



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PRUEBAS DE LABORATORIO DE LODOS FRAGUANTES Y
PROPUESTA DE UTILIZACIÓN EN LA INGENIERÍA CIVIL.**

TESIS

**PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA
DANIEL GARCÍA RODRÍGUEZ**

**DIRECTOR DE TESIS
M.I. JUAN LUIS UMAÑA ROMERO**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/030/13

Señor
DANIEL GARCÍA RODRÍGUEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. JUAN LUIS UMAÑA ROMERO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"PRUEBAS DE LABORATORIO DE LODOS FRAGUANTES Y PROPUESTAS DE UTILIZACIÓN EN LA INGENIERÍA CIVIL"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES
- III. ENSAYES REALIZADOS
- IV. RESULTADOS OBTENIDOS
- V. PROPUESTAS DE UTILIZACIÓN EN LA INGENIERÍA CIVIL
- VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- VII. REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 4 de abril del 2013.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	3
Objetivo.....	6
Justificación.	6
Alcance.	6
1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	8
1.1. Aspectos relevantes de la Bentonita.....	8
1.2. Cemento portland.....	14
1.3. Agua.....	17
1.4. Mezcla agua, bentonita y cemento.....	18
1.5. Propiedades de la mezcla agua- bentonita-cemento.....	19
2. ENSAYES REALIZADOS.....	29
2.1. Preparación de las mezclas.....	32
2.2. Ensaye de compresión simple.....	42
2.3. Tabla de dosificaciones de mezclas ensayadas.....	47
3. RESULTADOS OBTENIDOS.....	49
3.1. Propuestas de diseño de lodos fraguantes.....	62
4. PROPUESTAS DE UTILIZACIÓN EN LA INGENIERÍA CIVIL.....	71
4.1. Uso de pantalla perimetral impermeable de lodo fraguante.....	71
4.2. Inyecciones de compensación.....	75
4.3. Instrumentación geotécnica.....	78
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
5.1. Conclusiones.....	81
REFERENCIAS.....	87



INTRODUCCIÓN.

Los lodos fraguantes constituyen un material singular, dado el hecho de que es un fluido tixotrópico durante las primeras horas de fraguado, lo cual hace que su comportamiento sea utilizado en inyecciones para la ingeniería civil, sin embargo hasta el día de hoy se le ha encontrado otras utilidades para la construcción, por ejemplo como material impermeabilizante, trabajos de excavación, sellado de juntas en tablestacas prefabricadas, muro Milán prefabricado y mejoramiento de suelo entre otros.

Los materiales que integran la mezcla de los fluidos estabilizadores y lodos fraguantes, son la bentonita, agua y cemento, la diferencia entre estos es la consistencia de la mezcla, para la elaboración de un fluido estabilizador es necesario tener un porcentaje mucho mayor de agua que de los otros componentes, el tiempo de fraguado es mayor que el tiempo de su uso; en cambio para los lodos fraguantes, sus propiedades y parámetros como la resistencia, elasticidad, densidad, fluidez y permeabilidad deben ser competentes para un buen uso en la ingeniería.

Es muy importante conocer las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que conforman dichas mezclas, así como los cambios que se dan durante su mezclado y fraguado a través del tiempo, cabe resaltar que estos lodos fraguantes tienen cierta reacción en condiciones húmedas y en condiciones secas debido al tiempo, ya que influye mucho en la resistencia y sedimentación de los materiales.

Tanto la bentonita como el cemento son materiales de propiedades muy cambiantes cuando absorben agua, por un lado la bentonita es muy plástica y tixotrópica, por otro lado el cemento, por su capacidad de fraguar y resistencia a la



compresión, la combinación de estos dos materiales más la humectación da resultado a propiedades muy complejas y cambiantes durante su fraguado.

Es por ello, que en este trabajo se presenta una investigación sobre el comportamiento físico de las mezclas de agua, bentonita y cemento, durante su proceso de fraguado, con el fin de proponer los rangos de proporciones de los materiales para la preparación de lodos fraguantes y lodos de estabilización para el uso de la ingeniería civil.

Los especímenes de las mezclas propuestas se fallaron en el laboratorio de geotecnia “Francisco Zamora Millán” de la facultad de ingeniería de la UNAM, las pruebas de laboratorio que se realizaron fueron: densidad, resistencia a la compresión simple, fluidez, sedimentación y tiempo de fraguado, obteniéndose la curva esfuerzo-deformación, módulo de elasticidad, resistencia, y peso volumétrico para diferentes dosificaciones y edades.

El trabajo está conformado primeramente por la caracterización de los materiales que conforman la mezcla, y por la descripción de las propiedades físicas y mecánicas de estas.

En el capítulo 2 se presentan dos procedimientos de elaboración para los especímenes, uno denominado como mezcla “húmeda” (bentonita hidrata más cemento) y mezcla “seca” (bentonita y cemento mezclada en seco, y después humectada), describiéndose los diferentes comportamientos durante su mezclado y fraguado, además se describen las pruebas de laboratorio que se llevaron a cabo para los especímenes con diferentes dosificaciones.

Los resultados de los ensayos realizados se presentan en el capítulo 3, se muestra por medio de tablas, imágenes y gráficas las propiedades de



manejabilidad (mezcla bombeable), cambio volumétrico, sedimentación, fluidez, parámetros de resistencia y deformabilidad, se comenta sobre la disposición de las propiedades físicas y mecánicas de los especímenes en función de las proporciones de los materiales, antes y después de fraguar, por último se comparan estos resultados con las gráficas triangulares propuestas por Jones (1963) y SOLUM yTGC (2002).

En el capítulo 4, se presentan tres aplicaciones en la Ingeniería Civil de las mezclas de agua, bentonita y cemento, denominadas como lodos fraguantes y de estabilización, para el uso de pantalla perimetral impermeable, de inyecciones de compensación y para fijación de instrumentación geotécnica, donde en cada caso las propiedades físicas y mecánicas de estas mezclas son distintas para su propósito. En este capítulo se evalúan las gráficas de tendencia de las dosificaciones de los ensayos efectuados, contra las proporciones de los materiales de estos lodos, dando recomendaciones para el uso de las gráficas de tendencia y triangular, para la consulta de resistencia, viscosidad, sedimentación, densidad y cambio volumétrico.

Por último, en el capítulo de conclusiones y recomendaciones, se concluye sobre la importancia que tiene la preparación, el curado y fraguado en las mezclas de agua, bentonita y cemento, para obtener las propiedades físicas y mecánicas requeridas en los lodos fraguantes y de estabilización. Se propone el uso de las gráficas, tendencia de resultados obtenida en esta investigación para el control de la calidad de la mezcla antes y después de fraguar, así mismo se dan recomendaciones sobre las proporciones de los materiales para otros usos en la construcción.



Objetivo.

Determinar los factores que influyen en el comportamiento de las mezclas de agua, bentonita y cemento, antes y después de fraguar, para obtener las propiedades físicas y mecánicas requeridas en lodos fraguantes y de estabilización, por medio de las pruebas de laboratorio de resistencia, densidad, fluidez, cambio volumétrico, tiempo de fraguado y sedimentación, así como proponer las dosificaciones de las mezclas para otros usos en la construcción.

Justificación.

Existen varias recomendaciones de dosificaciones de mezclas de agua, bentonita y cemento para diferentes usos en la construcción, en especial en la estabilización e impermeabilización de los suelos, estas se basan en su resistencia, densidad y viscosidad, sin embargo se ha dejado de lado otras propiedades importantes como la sedimentación, tiempo de fraguado y el cambio volumétrico, por tal motivo se realizó varias pruebas de laboratorio a especímenes con diferentes dosificaciones, para encontrar la tendencia de las proporciones de los materiales que satisfagan las propiedades físicas y mecánicas antes y después de fraguar, requeridas en los diferentes usos.

Alcance.

Se presentan y se evalúan dos métodos diferentes de preparación de mezclas de agua, bentonita y cemento.



Se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio de densidad, fluidez, resistencia, sedimentación y cambio volumétrico de especímenes con diferente dosificación.

- Se presentan gráficas de tendencia de proporciones de los materiales respecto a sus propiedades físicas y mecánicas, antes y después de fraguar.
- Se consignan las proporciones de lodos fraguantes y de estabilización usados en la práctica profesional respecto a los resultados obtenidos en esta investigación.
- Se dan recomendaciones sobre las proporciones de los materiales para otros usos en la construcción.



1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.

1.1. Aspectos relevantes de la Bentonita.

Su definición parte de 1888 en que fueron descubiertas y clasificadas como tales en Fort-Benton, Wyoming. U.S.A., a causa de una bentonita que poseía propiedades muy especiales, particularmente la de expandirse en el agua dando una masa voluminosa y gelatinosa.

Las bentonitas son también llamadas “arcillas activadas” debido a su afinidad en ciertas reacciones químicas causada por su excesiva carga negativa.

La bentonita es una arcilla compuesta esencialmente de Montmorillonita. La Montmorillonitas son minerales de arcillas de tipo esmécticas con una estructura de capas. El ión aluminio predomina en la estructura pero puede ser reemplazado por otro ión metálico formando una gran variedad de minerales.

Los tipos de bentonita más comunes son:

- Bentonita sódica: Montmorillonita que se encuentra en forma natural y que contiene un alto nivel de iones de sodio. Se expande al mezclarse con el agua, para hidratarse requiere un alto porcentaje alrededor del 300%. También se conoce como “Wyoming Bentonita” o “Western Bentonita”.
- Bentonita Cálcica: Es una Montmorillonita en la que el catión intercambiable predominante es el calcio. No exhibe la misma capacidad de expansión de la bentonita sódica, pero tiene propiedades absorbentes. También llamadas “Southern, Texas o Mississippi Bentonita”.



- **Propiedades Físico-Químicas de La Bentonita.**

Con el objeto de comprender mejor la respuesta de la bentonita es conveniente proporcionar una introducción a sus aspectos físico-químicos.

Se considera en general, que la bentonita tiene un tamaño del orden de 2 micras o menores y presentan una gran actividad eléctrica. A continuación de algunas hipótesis respecto al origen de las fuerzas actuantes de la bentonita.

La fuerza de unión entre átomos para formar moléculas se conoce como la fuerza de valencia primaria.

Los minerales cristalinos cuya actividad superficial es tal que se presenta cohesión y plasticidad se definen como arcillosos.

Los minerales de arcilla de montmorilonita, tienen láminas formadas por unidades tetraédricas y octaédricas, permitiéndole sustitución isomorfa, que consiste en la sustitución de un átomo por otro. La unión catiónica en la montmorilonita depende del tipo de catión que se tenga presente pero en general es débil, por lo que el agua puede entrar fácilmente entre las láminas de montmorilonita, ocasionando que se separen, no siendo difícil desasociar a las unidades estructurales de montmorilonita. Como resultado de lo anterior, los suelos que contengan cantidades considerables de montmorilonita presentan características muy importantes de expansión cuando se hidratan y contracción cuando se secan..

Las propiedades de las bentonitas derivan, principalmente, de:

- Pequeño tamaño de granos menor o igual a 2 milésimas de milímetro.
- Morfología laminar (filosilicatos).



- Sustituciones isoméricas (aparición de cargas en las laminas).
- Capacidad de intercambio catiónico. Suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede absorber a un determinado pH

Las cargas negativas del mineral se generan de tres formas distintas:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas

- **Hidratación y expansión.**

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmectitas en la cual permiten la entrada de agua y otras moléculas que causan un aumento en el espacio interlaminar, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar a la expansión. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el



sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen *Ca* o *Mg* como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

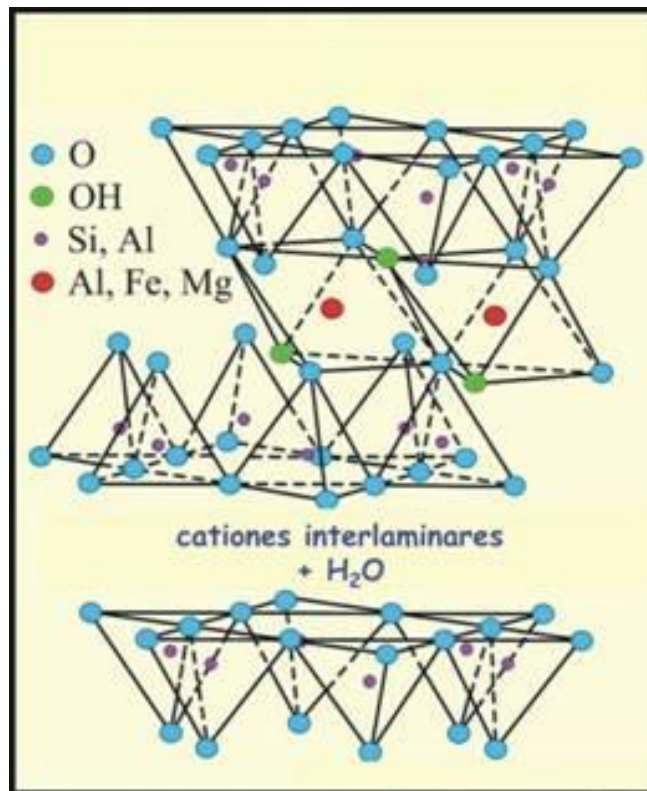


Figura 1.1.2. Estructura de las arcillas tipo esmectita.

- **Plasticidad.**

Las arcillas bentoníticas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un



efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas bentoníticas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de expansión.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de contracción). Estos límites marcan una separación entre los cuatro estados o modos de consistencia de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas, 1975).

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición mineralógica, comportamiento en su variación de volumen y forma, naturaleza y calidad de la arcilla bentonítica.

.

- **Tixotropía.**

Entre las partículas arcillosas se ejercen fuerzas debidas a las ligaduras físico-químicas que se manifiestan en sus respectivas películas envolventes de agua y cationes adsorbidos. Un amasado enérgico de la arcilla, puede romper esas ligaduras momentáneamente, lo cual refleja macrofísicamente por una perdida sensible de las propiedades de resistencia del material. Sin embargo, la mayoría de las arcillas vuelven más o menos a sus propiedades originales, es decir vuelven a estructurarse; este fenómeno fue llamado Tixotropía.



Las arcillas montmoriloníticas presentan la propiedad en grado máximo y recobran muy rápidamente sus características de resistencia, tras un enérgico remoldeo.

Una medida de la tixotropía puede tenerse determinando una vez el límite líquido de una arcilla inmediatamente tras el remoldeo y otro dejando pasar unos minutos después de éste: si la arcilla es tixotrópica el valor obtenido en el segundo caso será mayor que el primeramente obtenido.

Algunos usos comerciales de la bentonita fuera de la ingeniería civil:

- Absorbentes.
- Industria farmacéutica.
- Limpieza y detergentes.
- Industria de productos alimenticios.

- **Propiedades índice de la bentonita empleada**

En el laboratorio se obtuvieron las propiedades índice, los límites de consistencia por medio de la copa de Casagrande y el rollito. La bentonita presenta un alto contenido límite líquido (LL) debido a su estructura laminar, esta hace que la bentonita absorba el agua de manera considerable.

El peso volumétrico varía en función del contenido de agua, de manera de proporción se puede decir que a mayor contenido de agua el peso volumétrico de la mezcla disminuye ya que el agua tiene un peso volumétrico menor que el de la bentonita.



Tabla 1.1.1 Propiedades índice de la bentonita.

Propiedades índice	Bentonita
L.L. (Límite líquido)	450
L.P. (Límite plástico)	36
I.P. (índice plástico)	414
γ_m (Peso volumétrico)	1.2 a 1.45 g/cm ³

1.2. Cemento portland.

Es un material inorgánico finamente pulverizado, comúnmente conocido como cemento que al agregarle agua ya sea solo o mezclado con otros materiales tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad, a continuación se mencionan algunas de las ventajas que tiene el cemento en la construcción:

- El cemento es hidráulico porque al mezclarse con agua, reacciona químicamente hasta endurecer. El cemento es capaz de endurecer en condiciones secas y húmedas e incluso, bajo el agua.
- El cemento es notablemente moldeable: al entrar en contacto con el agua y los agregados, como la arena y la grava, el cemento es capaz de asumir cualquier forma tridimensional.
- El cemento —y el concreto hecho con él— es tan durable como la piedra. A pesar de las condiciones climáticas, el cemento conserva la forma y el volumen, y su resistencia se incrementa con el paso del tiempo.



