

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

**ESTUDIO DE MEZCLAS DE INYECCIÓN INCORPORANDO AL
CEMENTO MATERIALES COMO CANGAHUA, BENTONITA,
CRUDO DE CALIZA-ARCILLA O ADITIVOS PARA
ESTABILIZACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LOS SUELOS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN
ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS DE LA CONSTRUCCIÓN**

MARITZA ALEXANDRA CÓRDOVA SALGADO
mcordovasalgado@yahoo.com

DIRECTOR: ING. MARIO GUILLERMO CASTILLO SALGADO
casal728@gmail.com

Quito, Julio 2014

DECLARACIÓN

Yo, Maritza Alexandra Córdova Salgado, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

MARITZA ALEXANDRA CÓRDOVA SALGADO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Maritza Córdova, bajo mi supervisión.

Ing. Mario Guillermo Castillo
Salgado

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente al ser superior que en su infinito amor me concedió el milagro de vivir, y con la vida su generosa dádiva de fe, esperanza y amor. Sin vida no me sería posible disfrutar la cercanía de los seres más especiales que han constituido en mi camino una influencia positiva , entre ellos puedo mencionar a mis padres, hermanos y aquellos amigos incondicionales que han sido más que hermanos en determinado momento, a quienes profeso mi más sincero agradecimiento.

Hago extensivo mi agradecimiento al director del presente Proyecto, Ing. Mario Castillo Salgado por su apoyo, paciencia y exigencia, pues rememoró en mí el valor de llevar a cabo las actividades importantes con seriedad, honestidad y calidad; y a los maestros que impartieron sin duda sus mejores conocimientos durante el período académico.

Así también me es grato mencionar a personas de espíritu generoso, con quienes he coincidido en el ejercicio de la profesión, han significado una fuente rica de conocimientos, experiencia, y han estado siempre prestos a contribuir en mi formación y desarrollo: Ing. Fabián Alvear, Ing. Hugo Bonifaz, Sr. Franklin Grijalva y Sr. Mario Andrade.

DEDICATORIA

A mis padres Miguel y Rocío, quienes han impartido en mí desde su ejemplo y temor a Dios, principios de humildad, honestidad, integridad y respeto.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA	IV
BIBLIOGRAFÍA.....	99
ANEXOS.....	103
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS	XI
RESUMEN	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XIV
OBJETIVOS	XV
OBJETIVO GENERAL	XV
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	XV
JUSTIFICACIÓN	XVI
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES Y DEFINICIONES	1
1.1 DEFINICIÓN DE SUELO Y SU FORMACIÓN	1
1.2 PROPIEDADES DEL SUELO QUE SE BUSCA MEJORAR	2
1.2.1 Estabilidad volumétrica.....	3
1.2.2 Resistencia al esfuerzo cortante	3

1.2.3 Permeabilidad	3
1.2.4 Compresibilidad.....	4
1.3 MÉTODOS DE MEJORAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	4
CAPÍTULO 2	8
INYECCIÓN DE SUELOS	8
2.1 ANTECEDENTES	8
2.2 MEDIOS INYECTABLES.....	9
2.2.1 Obras de fábrica	10
2.2.2 Medio rocoso.....	10
2.2.3 Suelos incoherentes.....	10
2.2.4 Suelos arcillosos blandos	11
2.3 TIPOS DE INYECCIÓN.....	11
2.3.1 PANTALLAS IMPERMEABLES	12
2.3.2 TAPETES DE CONSOLIDACIÓN	13
2.3.3 Inyecciones de relleno.....	14
2.3.4 Inyecciones de contacto	14
2.3.5 Inyección mediante tubos manguito	15
2.3.6 Inyección por hidrofracturamiento	17
2.4 MEZCLAS INYECTABLES.....	18

2.4.1 MEZCLAS DE INYECCIÓN INESTABLE	20
2.4.2 MEZCLAS DE INYECCIÓN ESTABLE.....	20
CAPÍTULO 3	21
PARÁMETROS DE MEZCLAS DE INYECCIÓN ESTABLES Y SUS COMPONENTES	21
3.1 ESTABILIDAD	22
3.2 VISCOSIDAD	22
3.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	23
3.4 COMPONENTES DE MEZCLAS DE INYECCIÓN ESTABLES FABRICADAS EN LABORATORIO	24
3.4.1 CEMENTO	25
3.4.2 BENTONITA.....	27
3.4.3 AGUA	28
3.4.4 CANGAHUA.....	30
3.4.5 CRUDO DE CALIZA Y ARCILLA	34
3.4.6 ADITIVOS.....	34
CAPÍTULO 4	38
ELABORACIÓN DE LECHADAS DE INYECCIÓN EN LABORATORIO.....	38
4.1 NORMAS A SEGUIR PARA LA FABRICACIÓN DE LECHADAS.....	38

4.2 DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTO Y EQUIPO UTILIZADO EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	39
4.2.1 MEZCLADO MECÁNICO DE LAS LECHADAS DE INYECCIÓN	39
4.2.1.1 Equipo necesario y procedimiento para el mezclado mecánico de la lechada en laboratorio	39
4.2.1.2 Observaciones sobre el procedimiento de mezclado mecánico de lechadas en laboratorio	40
4.2.2 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LECHADAS EN LABORATORIO	40
4.2.2.1 Observaciones sobre la determinación de la densidad de lechadas en laboratorio.	41
4.2.3 MEDICIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LECHADAS EN LABORATORIO	41
4.2.3.1 Equipo necesario y procedimiento para medición de la viscosidad de lechadas en laboratorio	41
4.2.3.2 Observaciones sobre la medición de la viscosidad de lechadas en laboratorio	42
4.2.4 Procedimiento para la determinación de la estabilidad de lechadas en laboratorio	42
4.2.4.1 Observaciones sobre la determinación de la estabilidad del fluido:	42
4.2.5 Medición de la resistencia a la compresión mediante rotura de probetas cúbicas	43
4.2.5.1 Equipo necesario y procedimiento para medición de la resistencia a la compresión.....	43

4.2.5.2 Observaciones sobre el procedimiento para medir la resistencia a la compresión de probetas cúbicas.....	43
---	----

CAPÍTULO 5.....45

RESULTADOS DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL DE DOSIFICACIÓN DE LECHADAS DE INYECCIÓN45

5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO PURAS.....	45
---	----

5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON BENTONITA.....	49
---	----

5.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON ADITIVO.....	57
---	----

5.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA.....	65
--	----

5.4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 50% E INCORPORACIÓN DE ADITIVO.....	70
---	----

5.4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 100% E INCORPORACIÓN DE ADITIVO.....	72
--	----

5.4.3 OBSERVACIONES DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA E INCORPORACIÓN DE ADITIVO.....	78
--	----

5.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA ARCILLA.....	78
---	----

5.5.1 OBSERVACIONES DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA ARCILLA E INCORPORACIÓN DE ADITIVO.....	84
---	----

5.6 PRESENTACIÓN DE MEZCLAS COMPATIBLES EN FUNCIÓN DE VISCOSIDAD Y ESTABILIDAD.....	85
5.7 DOSIFICACIÓN PARA ELABORAR 1m ³ DE LECHADA.....	85
5.8 ANÁLISIS DE COSTOS DE LECHADAS ÓPTIMAS Y DETERMINACIÓN DE LA LECHADA MÁS ECONÓMICA	88
5.8.1 PRECIO UNITARIO ACTUAL DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DE LECHADAS	89
5.8.2 RECOMENDACIÓN DE PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CANGAHUA .	89
5.8.3 DETERMINACIÓN DEL COSTO UNITARIO DE CANGAHUA	90
5.8.3.7 Costo unitario de cangahua.....	91
5.8.4 PRECIO UNITARIO DE LECHADAS ÓPTIMAS	92
CAPÍTULO 6	93
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

FIGURA 2. 1 SECUENCIA DE PERFORACIÓN E INYECCIÓN DE BARRENOS PANTALLA.....	13
FIGURA 2. 2 ETAPAS DE INYECCIÓN DE TAPETES DE CONSOLIDACIÓN.	14
FIGURA 2. 3 INYECCIÓN DE CONTACTO CONCRETO-ROCA EN LA BÓVEDA DE UN TÚNEL	15
FIGURA 2. 4 EQUIPO TIPO PARA LA INYECCIÓN CON TUBOS MANGUITO .	16
FIGURA 2. 5 TIPOS DE INYECCIÓN DE SUELOS BLANDOS.....	18
TABLA 1. 1 MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS.....	5
TABLA 3. 1 RELACIÓN EMPÍRICA ENTRE SPT Y VARIAS PROPIEDADES DEL SUELO.....	24
TABLA 3. 2 TOLERANCIAS DE CONCENTRACIONES DE IMPUREZAS EN EL AGUA DE MEZCLAS.	30
TABLA 5. 1 LECHADAS DE CEMENTO PURAS.....	46
TABLA 5. 2 LECHADAS DE CEMENTO CON BENTONITA 1%	50
TABLA 5. 3 LECHADAS DE CEMENTO CON BENTONITA 2%	52
TABLA 5. 4 LECHADAS DE CEMENTO CON BENTONITA 3%	54
TABLA 5. 5 LECHADAS DE CEMENTO CON ADITIVO 1%.....	58

TABLA 5. 6 LECHADAS DE CEMENTO CON ADITIVO 2%.....	59
TABLA 5. 7 LECHADAS DE CEMENTO CON ADITIVO 3%.....	61
TABLA 5. 8 LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 50%.....	68
TABLA 5. 9 LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 100%.....	69
TABLA 5. 10 LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 50% Y 1% DE ADITIVO.....	70
TABLA 5. 11 LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 100% DE DIFERENTE YACIMIENTO.....	77
TABLA 5. 12 LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA ARCILLA 20%.....	79
TABLA 5. 13 LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA ARCILLA 35%.....	80
TABLA 5. 14 RESUMEN DE LECHADAS ÓPTIMAS.....	86
TABLA 5. 15 PRESENTACIÓN Y COSTO ACTUAL DE LOS ELEMENTOS.....	89
TABLA 5. 16 PRECIO PARA 1m ³ DE LECHADAS ÓPTIMAS	92

RESUMEN

Con objeto de mejorar o rehabilitar un terreno, se puede llevar a cabo el procedimiento de inyección de suelos, su aplicación tiene un alto costo debido al elevado consumo de cemento de la mezcla inyectable. En el presente proyecto se reemplaza el contenido de cemento por bentonita, crudo de caliza arcilla o cangahua para disminuir el costo de la mezcla, de modo que el procedimiento pueda ser aplicado de manera más económica cuando otro método no resulte aplicable para las exigencias de la obra o del terreno.

Con fines prácticos se recomienda la utilización de una lechada estable, es decir que posea características de viscosidad que oscile de 45seg a 80seg según Prueba de Cono Marsh y su sedimentación en prueba de estabilidad no supere el 5%. Además debe emplearse un aditivo compatible con los componentes que asegure su fluidez, estabilidad y sea capaz de mantener dichas propiedades en el transcurso de la inyección, en cuanto a la resistencia que debe alcanzar la mezcla, normalmente se exigen 40kg/cm²; esta resistencia es excesiva y suficiente para tratar la mayoría de suelos y rocas.

Mediante un programa experimental de variación de la proporción de los diferentes componentes, se pudieron obtener dos mezclas óptimas que satisfacen tanto en aspecto técnico como económico. La primera lechada tiene una relación $c/a=1$, constituida por 100% de cangahua y 1,5% de Aditivo Megamix especial, medidos en relación al peso del cemento, constituye un ahorro significativo pues al elaborar un análisis de precios unitarios se determina una disminución del 50% del costo en comparación a lechadas elaboradas solamente con cemento. La segunda mezcla tiene una relación $c/a=1$, constituida por 35% de crudo de caliza arcilla y 0.20% de aditivo lignosulfonato puro; resulta también una solución de menor costo, posee mayor trabajabilidad y puede ser utilizada en lugar de las lechadas con cangahua, si las condiciones del medio a tratar no permiten la introducción de partículas del tamaño de las cangahuas.

INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años se han utilizado métodos de mejoramiento y estabilización de suelos, uno de ellos es el procedimiento de inyección, el cual puede ser aplicado “cuando los suelos tienen índices de consistencia inapropiados, o muy alta permeabilidad” (Bowles, 1982) o para “reducir los asentamientos bajo una carga determinada de cimentación” (Tomlinson, 1996).

A veces al no existir sitios alternos, a pesar del conocimiento de las defectuosas características del suelo se han tenido que llevar a cabo proyectos, es entonces que al no haber otra opción, se debe proporcionar una obra sin riesgos, remediando la naturaleza del suelo. Así como una inyección introduce medicamento en el organismo de un enfermo, también al suelo se le procura artificialmente los elementos que necesita.

“La inyección es una técnica que consiste en inyectar una pasta de baja viscosidad denominada lechada” (Bowles, 1982), generalmente está compuesta por cemento y agua, pero debido al alto costo de una lechada de esta característica, este método tecnológico no se considera una alternativa económica.

Una lechada tradicional resulta muy costosa, por ser el cemento el elemento más caro en la composición de la mezcla. Se propone entonces, reducir costos y mejorar las lechadas, incorporando al cemento materiales como bentonita, cangahua, crudo de caliza-arcilla y aditivos.

El presente estudio plantea un programa sistemático de adición de los diferentes ingredientes, para contrastar los resultados de las mezclas obtenidas de la lechada tradicional de cemento. Así, se determinan las dosificaciones óptimas, que pueden ser viables en los procesos de inyección de suelos y otros medios,

desde el punto de vista económico y a la vez técnico es decir, se deben cumplir los requerimientos de estabilidad y viscosidad de una lechada.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Contribuir a la rehabilitación y mejoramiento de suelos mediante el estudio de una mezcla de inyección estable utilizando cangahua, bentonita o crudo de caliza arcilla.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer los campos de aplicación de una lechada y sus componentes.
- Indicar los métodos de inyección de suelos en el medio.
- Identificar las características de los elementos a formar parte en el estudio de obtención de una dosificación de lechada.
- Elaborar un plan de actividades y fabricar lechadas en laboratorio en función de una sola variable.
- Determinar la resistencia, viscosidad y estabilidad de las lechadas fabricadas en laboratorio.
- Evaluar los resultados de cada lechada mediante cuadros estadísticos.
- Determinar la dosificación más apropiada para una lechada, mediante el análisis cuantitativo de los cuadros estadísticos.
- Elaborar una dosificación de los materiales en función del peso del cemento para 1m³ de lechada.
- Evaluar costos de lechadas óptimas.

