos una bentonita de buena calidad se necesita adicionarle un menor porcentaje en la mezcla siendo hasta un valor del 40%, para obtener las propiedades deseadas.

Los temas que se recomiendan para ampliar y continuar los conocimientos de este trabajo realizado son los siguientes:

- Análisis fisicoquímico y mineralógico de las arcillas del valle de México.
- Especificaciones de materiales y pruebas de cementación.
- Función de los aditivos de cementación y cuando aplicarlos.
- Estudios del subsuelo de la Ciudad de México

RECOMENDACIONES

Se debe de tener atención en la relación agua-cemento que se use en el diseño de las mezclas. Un exceso de agua en la mezcla ocasionará una precipitación de sólidos y demasiada agua libre; por otra parte muy poca agua en la mezcla incrementa la viscosidad, lo que dificultará su bombeo hacia el barreno donde se localiza el problema del filtrado.

Se recomiendan mezclas con valores bajos de punto de cedencia, ya que son más fáciles de manipular o de mover en estado de reposo; debido a que la mezcla se comienza a gelificar en estado estático.

Durante el diseño de una mezcla de bentonita –cemento, se recomienda mezclar antes que nada la bentonita con el agua, para posteriormente adicionarle el cemento o cualquier aditivo que se haya calculado, esto con el fin de que la bentonita tenga una buena hidratación; por lo menos unas 24 hrs.

Es necesario poner especial atención con todos los elementos que se consideren en el diseño de la mezcla y su dosificación para obtener una mezcla adecuada y homogénea según las necesidades de la obra, además de darle el tiempo suficiente de mezclado para la obtención de una mezcla estable.

Se recomienda establecer un muestreo aleatorio y selectivo de los materiales empleados en la elaboración de la mezcla con pruebas de laboratorio, con la finalidad de garantizar una mezcla bentonítica de calidad.

Por otra parte, se deben de tener valores bajos de pérdida de agua en las mezclas diseñadas, ya que al perder grandes cantidades de agua en la mezcla, las propiedades reológicas cambian y se modifica el tipo de flujo, provocando una caída de presión hidrostática con lo que nos aumenta la probabilidad de no sellar la filtración que se presenta en las paredes de los túneles del Metro.

BIBLIOGRAFÍAS

1. Kumar Mehta P., "Avances en la Tecnología del Concreto", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2001.
2. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. Núm. 217, México, Febrero 2010.
3. American Concrete Institute, "Guide to shotcrete", Estados Unidos, ACI 506 R90, 1999.
4. SMMR (Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas, A.C.), "Empleo del Concreto Lanzado", México, Curso 2001.
5. Recommended Practice for Testing Well Cements, API, 22 Edition, December 1997.
6. IMCYC (Instituto Mexicano del concreto y cemento), "Manual para la Reparación, Refuerzo y Protección de las Estructuras de Concreto", México, 1997.
7. Specification for cements and materials for well cementing, API specification 10A, 23 Edition, April 2002.
8. Juárez Badillo y Rico Rodríguez, Mecánica de Suelos, Tomo III, Edit. Limusa, México, 1991.
9. Mehta, P.K. y P.J.M. Monteiro, "Concrete: Microstructure, Properties and Materials", McGraw-Hill College Custom Series, 1996.
10. www.conagua.gob.mx/.../SGP-28SemblanzaHistóricaMéxico.pdf
11. Procedimiento para el diseño de la cementación de tuberías de revestimiento. Pemex Exploración y Producción, 2005.

12. Manual Dowell Schlumberger, "Engineered Cementing", Byron Jackson Inc. Calif.
13. Composition and properties of drilling and completion fluids, Google books.
14. ACI 506.2-95, "Specification for Shotcrete", Estados Unidos, 1995.
15. Raymundo Vazquez C. "Tratamiento de la roca mediante inyecciones en el plinto del proyecto hidroeléctrico del Cajón" México, 2006.
16. Prácticas Recomendadas por API, API-RP-10B, 13 Edition, March, 1987.
17. Manual Halliburton Parte 1, "Función de los aditivos de cementación y cuando utilizarlos", 1982.
18. Rosales Hernandez M. "Sellado de filtraciones en túneles a base de inyecciones de silicatos dentro de un macizo rocoso de origen ígneo", México, 2004.
19. Suplemento a la práctica recomendada API-RP-10B, "Specification for Materials and Testing Well Cements", American Petroleum Institute, March, 1987.
20. Manuel Herrera "Mortero de larga vida y relleno fluido", México, 2002
21. Jesus Varela C. "Procedimientos de inyección del subsuelo, tipos de mezclas y equipo adecuado para llevarla a efecto" México, 1992
22. ASTM C494, "Standard specification for chemical admixtures for concrete", International C494/C494M, 2008.
23. Manual de Construcción Geotécnica I, SMMS, México, 2002.
24. Manual de Construcción Geotécnica, Tomo II, SMMS, México, 2002.