- El cemento es un adhesivo tan efectivo que una vez que fragua, muy difícil romper su enlace con los materiales tales como el ladrillo, el acero, la grava y la roca.
- Son más impermeables cuando la proporción de cemento es mayor a la de los materiales agregados.
- El cemento ofrece un excelente aislante contra los ruidos cuando se calculan correctamente los espesores de pisos, paredes y techos de concreto.

El cemento portland generalmente es de color gris a café grisáceo, compuesto principalmente por minerales cristalinos artificiales, siendo los más importantes los silicatos de calcio y aluminio. Estos minerales al reaccionar con el agua producen compuestos capaces de impartir propiedades semejantes a las de las rocas una vez que ha endurecido la mezcla de cemento y agua.

Las partículas de un cemento se encuentran comprendidas entre 1 micra y 80 micras pasando la mayor parte por la malla No. 200.

La velocidad de endurecimiento y otras propiedades dependen en forma considerable de los compuestos esencialmente del cemento y de la finura del mismo

La materia prima para la elaboración del cemento (caliza, arcilla, arena, mineral de hierro y yeso) se extrae de canteras o minas y, dependiendo de la dureza y ubicación del material, se aplican ciertos sistemas de explotación y equipos. Una



vez extraída la materia prima es reducida a tamaños que puedan ser procesados por los molinos de crudo.

El proceso de fabricación del cemento comprende cuatro etapas principales:

1. Extracción y molienda de la materia prima.
2. Homogeneización de la materia prima.
3. Producción del Clinker.
4. Molienda de cemento.

El empleo del cemento portland es uno de los materiales más indicados en el mejoramiento de suelos. Las técnicas modernas de construcción tienden a tomar ventaja de los materiales de construcción disponibles en el lugar y es aquí donde se ha logrado ventajas tanto económicas como ingenieriles al efectuar estabilizaciones con cemento portland.

En general, la técnica utilizada para efectuar una buena estabilización con cemento, considera dos criterios fundamentales, la durabilidad y la resistencia, repercutiendo ambos criterios en la economía.

El cemento utilizado en este proyecto es de marca tolteca Portland Gris es un material de construcción de alta calidad—compuesto principalmente de clinker—que cumple con todos los requisitos físicos y químicos aplicables, y se utiliza ampliamente en todos los segmentos de la industria de la construcción: residencial, comercial, industrial, y de infraestructura pública.



1.3. Agua.

El agua es el componente que se utiliza para generar las relaciones químicas en los cementantes del concreto hidráulico o del mortero del cemento Pórtland. Puede ser agua potable, es decir, aquella que por sus características químicas y físicas es útil para el consumo humano o que cumpla con los requisitos de calidad establecidos en las normas de la tabla 2.3.1.

Tabla 1.3.1. Normas de calidad de agua.

MANUALES	DESIGNACIÓN
- Impurezas orgánicas en Agregados finos	M-MMP-2-02-026
- Muestreo de Agua	M-MMP-2-02-039
- Aceite, Grasa y Sólidos en Suspensión en el Agua	M-MMP-2-02-040
- Carbonatos y Bicarbonatos Alcalinos en el Agua	M-MMP-2-02-041
- Sulfato de Agua	M-MMP-2-02-042
- Cloruros en el Agua	M-MMP-2-02-043
- Materia Orgánica en el Agua	M-MMP-2-02-044
- Magnesio en el Agua	M-MMP-2-02-044
- Bióxido de Carbono Disuelto en el Agua	M-MMP-2-02-046
- Potencial de Hidrógeno (pH) del Agua	M-MMP-2-02-047
- Impureza en Solución en el Agua	M-MMP-2-02-048
- Álcalis en el Agua	M-MMP-2-02-049

En el curado, el agua deberá ser de buena calidad, ya que necesita más agua y en este proceso es cuando se producen las reacciones.

- Calidad del agua.



Deberá ser potable, las sustancias nocivas son de especial cuidado para evitar los siguientes problemas:

- Alteraciones en la velocidad de fraguado.
- Pérdidas de resistencia.
- Defectos estéticos.

Para este caso se utilizó el agua potable de la Ciudad de México, el cual cumple con las características de calidad.

1.4. Mezcla agua, bentonita y cemento.

Se le denomina en el área de la construcción como lodo fraguante a la mezcla de agua, suelo fino y cemento.

La mezcla del agua-bentonita-cemento constituye un material singular, dado el hecho de que es un líquido tixotrópico durante bastantes horas, antes de fraguar, y, posteriormente es un sólido muy impermeable, de una resistencia definida a voluntad dentro de unos amplios márgenes.

Tanto la bentonita como el cemento son dos materiales de propiedades muy marcadas; la bentonita por su tixotropía y alta plasticidad, y el cemento, por su capacidad de fraguar, adquiriendo así características resistentes. La combinación de ambos constituye un nuevo material de propiedades muy complejas.

Comúnmente se piensa que la mejoría en las propiedades ingenieriles en un suelo tratado con cemento, se debe principalmente al endurecimiento del cemento



Portland, pero a la fecha se sigue discutiendo acerca de los procesos que tienen lugar durante la hidratación del cemento en presencia de arcillas. Si el endurecimiento de la mezcla de suelo-cemento se debiese solamente a la hidratación del cemento, podría considerarse a la bentonita como un componente químicamente inerte. Las partículas de cemento hidratado ligarían a los granos adyacentes la bentonita y formarían un esqueleto más o menos continuo de un material duro y resistente que encerraría a una matriz de la bentonita inalterada químicamente. También podría este esqueleto sellar vacíos en la bentonita con lo que éste sería más impermeable y en consecuencia más resistente a los efectos propiciados por los cambios de humedad. Si además del endurecimiento, se presentan reacciones adicionales entre los componentes del cemento y de la bentonita, se obtendría un material adicional cementante que contribuiría no solamente a la unión entre las partículas de la bentonita sino también a la unión entre las partículas de la bentonita y las del cemento endurecido.

1.5. Propiedades de la mezcla agua- bentonita-cemento.

Las principales propiedades de este material, que varía cuantitativamente según la interacción química particular de cada pareja bentonita-cemento, son las siguientes.

- Viscosidad.

La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal, en realidad todos los fluidos



conocidos presentan algo de viscosidad, siendo el modelo de viscosidad nula una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones.

Aumenta con la dosificación de bentonita y también con el contenido de cemento es necesario para alcanzar los valores de régimen un batido suficiente de la bentonita y un cierto periodo de maduración de lodo hasta conseguir la hidratación total de la arcilla, todo ello antes de proceder a la adición del cemento.

Una vez fabricado el lodo de bentonita-cemento, si el tiempo de maduración ha sido suficiente, su viscosidad permanece constante durante un cierto tiempo, a partir de aquí comienza espontáneamente a aumentar la viscosidad, iniciándose el fraguado sin solución de continuidad.

La figura 1.5.1. Muestra la medición de la fluidez de la mezcla con el cono March, al depositar la mezcla en el cono se mide el tiempo en el cual aproximadamente un litro tarda en vaciarse por completo la mezcla del cono, con ello se puede estimar la viscosidad del lodo.



Figura 1.5.1. Medición de la viscosidad con el cono March.

- Tiempo de fraguado.

Varía bastante según la dosificación de bentonita-cemento y suele aplazarse mediante retardadores cuando la obra lo requiere. La agitación retrasa considerablemente el comienzo del fraguado.

En este estudio los especímenes se consideraron que el tiempo de fraguado sería de 28 días. Con el lodo en reposo, el fraguado se inicia de media a diez horas después de la adición del cemento.

Para este caso el tiempo que tardó en solidificarse la mezcla fue de 28 días, tanto seca, como saturada.

- Sedimentación.



Definimos como "sedimentación" al proceso natural por el cual las partículas más pesadas que el agua, que se encuentran en suspensión, son removidas por la acción de la gravedad, en este caso hasta la parte inferior de la probeta..

La sedimentación de granos de cemento y de la bentonita hace que decante en la superficie cierta porción de agua, lo cual debe limitarse por el menor rendimiento volumétrico, que implica escogiendo una pareja bentonita-cemento adecuada.

Este fenómeno es consecuencia del cambio de base entre Na y Ca sufrido por la bentonita, motivado por la cal que libera el cemento al fraguar.

Este fenómeno se observó después de haber agitado las probetas con la mezcla y dejarlas en reposo, durante aproximadamente 10 minutos los materiales comenzaron a separarse debido a la diferencia de densidades.

- Densidad sin fraguar y fraguada.

La densidad se define como el cociente entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.

La densidad de la mezcla varía de 1.2 a 1.45 g/cm^3 , según la dosificación de cemento. En aquellos casos en que esta dosificación es baja, el contenido porcentual de agua es muy alto, por lo que su fluidez es alta, en caso de que la densidad es alta la fluidez disminuye.

Se denominará densidad sin fraguar a la densidad del lodo y como densidad fraguada a la densidad de la mezcla a los 28 días de edad.



La cuantificación de la densidad del lodo se realiza por medio de la balanza de densidad, esta prueba consiste en vaciar la mezcla en un recipiente de aluminio cilíndrico hasta llenarlo completamente, después se embona una tapa perforada para desalojar el exceso de mezcla, se limpia el excedente y se coloca en la balanza para su medición.

Para la obtención de la densidad fraguada de los especímenes cilíndricos, se obtuvo la masa del espécimen por medio de una balanza electrónica y se midieron los diámetros y alturas con la ayuda del Vernier.

La figura 1.5.2. Nos muestra el densímetro con el cual se midieron las densidades de las mezclas presentadas en esta investigación.



Figura 1.5.2. Densímetro.

- Resistencia.



Aplicando un esfuerzo axial a un espécimen, sin la etapa previa de presión hidrostática. Prácticamente sólo existe la etapa de carga, que conduce el suelo a la falla; sin embargo, en vías de simplificación, podría considerarse como primera etapa el estado inicial de la muestra, sin esfuerzos exteriores. En esta primera etapa los esfuerzos son nulos y el agua adquiere una tensión de magnitud igual, teóricamente, a la presión de preconsolidación (γz) que el suelo tuviere en la naturaleza; esta tensión del agua comunica a la estructura sólida los esfuerzos efectivos necesarios para que la muestra mantenga su volumen.

En la segunda etapa la muestra es llevada a la falla con la aplicación del esfuerzo axial (q_u), que mide su resistencia en este tipo de prueba, originando a la vez una presión neutral adicional.

- Comportamiento Plástico.

En la mecánica de suelos la plasticidad se puede definir como la propiedad de un material por lo cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse o agrietarse.

La mezcla bentonita-cemento es un material que durante su proceso de fraguado presenta los estados de consistencia líquida, semilíquida, plástica, semisólida y sólida, estos dependerán de su contenido de agua, de la relación de bentonita-cemento y del tiempo y condición del fraguado.



60% AGUA, 13.3% BENTONITA Y 26.7% CEMENTO
A / C = 2.2 A / B = 4.5 B / C = 0.5
Gráfica resumen de edades 1, 3, 7 y 28 días
V = 1.0 mm/min
Curva Esfuerzo-Deformación

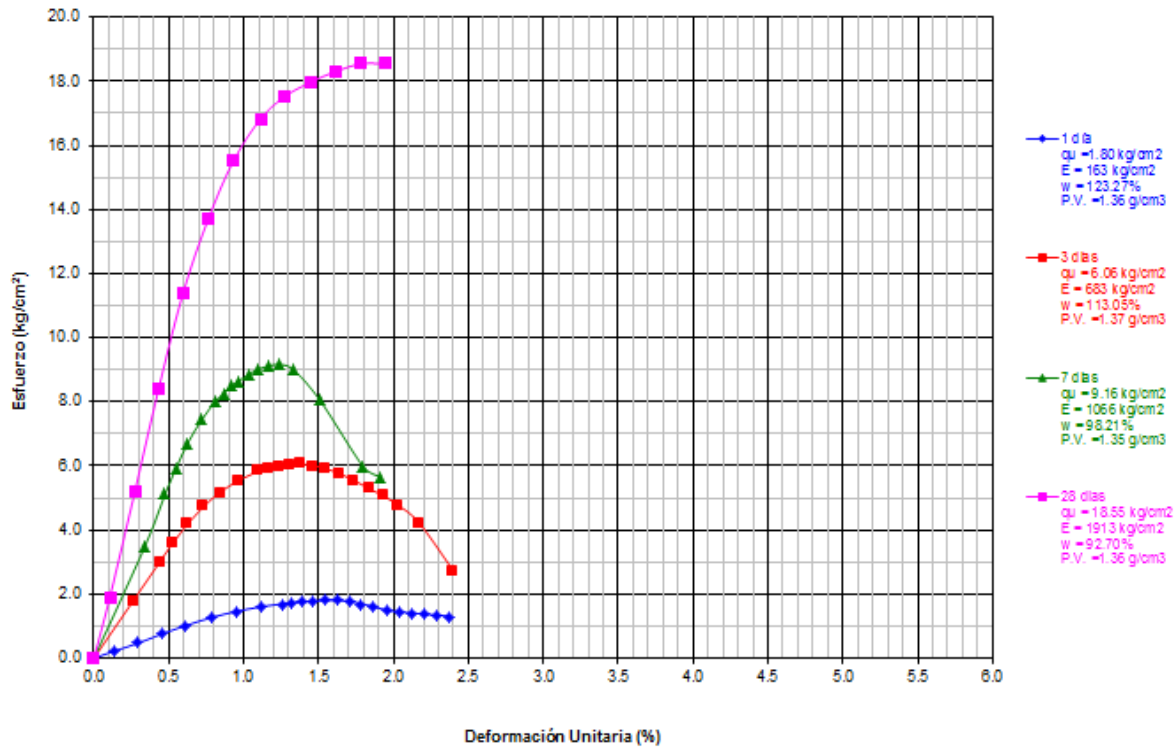


Figura 1.5.3. Curva esfuerzo deformación, indicando el rango plástico.

- Deformación elástica.

Se presenta cuando un material recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación. Comúnmente se entiende por materiales elásticos, aquellos que sufren grandes elongaciones cuando se les aplica un esfuerzo.