JUSTIFICACIÓN

La información recopilada acerca de aplicaciones de una lechada de inyección permite conocer sus características sustentando teóricamente este proyecto.

Una lechada es una técnica de mejoramiento de suelo, que se puede aplicar cuando ya se han realizado construcciones en terrenos con gran porcentaje de permeabilidad, deformabilidad o bajas resistencias causantes de asentamientos diferenciales y resquebrajamiento en la edificación.

El uso de la cangagua como elemento alternativo en el diseño de una lechada permitiría desarrollar una nueva metodología que contribuya a un mejor uso de los recursos del Ecuador.

El alto costo de adquisición de bentonita (VER TABLA 5.15), y en si de una lechada de agua cemento, impide la aplicación de la tecnología de inyecciones de lechadas por no resultar económicas provocando que grandes proyectos de construcción no encuentren solución a su problemática de inestabilidad del suelo.

La bentonita como elemento de una lechada que en principio intenta reducir costos, es también un elemento costoso si se lo compara con la cangagua, que es un recurso natural que el país posee en abundancia; al ser la cangagua un limo arenoso con cantidades de arcilla, proporciona estabilidad a la lechada como también lo hace la bentonita, por lo tanto puede ser reemplazada. Además aumenta el volumen de la mezcla haciendo factible un ahorro en el costo de la lechada al reducir la cantidad de cemento empleada. (VER TABLA 5. 16)

La información recopilada de métodos de inyectabilidad permite establecer un diseño de lechadas de inyección con cangagua que contribuya a mejorar las propiedades mecánicas de un suelo o un medio a tratar.

El uso del crudo caliza-arcilla pretende también reducir costos en la mezcla, al ser la materia prima del cemento sin atravesar aún el proceso de clinkerización; por lo tanto es un material más económico por reducir su costo de producción en comparación al cemento. (VER TABLA 5.15)

Mediante el uso de elementos económicos, este diseño estaría al alcance de empresas que ya han iniciado grandes proyectos de construcción y necesitan una alternativa económica del mejoramiento o estabilización del suelo.

La lechada debe estar en capacidad de satisfacer aspectos de trabajabilidad y técnicos como son la estabilidad, viscosidad y conseguir la resistencia deseada para lechadas a los 28 días.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES Y DEFINICIONES

1.1 DEFINICIÓN DE SUELO Y SU FORMACIÓN

El término suelo ha sido usado y definido por los diferentes profesantes según su respectivo interés. Para entendimiento de la aplicación del procedimiento de inyección se establece la definición de Suelo desde el punto de vista de la geotecnia, pues aplica los principios ingenieriles a la construcción y provee un concepto más global del medio natural en conjunto, entendiendo por “roca una agrupación de minerales que constituyen la capa superior de la corteza terrestre y que se presentan en grandes masas compactas y homogéneas” (Editores Técnicos Asociados, 1975); el “suelo una delgada capa sobre la corteza terrestre, de aglomerados de partículas que provienen de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que se asientan sobre ellas”; son elementos relativamente pequeños, no homogéneos y separables al utilizar un medio mecánico de baja intensidad debido a su baja cohesión (Crespo Villalaz, 2004).

Debido a que el suelo es la base de una cimentación y por ser un sistema compuesto de tres fases: (La fase sólida, partículas minerales u orgánicas o ambas; la fase líquida, el agua libre que llena total o parcialmente los vacíos del suelo y; la fase gaseosa, el aire que llena los vacíos dejados por la fase líquida); puede originarse por distintos factores un desequilibrio entre el mismo y la cimentación, generando deformaciones que repercuten en la construcción; pues la estructura del suelo es la que “produce una respuesta a los cambios exteriores como cargas, agua, temperatura y otros” (Bowles, 1982).

De este modo, cuando el suelo presenta características inapropiadas como la “compresibilidad, alta permeabilidad, índices de consistencia indeseables” (Bowles, 1982), o al ser necesaria “la adopción de presiones de carga permisible incrementadas, o reducir los asentamientos bajo una carga determinada de cimentación” (Tomlinson, 1996), es de interés aplicar algún procedimiento que modifique las propiedades del suelo. El método de inyección es capaz de remediar los defectos que el suelo y roca pueden presentar por naturaleza.

1.2 PROPIEDADES DEL SUELO QUE SE BUSCA MEJORAR

El mejoramiento del terreno es una solución que se provee a obras que presentan problemas en sus suelos, cual sea el tratamiento aplicado, químico, físico o mecánico, busca generalmente mejorar las siguientes propiedades:

- Estabilidad volumétrica
- Resistencia
- Permeabilidad
- Compresibilidad

Estos procedimientos actúan sobre varias características del terreno a la vez, los mismos independientemente no existen y, a veces el mejoramiento de una propiedad significa el deterioro de otra u otras (Rico Rodríguez, 1978).

A su efecto, los diferentes tratamientos actúan mejorando las características portantes del terreno, reduciendo su permeabilidad, incrementando su densidad o disminuyendo sus deformaciones.

A continuación se hace una corta descripción de las propiedades de los suelos que se pueden modificar.

1.2.1 ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA

Existen suelos denominados expansivos, que ante la presencia de humedad sufren cambios en su volumen. Las deformaciones generadas por la expansión o contracción del medio deben ser controladas a bien de la edificación. La estabilidad de este tipo de suelos consiste en “transformar la masa de arcilla expansiva en una masa rígida o en una masa granulada, con sus partículas unidas lo suficientemente fuerte para resistir las presiones internas de expansión, mediante el uso de tratamientos químicos” (Rico Rodríguez, 1978)

1.2.2 RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

Es de vital importancia la evaluación de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo para análisis de estabilidad en proyectos ingenieriles. Este valor corresponde a la “capacidad de los suelos para adaptarse a las cargas que actúen sobre ellos, sin fallar” (Rico Rodríguez, 2005)

El fenómeno de fallase produce bajo la acción de un esfuerzo normal de compresión y un esfuerzo cortante en plano de falla del suelo; al ser sus valores mayores a los que puede contrarrestar el suelo, puede producirse la ruptura de sus partículas generando su desplazamiento (Bowles, 1982).

Si se conoce que el suelo no puede resistir con cierta seguridad una carga determinada o se ve influenciado negativamente por cambios en el contenido de agua, es necesario aplicar un método geotécnico que incremente la resistencia del mismo.

1.2.3 PERMEABILIDAD

La permeabilidad también es importante para análisis de estabilidad del suelo, y es “la capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. El fluido es el agua, y el medio poroso es la masa de

sólidos”(Bowles, 1982). Hay vacíos en el suelo que están interconectados entre sí, mientras más grandes y mayor es su cantidad mayor es la permeabilidad y, cuanto más permeable es un suelo más riesgos se tienen de sufrir inestabilidad.

Una roca no erosionada a diferencia del suelo no suele verse afectada por deformaciones al existir flujo de agua a través de sus poros pues “la permeabilidad atribuible a la porosidad de una roca es insignificante” (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002), pero puede requerir impermeabilización debido a otro tipo de fallas, como “rellenar planos de fracturas, cavidades de disolución y otras oquedades” (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

1.2.4 COMPRESIBILIDAD

La compresibilidad es una propiedad del suelo de disminuir su volumen debido a cargas o esfuerzos a los que se le somete (González, 2001).

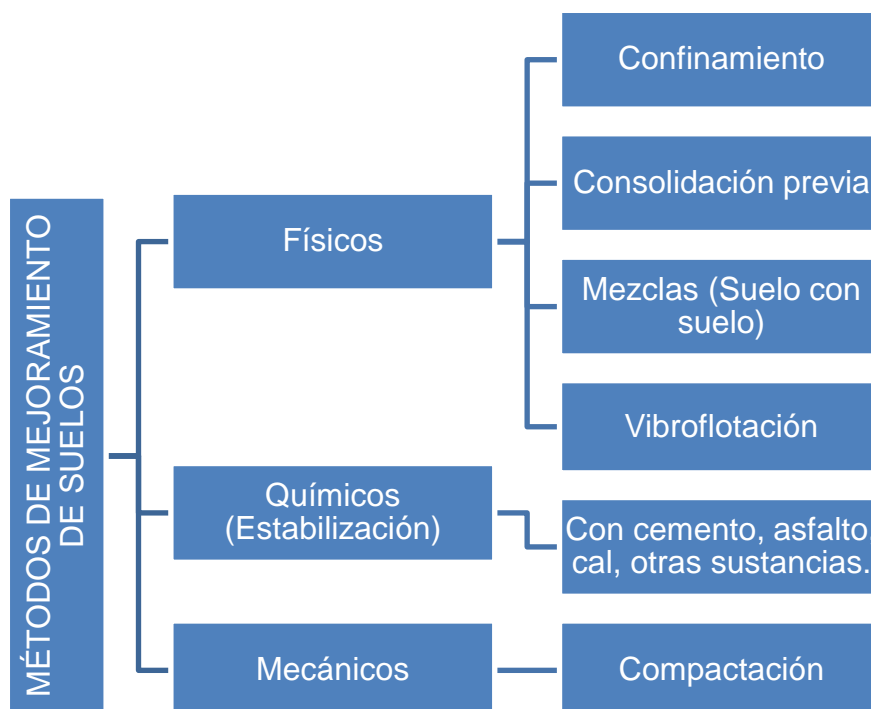
En un tratamiento geotécnico, la disminución de volumen hace referencia a los asentamientos generados por la carga, aplicada para producir deformación hasta un nivel en que la compresibilidad del suelo se modifica o estabiliza.

1.3 MÉTODOS DE MEJORAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Son varios los procedimientos que pueden adoptarse para conseguir la mejora de las propiedades del suelo pero en lo posible se debe evitar proyectar construcciones sobre terrenos inapropiados pues el costo de las operaciones encarece. Cuando se ha erigido ya un proyecto se debe buscar una alternativa económica que modifique o mejore las propiedades defectuosas del suelo.

En la TABLA 1. 1 se presentan los diferentes métodos que pueden aplicarse con este fin.

TABLA 1. 1 MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS



Fuente: (Rico Rodríguez, 2005)

La sustitución de un terreno por columnas de grava (vibro sustitución) consigue su confinamiento, “permitiendo que éste soporte cargas de cimentación sin un asentamiento excesivo” (Tomlinson, 1996). Este procedimiento es aplicado a suelos mixtos granulares o cohesivos como limos arenosos y no arenosos y suelos de grano fino (Valcárcel).

La consolidación previa supone un proceso de consolidación inducido para que el suelo desarrolle resistencia; consiste en la aplicación de una presión de carga al suelo, la cual puede ser generada por amontonamiento de piedra bruta o arena, este material se mantiene en el sitio produciendo asentamiento hasta niveles en que las deformaciones son mínimas, de este modo la resistencia adquirida y los asentamientos reducidos después de la consolidación provocada garantizan la

estabilidad o buen comportamiento de la futura obra (Tomlinson, 1996), (Rico Rodríguez, 2005).

La estabilización de ciertos suelos se consigue al mezclarlos con otros, consiguiendo un suelo con determinadas propiedades deseables; generalmente se procura incidir en la resistencia triaxial, la relación esfuerzo-deformación o la permeabilidad. El buen comportamiento de la mezcla depende de la granulometría, de la cantidad de finos y plasticidad que posee, los cuales deben ser analizados y determinados previamente en un laboratorio (Rico Rodríguez, 1978).

La vibroflotación o vibrocompactaciones un método de compactación profunda, se aplica generalmente a suelos granulares, arenas limpias y grava. En este procedimiento el terreno no se sustituye y consiste en hacer descender un equipo vibrador pesado con chorro de agua, el cual canaliza las partículas de suelo hacia abajo. La unidad es retirada aplicando vibración, y en su ascenso y descenso el suelo se compacta debido al reacomodo de sus granos. Se consiguen columnas compactadas sobre las cuales se pueden construir nuevas cimentaciones sin el riesgo de sufrir asentamientos diferenciales (Tomlinson, 1996).

La estabilización química consiste en la introducción de agentes químicos al suelo mediante mezcla o inyección. Las sustancias químicas aplicadas para modificar el comportamiento de los suelos pueden ser cemento portland, asfalto, cloruro de sodio, cal. Las mezclas suelo-cemento son las más utilizadas para fin de estabilización, consiste en la compactación con humedad y densidad predeterminadas, y se puede conseguir la disminución de la plasticidad del suelo arcilloso, o el aumento de su resistencia y durabilidad (Bowles, 1982), (Rico Rodríguez, 1978).

La compactación es un método mecánico de mejoramiento de las características del suelo, el cual incide favorablemente sobre la resistencia, la compresibilidad y la permeabilidad. Mediante la aplicación de una energía específica de compactación y la variación del contenido de humedad se obtienen pesos específicos secos; de los cuales existe para cierto contenido de humedad

denominado óptimo, un peso volumétrico seco máximo. En este punto se ha producido una reducción significativa de volumen debido a la disminución de vacíos que ocupaba el aire en el suelo, este incremento del peso volumétrico permite el mejoramiento de las propiedades del suelo. Este tratamiento de mejora es aplicable tanto para arcillas como para arenas (Rico Rodríguez, 2005).

Se puede resaltar que la ejecución de los diferentes tipos de procedimientos para mejorar las características del terreno, dependen de la necesidad, respecto a problemas de diseño, ejecución y/o protección de estructuras, así también de la rectificación de asientos de edificaciones o restauración de cimientos, desatacando que cada método puede ser útil en cierta circunstancia y descartable en otras, su selección dependerá de buen criterio técnico y económico

CAPÍTULO 2

INYECCIÓN DE SUELOS

2.1 ANTECEDENTES

La inyección de suelos es un procedimiento geotécnico cuyo campo de aplicación es limitado debido al alto costo de los materiales que componen una lechada, pero necesario para condiciones del lugar donde no pueden ser aplicados otros métodos de mejoramiento, por ejemplo debido a la presencia de estructuras existentes (Tomlinson, 1996); o en caso de requerir el relleno de huecos, restauración de cimientos, o izado de estructuras que sufren asentamientos por efecto de cargas aplicadas; los cimientos pueden ser defectuosos por piedra natural que se ha agrietado o suelos que se han desplazado (Keller Terra) y por tanto es indispensable detener las deformaciones. Así también es necesario en el caso de reducción del efecto de vibraciones a estructuras o, ser soporte de túneles (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

Al disminuir el costo de las lechadas de inyección reemplazando el consumo de cemento por cangahua o crudo de caliza-arcilla (VER TABLA 5. 16), este procedimiento geotécnico puede ser aplicado de manera más económica en las circunstancias en que otro método geotécnico no sería satisfactorio para las exigencias de la obra y del terreno.