60% AGUA, 13.3% BENTONITA Y 26.7% CEMENTO
A / C = 2.2 A / B = 4.5 B / C = 0.5
28 días de fraguado sin inmersión
V = 1.0 mm/min
Curva Esfuerzo-Deformación

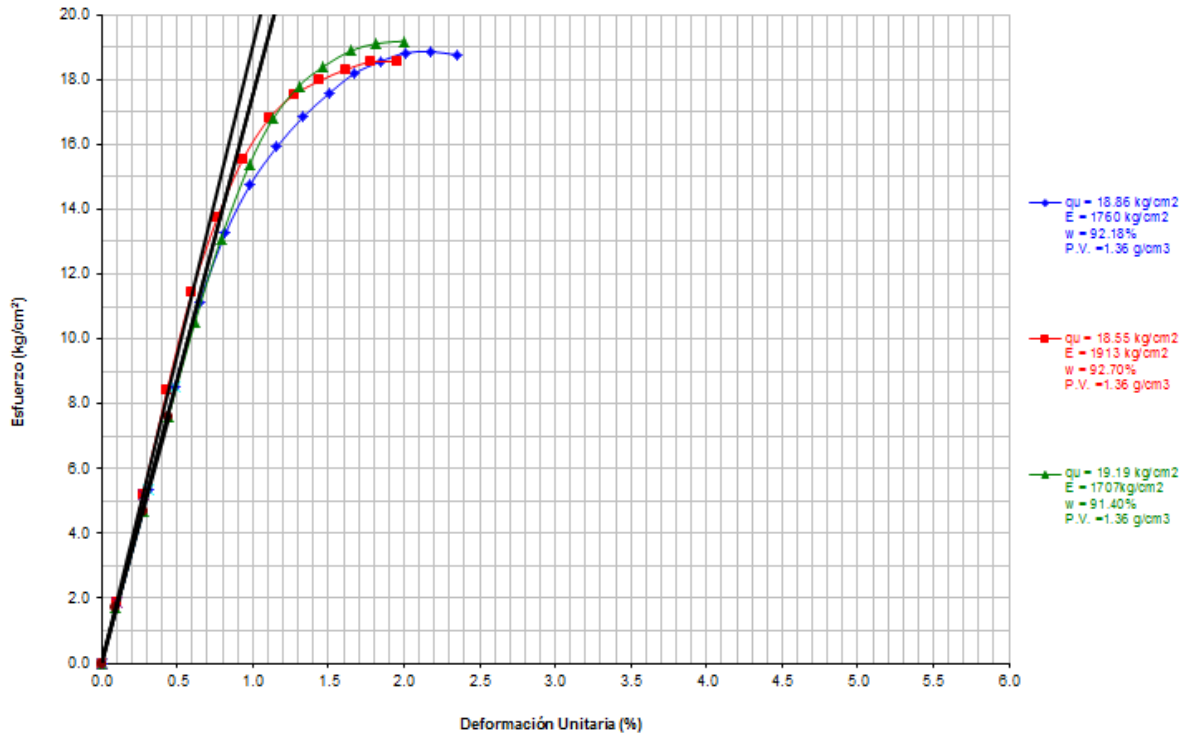


Figura 1.5.4. Curva esfuerzo deformación indicando el módulo elástico.

Los lodos fraguantes presentan este comportamiento hasta un cierto valor del esfuerzo aplicado; si bien en los casos apuntados las deformaciones son pequeñas, al retirar la carga desaparecen.

Al valor máximo de la fuerza aplicada en este caso sobre las mezclas presentadas para que su deformación sea elástica se le denomina límite elástico y es de gran importancia en el diseño mecánico, esta propiedad se cuantifica por medio del módulo elástico tangente o módulo de Young.



- Relación agua/cemento

La relación agua/cemento (A/C) es lo que nos va a indicar en la variación de resistencia a la compresión de la mezcla, ésta está influenciada con la edad de los especímenes.

Es de suma importancia llevar el Control de dosificación: Agua / cemento, ya que muy susceptible a su comportamiento, por ejemplo.

- A menor agua mayor trabajo de mezclado, menor fluidez. Mayor dificultad de puesta en obra.
- A mayor agua menor trabajo de mezclado, mayor fluidez. Menor tiempo de colocación.
- A mayor relación agua/cemento menor resistencia, menor presencia de agrietamiento en el fraguado.

Las características anteriores se deducen de las pruebas realizadas en el laboratorio, dado a manera que va creciendo la relación A/C la mezcla va perdiendo resistencia, esto combinado con su respectivo porcentaje de bentonita. Se hace énfasis a esta relación ya que para la mezcla en general nos indica la resistencia.



FACULTAD DE INGENIERÍA

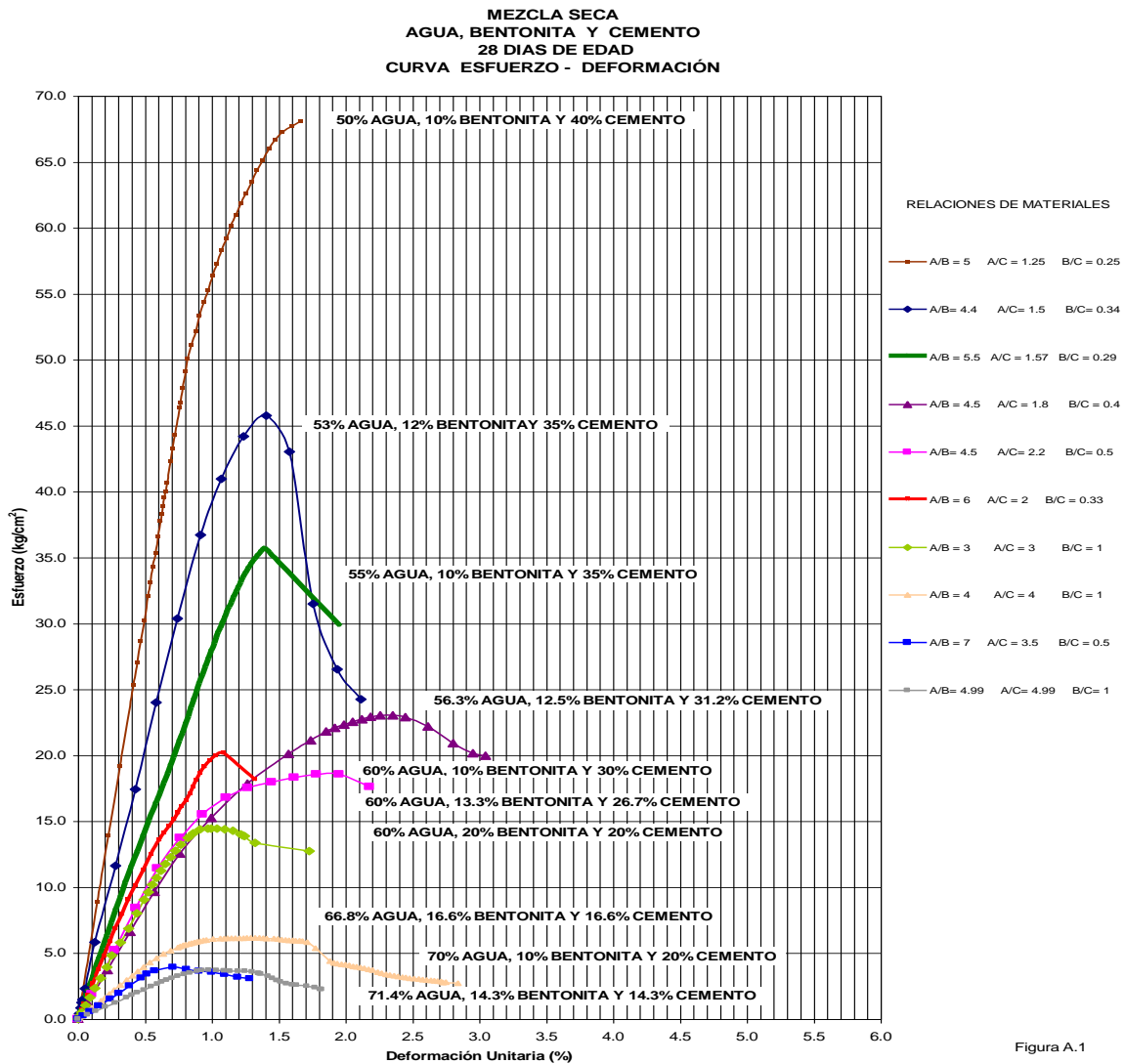


Figura A.1

Figura 1.5.5. Curva esfuerzo deformación, que indica las relaciones entre los materiales y porcentajes de dosificación.



2. ENSAYES REALIZADOS.

Los ensayos se realizaron en Laboratorio de Geotecnia “Francisco Zamora Millán” de La Facultad de Ingeniería de la UNAM.

- Propuesta de preparación de mezcla.

En la preparación de la mezcla, se hicieron dos procesos:

- a) Mezcla Húmeda. El proceso consiste en humedecer y batir la bentonita con agua hasta lograr una pasta homogénea, después se agrega el cemento sin parar el batido, hasta uniformizar la mezcla.
- b) Mezcla Seca. El proceso consistió en mezclar a temperatura ambiente la bentonita con el cemento hasta lograr una coloración uniforme, para después batirlos con el agua, hasta uniformizar la mezcla.

Las propiedades que presentaron en las mezclas fueron diferentes para cada proceso, en la mezcla húmeda resultó ser más espesa que la mezcla seca teniendo la misma dosificación, esto es, la bentonita sola requiere mayor agua para humectarse, y la mezcla de bentonita y cemento requiere menos agua para humectarse, esto aumenta la propiedad de fluidez y disminuye los agrietamientos de los especímenes, por lo que se decidió utilizar el procedimiento de la mezcla seca, dado que al parecer tiene mejor resultado homogéneo para el estudio de la resistencia.

Para la programación de la dosificación de la mezcla seca, se propuso que dicha mezcla debería presentar una consistencia fluida y que alcanzará una resistencia



en su fraguado competente teniendo cuidado de no exceder de los materiales para cuidar la sedimentación, es por ello que se prepararon y probaron varias dosificaciones para identificar el rango de variación de porcentajes de los materiales que cumplieran dichos objetivos para dar una recomendación aceptable.

- Cálculo de la dosificación de la mezcla.

Se decidió que la relación agua/cemento respecto a su peso tenga una variación entre 1.25 y 4.99; para determinar los porcentajes de cada material se empleo el siguiente procedimiento:

- a) La suma de los porcentajes de los materiales es el 100%.

$$W_{\text{agua}}\% + W_{\text{bentonita}}\% + W_{\text{cemento}}\% = 100\% W_{\text{mezcla}} \dots \dots \dots (1)$$

Siendo:

$W_{\text{agua}}\%$ Peso de agua en porciento.

$W_{\text{bentonita}}\%$ Peso de bentonita en porciento.

$W_{\text{cemento}}\%$ Peso de cemento en porciento.

$100\%W_{\text{mezcla}}$ Suma total de los pesos de los materiales en porciento.

- b) Variando la relación agua/cemento entre 2.8, se tiene que.

$$\text{Agua} = 2.8 \text{ cemento} \dots \dots \dots (2)$$

- c) Sustituyendo la expresión (2) en (1) se obtiene.



$$2.8 W_{\text{cemento}\%} + W_{\text{bentonita}\%} + W_{\text{cemento}\%} = 100\% W_{\text{mezcla}} \dots \dots \dots (3)$$

d) Operando.

$$3.8 W_{\text{cemento}\%} + W_{\text{bentonita}\%} = 100\% W_{\text{mezcla}} \dots \dots \dots (4)$$

e) Por lo que peso de la bentonita en porcentaje es.

$$W_{\text{bentonita}\%} = 100\% W_{\text{mezcla}} - W_{\text{cemento}\%} \dots \dots \dots (5)$$

Con la expresión (5) se propuso varios de porcentajes bentonita para la dosificación de las mezclas, cuidando que la mezcla fuese fluida y que no se presentara sedimentación durante el fraguado; los porcentajes de bentonita propuestos varían entre 5 y 20 % como se muestra en la tabla 3.3 localizada en el capítulo de resultados.

- Curado de especímenes.

Debido a las condiciones que se presentan en campo para el uso de la mezcla de bentonita se decidió que en la etapa de fraguado fuese de dos maneras diferentes:

- a) Fraguado en cuarto húmedo. Las probetas estuvieron dentro del cuarto húmedo durante 28 días observando en este tiempo los cambios obtenidos físicamente.
- b) Fraguado inmerso en agua. Las probetas después de 3 días de fraguado en cuarto húmedo se introdujeron en un recipiente con agua y ahí permanecieron hasta completar los 28 días de fraguado.



En este trabajo se realizaron 16 pruebas tanto en fraguado en cuarto húmedo como en inmerso en agua, preparando 3 especímenes para cada prueba, haciendo un total de 96 ensayos.

2.1. Preparación de las mezclas.

a) Mezclado por método seco.

Las dosificaciones de las mezclas se programaron con una relación de agua/cemento variable entre 1.25 y 4.99, variando los porcentajes de sus componentes como se indicó anteriormente, tomando en cuenta las características de esta relación mencionadas en el capítulo 1.



Figura 2.1.1. Mezclado de Bentonita cemento sin hidratación.



Mezcla seca, en la figura 2.1.1 se observa el mezclado de cemento y bentonita en condiciones ambientales antes de agregarle el agua.

El mezclado se realiza con una espátula, y se da como terminado cuando la mezcla tenga una coloración homogénea.

b) Hidratación y mezclado.

La mezcla homogénea de bentonita-cemento, se introduce a la batidora, y con la ayuda de una probeta se agrega el agua, teniendo cuidado de que ésta no salpique y/o eche fuera a los materiales del recipiente, cuando se bata, como lo muestra la fig. 21.2.



Figura 2.1.2. Batidora con agua.



La batidora tiene un aspa de globo, el tiempo de mezclado fue de 5 minutos a una velocidad de 1725 rpm, se recomienda cubrir con plástico la batidora mientras se realiza el mezclado para evitar la pérdida de material.

En la figura 2.1.3 se muestra la batidora mezclando el agua, la bentonita y cemento.



Figura 2.1.3. Batido de la mezcla.

c) Prueba del Cono Marsh.

Esta prueba consiste en la cuantificación del tiempo que tarda aproximadamente un litro de fluido, en este caso el lodo fraguante en vaciarse a través del cono, esto es para verificar la fluidez de la mezcla, con esta prueba se evalúa la facilidad que tiene la mezcla para ser bombeada o inyectarla in situ.



Para clasificar que el lodo sea bombeable es necesario que la mezcla tengan una fluidez Marsh menor a los 40 segundos.

En la figura 2.1.4 se muestran los accesorios utilizados para medir la fluidez de las mezclas con el cono Marsh.



Figura 2.1.4. Cono Marsh.

d) Densidad de la mezcla del fluido.

Para la obtención de la densidad del fluido se utilizó la balanza de densidad o densímetro. La prueba consisten vaciar la mezcla en el recipiente cilíndrico, para verificar el correcto llenado, el lodo se tiene que derramar por el orificio superior de la tapa, al momento de colocarla, después se limpia el excedente del lodo y se



coloca en la base y se realiza la medición, ver figura 2.1.5. La precisión de la medición es $\pm 0.001 \text{ g/cm}^3$.

La densidad obtenida corresponde a la mezcla fluida, esta prueba se realizó antes de vaciar la mezcla en los recipientes de fraguado.



Figura 2.1.5. Obtención de densidad del lodo fraguante con la balanza.

e) Fraguado.

En el uso de los lodos fraguantes es común que se tengan 2 condiciones ambientales diferentes, una en medios sin saturar u otra saturados, es por ello, que en el proceso de fraguado para las mezclas se consideran estas dos condiciones:

- Sin saturar, los lodos se mantuvieron en condiciones ambientales, esto es con una humedad promedio del 55% y un temperatura de 21 °C.



- Saturada, los lodos se dejaron 24 horas previas en la intemperie, para después sumergirlos en agua para su termino de fraguado.

El tiempo de fraguado para los especímenes para ambas condiciones fue de 28 días.

Las probetas que se fraguaron en la intemperie, presentaron contracciones y agrietamientos, en cambio las otras probetas con el fraguado inmerso en agua no presentaron agrietamientos al término de su fraguado.

f) Recipientes para el fraguado de la mezcla.

Para el fraguado de las mezclas se utilizaron tubos de PVC con las dimensiones 3.6 cm de diámetro y 10 cm de altura, en su parte inferior se colocó plástico auto adherible sujetado con ligas para taponearlo. Estos tubos se colocaron y sujetaron con plastilina sobre una charola.

Una vez terminado el batido de la mezcla, se vacía en los tubos de PVC, cuidando que el escurrimiento sea constante y homogéneo (sin plastas o grumos). En la figura 2.1.6 se observa el llenado de cada tubo.

Para la mezcla de mayor contenido de bentonita, se requirió un tubo de llenado más alto, debido a los grandes cambios volumétricos que se presentan durante su proceso de fraguado.



La altura del espécimen fraguado o probeta debe cumplir con la relación de esbeltez de 2.5 veces el diámetro, por lo que será necesario cortarlos en sus extremos (cabecearlos).



Figura 2.1.6. Llenado de probetas.

g) Desalojo de burbujas de aire atrapado en la mezcla.