El inicio de aplicación de este método data del siglo XIX en Francia, en que se emplearon morteros de cemento con la asociación ocasional de puzolanas, más tarde ingenieros de vanguardia ejecutaron la inyección de morteros líquidos para relleno de oquedades por gravedad; los materiales y los métodos de inyección fueron mejorando poco a poco, hasta llegar a los años 1920-1930 en que la construcción de ferrocarriles y de obras hidráulicas influyeron significativamente

en el desarrollo de las inyecciones, promoviendo una amplia gama de morteros (Cambefort, 1968), además debido al avance tecnológico se han desarrollado técnicas de inyección que optimizan los procesos. De este modo, es función del proyectista o especialista tener conocimientos sólidos en principios de inyección que le permitan adaptar un método efectivo y elegir la mezcla de inyección en función de los requerimientos de la obra, de las condiciones de terreno y del tipo de suelo, sin descuidar el ámbito económico para lo que puede ser necesario el cambio de mortero durante los trabajos de inyección cuantas veces sea conveniente.

Este procedimiento consiste en introducir mortero o lechada en el suelo con el uso de un monitor a una presión que corta el suelo; esta presión es generada por la energía de impacto de la alta velocidad de circulación del fluido, el cual es bombeado a través de una boquilla del equipo inyector. En este momento la función de la lechada es erosionar al suelo, para consiguientemente mezclar el suelo con la lechada, o remover el suelo y reemplazarlo con lechada; su aplicación busca modificar o incrementar las características mecánicas del medio tratado ya sea para aumentar su capacidad de carga o disminuir su compresibilidad y al mismo tiempo reducir la permeabilidad.

En el caso de ser requerida la intervención del procedimiento de inyección en un medio rocoso se debe conocer que el objetivo es rellenar fisuras, grietas y oquedades con el fin de evitar el flujo del agua a través de sus planos de falla o reducir su permeabilidad, también se busca evitar el colapso del terreno y/o una adecuada transmisión de esfuerzos en caso de que una cimentación se desplace sobre esta roca (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

2.2 MEDIOS INYECTABLES

El avance de la tecnología ha hecho del procedimiento de inyección un método aplicable en el tratamiento de rocas fisuradas, arenas y gravas o aluviones, suelos arcillosos blandos, así también fábricas defectuosas.

2.2.1 OBRAS DE FÁBRICA

Son aquellas obras ejecutadas con materiales pétreos u hormigón, las cuales no corresponden a edificios sino a caminos, ferrocarriles, muros, obras de desagüe, entre otros.

Una obra de fábrica puede ser defectuosa en el caso de encontrarse gravas mal cementadas o juntas desguarnecidas de mortero; aunque pueden inyectarse de la misma forma que los suelos, su regeneración puede ser un tratamiento muy difícil, pues las mezclas inyectadas no pueden someterse a presiones muy elevadas (Cambefort, 1968).

2.2.2 MEDIO ROCOSO

Un macizo rocoso generalmente presenta discontinuidades, que corresponden a planos de fracturas, cavidades de disolución y otras oquedades por medio de los cuales fluye el agua, para reducir dichas infiltraciones es necesario sellarlas con un producto. En algunos casos se busca reducir la permeabilidad, en otros mejorar las propiedades de resistencia y deformabilidad. Se determina el procedimiento más adecuado mediante estudios previos de permeabilidad y se realizan exploraciones que señalan el estado de fisuración de la roca y la posibilidad de circulación de las aguas (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

2.2.3 SUELOS INCOHERENTES

Se conocen como suelos incoherentes aquellos que pueden estar constituidos por aluviones de arenas y gravas o por derrubio de laderas, los cuales poseen una estructura interna inestable y permeable debido al alto índice de vacíos que posee; esta característica aumenta o disminuye conforme varía la granulometría del depósito (Cambefort, 1968).

El tratamiento de este tipo de suelos resulta difícil por su mencionada inestabilidad, pero puede llevarse a cabo tras una investigación de la permeabilidad, se emplean soluciones químicas y mezclas de cemento estables (Cambefort, 1968), las segundas mencionadas resultan una solución más económica por lo que se recomienda su aplicación siempre y cuando sean adecuadas para la granulometría de la zona inyectada.

2.2.4 SUELOS ARCILLOSOS BLANDOS

Los suelos arcillosos se conocen por poseer una considerable cantidad de finos, los cuales modifican sus propiedades al variar su contenido de agua. Así, en estado seco el suelo se presenta bastante denso y duro, pero cuando se saturan tienden a expandirse, disminuir la resistencia al esfuerzo cortante y aumentar su compresibilidad (Rico Rodríguez, 2005). En estas condiciones los suelos blandos pueden ocasionar serios problemas, por lo tanto aplicar un tratamiento que garantice su estabilidad es imprescindible.

La inyección de este tipo de suelos hace algunos años se consideraba como irrealizable, posteriormente en el campo de la ingeniería civil se aplicó el mismo criterio de hidrofracturamiento que nació en la ingeniería petrolera de rocas a suelos arcillosos blandos, consiguiendo la inyección que reduce la compresibilidad del suelo ante cargas aplicadas.

2.3 TIPOS DE INYECCIÓN

Según las condiciones y propiedades mecánicas del terreno así como de los objetivos del tratamiento los métodos de inyección varían.

Al tratarse de un medio rocoso los métodos de inyección pueden ser: Pantallas impermeables, tapetes de consolidación, rellenos, inyecciones de contacto.

Para el tratamiento de aluviones mediante inyección, se utiliza generalmente el método de tubos manguito.

La inyección de suelos arcillosos blandos se consigue mediante la técnica de fracturamiento hidráulico.

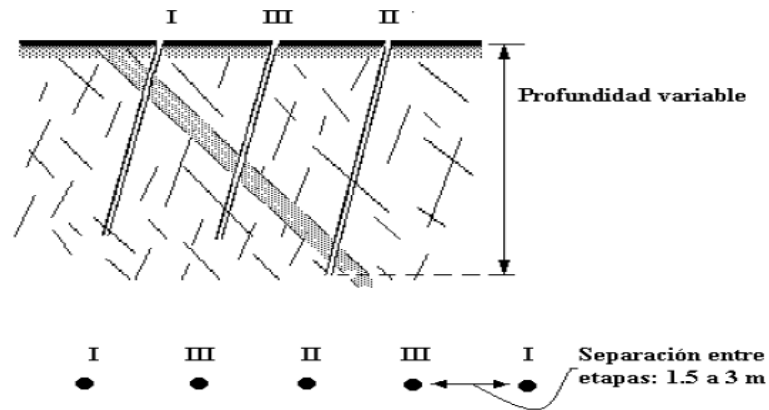
Cabe mencionar además que los procesos de inyección se pueden realizar por fases ascendentes o descendientes, desde la boca de perforación o fases repetitivas (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

2.3.1 PANTALLAS IMPERMEABLES

Esta técnica es generalmente aplicada al macizo rocoso en que se busca impermeabilización o limitación de las infiltraciones a través de sus discontinuidades. Consiste en la perforación e inyección de una serie de barrenos, los cuales forman una o más líneas paralelas conocidas como planos de pantalla. Una pantalla define su geometría por características como resistencia mecánica, permeabilidad, o fracturamiento del terreno. Su diseño radica en una sucesión de líneas que alcanzan diferentes profundidades, según características desfavorables estas pueden ser mayores. Así, se determina una superficie conocida como plano de pantalla, el cual queda dispuesto con cierta inclinación. Es de importancia llevar un registro del consumo de mezcla durante la inyección pues se pueden definir de este modo cambios en la presión y forma de inyección, así como la separación final de los barrenos (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

En la FIGURA 2. 1 se puede observar una representación de la perforación de inyección de barrenos de pantalla.

FIGURA 2. 1 SECUENCIA DE PERFORACIÓN E INYECCIÓN DE BARRENOS PANTALLA

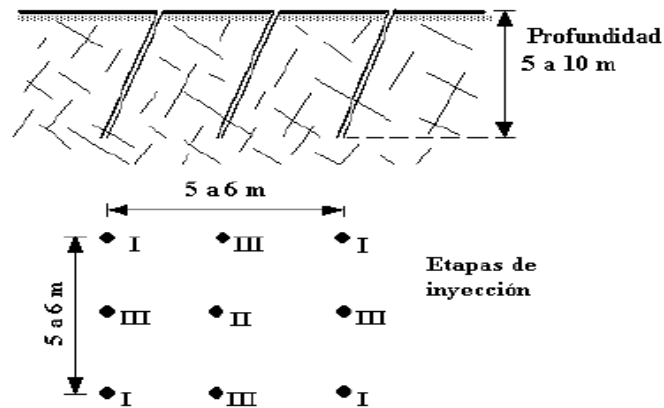


Fuente: (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

2.3.2 TAPETES DE CONSOLIDACIÓN

Los tapetes de consolidación se proyectan de forma similar a las pantallas impermeables al estar caracterizados por la profundidad, inclinación y separación de los barrenos introducidos, pero se diferencian por aplicarse en un área de tratamiento que forma una retícula cuadrangular o tresbolillo como puede observarse en la FIGURA 2. 2 sobre la cual se estima la construcción de una obra civil. Este tipo de tratamiento generalmente se aplica a una profundidad máxima de 10m y su objetivo principal es reducir la deformabilidad del macizo rocoso (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

FIGURA 2. 2 ETAPAS DE INYECCIÓN DE TAPETES DE CONSOLIDACIÓN



Fuente: (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

2.3.3 INYECCIONES DE RELLENO

Existen rocas que por su naturaleza poseen grandes cavidades subterráneas, así como las rocas calizas que disuelven zonas de importancia debido al contacto con el agua, o las rocas ígneas con oquedades originadas entre distintos derrames de lava; por lo tanto para poder elevar una construcción en el terreno evitando su colapso, es indispensable rellenar estos huecos (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

Debido a los grandes volúmenes de mezcla que se emplean para el relleno pueden emplearse materiales granulares en forma de mortero estable para una etapa inicial, y posteriormente para su sellado e impermeabilización una mezcla tipo lechada (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

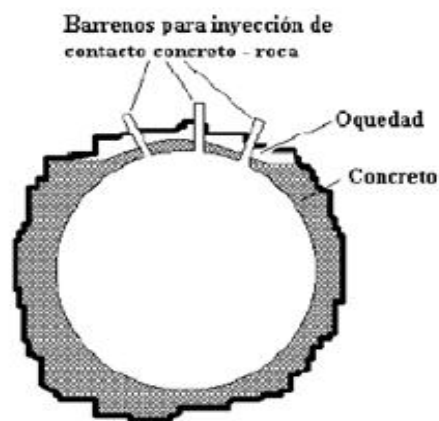
2.3.4 INYECCIONES DE CONTACTO

La inyección de contacto es una forma de inyección de relleno pero con la particularidad de pretender actuar sobre las oquedades o fisuras existentes entre el concreto de revestimiento de túneles o la cimentación de edificaciones y la

roca. Su objetivo además de reducir la permeabilidad como en los otros tipos de tratamientos es asegurar una correcta transmisión de esfuerzos de la estructura a la roca (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002). En la FIGURA 2. 3 puede observarse la inyección del relleno que pone en contacto al concreto con la roca en un túnel.

Dependiendo del volumen de inyección determinado previamente con pruebas de permeabilidad será posible la utilización de una mezcla de inyección que resulte económica disminuyendo el contenido de cemento al reemplazarlo por arena o gravas.

FIGURA 2. 3 INYECCIÓN DE CONTACTO CONCRETO-ROCA EN LA BÓVEDA DE UN TÚNEL



Fuente: (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

2.3.5 INYECCIÓN MEDIANTE TUBOS MANGUITO

El método de inyección empleando tubos manguito se utiliza para la impregnación e inyección de gravas y arenas pues resulta el más adecuado de modo que al realizar el tratamiento, la masa de suelo no se desmorone. Consiste en la perforación de barrenos hasta la profundidad del tratamiento, seguido de la introducción de un tubo provisto de bandas de caucho que actúan como válvulas el cual es conocido como tubo de manguitos, posee cuatro orificios por cada válvula por los cuales se envía lechada a presión, propagándose equitativamente

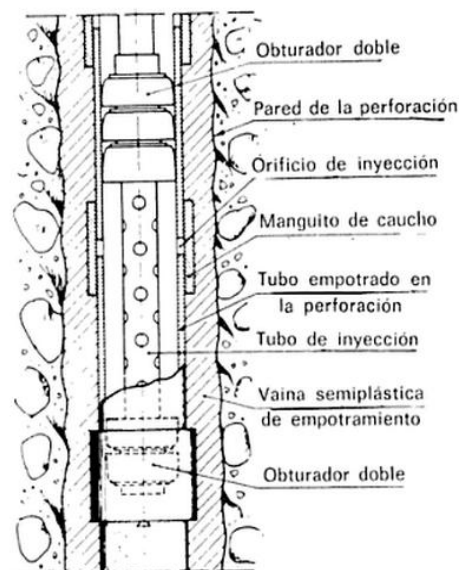
y evitando su retorno; por cada metro de longitud se ubican tres bandas de caucho que pueden limitar los tramos en que se realiza la inyección, de este modo es posible cambiar de lechada en los tramos que sea conveniente. Antes de iniciar la etapa de inyección se sella el espacio entre el tubo y el terreno con una mezcla plástica, se va recuperando el tubo provisional conforme se va realizando la inyección, la lechada fractura dicho mortero de recubrimiento fraguado y rompe el terreno, también se rellenan las fisuras ocasionadas consiguiendo su impermeabilización o consolidación (Cambefort, 1968).

Se recomienda la utilización de una lechada estable que asegure la ausencia de sedimentación para un adecuado bombeo durante la inyección (Cambefort, 1968).

En la

FIGURA 2. 4 se muestra un esquema de inyección mediante tubos manguito.