Una vez llenados los tubos con la mezcla, se procedió a desalojar las burbujas de aire, agitando fuertemente la mezcla con la ayuda de un alambre rígido, con este proceso se evitó las oquedades en el interior del espécimen fraguado (probeta).

En la figura 2.1.7 se muestran las probetas en proceso de fraguado después del agitado, se puede ver como comienza la separación de los materiales, de esta forma el cemento que es el más pesado, queda hasta la parte inferior de la



probeta, posteriormente la bentonita que un peso volumétrico menor al cemento y mayor al agua queda en la parte central, y como se ve en la imagen, queda un espejo de agua en la parte superior.



Figura 2.1.7. Probetas en proceso de fraguado.

h) Extracción de las muestras.

Los especímenes se extrajeron de los tubos de PVC después de 24 horas a la intemperie, las probetas presentaron una consistencia semisólida y muy blanda. El tiempo promedio que la mezcla tardó en fraguar fue de 24 horas, con este fraguado se pudieron extraer las muestras.

Las probetas se sacaron de los tubos por medio de un extractor. El proceso consistió en meter un émbolo metálico por la parte interior del tubo, fijando el tubo de PVC en su parte superior, después se empuja por medio de un gato hidráulico



el émbolo hacia arriba para extraer la probeta del tubo. En la figura 2.1.8 se muestra al personal de laboratorio extrayendo la muestra.



Figura 2.1.8 Extracción de la probeta del tubo PVC.

i) Cabeceo de la probeta.

Después de extraer la probeta, se cortan los extremos para delimitar a altura (cabecear), las probetas deben cumplir con una relación altura/diámetro de 2 a 2.5. En general los especímenes se cabecearon una altura entre 8 y 8.7 cm, los diámetros entre 3.2 y 3.7 cm, cumpliendo con dicha relación de esbeltez.

La figura 2.1.9 muestra el cabeceo de las muestras con el equipo y personal de laboratorio, como se mencionó anteriormente, la manipulación de las probetas debe ser con cuidado debidas a su consistencia muy blanda, o en su defecto para las muestras curadas en seco, la mezcla es muy frágil y se corre el riesgo de romperla.



Figura 2.1.9. Cabeceo del espécimen.

j) Inmersión de las muestras.

Una vez extraídas y cabeceadas las probetas cilíndricas se metieron nuevamente en otro tubo de PVC perforado en sus paredes, con la intención de saturarlas en agua, se colocaron tapas de acrílico perforadas en sus extremos conjuntamente con un geosintético drenante, todo esto sujetado con tornillos, después se colocaron en una tina llena de agua para continuar el fraguado.

La figura 2.1.10, muestra la instrumentación del espécimen antes de saturarlo, así mismo se muestra las probetas sumergidas en un recipiente con agua, se identificaron las pruebas en la parte superior.

El propósito de la inmersión de las probetas en agua es para representar as condiciones de campo, en el caso de usar la mezcla por debajo del nivel de aguas freáticas.



Figura 2.1.10. Muestras sumergidas en el agua.

2.2. Ensaye de compresión simple.

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión simple a los especímenes en el equipo de deformación controlada, de acuerdo con la norma ASTM D2 166, con el propósito de obtener las propiedades mecánicas del lodo fraguante.

A continuación se presentan los procesos de ensaye:

- Medidas de la probeta, con ayuda de un vernier se obtuvieron los diámetros superior, central e inferior, y la altura extrema y central.
- Obtención de la masa de la probeta con una precisión de 0.01 g.

En la figura 2.2.1, se presenta del lado izquierdo la medición de las dimensiones, tanto de alturas como diámetros (inferior, a mitad de la probeta y de la parte



superior). Del lado derecho se presenta la toma de masa de la probeta con la balanza electrónica.



Figura 2.2.1. Medición del espécimen.

- Montaje de la probeta a la cámara triaxial. Se colocó una membrana (holgada) de látex en la probeta para detener el cabezal y la base conjuntamente, se colocó el vástago y se centró la cámara en el anillo de carga, después se colocaron los deformímetros, figura 2.2.2.
- Etapa de carga. Se acciona la prensa a una velocidad de 1 mm/min para el ensaye a compresión, se registran las lecturas de los deformímetros, tanto el vertical como el del anillo de carga a cada 10 segundos.



Figura 2.2.2. Ensayo de compresión simple.

- Fallas de los especímenes.

Durante los ensayos a compresión, se observaron que las probetas fraguadas a la intemperie, esto es, sin saturar, presenta una apariencia con agrietamientos importantes, presentando resistencias bajas y muy diferentes entre sí, siendo de la misma dosificación. Se pudo observar que a mayor contenido de bentonita, las probetas presentan mayores contracciones y agrietamientos.

En la figura 2.2.3, se presenta el equipo semiautomatizado de registro, la bondad de este sistema es la rapidez y facilidad de la toma de lecturas. Se toma la lectura inicial, posteriormente al iniciar la prueba se van tomando lecturas con los aparatos de registro que se muestra en la figura.



Figura 2.2.3. Prueba de compresión simple, registro de lecturas.



Figura 2.2.4. Probets fraguadas a la intemperie.



La figura 2.2.4, presenta resistencias bajas, y muy diferentes siendo de la misma dosificación. Se pudo observar que a mayor contenido de bentonita, las probetas presentan mayores contracciones y agrietamientos.

En cambio, las probetas fraguadas en agua (saturadas), su apariencia fue homogénea, sin agrietamientos, presentaron resistencias muy parecidas en las tres probetas de igual dosificación.

El tipo de falla de estas probetas fue frágil, presentaron planos de falla verticales, ver figura 2.2.5, en ocasiones estos planos verticales se apuntalaban después de la falla, manteniendo una aparente resistencia residual.



Figura 2.2.5. Tipo de fallas en probetas fraguadas en condiciones saturadas.

- Obtención del contenido de agua.

Una vez fallada la probeta, se procedió a la obtención del contenido de agua. El procedimiento consistió en colocar toda la probeta en una capsula refractaria previamente identificada y pesada, después se obtuvo el peso en conjunto, esto



es, la cápsula con la probeta, se introdujeron al horno, a una temperatura de 105 ±5 °C, cumpliendo 24 horas de secado, se pesa nuevamente el conjunto para obtener el peso seco. Este procedimiento se efectuó para cada probeta fallada, con la finalidad de evidenciar la homogeneidad de estas en su dosificación.

2.3. Tabla de dosificaciones de mezclas ensayadas.

El trabajo consistió en la realización de 16 dosificaciones diferentes, para 2 tipos de fraguado, seco y saturado, preparando 3 probetas para cada caso, dando un total de 96 probetas.

La dosificación se propuso para la preparación de un lodo con la fluidez necesaria para ser bombeado, así como alcanzar una resistencia entre 3.004 y 68.11 kg/cm² para una edad de 28 días de fraguado.

En la tabla 2.3.1 se presenta las dosificaciones de las 16 mezclas, con sus respectivos porcentajes en peso de los materiales que las constituyen y las relaciones entre éstos, así como las densidades antes de fraguar.

Tabla 2.3.1 Tabla de dosificaciones de lodos fraguantes ensayados.

Pruebas	ρ g/cm ³	w %	MEZCLA SATURADA			RELACIONES		
			A %	B %	C %	A/B	A/C	B/C
1	0.830	77.75	70	5	25	14	2.8	0.2
2			70	20	10	3.5	7	2
3	1.280	135.6	64.84	12	23.16	5.40	2.80	0.52
4	1.280	129.5	63.36	14	22.64	4.53	2.80	0.62
5	1.280	129.5	66.32	10	23.68	6.63	2.80	0.42



FACULTAD DE INGENIERÍA

6	1.280	139.4	68.53	7	24.47	9.79	2.80	0.29
7	1.54	75.93	50	10	40	5	1.25	0.25
8	1.25	197.21	70	10	20	7	3.5	0.50
9	1.45	94.19	55	10	35	5.5	1.57	0.29
10	1.37	122.72	60	10	30	6	2	0.33
11	1.41	86.16	56.3	12.5	31.2	4.5	1.8	0.40
12	1.45	77.52	53	12	35	4.42	1.51	0.34
13	1.36	92.7	60	13.3	26.7	4.51	2.25	0.50
14	1.31	147.08	60	20	20	3	3	1
15	1.27	185.82	66.8	16.6	16.6	4.02	4.02	1
16	1.22	241.4	71.4	14.3	14.3	4.99	4.99	1

Como se observa en la tabla resumen anterior, las densidades de los lodos fraguantes, varían de 0.83 a 1.54 g/cm³, los porcentajes de agua fueron de 50% en adelante, la proporción de agua/cemento, A/C menor a 5 y la de agua/bentonita, A/B más de más de 3, con estas proporciones de los materiales se obtuvieron mezclas fluidas para bombeo.

Con el fin de limitar las combinaciones de las dosificaciones de las mezclas, se observó que las probetas fraguadas en agua con la relación A/C=2.8, presentaron una resistencia aceptable, por lo que se decidió preparar 5 dosificaciones con diferentes porcentajes de materiales para incrementar la fluidez, pero manteniendo la relación de A/C, así mismo en otro grupo de mezclas se trabajó con una relación promedio de A/B=4 con la idea de mantener la fluidez del lodo, y variando los porcentajes de los materiales para incrementar la resistencia.



3. RESULTADOS OBTENIDOS.

Para cumplir con los objetivos planteados, fue necesario primeramente encontrar la cantidad necesaria de agua, bentonita y cemento que debería contener la mezcla para lograr las propiedades del lodo fraguante, fluidez y resistencia.

En las pruebas realizadas se mantuvo una relación Agua/Cemento (A/C) entre 1.25 a 3.5, ya que con ésta se observó que la mezcla presentaba una consistencia fluida y una resistencia aceptable a los propósitos establecidos.

En la tabla 3.1, 3.2 y 3.3 se presentan los resultados obtenidos de los especímenes ensayados en este trabajo, tanto para condiciones saturadas como secas en su fraguado, se valúan las propiedades físicas de la mezcla:

Antes del fraguado

- Fluidez-Tiempo en prueba de Cono Mash (FTCM).
- Densidad (ρ_m).
- Grado de Sedimentación (GSed).

Fraguado a 28 días de edad

- Peso volumétrico (γ_m).
- Contenido de agua (w%).
- Cambio volumétrico (CV).

Así como las propiedades mecánicas a los 28 días de fraguado.



- El módulo tangente elástico (E).
- Resistencia a la compresión simple (q_u).
- Relación del módulo tangente elástico con la resistencia a la compresión simple (E/q_u).

En la tabla 3.1, se presentan las propiedades físicas de los lodos antes de fraguar.

Como se observa en los resultados de la tabla 3.1, la resistencia a la compresión simple son menores a las requeridas para esta investigación, esto se debe al agrietamiento presentado en los especímenes, debido a la alta contracción volumétrica.

Tabla 3.1. Propiedades físicas de mezclas con relación A/C = 2.8 antes del fraguar.

Pruebas	MEZCLA			RELACIONES			Propiedades físicas		
	Agua %	Bentonita %	Cemento %	A/B	A/C	B/C	Tiempo cono Marsh (s)	ρ_m g/cm ³	Grado de sedimentación
1	70	5	25	14	2.8	0.2	35.2	0.83	Alta
3	64.84	12	23.16	5.40	2.80	0.52	44	0.72	Media
4	63.36	14	22.64	4.53	2.80	0.62	50.7	0.75	Baja
5	66.32	10	23.68	6.63	2.80	0.42	40	0.74	Alta
6	68.53	7	24.47	9.79	2.80	0.29	37	0.67	Alta

Interpretaciones de los resultados.

- a) Tiempo de prueba de Cono Marsh.

Durante la prueba se observó que el material que requiere mucha cantidad de agua para humectarse es la bentonita, es por ello, que los valores del tiempo de la



prueba de cono Marsh disminuyen cuando el porcentaje de bentonita es menor, logrando que el lodo tenga una consistencia más fluida.

En la tabla 3.1, se presentan las relaciones de los materiales utilizados en las dosificaciones, resultado de la relación B/C influye en el tiempo de la prueba del Cono Marsh por lo que se concluye que: la fluidez de un lodo dependerá de la relación de B/C, a menor B/C mayor fluidez del lodo.

b) Densidad de la mezcla sin fraguar.

En la tabla 3.1, se presentan las densidades de los lodos después de su preparación con la ayuda de la balanza, ahí se observa que la densidad del lodo es menor que 1 g/cm^3 , esto se debe a la bentonita que se encuentra expandida y al agua que aún no se evapora.

La tendencia de las proporciones de los materiales, se sugiere que a mayor contenido de cemento mayor densidad de lodo, sin embargo no está de todo claro, ya que existen reacciones químicas tanto en el cemento como en la bentonita a través del tiempo de hidratación y fraguado.

c) Grado de sedimentación.

Durante el tiempo de fraguado de 24 horas, se pudo observar que la mezcla con agua, bentonita y cemento en reposo, se separan sus componentes, sedimentándose en el fondo el cemento, luego la bentonita y después en la parte superior una capa de agua, esto se presenta más cuando el lodo es muy fluido (tiempo menor o igual a 40 segundos).



Para limitar el fenómeno de sedimentación se propone dar tres adjetivos: alta, media y baja, se entenderá que la sedimentación alta es cuando se presenta la capa de agua muy clara en la parte superior, el espesor de capa es más del 5% de su altura, y cuando las probetas fraguadas presenten dos coloraciones bien definidas, una parte gris correspondiente al cemento y otra parte rosada para la bentonita. Para la sedimentación media, la capa superior de agua se observa turbia, el espesor de ésta es menos del 5% de su altura, y la coloración de la probeta fraguada en su parte inferior es más oscura. Por último, la sedimentación baja, la capa superior de agua es difícil de identificarla, y las probetas fraguadas presentan una coloración homogénea.

En la tabla 3.1 se presenta la valoración del grado de sedimentación de las mezclas propuestas, a los tiempos menores de 40 segundos en la prueba Marsh, el grado de sedimentación es alto; para los valores del cono Marsh entre 40 a 50 segundos, el grado de sedimentación se consideró medio y para tiempos mayores de 50, el grado de sedimentación es bajo.

Apariencia y cambios volumétricos de las probetas fraguadas a la intemperie y saturadas.

En la figura 3.1 se muestra la comparación de los especímenes fraguados en seco y en agua (izquierda y derecha respectivamente), estas probetas contienen los mismos porcentajes de agua, bentonita y cemento, sin embargo la apariencia y la contracción volumétrica de los especímenes después de los 28 días de fraguado son muy diferentes, para los fraguados en seco presentan agrietamientos y grandes contracciones volumétricas, en cambio, las probetas fraguadas en agua



presentan una apariencia homogénea sin grietas y su cambio volumétrico en mínimo.



Fig. 3.1 Apariencia y contracción volumétrica de especímenes.

Propiedades mecánicas de las probetas fraguadas a la intemperie.

La mayoría de las probetas con fraguado en seco presentaron gran discrepancia en su resistencia, ya que presentaban desprendimientos en su exterior, presentando planos predeterminados de falla, es por eso, que no fue posible llevar un recuento de resultados de todas las dosificaciones.

En la tabla 3.2, se presentan los resultados de la resistencia a la compresión simple (q_u), el módulo tangente elástico o módulo de Young (E) y la relación que guarda la resistencia q_u y el módulo E.



Tabla 3.2. Propiedades mecánicas de mezclas con relación A/C = 2.8, edad de 28 días de fraguado Mezcla seca..

Pruebas	γ g/cm ³	w %	MEZCLA SECA			RELACIONES			PROPIEDADES FÍSICAS		
			A %	B %	C %	A/B	A/C	B/C	qu kg/cm ²	E kg/cm ²	E/qu
1	0.83	77.75	70	5	25	14	2.80	0.2	7.7	183.14	23.78
3	0.72	18.53	64.84	12	23.16	5.40	2.80	0.52	1.22	146.36	119.97
4	0.75	13.84	63.36	14	22.64	4.53	2.80	0.62	1.85	199.01	107.57
5	0.74	14.73	66.32	10	23.68	6.63	2.80	0.42	2.8	205.5	73.39
6	0.69	9.9	68.53	7	24.47	9.79	2.80	0.29	1.67	275.25	164.82

Como se observa en los resultados de la tabla 3.2, la resistencia a la compresión simple son menores a las requeridas para esta investigación, los valores obtenidos son muy dispersos, por lo que no se tiene claro una tendencia de los parámetros mecánicos, esto se debe, como se mencionó anteriormente, al agrietamiento por la alta contracción volumétrica de los especímenes.

Propiedades mecánicas de las probetas fraguadas en agua.

Las dosificaciones de las mezclas con fraguado saturado que se proponen, cumplen con una fluidez bombeable, así como una resistencia promedio de 30 kg/cm² para la edad de 28 días, con excepción de la prueba 2 y 14, pues éstas no cumplen con la fluidez debido a su alto contenido de bentonita respecto al agua y del cemento.

En la Tabla 3.3, se presentan las propiedades mecánicas de las mezclas con 28 días de edad con fraguado saturado, la resistencia a la compresión simple (qu), el



módulo tangente elástico (E) y la relación entre la resistencia y el módulo elástico (q_u/E).

Tabla 3.3. Propiedades mecánicas de mezclas, con edad de 28 días de fraguado saturado.

Pruebas	γ g/cm ³	w %	MEZCLA			RELACIONES			SATURADA		
			A %	B %	C %	A/B	A/C	B/C	q_u kg/cm ²	E kg/cm ²	E/ q_u
1	0.830	77.75	70	5	25	14	2.8	0.2	5.59	477.94	85.50
2			70	20	10	3.5	7	2			
3	1.280	135.6	64.84	12	23.16	5.40	2.80	0.52	5.49	612.01	111.48
4	1.280	129.5	63.36	14	22.64	4.53	2.80	0.62	6.83	1021	149.49
5	1.280	129.5	66.32	10	23.68	6.63	2.80	0.42	3.09	512.25	165.78
6	1.280	139.4	68.53	7	24.47	9.79	2.80	0.29	3.004	420.55	140.00
7	1.54	75.93	50	10	40	5	1.25	0.25	68.11	6102	90.00
8	1.25	197.21	70	10	20	7	3.5	0.50	3.92	648	165.00
9	1.45	94.19	55	10	35	5.5	1.57	0.29	35.73	2845	80.00
10	1.37	122.72	60	10	30	6	2	0.33	20.17	2472	123.00
11	1.41	86.16	56.3	12.5	31.2	4.5	1.8	0.40	23.03	1694	74.00
12	1.45	77.52	53	12	35	4.42	1.51	0.34	45.75	4093	89.00
13	1.36	92.7	60	13.3	26.7	4.51	2.25	0.50	18.55	1913	103.00
14	1.31	147.08	60	20	20	3	3	1	15.13	1819	120.00
15	1.27	185.82	66.8	16.6	16.6	4.02	4.02	1	6.14	804	131.00
16	1.22	241.4	71.4	14.3	14.3	4.99	4.99	1	3.66	422	115.00

En la figura 3.2, se observa que tanto la relación agua/cemento y el contenido de agua, influyen en la resistencia a la compresión de las probetas, esto es, si aumenta la relación A/C la resistencia a la compresión simple disminuye, y si el contenido de agua (w%) disminuye la resistencia a compresión aumenta.



Por lo anterior, se concluye que no solo la relación A/C influye en la resistencia de los lodos fraguantes, sino también las condiciones saturadas del fraguado a través del tiempo.

A continuación se presenta la gráfica de Resistencia a la compresión simple vs Relación agua/cemento, ver figura 3.2.

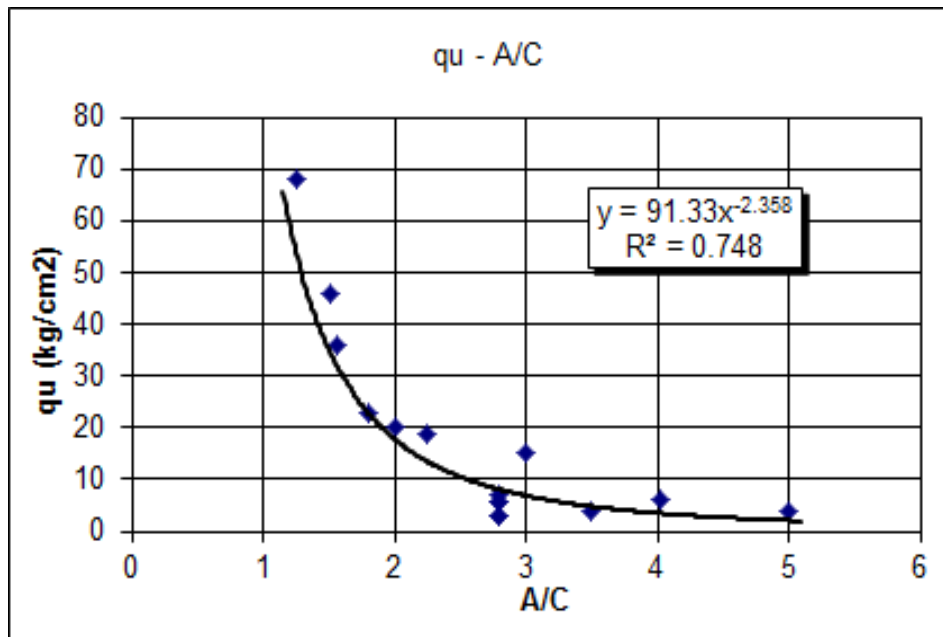


Fig. 3.2. Gráfica de relación Resistencia a la compresión simple vs Relación Agua/cemento.

La figura 3.2, presenta una curva de tendencia de los resultados presentados en la tabla 3.3, la expresión matemática es de tipo exponencial, cuyo coeficiente de correlación es muy cercano a 1.

En la figura 3.3, se presenta la curva de tendencia entre la resistencia a la compresión simple y el contenido de agua, esta ecuación es de tipo exponencial y tiene un coeficiente de correlación de 0.3712.

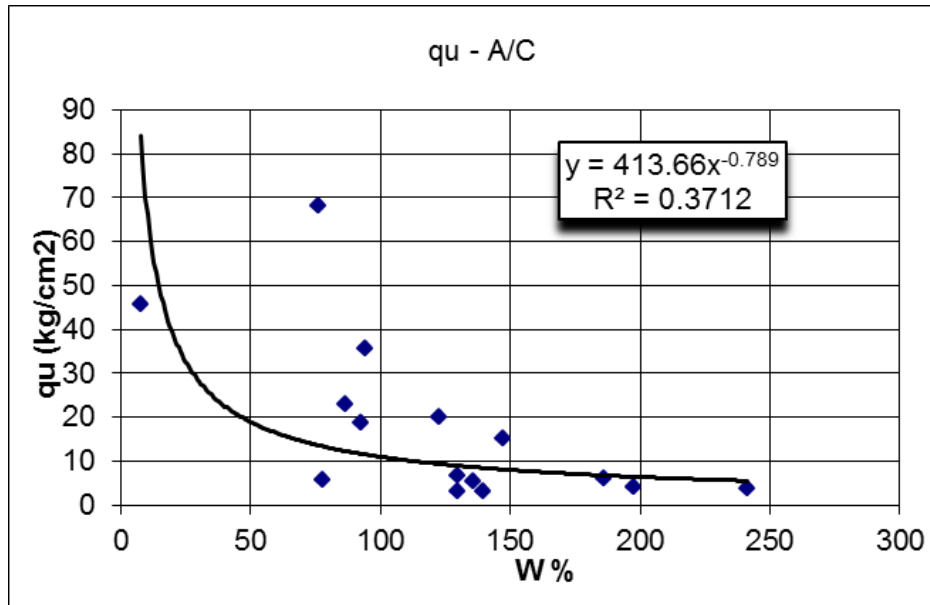


Fig. 3.3. Gráfica de relación Resistencia a la compresión simple vs Relación Agua/cemento.

A continuación se presenta la gráfica del módulo tangencial elástico vs la relación agua/cemento.

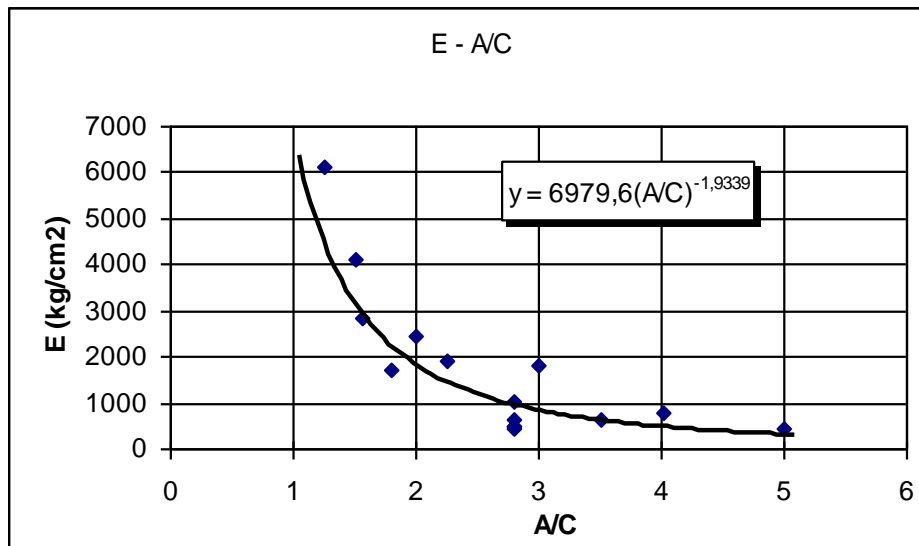


Fig. 3.4. Gráfica de relación Módulo tangente elástico vs Relación Agua/cemento.



Módulo tangente elástico. Con los resultados de la tabla 3.3, se presentan en la figura 3.4 la curva de la relación agua/cemento y el módulo tangente elástico, donde se observa que cuando los valores de la relación A/C disminuye, el valor del módulo E aumenta en forma exponencial.

En la figura 3.5 se presenta la curva de tendencia entre el módulo tangente elástico y el contenido de agua, esta ecuación es de tipo exponencial y tiene un coeficiente de correlación de 0.3279.

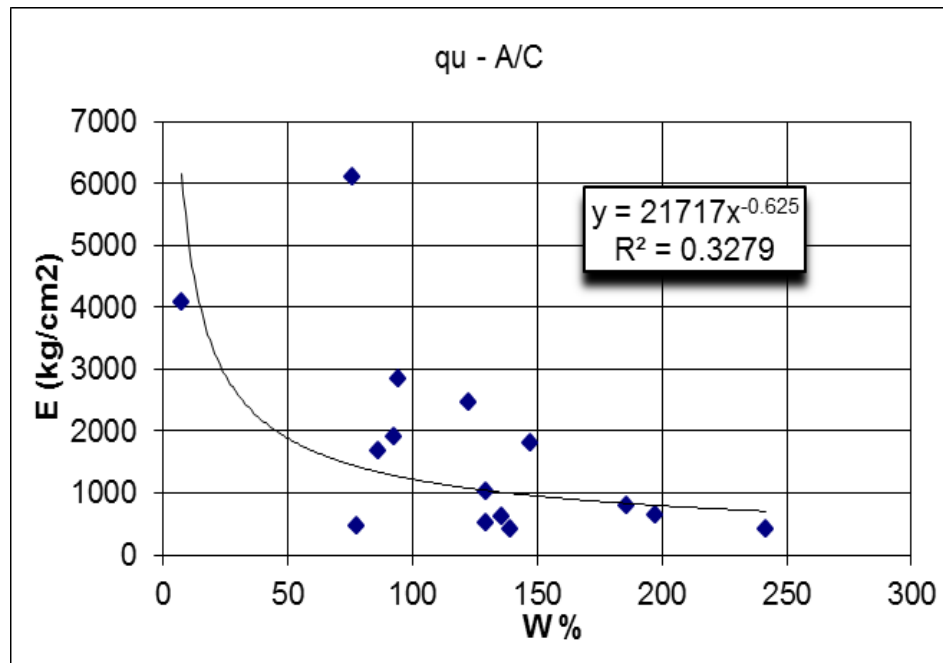


Fig. 3.5. Gráfica de relación Módulo tangente elástico vs Contenido de agua.

De igual manera, las curvas de tendencia 3.4 y 3.5 nos indican que el módulo elástico está en función de la relación de A/C y del contenido de agua de la probeta.



Densidad de la mezcla fraguada.

Unas de las propiedades físicas obtenidas en las pruebas fueron la densidad de la mezcla sin fraguar, lodo, (ρ) y la densidad de la mezcla fraguada, probeta, (γ).

La figura 3.6, indica que la densidad de la probeta aumenta cuando la relación agua/cemento va disminuyendo debido a que se le aplica una mayor cantidad de cemento ya que éste tiene una densidad mayor que la bentonita y el agua.

A continuación se presenta la gráfica del peso volumétrico vs la relación agua/cemento.

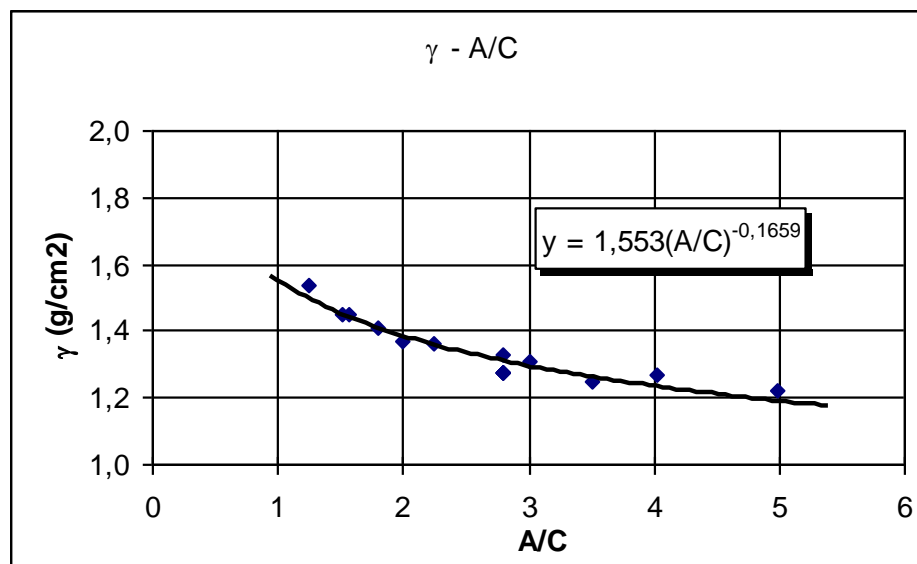


Fig. 3.6. Gráfica de relación Peso volumétrico del espécimen vs Relación Agua/cemento.

En la figura 3.7, se presenta una correlación entre el contenido de agua y la densidad del espécimen.