FIGURA 2. 4 EQUIPO TIPO PARA LA INYECCIÓN CON TUBOS MANGUITO



Fuente: (Cambefort, Geotecnia del Ingeniero, 1975)

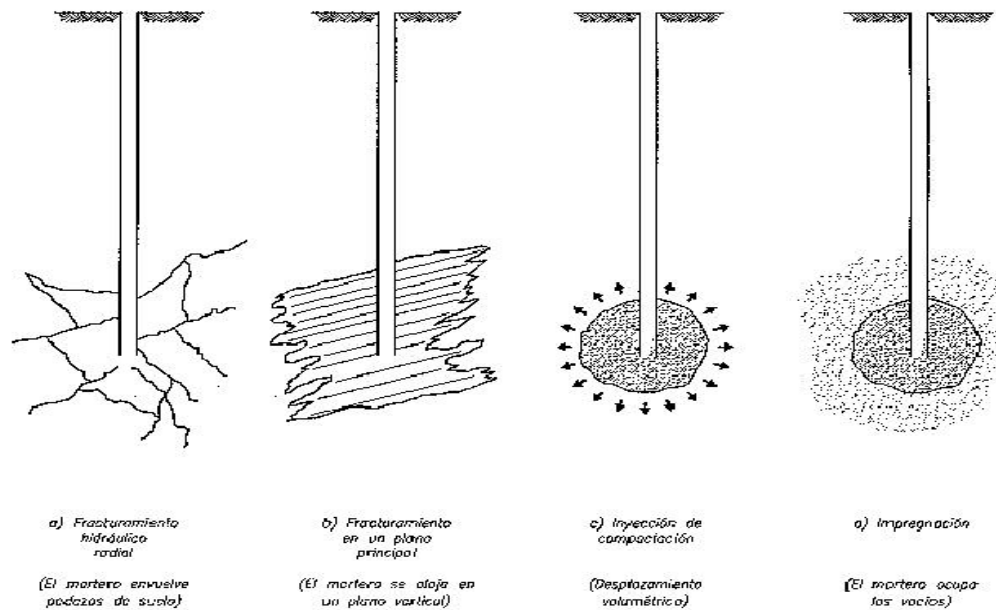
2.3.6 INYECCIÓN POR HIDROFRACTURAMIENTO

Esta técnica de inyección se aplica a suelos arcillosos blandos, su ejecución consiste en inyectar un fluido a presión el cual induce fracturamiento al terreno, las fisuras ocasionadas permiten la inserción de la lechada que al fraguar, endurece e impermeabiliza el terreno. Al momento de aplicar una inyección los suelos pueden reaccionar de maneras diferentes según su condición in situ, de este modo el suelo puede someterse a: fracturamiento radial, fracturamiento plano, desplazamiento volumétrico, impregnación. Estas diferentes formas de hidrofracturamiento se presentan en la FIGURA 2. 5. (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

El fracturamiento radial se identifica como una estructura de naipes aleatoria y el fracturamiento plano consiste en la generación de láminas de mortero. La inyección de compactación consigue el desplazamiento volumétrico y es más utilizada cada vez por contrarrestar los hundimientos ocasionados por una estructura. La inyección de impregnación es factible en suelos muy permeables, en que la lechada pueda introducirse entre las partículas y conseguir su saturación (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

Mediante una etapa experimental de inyección pueden definirse, la presión de inyección, el volumen y viscosidad del mortero, de los cuales se recomienda valores de 45 a 60seg en cono Marsh, como óptimos para factibilidad de bombeo (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

FIGURA 2. 5 TIPOS DE INYECCIÓN DE SUELOS BLANDOS



Fuente: (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

Una vez que han sido definidas las variables para inyección de suelos, es útil contar con la gama de mezclas del presente estudio que cumplen con parámetros técnicos, de las cuales se puede seleccionar la más apropiada también en términos económicos de acuerdo a las necesidades del método de inyección a aplicar.

2.4 MEZCLAS INYECTABLES

Mediante el reconocimiento previo del medio a tratar puede determinarse el método de inyección y los diferentes tipos de mezclas a utilizarse durante el tratamiento, esto se debe a que casi nunca un mortero es suficiente para concluir los trabajos satisfactoria y económicamente.

Las mezclas utilizadas para inyecciones son varias y el inyector tiene la responsabilidad de utilizar en el momento justo el mortero más conveniente en función de la naturaleza del terreno, los resultados que se deseen obtener, el precio de los productos, la posibilidad de aprovisionamiento, la facilidad de fabricación del mortero y su penetrabilidad (Cambefort, 1968).

Se amerita un producto final solidificado con buenas características de resistencia mecánica, pero de forma poco viscosa durante la inyección para facilitar su penetración. Los tratamientos iniciales de inyección se realizaron utilizando suspensiones de cemento inestable, las cuales no fueron completamente satisfactorias para cualquier medio, debido a que los granos de cemento se asientan al detenerse la agitación, y las presiones utilizadas para este tipo de mezclas no conseguían su penetración antes de que los granos de cemento causen obturación de los intersticios del suelo por su sedimentación. Como consecuencia se inició la aplicación de soluciones estables con la cual se obtuvieron buenos resultados, pero para ciertas zonas de tratamiento estas no son útiles y es necesaria la aplicación de otros productos como betunes calientes, emulsiones de betún u otros productos químicos que por su costo deben ser utilizados de manera muy limitada (Cambefort, 1968). Las mezclas inyectables se clasifican en tres categorías principales:

- a) Líquidas
- b) Suspensiones inestables
- c) Suspensiones estables

Aunque todos los morteros de inyección son líquidos, se denominan así a las mezclas que no contienen ninguna partícula cuya dimensión, por pequeña que sea pueda medirse fácilmente. Las mezclas líquidas están constituidas por productos químicos como silicato de sosa más o menos diluido, mezclado con un reactivo; resinas sintéticas o también productos hidrocarbonatados puros. Los morteros líquidos son poco viscosos pero muy costosos (Cambefort, 1968).

2.4.1 MEZCLAS DE INYECCIÓN INESTABLE

Como ya se mencionó las mezclas inestables son aquellas que están compuestas por agua y cemento o piedra molida en proporcionamientos c/a que van de 1/8, 1/6, 1/4, 1/2, 3/4 y 1/1, por lo tanto los granos de cemento se mantienen en suspensión solamente durante la agitación de la mezcla, al cesar esta los granos de cemento comienzan a sedimentarse. Este fenómeno es conveniente para la inyección de macizos rocosos pues los granos de cemento se depositan en forma de sedimentación hidráulica, pero también constituye la razón para no ser apto en la inyección de arena, su granulometría no permite el paso de cemento aunque sea el caso de utilizar una relación c/a de menor dosificación para su penetración pues los granos se depositan antes de conseguir su fin, esto se debe a que para tal dosificación la velocidad de circulación es lenta. No se les considera estables pues presentan sedimentación más o menos rápida y superior al 10% al realizarse una prueba de sedimentación (Cambefort, 1968).

2.4.2 MEZCLAS DE INYECCIÓN ESTABLE

En la actualidad se emplean mayormente las mezclas de inyección estables por poseer mejores características reológicas que las inestables, poseen mayor resistencia final, buena fluidez y son más penetrables en el medio de inyección; los diferentes tipos de aditivos que existen en la actualidad permiten una mezcla con mayor dosificación de cemento y a la vez mantienen constantes sus propiedades durante el período del tratamiento, lo cual comprende parámetros de viscosidad y estabilidad, es decir que la mezcla mantenga la fluidez y los granos de cemento puedan mantenerse suspensos en un tiempo estimado de 1 a 2 horas (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

Una mezcla fuertemente dosificada con cemento consigue sedimentación nula pero es un fluido muy viscoso e ininyectable (Cambefort, 1968), por lo tanto las propiedades deseadas que son difíciles de obtener ameritan un estudio de laboratorio que determine la dosificación adecuada de cemento, proporcionándole cantidades de bentonita por sus propiedades coloidales y aditivos con propiedades estabilizadoras en función del peso del cemento.

CAPÍTULO 3

PARÁMETROS DE MEZCLAS DE INYECCIÓN ESTABLES Y SUS COMPONENTES

El presente proyecto es un estudio experimental en laboratorio para obtener un mortero inyectable, que satisfaga cuando sea colocado. De esta manera se dirigen los esfuerzos para determinar la proporción de los diversos productos que entran en la composición de un mortero estable.

Las mezclas a estudiar están constituidas de la siguiente manera:

- 1) La mezcla de cemento-agua
- 2) La mezcla de cemento-bentonita-agua
- 3) La mezcla de cemento-aditivo-agua
- 4) La mezcla de cemento-cangahua-agua
- 5) La mezcla de cemento-bentonita-agua
- 6) La mezcla de cemento-cangahua-aditivo-agua
- 7) La mezcla de cemento-crudo de caliza arcilla-agua.

Este estudio sistemático está basado en un determinado número de medidas, que varían según la influencia de los diversos componentes en sus propiedades físicas y mecánicas.

Las primeras, las propiedades físicas definen el grado de manejabilidad o fluidez de los morteros para ser bombeados e inyectables, serían las medidas de viscosidad y estabilidad o decantación; y las segundas analizan las relevantes a su resistencia a la compresión (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

3.1 ESTABILIDAD

La estabilidad de una mezcla de inyección hace referencia a la propiedad de mantener sus granos de cemento en suspensión, pero es relativa, pues una mezcla satisfactoria es aquella que mantiene estas características durante el período de inyección (Cambefort, 1968).

En laboratorio puede determinarse la estabilidad de una mezcla mediante la prueba de sedimentación o decantación (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002), en donde puede observarse claramente una separación de fases, producida al sedimentarse las partículas y a la vez la ascensión del agua a la superficie en condiciones de reposo. El fenómeno de sedimentación es muy complejo pues está influenciado por la gravedad, la densidad de los elementos que componen la mezcla, la forma y dimensión del recipiente que la contiene (Cambefort, Inyección de Suelos, 1968), por lo tanto es necesario llevar a cabo la prueba en una probeta estándar para todos los ensayos, de modo que se eviten obtener más variables.

La prueba consiste en colocar 250cm³ en una probeta cilíndrica y gradada, al cabo de dos horas se mide la cantidad de agua libre en la parte superior de la probeta, “se considera estable si el agua libre es menor al 5%” (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

3.2 VISCOSIDAD

La viscosidad es característica de todos los fluidos y es un indicador de la facilidad con que fluyen, cabe mencionar que la viscosidad solo se manifiesta en fluidos con movimiento, pues el rozamiento entre las capas del fluido produce oposición a deformaciones tangenciales, si el fluido es muy viscoso el rozamiento entre capas también lo es, no se puede decir que un fluido en reposo tiene viscosidad porque en tal condición, la única fuerza que actúa es la gravedad, no existiendo así componente tangencial (Robert, 2006).

Para el caso de una mezcla inyectable, es necesario conocer el valor de la viscosidad, pues es un parámetro que define las posibilidades de circulación de la mezcla al momento de la inyección, así como su penetrabilidad en el medio; mediante estudios se ha determinado que viscosidades óptimas para que la mezcla pueda bombearse sin obstrucciones, se encuentran entre 60 y 80seg determinados en pruebas de viscosidad Marsh (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002). Esta prueba consiste en colocar en un embudo de dimensiones estándar, 1000 ml de mezcla y medir el tiempo que tarda en fluir, se comprueba que cuanto mayor es este tiempo más viscosa es la mezcla, y por lo tanto menos apta para la inyección.

3.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Debido a que el cemento forma parte de los elementos de una mezcla estable, es razonable esperar su solidificación con el tiempo, pues el cemento tiene la propiedad de fraguar y endurecer al contacto con el agua. De este modo se tiene un producto al que el cemento ha conferido resistencia mecánica.

Para medir la resistencia a la compresión se elaboran especímenes cúbicos con la mezcla, los cuales después de su fraguado son ensayados a edades de 3, 7 y 28 días, se observa un incremento en la resistencia, siendo la última medida un valor estimado como máximo y constante.

La cantidad de cemento que contienen las mezclas de inyección está íntimamente ligada con la resistencia mecánica que estas llegan a alcanzar, sin embargo en el presente estudio no se esperan obtener resistencias muy elevadas, pues según Cambefort (1968), una mezcla inyectable no debe presentar necesariamente una fuerte resistencia mecánica a la compresión, generalmente es superabundante para impermeabilización o consolidación, así también la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (2002) diseñaba morteros para inyección de suelos que usualmente adquirirían resistencias entre 7y 45 kg/cm². En la TABLA 3. 1, se puede observar valores típicos de la resistencia a la compresión confinada de

suelos mediante una correlación antigua con SPT (Standard penetration test), que no sobrepasan los 5 kg/cm², tomando en cuenta que se busca mejorar el suelo, se establece como valor base a obtener en los ensayos de compresión inconfiada de mezclas de inyección, una resistencia de 50kg/cm².

TABLA 3. 1 RELACIÓN EMPÍRICA ENTRE SPT Y VARIAS PROPIEDADES DEL SUELO.

N	Consistencia	Identificación en el campo	γ_{sat} kN/m ³	q_u , kPa
<2	Muy blanda	Fácilmente penetrable varios cm con el puño	16-19	<25
2-4	Blanda	Fácilmente penetrable varios cm con el pulgar	16-19	25-50
4-8	Media	Se requiere un esfuerzo moderado para penetrarlo varios cm con el pulgar	17-20	50-100
8-16	Rígido	Identable fácilmente con el pulgar	19-22	100-200
16-32	Muy rígido	Identable fácilmente con la uña del pulgar	19-22	200-400
>32	Duro	Difícil de identar con la uña del pulgar	19-22	>400

Fuente: (Bowles, 1982)

3.4 COMPONENTES DE MEZCLAS DE INYECCIÓN ESTABLES FABRICADAS EN LABORATORIO

En el presente proyecto se utilizó Cemento Portland Puzolánico tipo IP producido por la empresa Intaco, la misma empresa abasteció el crudo de caliza-arcilla, se utilizó bentonita que es un producto de importación, cangahua que fue extraída en

Quito en el sector La Forestal-Autopista Simón Bolívar y Tababela, y aditivos plastificantes y superplastificantes los cuales fueron fabricados por la empresa Setmix.

A continuación se presenta una descripción de los elementos con los que se elaboraron las lechadas de inyección estables en laboratorio.

3.4.1 CEMENTO

El cemento es el elemento activo en una mezcla inyectable por sus propiedades de adherencia y cohesión, generalmente la palabra cemento hace referencia al cemento portland, pues tiene la propiedad de fraguar o endurecer al producirse una reacción química con el agua denominada hidratación. El agua que se utiliza en el mezclado es la que promueve la hidratación después de que ha conseguido penetrar en el interior de los granos de cemento, además las partículas adheridas en su superficie constituyen el material de hidratación. (Guzmán, 2001)

El cemento portland es fabricado a base de materiales y minerales calcáreos, como son la caliza, la alúmina y sílice presentes en la naturaleza en forma de arcillas, yeso y eventualmente puzolanas para evitar el ataque de agentes agresivos como los sulfatos. Para fabricar cemento portland se necesita explotar las materias primas, prepararlas y dosificarlas; las calizas pueden presentar dureza elevada y necesitan ser llevadas a trituración, las arcillas por el contrario pueden extraerse simplemente por arrastre y mezclarse directamente con la caliza, ambos materiales pasan al proceso de molienda para reducir su tamaño a polvo fino, el producto que se consigue se denomina crudo o "harina". El crudo se homogeniza y es almacenado en tanques o silos, posteriormente el material es sometido a un tratamiento térmico denominado clinkerización en donde grandes hornos giratorios alcanzan temperaturas de 1400 a 1500 °C, la masa se funde formando bolas conocidas como clinker, el clinker sale del horno a temperaturas que oscilan los 1200 o 1300°C, el cual debe enfriarse rápidamente hasta descender a 50 o 70°C. El Clinker frío se lleva a un molino, el cual tiene bolas de acero que lo trituran, finalmente se le añade yeso que sirve para evitar su pronto endurecimiento al combinarse con el agua. (Guzmán, 2001)

El cemento portland puzolánico, que es el cemento utilizado en los ensayos del presente estudio, se obtiene de la mezcla de clinker pulverizado con puzolanas; estos cementos poseen características preferibles en campos específicos de aplicación. Dichos campos específicos se refieren a durabilidad, estabilidad, calor de hidratación, plasticidad, que en los portland manifiestan alguna insuficiencia. Este cemento presenta ventajas técnicas además de económicas (Guzmán, 2001).

El cemento que se utilice para la elaboración de mezclas de inyección requiere rigurosos controles que aseguren su calidad y esté dentro de los parámetros especificados en las normas. Las normas para control de cemento mediante ensayos de laboratorio corresponden a:

NTE INEN 151 Cemento hidráulico-definición de términos (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010).

NTE INEN 151 Cemento portland-requisitos (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010)). (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010)

NTE INEN 156 Cemento hidráulico-determinación de la densidad (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009).

NTE INEN 157 Cemento hidráulico-determinación de la consistencia normal. Método de Vicat. (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

NTE INEN 158 Cemento hidráulico-determinación del tiempo de fraguado del cemento hidráulico por medio de la aguja del aparato Vicat (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

NTE INEN 159 Cemento hidráulico-determinación del tiempo de fraguado del cemento hidráulico Método Gilmore. (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010)

NTE INEN 488 Cemento hidráulico-determinación de la resistencia a la compresión de morteros elaborados con cemento hidráulico, usando cubos de 50mm de arista. (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

Además las condiciones de almacenamiento deben ser las oportunas tratando de evitar en lo posible el contacto directo con el suelo, las paredes y humedad.

3.4.2 BENTONITA

En el presente estudio se han elaborado lechadas de cemento con adición de bentonita con el objetivo de adquirir una mezcla estable, pues la bentonita por sus propiedades particulares es capaz de reducir la sedimentación de las partículas de mayor tamaño que componen la mezcla, además se intenta reducir su costo aumentando el volumen de la lechada.

El aumento de volumen que se consigue es debido a que “la bentonita al estar constituida esencialmente por minerales como las esmectitas, tiene la capacidad de hincharse al contacto con el agua” (Usos y aplicaciones de las bentonitas, 2006), esta reacción produce un aumento en la viscosidad de la mezcla, para mantenerla es necesario disminuir la dosificación de cemento, consecuentemente se puede obtener una mezcla más económica.

La bentonita es un mineral arcilloso proveniente de la alteración de cenizas volcánicas, su hidratación se lleva a cabo en su espacio interlaminar; allí tiene consecuencia el hinchamiento originado por la separación de las láminas; a medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan entre las láminas son de repulsión electrostática, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras, esta reacción es la que produce cierto grado de dispersión y pone de manifiesto en la mezcla sus propiedades coloidales (Emilia García Romero, Mercedes Suárez Barrios).

La bentonita sódica fue empleada en los ensayos, la cual tiene alta capacidad de hinchamiento, este fenómeno se da en razón de su superficie específica pues allí se produce la interacción entre las partículas sólidas y el fluido. Al poseer la bentonita una elevada superficie específica, tiene gran capacidad de absorción como de adsorción. (Emilia García Romero, Mercedes Suárez Barrios) La absorción hace referencia a un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran en los de otra fase; por su parte la adsorción se produce cuando las moléculas o átomos de una fase se concentran en la superficie otra (Técnicas Hidrotermales y estética del bienestar). En este caso las moléculas del agua son capaces de penetrar en la estructura de la bentonita confiriéndole hinchamiento y pueden quedar adheridas en su superficie formando un gel.

El uso de bentonita en la mezcla presenta ventajas y desventajas de las cuales podemos mencionar el aumento considerable en el volumen de la mezcla y su homogeneidad, mayor estabilidad, mayor viscosidad, retardo en el tiempo de fraguado y menor resistencia mecánica. Se debe tomar en cuenta que las dosificaciones de bentonita en relación al peso del cemento son relativamente débiles, pues estas varían en proporciones del 1 al 4% dependiendo de la calidad de la Bentonita, no debiendo ser mayor, pues se obtendrían productos esponjosos con baja resistencia a la compresión y fraguado lento.

Este tipo de mezcla en la que predomina un mayor porcentaje de bentonita es útil en las etapas de perforación, previo al tratamiento de inyección, en que es preciso un recubrimiento de los barrenos introducidos.

3.4.3 AGUA

Como se ha visto en los apartados 3.4.1 y 3.4.2 el agua desempeña un papel predominante en las reacciones de hidratación de los elementos constituyentes de la mezcla, por lo tanto es coherente pensar en que debe poseer ciertas características que permitan su aplicación técnica.

Para que el agua pueda usarse en la elaboración de mezclas, se recomienda que sea potable y no tenga un pronunciado olor o sabor; sin embargo pueden

encontrarse disueltas sales, cítricos o azúcares en altas concentraciones que pueden resultar perjudiciales. Las concentraciones de impurezas pueden tener efectos de aceleración o retardo del fraguado, y en altas concentraciones las sales pueden reducir la resistencia del mortero (Guzmán, 2001).

El agua debe tener aceptación también en función de su acidez, lo que incida la concentración de ácidos en el agua (ppm). Para su medición se determina el PH del agua, que es una medida de la concentración del ión hidrógeno. El valor del PH por debajo de 7 indica acidez y por encima alcalinidad. Algunas normas de los EEUU estipulan un valor aceptable entre 6 y 8 y descartables aquellas con PH por debajo de 3,0.(Guzmán, 2001)

Así, se evitará el agua de pozos, aguas estancadas, pantanos, ríos con arrastre de materia orgánica, etc. generalmente también de emanaciones sulfurosas o que puedan tener reacción ácida. No se deben usar las aguas provenientes de fuentes termales o minerales y las de fábricas que contengan vestigios de aceite, grasa, azúcar, sales de potasio y otras sales resultantes de las industrias tales como: mineras, curtiembres, tintorerías, laboratorios químicos, etc.(Guzmán, 2001)

En la TABLA 3. 2 se presentan un resumen de las tolerancias de concentraciones máximas de impurezas en el agua apta para el mezclado.

TABLA 3. 2 TOLERANCIAS DE CONCENTRACIONES DE IMPUREZAS EN EL AGUA DE MEZCLAS.

Impurezas	Máxima tolerada	concentración
Carbonatos de sodio y potasio	1000	ppm
Cloruro de sodio	20000	Ppm
Sulfato de sodio	10000	Ppm
Sulfato, como SO ₄	3000	Ppm
Carbonatos de calcio y magnesio, como ión bicarbonato	400	Ppm
Cloruro de magnesio	40000	Ppm
Sulfato de magnesio	25000	Ppm
Sales de hierro	40000	Ppm
Yodato, fosfato, arsenato y borato de sodio	500	Ppm
Sulfito de sodio	100	Ppm
Ácido sulfúrico y ácido clorhídrico	10000	Ppm
Azúcar	500	Ppm
Partículas en suspensión	2000	Ppm
Agua con algas	0	
Materia orgánica	20	Ppm

Fuente: (Guzmán, 2001)

3.4.4 CANGAHUA

Las mezclas de inyección pueden ser adicionadas de arena más o menos fina según resulte apta para la introducción en el medio, es decir que los huecos a rellenar sean lo suficientemente grandes como para su aplicación. (Cambefort, 1968). Por este motivo en el presente estudio se ha determinado la utilización de cangahua, “destacada por ser un material endurecido” (Dirección Nacional

Agrícola. Quito-Ecuador), además con el propósito de disminuir costos y hacer más aprovechables los recursos ecuatorianos.

La cangahua es un suelo característico de los países andinos debido a su origen volcánico, es definido técnicamente como “sedimento geológico derivado de ceniza volcánica (rico en arena fina y limo)” (Gallardo Lancho, 2006); su distribución en el país ecuatoriano alcanza una extensión importante, cubriendo en la parte septentrional, una superficie igual al tercio del país. Se identificaron grandes espesores al Oeste hasta una vertical que pasa por Quinindé, al Sur hasta la latitud de Chunchi y al Este hasta el pie de las vertientes orientales de la Sierra (Zebrowski, 1996). Dicha distribución puede observarse de mejor manera en el mapa mostrado en la FIGURA 3. 1.

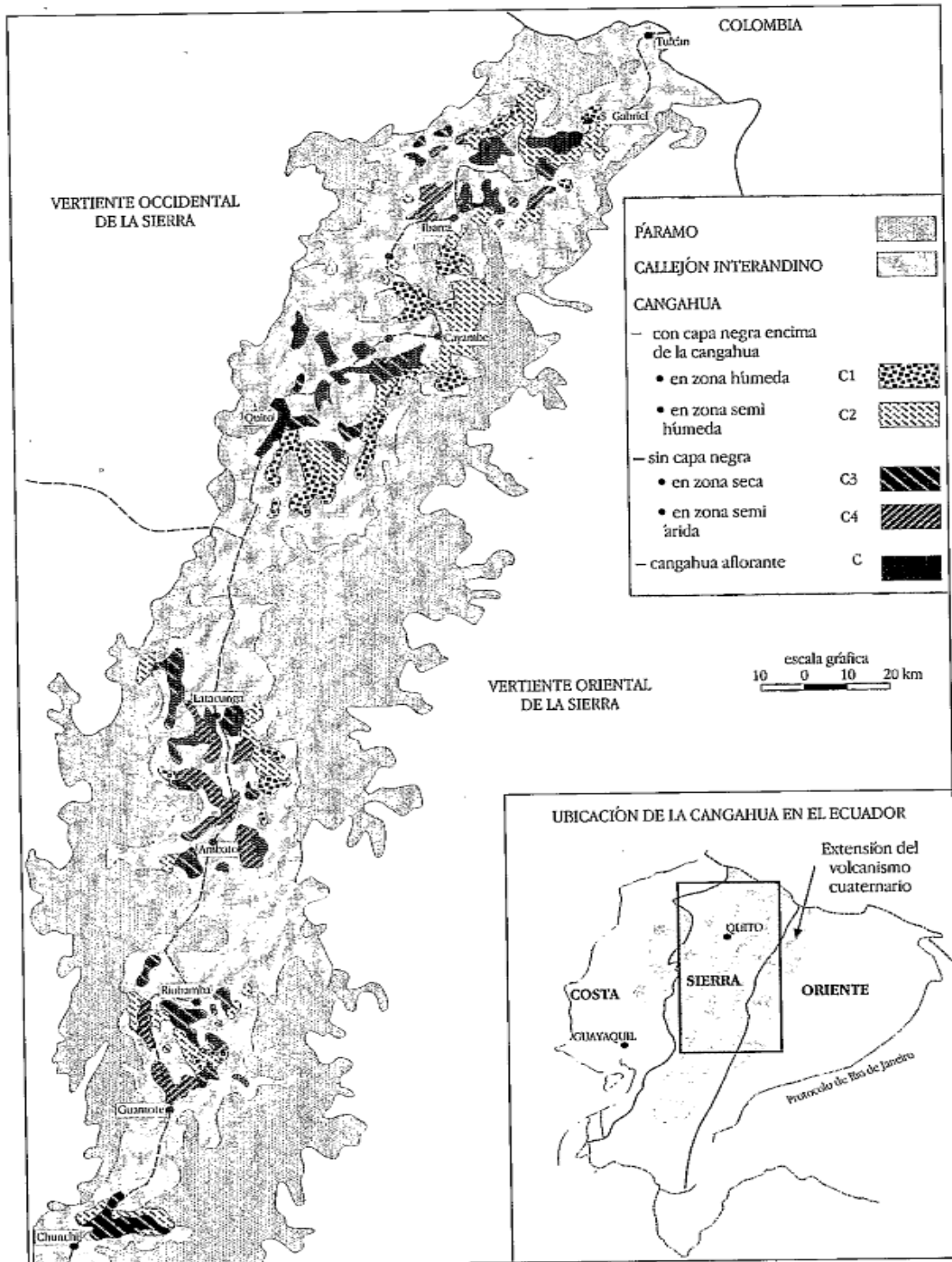
El uso de cangahua permite el reemplazo de una parte de cemento en la mezcla, y para utilizarla es necesario primeramente caracterizarla. Torres (2005) en su estudio “Compactación de cangahuas” identificó diferencias en el material según su origen, clasificación y ubicación, entre los cuales pueden identificarse arenas limosas y limos arenosos, de color café claro, café amarillento, habano, con cantidades de pómez, clasificados como ML y SM según el sistema SUCS.

Para las mezclas de inyección estables estudiadas se utilizó cangahua de color café amarillento, clasificada como limo arenoso con contenido de arcilla (ML según SUCS), en la cual juega un papel importante el contenido de partículas finas, su porcentaje fue determinado mediante ensayos de granulometría, también fue necesario determinar su peso volumétrico, su capacidad de absorción y humedad natural, los resultados pueden encontrarse en el ANEXO 3. Es conveniente mencionar que cangahuas con menor porcentaje de finos pueden causar una mezcla inestable con mayor cantidad de partículas sólidas precipitadas.