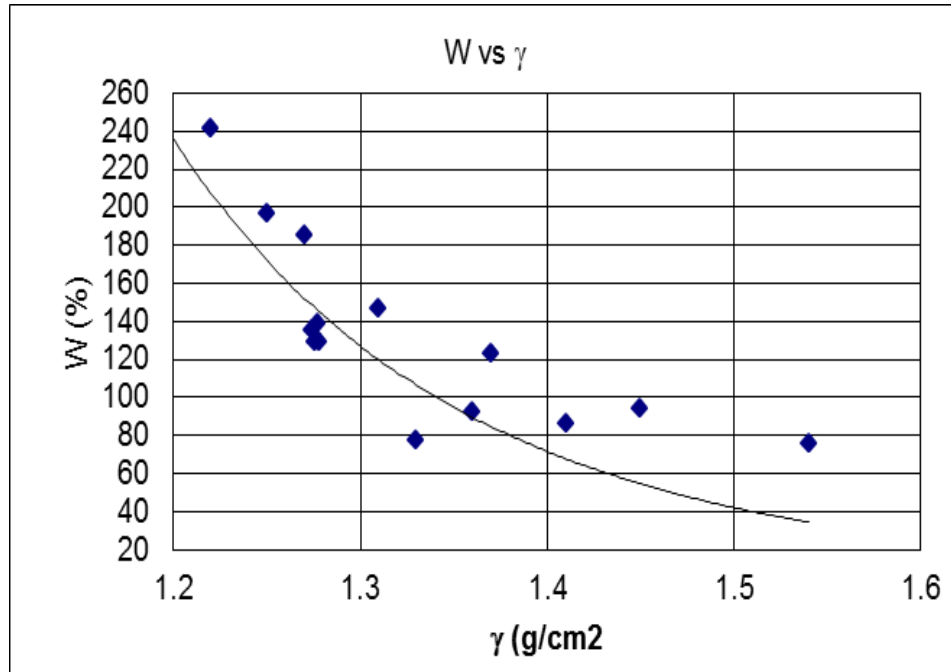


Fig. 3.7. Gráfica de relación Contenido de agua vs Densidad del espécimen.

Densidad del lodo sin fraguar y fraguado.

En la figura 3.8 se correlacionan los valores de las densidades, donde se aprecia que no hay una tendencia lineal, porque existen diferencias entre ellas. Esto es de suma importancia ya que nos indica que existirán cambios volumétricos de las muestras cuando se colocó o inyecte en campo, bajo las condiciones tanto en la intemperie como en inmersión de agua.

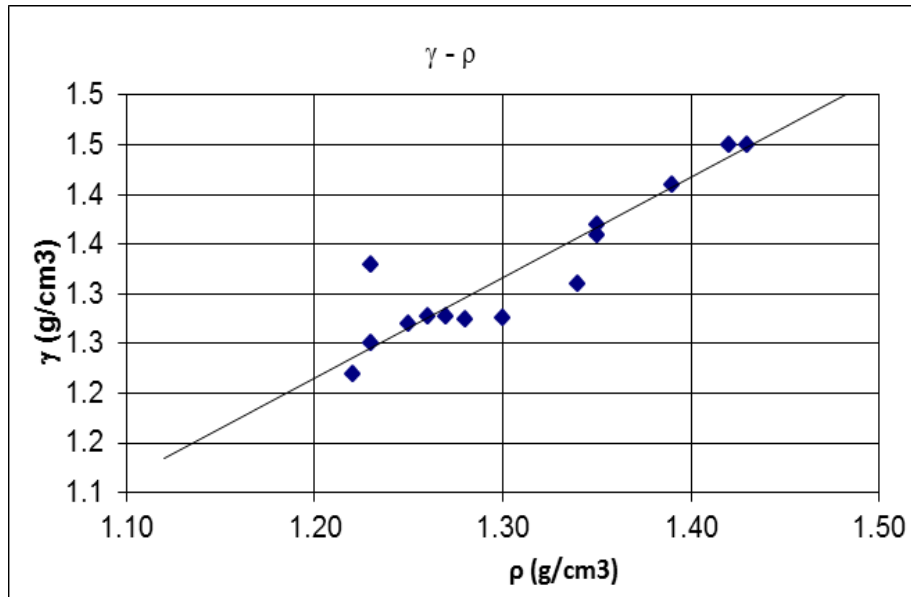


Figura. 3.8. Gráfica de densidades de la probeta vs Densidad del lodo

Como se observa en los valores de las tablas 3.2 y 3.3, la densidad tanto del lodo como de la probeta, dependerán de las condiciones ambientales de fraguado y del grado de sedimentación.

Conclusiones de resultados

Los diferentes proporcionamientos adoptados en esta investigación pueden conducir a mejorar ciertas características mecánicas de las mezclas, sin embargo se afectan las propiedades físicas de éstas. Por ejemplo si se desea aumentar la resistencia a la compresión, se debe de aumentar el porcentaje de cemento de tal manera que la relación A/C no sea menor a 2, ya que esto ocasionaría una sedimentación alta. La sedimentación depende de la relación B/C, a menor relación la sedimentación va aumentando.



En el caso de la fluidez, se recomienda que la relación A/B sea no menor a 3.5 para tener una mezcla fluida.

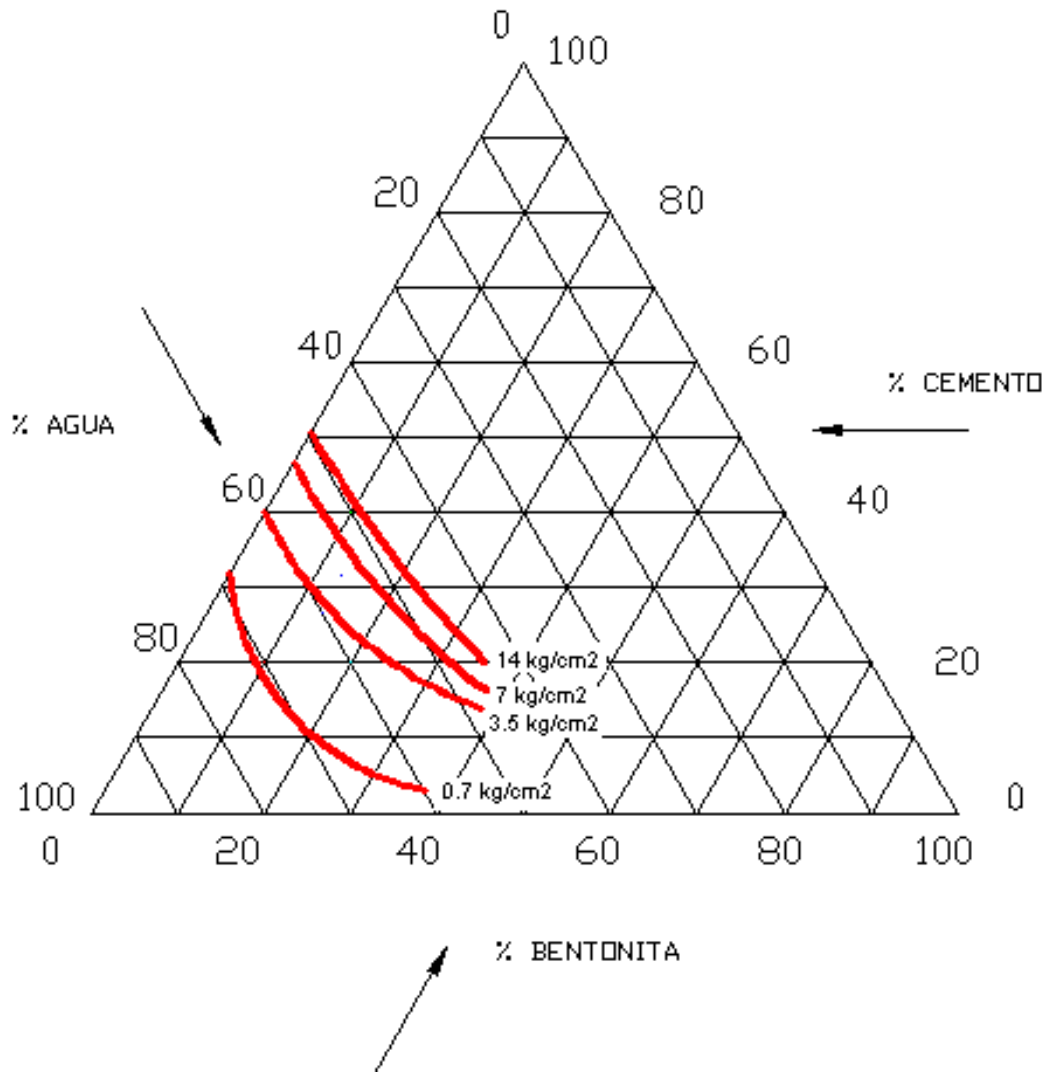
Por lo anterior, se concluye que el diseño de la mezcla de lodos fraguantes depende las proporciones de sus materiales que lo componen, A/C, B/C y A/B.

3.1. Propuestas de diseño de lodos fraguantes.

- Gráfica triangular de Jones.

La investigación experimental realizada por G. K. Jones (1963), en la preparación de lodos le permitió proponer una gráfica triangular de las proporciones de agua, bentonita y cemento, donde se indica las curvas de resistencia a la compresión, figura 3.1.1. Con esta gráfica triangular se obtienen de una manera rápida y sencilla la resistencia en función de los porcentajes de los materiales, se debe seguir la dirección de la traza de cada porcentaje, donde se intersecten las tres trazas de los materiales se obtendrá la resistencia con la ayuda de las curvas iso-resistentes.

La tendencia de las curvas iso-resistentes del triángulo de proporciones está en función del aumento de porcentaje cemento, por lo que los estudios experimentales presentados se ratifican que la relación agua/cemento (A/C) es el parámetro más significativo que influye en la resistencia del lodo fraguante.



- Delimitación de zonas de trabajo por SOLUM y TGC.

Posteriormente en febrero del 2002, las empresas SOLUM - ICA y TGC presentan curvas que limitan las zonas de fluidez de los lodos fraguantes, reduce el área de proporción de los materiales con el fin de delimitar los porcentajes de los materiales en zonas de resistencia y fluidez requeridas en obra, ver figura 3.1.2.

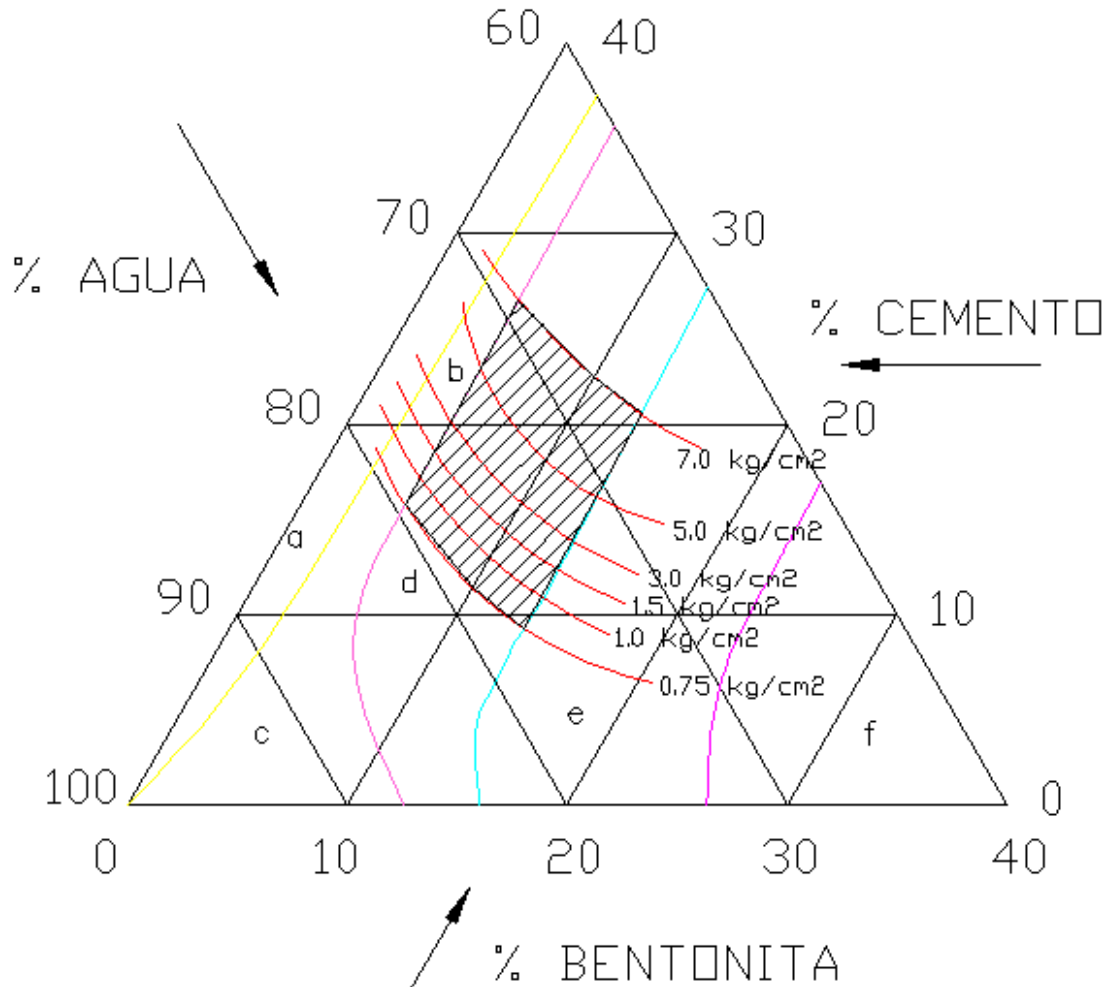


Fig. 3.1.2. Curvas para dosificación de lodos fraguantes (febrero, 2002).

Las áreas divididas en el triángulo por SOLUM Y TGC, las clasificaron de la siguiente manera:

- a) Suspensiones inestables, se asientan.



- b) Suspensiones temporalmente estables, se asientan antes de endurecer.
- c) Geles arcilla-cemento de baja resistencia.
- d) Suspensiones que fluyen libremente, estables y bombeables.
- e) Suspensiones estables y muy viscosas.
- f) Mezclas no trabajables, sólidas.



Zona recomendada para la dosificación de lodos fraguantes, valores experimentales obtenidos por SOLUM Y TGC.

Cabe hacer mención, que la propuesta anterior, es una guía para calcular la dosificación de los componentes agua-bentonita-cemento para la resistencia y fluidez requerida; sin embargo, siempre se deberá verificar mediante mezclas de prueba para las condiciones representativas que prevalecerán en la obra.

- Ampliación de zona de trabajo para la dosificación de mezclas.

Los resultados obtenidos con las pruebas de laboratorio realizadas en este estudio, así como las gráficas de dosificaciones presentadas de investigaciones anteriores, nos permiten ampliar la gama de dosificaciones de mezclas para su aplicación en las obras.

Con la información adquirida se procuró hacer una mayor gama de resultados de mezclas, de esta manera se presenta el triángulo de Jones más detallado para facilitar el uso de lodos fraguantes.



En la figura 3.1.3, se ubican los puntos de las proporciones de las mezclas realizadas en el interior del triángulo de Jones. La zona de utilización se amplía y se redefinen las curvas de isoresistencia en función de los resultados de esta investigación, por lo que se delimitan las zonas de sedimentación, fluidez y resistencia para el uso de otras proporciones de mezclas que cumplan con las propiedades físicas y mecánicas de los lodos fraguantes.