La caracterización de la cangahua es importante para poder establecer una dosificación en que no se vea afectado el comportamiento de los diferentes componentes en la mezcla, para puntualizar se hará referencia a su capacidad de absorción y el contenido de finos. Al ser la cangahua suelo, está compuesta por

aire, agua y partículas sólidas, al someterla a preparación y secado para su intervención como elemento de la mezcla, es de interés el comportamiento de las partículas sólidas. En el cuerpo de las partículas puede ser absorbida el agua de mezclado o también puede retenerse en su superficie formando una película de humedad; esto se debe a la cantidad de arena, limos y arcillas que la integran. Para determinar la máxima cantidad de agua que la cangahua puede absorber en sus poros saturables se determina la capacidad de absorción, de modo que la cangahua no tome parte del agua de mezclado (Guzmán, 2001). Así también se debe mencionar que la cantidad de finos de $<0.063\text{mm}$ presente en la cangahua, es la que puede condicionar la compatibilidad de un aditivo (Mas, 2012). Se puede concluir que parte de las partículas de cangahua absorben agua en su interior y otra parte de las partículas es decir las finas adsorben aditivo, como aspecto negativo de la utilización de cangahua se menciona la disminución del efecto del aditivo sobre las partículas de cemento, pero son las mismas que son capaces de otorgar cierta estabilidad en la mezcla.

FIGURA 3. 1 MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SUELOS DE CANGAHUA EN ECUADOR.



Fuente: (Zebrowski, 1996)

3.4.5 CRUDO DE CALIZA Y ARCILLA

La caliza y la arcilla son las materias primas del cemento, de la mezcla íntima entre ambos materiales se obtiene el crudo, el cual aún no ha atravesado la etapa de clinkerización en el proceso de producción de cemento descrito anteriormente en el Apartado 3.4.1

En el presente proyecto se utilizó este material como componente en la elaboración de lechadas de inyección por sus propiedades, pues al estar compuesto por arcilla presenta un desempeño similar a la bentonita, también constituye un elemento que consigue disminuir costos, por permitir reemplazar una parte de cemento, tiene un valor mucho menor al no haber pasado por el proceso de clinkerización, y demás pasos de fabricación de cemento. VER TABLA 5.15

La justificación de la utilización de este material como componente de mezclas estables la da Cambefort (1968), pues indica que anteriormente se añadía arcilla al cemento con el propósito de estabilizar la mezcla, es decir se conseguía reducir la sedimentación debido a las propiedades coloidales que presentan las arcillas.

El crudo de caliza arcilla presenta ventajas y desventajas similares a la bentonita pero otorga una ventaja adicional en la composición, pues al poseer menor capacidad coloidal que la bentonita permite lechadas con menor dosificación de cemento y mayor porcentaje de crudo, disminuyendo de esta manera significativamente el costo de la mezcla.

3.4.6 ADITIVOS

Debido a que los componentes de una lechada reaccionan desde el inicio de su preparación con agua, tienen un tiempo útil limitado en función de sus propiedades físicas como son la viscosidad y estabilidad, por lo tanto es necesaria la adición de un aditivo químico que pueda asegurar su manejabilidad y fluidez para ser bombeados e inyectables durante el transcurso de la inyección,

generalmente el tiempo en que las propiedades pueden mantenerse constantes fluctúa entre 1 y 2 horas (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

Los aditivos se han empleado desde hace mucho tiempo, los cuales gracias al progreso de la industria química, son cada vez más sofisticados y útiles según la necesidad de la construcción moderna (Guzmán, 2001). Los aditivos modernos que suelen emplearse en mezclas de inyección son los superplastificantes y estabilizadores de volumen (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002).

Los aditivos que tienen la capacidad de reducir agua son denominados plastificantes o superplastificantes, según sea menor o mayor su efecto, esta propiedad les permite proporcionar fluidez a la mezcla. Los aditivos plastificantes están compuestos usualmente de ácidos lignosulfónicos (lignosulfonatos) o sus modificaciones, sales de ácidos carboxílicos hidroxilados o sus modificaciones, melaninas y polímeros hidroxilados. Los aditivos superplastificantes por su parte, son polímeros orgánicos, ya sea de melanina sulfonatada o condensados de formaldehído de naftalina sulfonatada; o lignosulfonatos modificados que no contienen cloruros adicionales, entre otros. Los superplastificantes en base de policarboxilatos se han desarrollado recientemente y su capacidad de reducción de agua es bastante superior a los superplastificantes tradicionales. (Guzmán, 2001)

Su capacidad de reducción de agua se produce por la adsorción superficial del aditivo en los finos y una consecuente separación estérica y/o electrostática de las partículas de cemento. Cuando no se emplean aditivos, internamente se producen en la mezcla efectos negativos, a continuación se describe su efecto: no todos los granos de cemento reaccionan inmediatamente al contacto con el agua, las cargas eléctricas entre los granos no hidratados causan floculación de las partículas de cemento, lo cual tiene un efecto negativo en la trabajabilidad y el impedimento de una pronta hidratación. Con la inclusión de reductores de agua es posible deflocular las partículas de cemento; expresada químicamente la defloculación consiste en la separación de las partículas de cemento debido a la neutralización de las cargas eléctricas de su superficie, ya sea por un proceso electrostático (como el caso de los polímeros de naftaleno, melamina y

lignosulfonatos), o por un mecanismo estérico en el caso de policarboxilatos (Bernardo de la Peña R, 2000).

Se puede mencionar también a los aditivos inclusores de aire como necesarios en la mezcla de inyección, pues tienen la capacidad de originar aire, comúnmente en forma de pequeñas burbujas. Los millones de burbujas incluidas por metro cúbico reducen la segregación o sedimentación de las partículas sólidas. Los lignosulfonatos son compuestos que pueden producir cierta cantidad de aire incluido (Guzmán, 2001).

Finalmente, se puede añadir la utilización de aditivo retardante, el cual retarda el fraguado inicial, regulando los tiempos de mezclado y colocación de la mezcla. La composición química de estos aditivos, por lo general, es a base de ácidos hidrocarboxílicos, ligninas, boratos, azúcares o sales y ácidos tartáricos. Estos aditivos no afectan el requerimiento de agua, pero permite mayor tiempo de utilización de la mezcla con el mismo estado de fluidez; en algunos casos pueden incluir aire, especialmente si se trata de lignosulfonatos (Guzmán, 2001).

Tomando a consideración el análisis realizado, en el presente estudio se empleó aditivo Megamix especial que tiene como base el policarboxilato; este aditivo es un reductor de agua de alto rango o superplastificante necesario para aumentar la fluidez de la mezcla, además es inclusor de aire por lo tanto es un aditivo dispersante, y retardante necesario para retrasar el fraguado inicial de la lechada, por lo tanto posee tres características importantes para que sea factible el bombeo e inyectabilidad de la lechada. También se utilizó aditivo lignosulfonato puro que es un aditivo reductor de agua, también capaz de retardar el fraguado inicial y producir cierta cantidad de aire incluido.

Además, se debe tomar en cuenta el fenómeno de saturación del aditivo que consiste en la aplicación cuidadosa del mismo, pues a partir de cierta dosis ya no se obtienen mejoras en la fluidez y por encima de esta cantidad óptima se presentan efectos contraproducentes (Bernardo de la Peña R, 2000). De la misma manera se debe determinar su compatibilidad con los diferentes componentes de la mezcla pues “el efecto dispersante de cualquier aditivo no puede tener lugar si

el aditivo no es adsorbido completamente sobre la superficie de las partículas del cemento, cuando el rendimiento del aditivo no es el estimado debe seleccionarse uno diferente que presente mejor compatibilidad” (Mas, 2012). Al elaborarse mezclas de cemento con cangahua debió seleccionarse un aditivo compatible con la naturaleza mineralógica de los finos o arcillas presentes en la cangahua y el mismo criterio se adoptó para la selección de un aditivo con capacidad dispersante sobre las mezclas con crudo de caliza-arcilla.

CAPÍTULO 4

ELABORACIÓN DE LECHADAS DE INYECCIÓN EN LABORATORIO

Para determinar la dosificación de una mezcla inyectable se necesita un estudio de laboratorio que establezca la proporción de los diversos componentes que forman el nuevo producto. Así también es importante conocer la secuencia en la que se mezclan estos elementos constitutivos pues es necesario trasladarla al lugar en que se estime practicar un trabajo de inyección; el no acatar el modo operativo establecido por el laboratorio implicaría mayor variación en los parámetros necesarios de a mezcla de inyección, si se toma en cuenta que las condiciones de laboratorio son óptimas.

Debido a que en la constitución de una lechada intervienen: el origen de los componentes, la dosificación, el mezclado y las condiciones ambientales, se planteó en el presente estudio un programa experimental de dosificaciones de lechadas en función de una sola variable, el mismo que se muestra en el ANEXO 1, consecuentemente los resultados tuvieron continuidad y fueron comparables, de manera que finalmente pueden seleccionarse las lechadas óptimas, es decir las que poseen los parámetros de viscosidad y estabilidad compatibles.

4.1 NORMAS A SEGUIR PARA LA FABRICACIÓN DE LECHADAS

Para la fabricación de lechadas en laboratorio se utilizaron las mismas normas de preparación de morteros, pues no existen normas específicas para elaboración de

lechadas. En el presente estudio no se hace distinción entre los términos lechada o mortero de inyección.

La norma ASTM C305 o NTE INEN 155 Cemento Hidráulico. Mezclado mecánico de pastas y morteros de consistencia plástica (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009), es la guía para la preparación de la mezcla de inyección.

La norma ASTM C109 o NTE INEN 488 Cemento Hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50mm de arista (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009) es la guía para medir la resistencia a la compresión mediante rotura de probetas cúbicas.

La norma ASTM C939 Método de prueba estándar para medir la fluidez de una lechada. Método del cono de Flujo (ASTM, 2010) es la guía para medir la viscosidad de la lechada de inyección en estado fluido.

4.2 DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTO Y EQUIPO UTILIZADO EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

A lo largo de todos los ensayos realizados se mantuvieron constantes las condiciones ambientales con el fin de reducir el número de variables; dichas condiciones se describen la norma NTE INEN 155 (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

4.2.1 MEZCLADO MECÁNICO DE LAS LECHADAS DE INYECCIÓN

4.2.1.1 Equipo necesario y procedimiento para el mezclado mecánico de la lechada en laboratorio

Para el mezclado mecánico se utilizó equipo detallado conforme a normativa NTE INEN 155 (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009). Los materiales se mezclaron bajo la técnica y secuencia manejada en lo posible al margen de la misma norma. Se puede observar el detalle en el Anexo 2.

4.2.1.2 Observaciones sobre el procedimiento de mezclado mecánico de lechadas en laboratorio

Se hicieron variaciones respecto al procedimiento descrito en la norma INEN 155 para elaboración de morteros, pues se introdujeron en la mezcla más materiales aparte del cemento y el agua, así también varió el tiempo de mezclado, pero continuó cumpliendo con el “tiempo experimentado para obtener mezclas de inyección homogéneas de 1 a 5 minutos” (Cambefort, 1968, pág. 273).

Después de varias pruebas de lechada de cemento-bentonita, se pudo observar y comprobar que según el sistema de preparación adoptado, el comportamiento de la bentonita es totalmente diferente; si la bentonita se utiliza inmediatamente en combinación con el cemento, o se utiliza después de diluida al estar en contacto con el agua para saturarse, en este caso el producto final es mucho más coloidal en comparación al primer método de mezcla, lo mismo sucede al mezclar crudo de caliza arcilla.

Después de agregar el aditivo a la lechada es importante mezclar primero a baja velocidad, de no ser así se corre el riesgo de que el aditivo salpique fuera del tazón y por consiguiente al no ser la cantidad requerida se obtienen resultados incoherentes.

4.2.2 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LECHADAS EN LABORATORIO

Para conocer la densidad de la mezcla, se llena el fluido en un recipiente completamente seco y se pesa, previamente se conoce el volumen del recipiente.

Según Ortiz (2006, pág. 9), la densidad de un fluido viene determinada por la masa y el volumen, mediante la relación:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{Volumen}}$$

Utilizando esta relación se obtuvo el volumen del recipiente y la densidad de la lechada en cuestión, de la manera descrita en el Anexo 2.

4.2.2.1 Observaciones sobre la determinación de la densidad de lechadas en laboratorio.

Para minimizar el margen de error se realizaron dos pesajes y se obtuvo un promedio.

Los recipientes debían ser llenos de fluido al ras, evitando derramarlo en el contorno externo, pues al conocer el volumen del recipiente el valor de la densidad del fluido depende únicamente de la masa contenida en el recipiente, de no ser así se obtienen datos incoherentes; y debieron conseguirse lo más pronto posible para continuar con los siguientes ensayos manteniendo su viscosidad inicial.

4.2.3 MEDICIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LECHADAS EN LABORATORIO

4.2.3.1 Equipo necesario y procedimiento para medición de la viscosidad de lechadas en laboratorio

Se utilizaron los viscosímetros que acorde a Cambefort (1968), no son más que simples conos calibrados, y poseen características conforme a normativa ASTM C939 (2010), detalladas en el Anexo 2.

La medida de la viscosidad se hace anotando el tiempo de circulación de un volumen de mortero (Cambefort, 1968).

Previamente se calibraron los conos de medición para estandarizar el volumen de todas las mezclas igual al volumen de agua señalado, medida que se toma debido a la variación de densidades de los fluidos a excepción del agua que es 1, o varía muy poco respecto a este valor. Se presenta un detalle en el Anexo 2.

4.2.3.2 Observaciones sobre la medición de la viscosidad de lechadas en laboratorio

En las lechadas elaboradas con bentonita, cangahua y crudo de caliza-arcilla se utilizó un filtro de abertura no mayor a 2mm, para colar y desechar las partículas que obstruían el orificio antes de llenar el cono.

Se puede determinar que el estado de la superficie y la unión del cono con el apéndice inferior tienen una gran importancia y pueden hacer variar los resultados. Por este motivo es importante que el cono sea siempre el mismo en cada caso, para obtener resultados comparables.

Después de realizar los ensayos se han establecido curvas de correspondencia donde se observa gran variación de las viscosidades según el cono utilizado. Para hacer comparable el tiempo de descarga del fluido con los 45 o 80 segundos de especificación experimentado como óptimo para lechadas de inyección, por la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (2002, pág. 616); se hicieron ensayos en los tres tipos de cono, al obtener datos se llegó a la conclusión que el cono apropiado para medir la viscosidad de una lechada de inyección es el cono Marsh con abertura del apéndice igual a 5mm.

Las lechadas que eran muy espesas por su alta dosificación de cemento, o por la dosificación de un elevado porcentaje de bentonita, crudo de caliza-arcilla o cangahua no conseguían fluir completamente a través del cono, por lo tanto no se obtuvo ningún dato fidedigno.

4.2.4 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LECHADAS EN LABORATORIO

Se controló la estabilidad mediante la prueba de agua libre o sedimentación descrita en el Anexo 2.