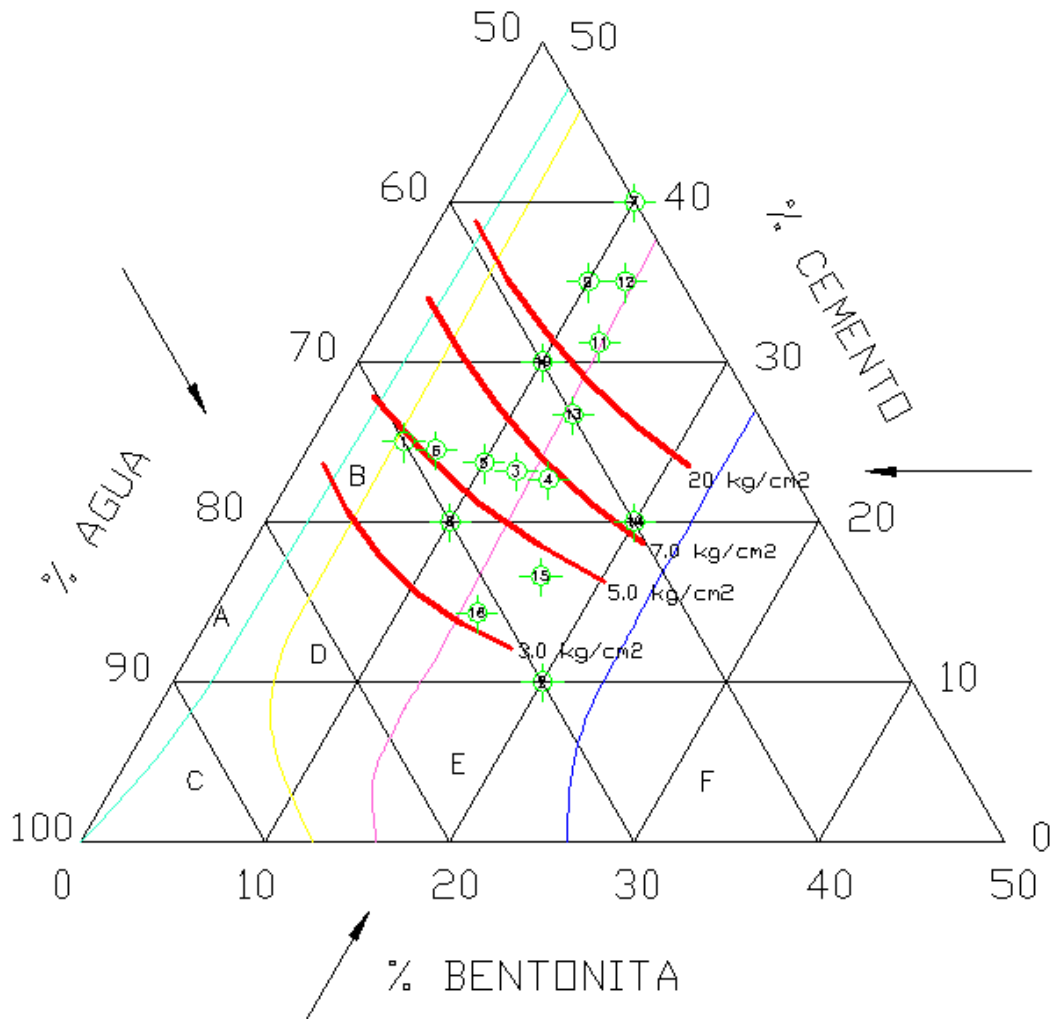


Fig. 3.1.3. Curvas para dosificación de lodos fraguantes (marzo, 2013).



A continuación se hace una descripción de las dosificaciones de las mezclas correspondientes a los puntos marcados dentro del triángulo.

Punto 1. En este punto la mezcla es muy fluida, debido a que su relación $A/B = 14$, el cual indica que es alta ya que contiene poca bentonita, además provocó una sedimentación alta debido a que la relación $B/C = 0.2$ indica que es baja. La relación $A/C = 2.8$, por lo que su resistencia es del orden de 5.5 kg/cm^2 .

Punto 2. El porcentaje de bentonita respecto al cemento B/C es de 2, lo cual provoca que tenga una viscosidad alta, la relación de A/C es de 7 lo cual indica que contiene poco cemento por lo que la resistencia es muy baja, de tal modo que no se realizó prueba de resistencia, además con la relación A/B de 3.5 la fluidez es baja.

Punto 3. Este punto presenta una relación $B/C = 0.52$, indica que se tiene una viscosidad media, la relación $A/C = 2.8$ se determinó en diferentes pruebas debido a que mantienen una resistencia similar como se indica en la tabla 3.3 y la relación $A/B = 5.40$, presenta una sedimentación y fluidez media.

Punto 4. La relación $B/C = 0.62$ presenta características similares al punto 3 al no variar mucho esta relación, por tal motivo esta mezcla tiene una viscosidad media, además presenta una relación $A/C = 2.8$ que se encuentra dentro de la misma zona del punto 3 presentando una resistencia de 6.83 kg/cm^2 , la relación $A/B = 4.53$ indica una sedimentación y fluidez media.

Punto 5. La relación $B/C = 0.42$ nos indica que la mezcla tiene una viscosidad media la cual es fluida, con la relación $A/C = 2.8$, se presenta una resistencia de 3.09 kg/cm^2 y para la relación $A/B = 6.63$, indica una sedimentación media.



Punto 6. Con una relación $B/C = 0.29$, lo cual se tiene una viscosidad baja de tal manera que la mezcla es fluida, además se tiene un relación $A/C = 2.8$, con resistencia de 3.004 kg/cm^2 , ésta se encuentra en la misma zona de las mezclas 1,3,4 y 5 ya que la relación A/C es la misma, $A/B = 9.79$ indica que la sedimentación es media.

Punto 7. La relación que presenta de $B/C = 0.25$, que indica una viscosidad baja por tanto la mezcla es muy fluida, la relación $A/C = 1.25$, nos muestra una resistencia de 68.11 kg/cm^2 , lo cual está muy por encima de las demás muestras, la relación $A/B = 5$, resulta una sedimentación alta.

Punto 8. Los porcentajes de materiales que presenta esta prueba, la colocan en una zona aceptable y, con la relación $B/C = 0.50$, indican una viscosidad media y fluida, la relación $A/C = 3.5$, mantiene una resistencia entre 3 y 5 kg/cm^2 como lo indica la figura 3.1.3, y la relación $A/B = 7$, la mantiene con una sedimentación baja.

Punto 9. Esta mezcla presenta un relación $B/C = 0.29$, por lo tanto tiene una viscosidad baja y una fluidez alta, la relación $A/C = 1.57$, que da una resistencia mayor a 20 kg/cm^2 , además de una relación $A/B = 5.5$, que indica una sedimentación baja.

Punto 10. La relación $B/C = 0.33$, mantiene una viscosidad media y una fluidez alta, además presenta una relación $A/C = 2$, para permanecer con una resistencia de entre 7 y 20 kg/cm^2 , con la relación $A/B = 6$, presenta una sedimentación media.

Punto 11. En este punto la mezcla presenta buena fluidez y baja viscosidad debido a su relación $B/C = 0.4$, además con la relación $A/C = 4.5$, su resistencia



pasa de los 20 kg/cm^2 , como lo muestra la figura 3.1.3, la relación $A/B = 4.5$, una sedimentación baja.

Punto 12. La relación $B/C = 0.34$, se encuentra dentro de la zona donde la mezcla tiene buena fluidez y baja viscosidad, el punto se encuentra en la parte alta de la gráfica con una resistencia mayor a 20 kg/cm^2 debido a que su relación $A/C = 1.51$, la relación $A/B = 4.42$, indica que se tiene una sedimentación alta.

Punto 13. Este punto se encuentra en la zona E, cerca de la zona D aún se puede entender que la mezcla es fluida y con viscosidad media debido a su relación $B/C = 0.5$, con la relación $A/C = 2.25$, la resistencia se encuentra entre 7 y 20 kg/cm^2 , presenta una relación $A/B = 4.51$, la cual determina una sedimentación media.

Punto 14. La ubicación de este punto indica que la mezcla es muy viscosa de tal manera que es poco fluida ya que presenta una relación $B/C = 1$, la resistencia es de 15.13 kg/cm^2 ya que su relación $A/C = 3$, la sedimentación es baja por la cantidad de bentonita que contiene dando una relación $A/B = 3$.

Punto 15. Este punto se encuentra en la zona E ya que tiene una relación $B/C = 1$, la cual indica que es muy viscosa y poco fluida, la relación $A/C = 4.02$, da un resistencia de 6.14 kg/cm^2 , y debido al porcentaje de bentonita se tiene una sedimentación baja teniendo una relación $A/B = 4.02$.

Punto 16. Está mezcla tiene una viscosidad alta y es poco fluida ya que su relación $B/C = 1$, la relación $A/C = 4.99$, mantiene la resistencia entre 3 y 5 kg/cm^2 , la sedimentación que presenta es media con una relación $A/B = 4.99$.



Con los resultados presentados en el triángulo de proporciones de Jones y la zona delimitada por SOLUM y TGC, se pudo identificar las zonas de menor sedimentación y mayor fluidez, concluyendo que existe una zona óptima de trabajo para los lodos fraguantes. La utilización de estas zonas está en función de las propiedades tanto físicas como mecánicas requeridas en la obra, por lo que es de suma importancia precisar lo mejor posible la dosificación del diseño de la mezcla en función de las relaciones A/C, B/C y A/C, dentro de los rangos aquí recomendados.



4. PROPUESTAS DE UTILIZACIÓN EN LA INGENIERÍA CIVIL.

4.1. Uso de pantalla perimetral impermeable de lodo fraguante.

Durante la construcción del túnel emisor oriente (TEO) fue necesario la construcción de lumbreras para dar acceso vertical hasta llegar a la profundidad de 16.9 m, las condiciones del sitio indican que se presenta un nivel de aguas freáticas (NAF) de 4.00 m de profundidad, por lo que hace necesario evitar la infiltración del agua a la lumbrera, el diseño de la lumbrera es por medio de un muro Milán el cual consiste precisamente en construir un muro armado en todo el perímetro de ésta, con el objetivo de soportar los esfuerzos que puedan afectar su construcción.

La presencia de una arcilla preconsolidada superficial es latente debido a las sobrecargas, rellenos y el citado bombeo profundo que acelera el proceso, pasando de ser arcillas normalmente consolidadas a arcillas con un cierto grado de preconsolidación. Este fenómeno origina que, durante el procedimiento constructivo de muro Milán, y basándose en experiencias de proyectos aledaños, se pierda el fluido de estabilización en grandes volúmenes por fisuras. Así entonces, es posible que durante la inundación con lodo bentonítico de la zanja, se atraviesen y activen fisuras preexistentes y que entonces se fugue el lodo a través de dichas grietas. Así entonces, las presiones hidráulicas que se desarrollan por acumulación brusca de lodo bentonítico dentro de grietas preexistentes favorecen la propagación y extensión de las mismas.

La construcción de la pantalla de lodo fraguante previo a la excavación de la zanja para muro Milán, no tiene ninguna función estructural sino que pretende ser una barrera impermeable que confine perimetralmente a las zanjas de muro Milán y



En la figura 4.1.1, se muestra el proceso constructivo de la impermeabilización con lodo fraguante, el muro Milán tiene una profundidad de 27.00 m, la lumbrera está a una profundidad de 16.90 m y 8.80 m de profundidad, de tal forma que la pantalla se proyecta a una profundidad de 15.00 m y a 2.00 m de distancia del muro Milán, las especificaciones del terreno se presentan en la siguiente tabla 4.1.1.

El modelo geotécnico conformado consta de 5 unidades estratigráficas donde se han agrupado las propiedades obtenidas de pruebas de laboratorio a diferentes profundidades de la estratigrafía. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.1.1. Resultados de laboratorio.

Estrato	Descripción	Prof. (m)	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	v	Ko
A	Relleno heterogéneo: arcilla, gravas, arena, basura.	0	16.0	20.0	28	0.25	0.60
		2					
B	Arcilla blanda de alta plasticidad, con lentes de arena limosa.	2	12.0	40.0	5	0.40	0.80
		26					
C	Limo arenoso de consistencia dura.	26	13.5	75.0	5	0.30	0.54
		32					
D	Arcilla de alta plasticidad, de consistencia blanda a firme.	32	13.3	100.0	4	0.30	0.80
		40					
E	Limo de alta plasticidad de consistencia dura con arena.	40	12.5	120.0	15	0.25	0.54
		50					

4.1.1. Dosificación de lodo fraguante.

La propuesta de la dosificación del lodo fraguante para la impermeabilización del muro Milán por parte de SOLUM Y TGC es de:

- 72% agua.



- 23% cemento.
- 5% bentonita.

La cual deberá corroborarse con pruebas de laboratorio realizadas en especímenes muestreados en obra.

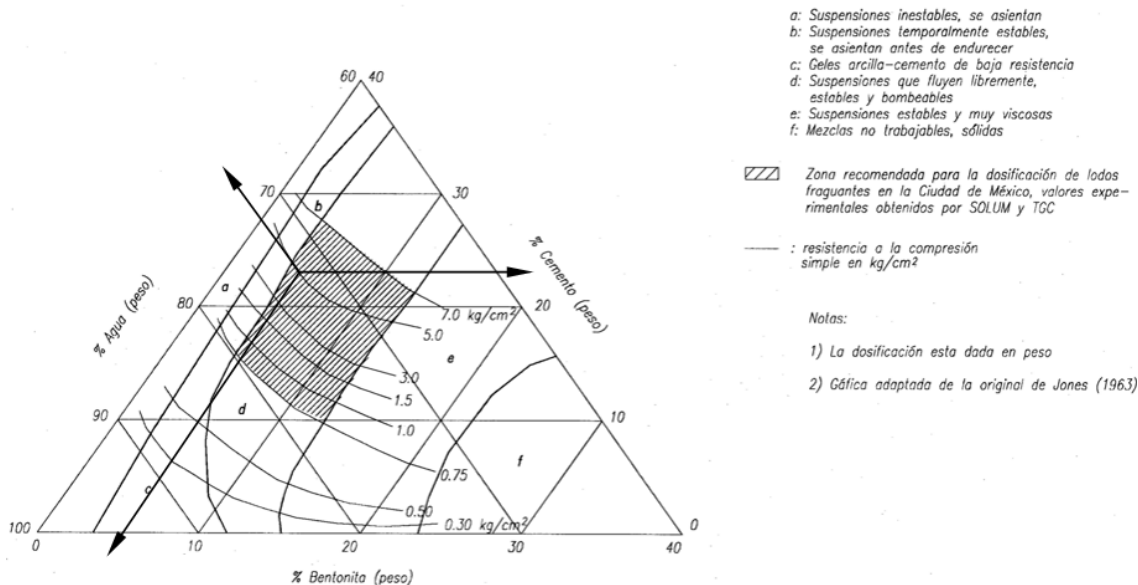


Fig. 4.1.1.1. Gráfica de dosificaciones por SOLUM Y TGC.

La dosificación propuesta para esta pantalla de acuerdo con los resultados de esta investigación, podría tener problemas de sedimentación ya que la relación A/B es de 14.4, y con la relación B/C = 0.22, indica una viscosidad baja. El problema de sedimentación por esta dosificación, provoca que el lodo comience a perder homogeneidad y los materiales se separen por gravedad, perdiendo así las propiedades por la cual fue diseñada.

De acuerdo a esta investigación se propone la siguiente dosificación:



- 70% agua.
- 10% bentonita.
- 20% cemento.

Se bajan los porcentajes de agua y cemento para darle más importancia a la bentonita. Con esta dosificación se sigue manteniendo una buena fluidez y disminuimos el problema de sedimentación, así mismo mantenemos una resistencia entre 3 y 5 kg/cm². La mezcla propuesta, además de disminuir problemas mencionados, también ayudaría a bajar costos debido a que le quitamos cemento y aumentamos bentonita.

4.2. Inyecciones de compensación.

Dentro de la ampliación del metro de Madrid prevista para el periodo 1995-1999 se incluye la prolongación de la línea 1 hasta la Villa de Vallecas. El inicio de la prolongación se desarrolla en zonas de poca densidad urbana y las tres estaciones que comprende la ampliación se han situado de forma que puedan realizarse a cielo abierto. A partir del paso bajo las vías de RENFE el túnel discurre ya bajo la propia villa caracterizada por calles estrechas y edificios de dos o tres niveles, con un sótano como máximo y de medidas pequeñas en plana, del orden de la propia excavación. Sus cimentaciones suelen ser zapatas aisladas o corridas, generalmente poco o nada armadas que frecuentemente no salvan toda la capa de relleno existente.

El sistema de excavación del túnel es el llamado Sistema Tradicional de Madrid, la evolución del más conocido "método belga".



La excavación de cualquier túnel provoca un efecto de pérdida de suelo, que es función de una serie de factores tales como el método de excavación escogido, la velocidad de avance con que ésta se desarrolle, la naturaleza del suelo etc. El efecto de esta pérdida de suelo está estudiado y la teoría permite predecir muy aproximadamente cual es la cubeta de asiento correspondiente a cada excavación. Además de saber en planta cual es la cubeta de asientos correspondiente a cada posición del frente de excavación del túnel, también se puede evaluar que asiento se va a producir en cada punto de ella y combinando ambos, qué volúmenes de suelo se verán afectados.