4.2.4.1 Observaciones sobre la determinación de la estabilidad del fluido:

Para determinar la estabilidad todos los ensayos fueron realizados en probetas estándar, con las características de ser cilíndricas, plásticas y con capacidad de

medición de 250cm³, pues fue evidente al realizar una medición en una probeta tipo cónica que el volumen sedimentado de la misma lechada al cabo de dos horas era diferente al de la probeta cilíndrica. Se concluye que la inclinación de las paredes así como el diámetro del recipiente de ensayo tiene influencia significativa; por tal motivo es necesario operar siempre de la misma manera, utilizando una misma probeta para todos los ensayos.

El porcentaje de sedimentación de partículas determina la estabilidad de la lechada, cuanto menor es el porcentaje sedimentado más estable es esta.

4.2.5 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MEDIANTE ROTURA DE PROBETAS CÚBICAS

Se toma parte de la mezcla preparada para su moldeo y posterior medida de resistencia a la compresión.

4.2.5.1 Equipo necesario y procedimiento para medición de la resistencia a la compresión.

Las características del equipo que se utilizó para este fin cumplía normativa NTE INEN 488 (NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009). Se elaboraron especímenes y se determinó la resistencia a la compresión acorde a la misma norma. Se presenta la fotografía del equipo utilizado en Anexo 2.

4.2.5.2 Observaciones sobre el procedimiento para medir la resistencia a la compresión de probetas cúbicas

Después de elaborar los primeros especímenes de lechada, se pudo observar que los datos que se consiguieron de resistencia a la compresión eran equívocos, pues en primera instancia los moldes metálicos no fueron sellados con silicona y, al ser la lechada un fluido poco viscoso escurría por las líneas de contacto exteriores entre el molde y la placa base, el resultado era, especímenes con

resistencias más elevadas que las verdaderas. Fue necesario entonces impermeabilizar para obtener resultados fiables y consecuentes.

No se pudo obtener valores de resistencia a la compresión de ciertos especímenes a la edad de 3 días, pues alguna variación en las dosificaciones como menor cantidad de cemento, mayor cantidad de agua, mayor porcentaje de bentonita o mayor porcentaje de aditivo no permitían que estos inicien su fraguado inicial.

La resistencia a la compresión es inversamente proporcional a la razón cemento/agua de la lechada, a medida que se aumenta la relación mayor es la resistencia.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL DE DOSIFICACIÓN DE LECHADAS DE INYECCIÓN

El presente capítulo tiene por objetivo mostrar los resultados obtenidos del plan de trabajo aplicado para elaboración de lechadas en laboratorio, con sus diferentes elementos constituyentes, como se observa en el ANEXO 1; su análisis, comparación y determinación de las dosificaciones óptimas.

5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO PURAS

Las lechadas de inyección de cemento puras fueron ensayadas utilizando equipo que cumple normativa y de acuerdo al procedimiento descrito en el CAPÍTULO 4.

El principal objetivo de esta serie de ensayos fue evaluar la influencia del cambio de relación cemento/agua comprendida entre 1 y 1.90, sobre la fluidez o viscosidad, la sedimentación que define la estabilidad de la lechada, su resistencia mecánica a la compresión y su densidad; que vienen dadas en la TABLA 5.1

TABLA 5. 1 LECHADAS DE CEMENTO PURAS

Prueba No.		1	2	3	4	5
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	Agua	1000,0	909,1	833,3	769,2	714,3
Relación	a/c	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7
	c/a	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		41,10	43,43	45,75	48,46	52,25
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		10,45	10,98	11,56	11,92	12,55
Fluidez Cono de flujos (seg)		8,87	8,92	9,16	9,44	9,88
Sedimentación (%)		22,20	16,00	10,40	7,92	6,80
Resistencia (MPa) 3 días		N/F	N/F	4,27	4,56	6,10
Resistencia (MPa) 7 días		5,68	6,30	7,50	8,40	8,53
Resistencia (MPa) 28 días		7,27	8,92	9,87	10,91	11,70
DENSIDAD gr/cm ³		1,51	1,54	1,58	1,62	1,66

CONTINUACIÓN DE TABLA 5.1

Prueba No.		6	7	8	9	10
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	Agua	666,7	625,0	588,2	555,6	526,3
Relación	a/c	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5
	c/a	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		57,07	65,10	87,00	N/P	N/P
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		13,56	14,42	15,50	18,00	21,70
Fluidez Cono de flujos (seg)		10,13	10,57	11,80	12,31	13,80
Sedimentación (%)		5,60	4,80	4,00	3,20	2,40
Resistencia (MPa) 3 días		6,58	9,21	10,75	12,71	14,04
Resistencia (MPa) 7 días		10,00	11,61	13,36	14,41	15,95
Resistencia (MPa) 28 días		12,99	15,73	17,75	19,42	21,79
DENSIDAD gr/cm ³		1,69	1,74	1,77	1,80	1,86

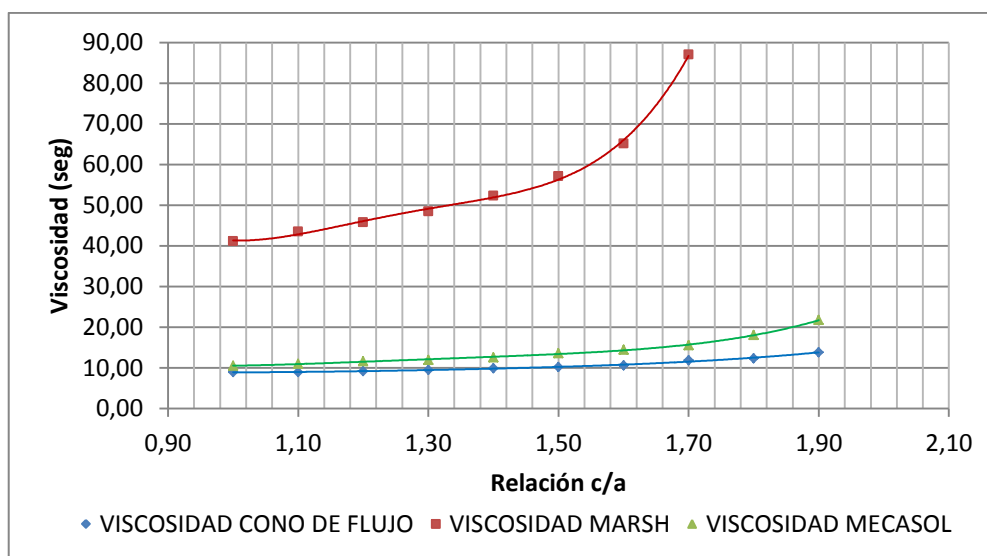
Elaborado por: Maritza Córdova

Puede observarse (TABLA 5. 1) que a medida que incrementa la cantidad de cemento aumenta la viscosidad de la lechada. A partir de la relación c/a de 1,80

no se muestran datos de viscosidad Marsh, debido a la imposibilidad de ser determinados, al no fluir la lechada completamente a través del cono.

Se establecen curvas de correspondencia de las medidas de viscosidad para los tres tipos de cono, en el GRÁFICO 5. 1 se puede observar la diferencia que existe entre ellos. Así, la curva correspondiente a la viscosidad Marsh es la que se utilizará como referencia de tiempo de descarga óptimo de fluido entre 45 y 80 segundos.

GRÁFICO 5. 1 VARIACIÓN DE LAS VISCOSIDADES SEGÚN EL CONO UTILIZADO

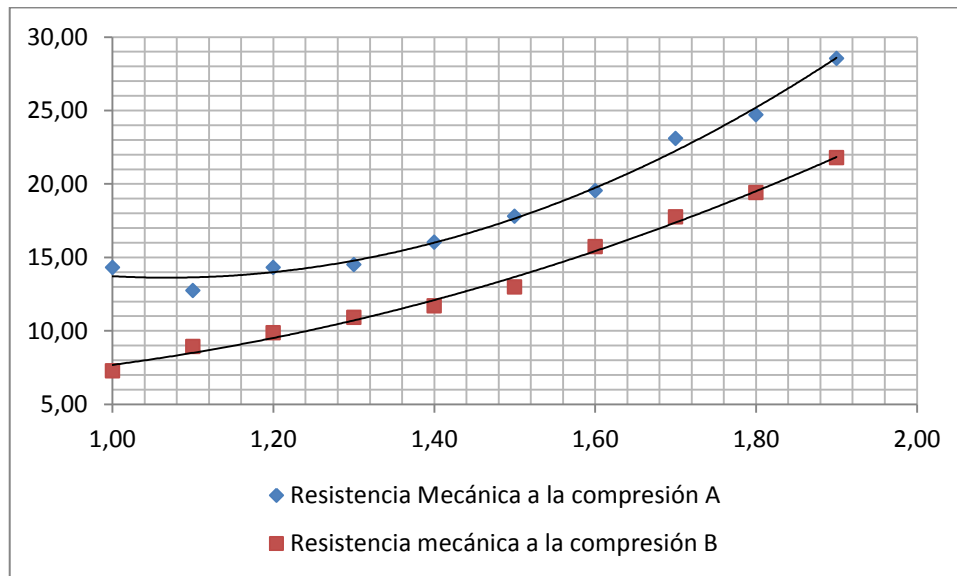


Elaborado por: Maritza Córdova

Los resultados de resistencia a la compresión que se muestran en la TABLA 5. 1 corresponden a una repetición de la secuencia de ensayos, en la que se corrigió la elaboración de especímenes en moldes sellados o impermeabilizados con silicona. En el GRÁFICO 5. 2, se presenta la diferencia de los valores de resistencia a la compresión a los 28 días de edad, de los especímenes elaborados en moldes sin sellar que corresponden a la línea A, y especímenes elaborados con moldes sellados correspondientes a la línea B; puede observarse que las resistencias son más elevadas y un tanto dispersas para A que para B.

Pero la línea B presenta confiabilidad al seguir el procedimiento correcto de moldeo que no exhibió fugas de agua.

GRÁFICO 5. 2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LECHADAS DE CEMENTO PURAS A LOS 28 DÍAS

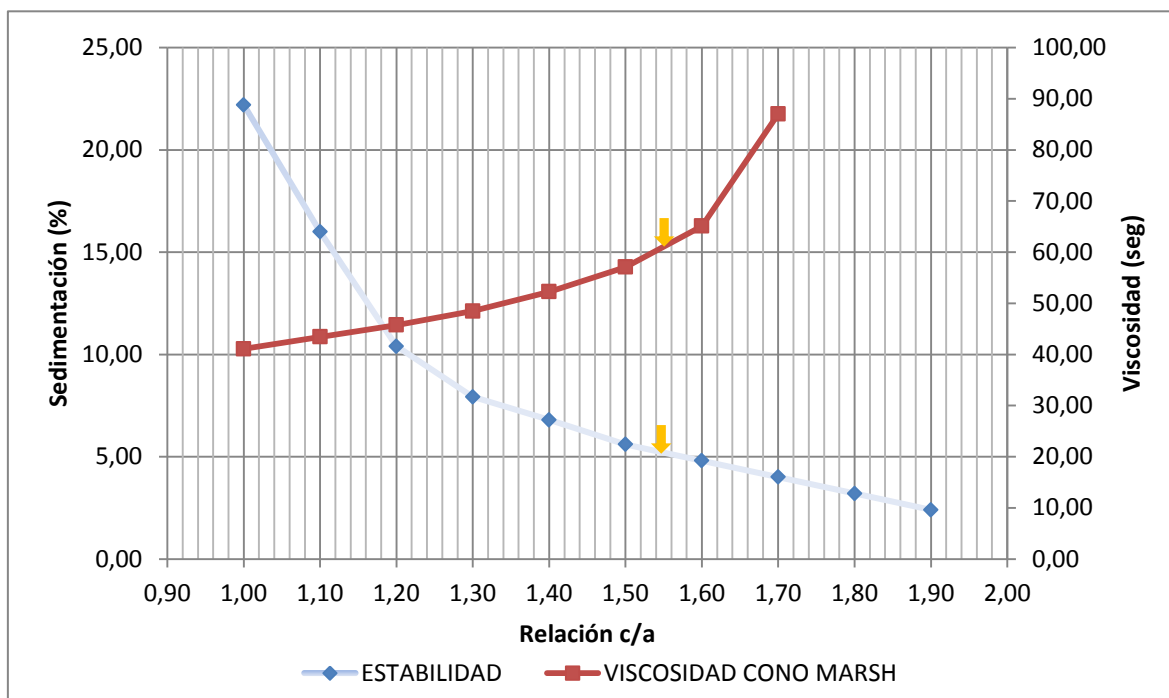


Línea A: Especímenes elaborados en moldes sin sellar
 Línea B: Especímenes elaborados en moldes impermeabilizados.
 Elaborado por: Maritza Córdova

De la misma manera en que la viscosidad aumenta con la cantidad de cemento, así también incrementa su densidad (TABLA 5. 1). Lo contrario sucede al medir la sedimentación, es decir que al aumentar la relación c/a disminuye el porcentaje de sedimentación de la lechada.

En el GRÁFICO 5. 3 se presentan los resultados de Sedimentación vs resultados de viscosidad; en la que se puede ver, después de realizar una interpolación, que la lechada se vuelve estable a partir de la relación c/a 1,55 hacia 1,90; y que el rango óptimo de viscosidad se da en las lechadas c/a de 1,0 a 1,55. Se determina que la viscosidad y la estabilidad para lechadas de cemento puras son compatibles en la relación c/a de 1,55.

**GRÁFICO 5. 3 SEDIMENTACIÓN VS VISCOSIDAD (RELACIÓN c/a ÓPTIMA)
EN LECHADAS DE CEMENTO PURAS**



Elaborado por: Maritza Córdova

5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON BENTONITA

Las lechadas de inyección de cemento con Bentonita fueron ensayadas utilizando equipo que cumple normativa y de acuerdo al procedimiento descrito en el CAPÍTULO 4.

El principal objetivo de estos ensayos es evaluar la influencia de la adición de bentonita en diferentes porcentajes a la lechada de cemento. Se prepararon las lechadas combinando primeramente el cemento y la bentonita en seco antes de su mezclado, pero se observó que no se estaba aprovechando totalmente las propiedades de la Bentonita al no estar hidratada por completo, así que se preparó primeramente un lodo o suspensión de bentonita. Los resultados que se

muestran en el presente capítulo se obtuvieron con el segundo procedimiento de mezclado.