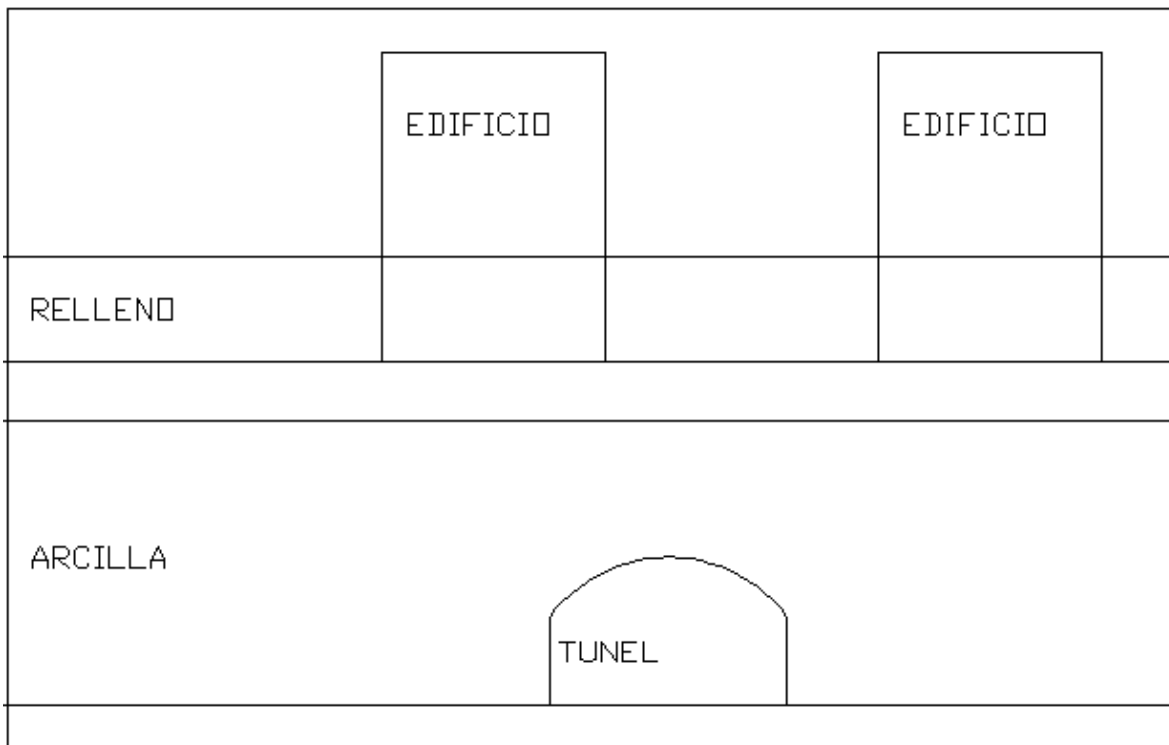


Figura 4.2.1. Sistema Tradicional de Madrid



El siguiente paso es estudiar qué estructuras se hallan afectadas por los asentamientos previstos. Hay que considerar conjuntamente las pendientes de la superficie de asentamientos y las tolerancias de las estructuras afectadas tanto en los asentamientos como en las deformaciones angulares que se les van a imponer determinando una gradación de los daños consecuencia de estos asentamientos.

El objetivo de las inyecciones de compensación es introducir en el terreno de forma controlada, un volumen de lechada suficiente para compensar el efecto de la pérdida de suelo y poder combatir los asentamientos de las estructuras existentes.

El proceso de inyección consta de tres fases:

- Acondicionamiento.
- Compensación durante la excavación.
- Compensación después de la excavación.

La primera fase debe realizarse antes del inicio de la excavación. Tiene como objetivo tratar el terreno previo a su afectación por la excavación del túnel. Prácticamente significa elevar levemente toda el área de tratamiento hasta un máximo de 3 a 4 mm.

La segunda fase puede incluir una prefase previa a la afectación por la excavación, cuyo objetivo es provocar otra sobre elevación, controlada y uniforme, de forma que no provoque distorsiones angulares inadmisibles y que en función de estas puede llegar hasta 1 ó 1.5 cm. Este paso es optativo y se debe de utilizar con mucho tino.

La tercera fase tiene la misma metodología que la segunda, sólo cambia el que en este caso se combaten los asentamientos diferidos fruto de la excavación pero posteriores a ella.



Las mezclas utilizadas deberán tener una dosificación como la siguiente:

- 63.17% agua.
- 34.74% cemento.
- 2.08% bentonita.

4.3. Instrumentación geotécnica.

Para monitorear el comportamiento del subsuelo durante la construcción de una lumbrera, fue necesario colocar la siguiente instrumentación geotécnica: a) cuatro inclinómetros verticales (IV) a 160 m de profundidad y una estación piezométrica compuesta de cuatro piezómetros de cuerda vibrante (PCV) a diferentes profundidades (Fig. 3). La profundidad, tipo y características de la instrumentación, fue determinada por CONAGUA y se siguieron las especificaciones establecidas para su instalación.

Los objetivos de la colocación de la instrumentación fueron: el monitoreo de la estabilidad de la excavación mediante la colocación de los inclinómetros, y el control de las condiciones hidráulicas del subsuelo durante la excavación por medio de la estación piezométrica. La descripción de los trabajos se presenta a continuación.

4.3.1. Inclinómetros verticales.

Se colocaron cuatro inclinómetros a 160 m para monitorear los movimientos radiales respecto de la excavación, distribuidos de la siguiente manera: dos en el muro milán y dos en terreno natural circundante.



4.3.2. En muro Milán.

Antes del colado de los tableros, el constructor colocó un tubo de PVC de 3 pulgadas de diámetro en medio del armado hasta cubrir los 120 m de muro. Una vez que se bajó el armado y previo a su colado, se rellenó el interior con arena fina colocada a volteo, con el fin de evitar posibles colapsos de la tubería. Al finalizar las maniobras de colado de los tableros y una vez que el concreto alcanzó la resistencia de proyecto (35,000 kPa) se perforó con broca tricónica en tres pasos: primero con broca de 2 15/16 pulgadas para retirar la arena y parte de la tubería de 3 pulgadas y posteriormente se reperforó con broca de 4 ½ pulgadas hasta 160 m de profundidad.

Alcanzada esta profundidad se introdujo la tubería de inclinómetro (tubería tipo ABS de 73 mm de diámetro exterior y 3.05 m de longitud, (Fig. 4) colocando una punta metálica y un tapón de fondo. Para la maniobra de introducción de los tramos fue necesario colarle al primer tramo 1 m de concreto simple para que sirviera de lastre al momento de bajar los tramos subsecuentes. Para facilitar la maniobra de introducción se llenó con agua el interior de los tubos para que bajaran por peso propio. Con el fin de asegurar el contacto entre la perforación y la tubería de inclinómetro se inyectó una mezcla de grout en el espacio anular en una proporción 15%, 5% y 80% (cemento, bentonita, agua).

4.3.3. En suelo.

De manera similar, para los inclinómetros en suelo se perforó primero en 2 15/16 pulgadas y se reperforó después en 4 ½ pulgadas hasta 160 m de profundidad. Las maniobras de instalación fueron las mismas que se empelaron para los inclinómetros en muro milán. Para asegurar el contacto entre muro milán y tubería,



así como entre suelo y tubería se inyectó una mezcla de grout en el espacio anular en una proporción 15%, 5% y 80% (cemento, bentonita, agua), (Fig. 5).

Es importante mencionar que para bajar la tubería de inclinómetro hasta 160 m resulta útil llenar su interior con agua limpia para que baje por gravedad y que se use cable de acero unido a cada tramo para manejarla adecuadamente (Fig. 6). Cuando se comenzaron a construir los dos inclinómetros en muro milán la excavación del núcleo de la lumbrera estaba en 16 m, por lo que se tuvo que hacer una estructura metálica anclada al paño interior de la lumbrera para que sirviera como plataforma de trabajo a la brigada de perforistas (Fig. 7)



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

Comúnmente se piensa que la mejoría en las propiedades mecánicas en un suelo tratado con cemento, se debe principalmente al endurecimiento del cemento por hidratación, por lo que se considera que el suelo es un componente químicamente inerte. En esta investigación se pudo demostrar que la bentonita, el suelo utilizado, presenta reacciones adicionales entre los componentes del cementante, que contribuye no solamente a la unión entre las partículas del suelo y las de cemento endurecido. Al mismo tiempo, la bentonita que participa en tales reacciones podría sufrir alteraciones en su consistencia y en sus propiedades mecánicas.

Por lo que es de suma importancia no solo la proporción de los materiales a utilizar para el diseño de la mezcla, sino el proceso de preparación del lodo fraguante. En esta investigación se concluye que el orden en la hidratación de los componentes y del mezclado de éstos, el procedimiento de la exclusión del aire atrapado durante el vaciado, las condiciones de temperatura y humedad durante el fraguado y la edad del lodo fraguante, son factores determinantes para lograr una mezcla adecuada, ya que influyen en sus propiedades físicas y mecánicas de los lodos; las propiedades que se afectan son: la consistencia, fluidez, sedimentación, agrietamiento, densidad, módulo de elasticidad y resistencia.

A continuación, se explica la importancia de los factores de preparación que influyen en las propiedades físicas y mecánicas de los lodos fraguantes, y se dan las conclusiones al respecto.



- **Proceso de preparación.** Los procesos de preparación es un factor determinante para lograr un lodo fraguante competente, la consistencia depende del orden de hidratación de los materiales, ya que tanto el cemento y la bentonita producen reacciones químicas importantes durante la hidratación, se concluyó que existe gran diferencia, si se hidrata primero la bentonita y después se le agrega el cemento (llamada “mezcla húmeda”), o si se realiza el proceso de preparación sugerido en este trabajo, el cual consiste en mezclar cemento-bentonita (llamada “mezcla seca”) sin agua hasta lograr una coloración uniforme, para después hidratar la mezcla. Resultando que la “mezcla seca” presenta una consistencia homogénea, con mayor fluidez, menos sedimentación y menos agrietamiento, debido a que el cemento inhibe químicamente los porcentajes tan altos de humectación de la bentonita.
- **Exclusión del aire atrapado.** Durante el vaciado de la mezcla en los recipientes se observó la inclusión del aire a la mezcla, lo cual provocan oquedades en la estructura del lodo fraguante cuando se solidifica, presentando heterogeneidad en la estructura y disminución en la resistencia. Para evitar esta situación en nuestros especímenes estudiados, se agitó vigorosamente el lodo, expulsando las burbujas de aire de la mezcla. Por lo anterior, se concluye que es de suma importancia llevar a cabo en campo, un proceso de exclusión de aire en el depósito del lodo fraguante.
- **Condiciones de fraguado.** En este trabajo de investigación se presentaron dos procedimientos diferentes en la etapa de fraguado, uno dejando la mezcla fraguar al intemperie y el otro en inmersión con agua, los especímenes fraguados al intemperie presentaron altas contracciones



volumétricas y por ende agrietamientos en toda su estructura, en cambio los especímenes curados en agua, presentaron una consistencia homogénea.

Por lo anterior, se concluye que las condiciones ambientales del sitio (humedad y temperatura) donde se depositará el lodo fraguante, es un factor muy importante para lograr las propiedades mecánicas requeridas.

- **Edad del lodo fraguante.** La intensidad de las reacciones químicas que se presentan en los lodos fraguantes, está en función de la edad, por lo que las propiedades físicas y mecánicas de estos lodos cambian durante el tiempo de fraguado. La fluidez, la densidad y la sedimentación son propiedades físicas que cambian a gran escala en un tiempo corto (minutos a horas), en cambio la contracción volumétrica, el agrietamiento y el aumento de resistencia, lo hacen en tiempos mayores (horas a días), por lo que se concluye, que es muy importante fijar los tiempos de edad para limitar las propiedades físicas y mecánicas de lodos en su uso, y así poder evaluar la calidad de este en periodos programados de trabajo, por ejemplo en esta investigación se fijó a 28 días de edad para la cuantificación de las propiedades mecánicas.

En la etapa de interpretación de resultados, graficas del capítulo 4, se concluye que dentro de los porcentajes de las dosificaciones estudiadas, existe dependencia entre las relaciones de los componentes de la mezcla con los resultados de las propiedades físicas y mecánicas.

Se concluye que:



- La densidad del lodo fraguante aumenta cuando la relación agua/cemento disminuye, y que esta densidad aumenta durante el proceso de fraguado.
- La fluidez del lodo depende de la relación A/B, a menor valor A/B mayor fluidez.
- La sedimentación está en función de la relación B/C, a menor relación la sedimentación aumenta.
- El módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión simple, depende de la relación A/C, si A/C aumenta disminuyen estas propiedades mecánicas, sin embargo hay otro factor muy importante que influye, que es el contenido de agua ($w\%$), al disminuir el porcentaje de humedad aumenta el módulo de resistencia.

Por lo anterior, se concluye que un buen diseño de una mezcla de lodos fraguantes depende de las proporciones de sus materiales que los componen, A/C, B/C y A/B, y que estas relaciones influyen en las propiedades físicas y mecánicas.

5.2 Recomendaciones

En el capítulo 4, se presentan algunos de los usos en la construcción de los lodos fraguantes, estas aplicaciones son para la estabilización, impermeabilización y fijación de instrumentación, en cada una de estas se proponen dosificaciones diferentes, y éstas están basadas en el triángulo de Jones (1963) y la región de trabajo recomendado por TGC y SOLUM (2002), sin embargo consideramos que es necesario limitar los rangos y las relaciones (A/C, B/C y A/B) de las



dosificaciones con el fin de mejorar las propiedades físicas y mecánicas solicitadas para cada caso.

A continuación se enumeran algunas recomendaciones en las proporciones de los materiales para el uso de los lodos fraguantes, obtenidas en esta investigación.

- Para considerar que el lodo fraguante sea bombeable es necesario que la mezcla tenga una fluidez menor a los 40 segundos en la prueba del cono Marsh, se recomienda que la relación A/B sea no menor a 3.5.
- Se debe tener cuidado con el fenómeno de sedimentación, para tiempos de fluidez menores de 40 segundos en la prueba del cono Marsh, el grado de sedimentación es alto; para los valores del cono Marsh entre 40 a 50 segundos, el grado de sedimentación se consideró medio, y para tiempos mayores de 50, el grado de sedimentación es bajo.
- En nuestras pruebas realizadas se mantuvo una relación Agua/Cemento (A/C) entre 1.25 a 3.5, observándose que la mezcla presenta una consistencia fluida y una resistencia aceptable a los propósitos establecidos.

Se recomienda que las propiedades físicas y mecánicas de los lodos fraguantes se estimen en función de las condiciones ambientales del sitio, temperatura y humedad, así como de la inclusión del aire durante el vaciado o inyectado, y del tiempo de reposo durante el fraguado.

Cabe hacer mención, que estas propuestas son una guía para diseñar la dosificación de los componentes agua-bentonita-cemento para las propiedades



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

físicas y mecánicas requeridas; sin embargo, siempre se deberá verificarse mediante pruebas de laboratorio, para las condiciones representativas que prevalecerán en la obra.



REFERENCIAS.

1. MANUAL DE CONSTRUCCIÓN GEOTÉCNICA I Y II, SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS, A.C.
2. MECÁNICA DE SUELOS 1, JUÁREZ BADILLO Y RICO RODRÍGUEZ, ED. LIMUSA.
3. XI REUNIÓN NACIONAL DE MECÁNICA DE SUELOS, PUEBLA 1998, SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS.
4. RESULTADO DE ENSAYES DE RESISTENCIA EN MEZCLAS DE BENTONITA-CEMENTO-AGUA, JUAN LUIS UMAÑA ROMERO Y RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO.
5. MEMORIA DE CÁLCULO GEOTÉCNICO “LUMBRERA MARAVILLAS”, PROYECTO EJECUTIVO CAPTACIONES TEO, ICA INGENIERÍA, COTRISA.