A la primera serie de ensayos se le añadió el 1% de Bentonita en relación al peso del cemento, estaban caracterizados por una relación c/a comprendida entre 1,0 y 1,8. Las medidas de viscosidad, sedimentación, resistencia mecánica a la compresión y su densidad, vienen dadas en la TABLA 5. 2

TABLA 5. 2 LECHADAS DE CEMENTO CON BENTONITA 1%

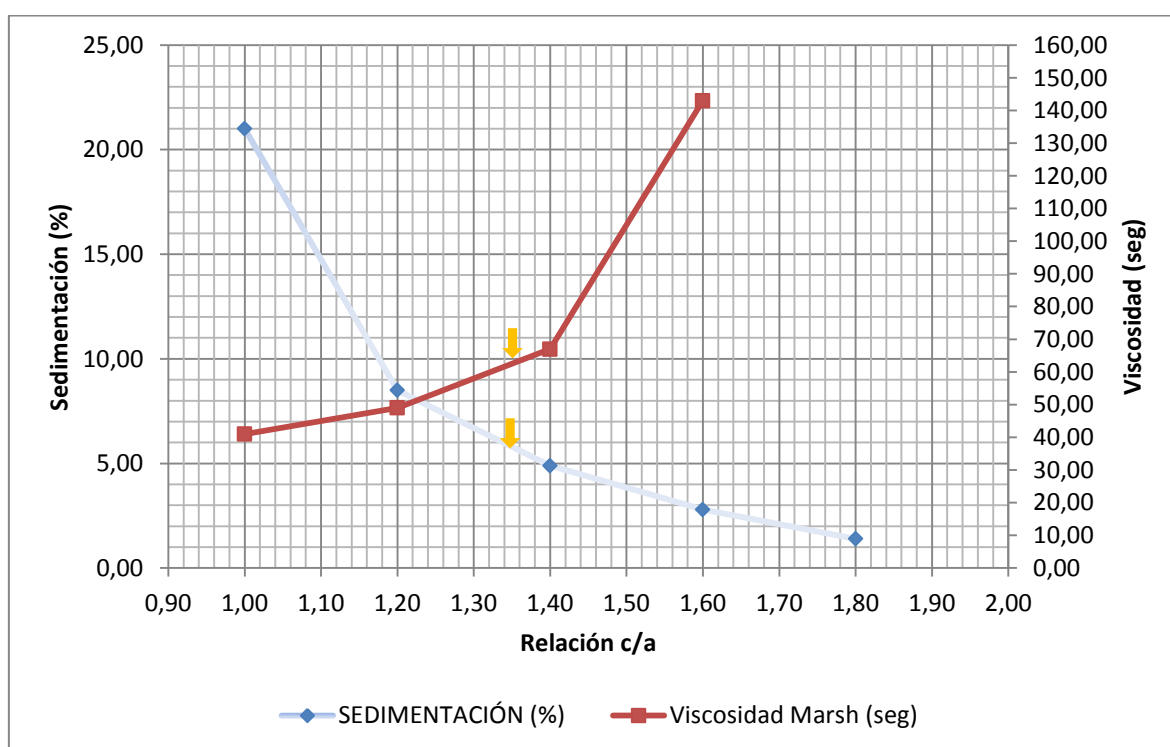
Prueba No.		1	2	3	4	5
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	agua	1000,0	833,3	714,3	625,0	555,6
Relación	a/c	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6
	c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		41,00	49,00	67,00	143,00	N/P
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		10,96	11,99	14,45	22,62	N/P
Fluidez Cono de flujos (seg)		9,09	9,47	10,47	12,80	19,34
Sedimentación (%)		24,00	7,00	4,40	2,00	1,20
Resistencia (MPa) 3 días		N/F	3,62	5,78	8,07	11,33
Resistencia (MPa) 7 días		5,05	5,42	7,92	11,48	13,37
Resistencia (MPa) 28 días		7,93	8,79	10,54	17,03	18,79
DENSIDAD gr/cm ³		1,50	1,58	1,67	1,74	1,81

Elaborado por: Maritza Córdova

Se observa en la TABLA 5. 2 como tendencia general, que a medida que se incrementa la relación c/a aumenta la viscosidad, resistencia mecánica a la compresión, densidad y disminuye su sedimentación. La lechada de menor dosificación c/a 1,0 a los 3 días no inicia su fraguado, se concluye que la adición de bentonita provoca retardo en el fraguado de la lechada de inyección.

En el GRÁFICO 5. 4, se presentan los resultados de Sedimentación vs resultados de viscosidad para lechadas de cemento con adición de 1% Bentonita; en la que se puede ver, después de realizar una interpolación, que la lechada se vuelve estable a partir de la relación c/a 1,35 hacia 1,90; y que el rango óptimo de viscosidad se da en las lechadas c/a de 1,0 a 1,45. Se determina que la viscosidad y la estabilidad para lechadas de cemento Bentonita 1% son compatibles en la relación c/a de 1,35.

**GRÁFICO 5. 4 SEDIMENTACIÓN VS VISCOSIDAD (RELACIÓN c/a ÓPTIMA)
EN LECHADAS CEMENTO BENTONITA 1%**



Elaborado por: Maritza Córdova

Posteriormente se elaboraron lechadas con adición del 2% de Bentonita; sus resultados se presentan en la TABLA 5. 3; se observa que la lechada de menor dosificación c/a 1,0 a los 3 días no inicia su fraguado, por lo tanto no se presenta ningún resultado.

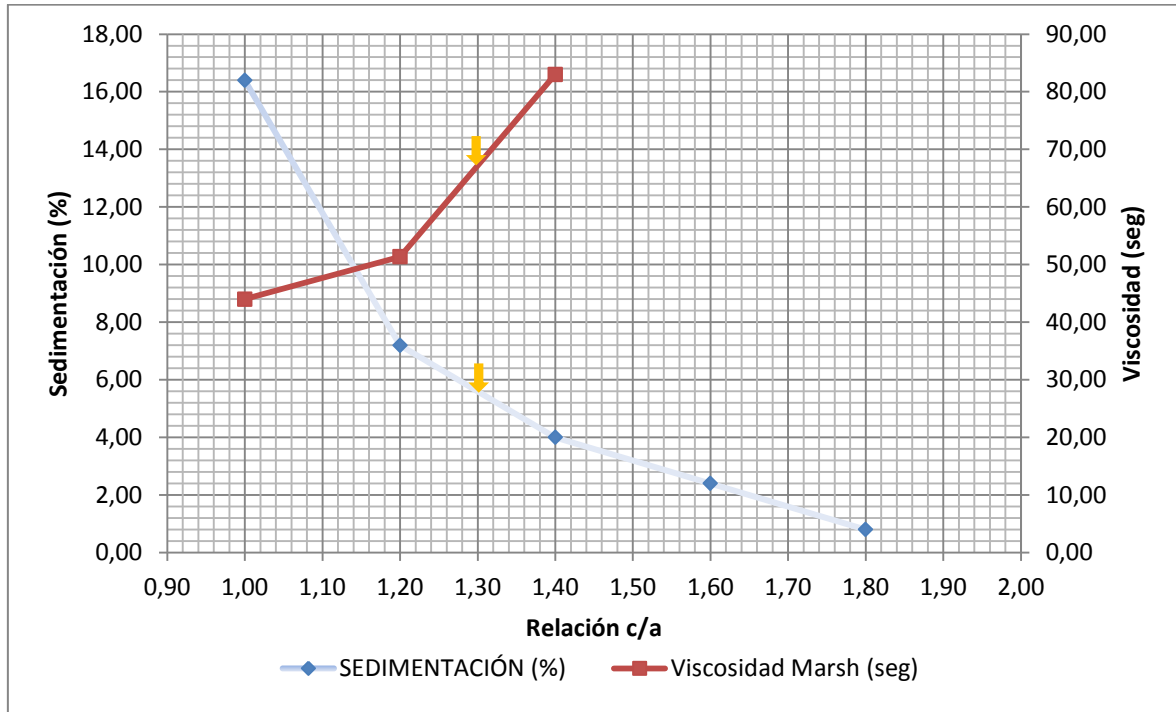
TABLA 5. 3 LECHADAS DE CEMENTO CON BENTONITA 2%

Prueba No.		1	2	3	4	5
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	Agua	1000,0	833,3	714,3	625,0	555,6
Relación	a/c	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6
	c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		44,00	51,35	83,00	N/P	N/P
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		10,96	12,25	15,40	N/P	N/P
Fluidez Cono de flujos (seg)		8,94	9,56	10,31	15,81	N/P
Sedimentación (%)		16,40	7,20	4,00	2,40	0,80
Resistencia (MPa) 3 días		N/F	4,75	6,63	7,79	10,35
Resistencia (MPa) 7 días		4,87	6,58	9,28	11,54	14,51
Resistencia (MPa) 28 días		6,10	8,95	13,24	14,53	20,29
DENSIDAD gr/cm ³		1,51	1,59	1,66	1,73	1,82

Elaborado por: Maritza Córdova

En el GRÁFICO 5. 5, se presentan los resultados de Sedimentación vs resultados de viscosidad para lechadas de cemento con adición de 2% Bentonita; en la que se puede ver, después de realizar una interpolación, que la lechada se vuelve relativamente estable a partir de la relación c/a 1,30 hacia 1,90; y que el rango óptimo de viscosidad se da en las lechadas c/a de 1,0 a 1,30. Se determina que la viscosidad y la estabilidad para lechadas de cemento con Bentonita 2% son compatibles en la relación c/a de 1,30.

**GRÁFICO 5. 5 SEDIMENTACIÓN VS VISCOSIDAD (RELACIÓN c/a ÓPTIMA)
EN LECHADAS CEMENTO BENTONITA 2%**



Elaborado por: Maritza Córdova

En la TABLA 5.4 se presentan los resultados de lechadas con adición del 3% de Bentonita; también se observa que la lechada de menor dosificación c/a 1,0 a los 3 días no inicia su fraguado.

TABLA 5. 4 LECHADAS DE CEMENTO CON BENTONITA 3%

Prueba No.		1	2	3	4	5
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	Agua	1000,0	833,3	714,3	625,0	555,6
Relación	a/c	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6
	c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		50,65	74,00	N/P	N/P	N/P
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		12,44	15,06	24,21	N/P	N/P
Fluidez Cono de flujos (seg)		9,38	10,99	12,13	N/P	N/P
Sedimentación (%)		9,20	5,20	1,60	0,80	0,20
Resistencia (MPa) 3 días		2,88	4,10	5,54	9,16	12,88
Resistencia (MPa) 7 días		3,81	5,70	6,98	11,08	14,26
Resistencia (MPa) 28 días		6,85	9,28	11,77	15,70	22,12
DENSIDAD gr/cm ³		1,52	1,61	1,68	1,76	1,82

Elaborado por: Maritza Córdova

No se presentan los resultados de Sedimentación vs resultados de viscosidad para lechadas de cemento con adición de 3% Bentonita; pues los resultados presentes en la

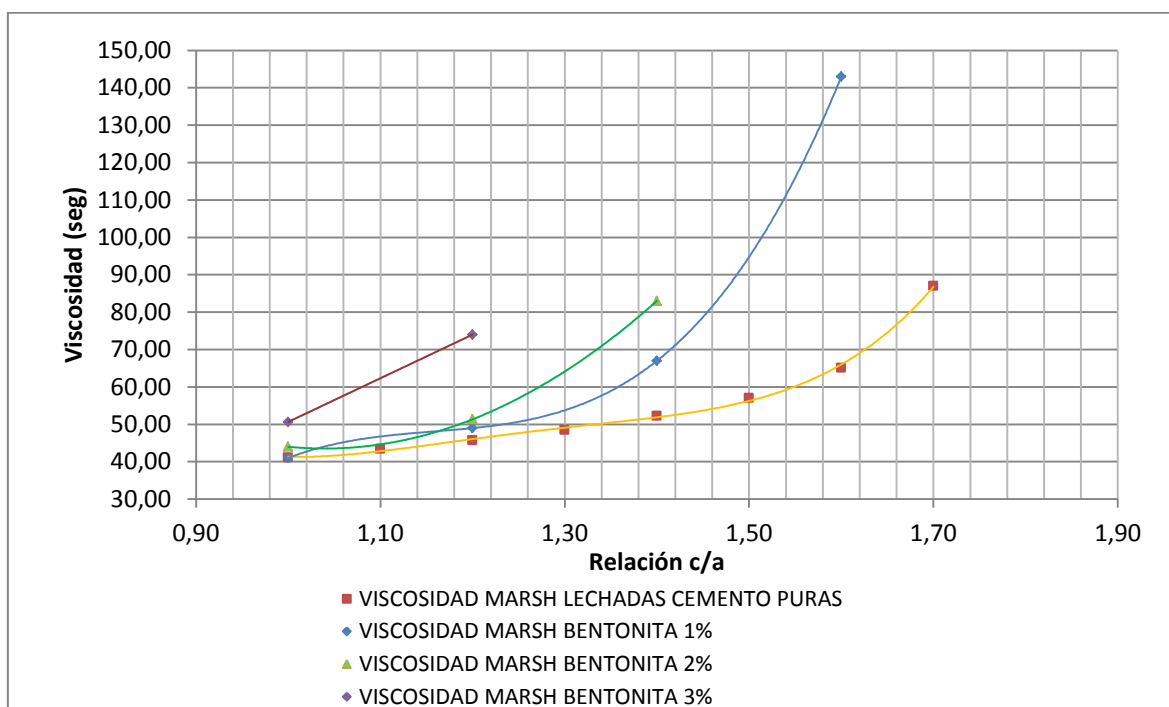
TABLA 5. 4

Si se comparan los resultados de la adición de Bentonita 1%, 2% y 3% de las TABLA 5. 2, TABLA 5. 3 y

TABLA 5. 4 respectivamente, se puede observar que el aumento de bentonita incrementa la viscosidad de le lechada. En laboratorio este incremento de la viscosidad ocasionó, que al llegar a cierta relación c/a no fuera posible su flujo

completo a través del cono Marsh. Así, con la adición de Bentonita 1% a partir de la relación c/a de 1,80 no se pudo determinar la viscosidad Marsh; con la adición de Bentonita 2% a partir de la relación c/a de 1,60 y con la adición de Bentonita 3% a partir de la relación c/a de 1,20. De esta manera elaborar lechadas con 4% de Bentonita habría sido inconsecuente. Se determina además que la adición de Bentonita no influye significativamente en los valores de densidad de la mezcla y resistencia a la compresión de especímenes a los 28 días de edad respecto a las lechadas de cemento puras.

GRÁFICO 5. 6 INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE BENTONITA EN LA VISCOSIDAD DE LAS LECHADAS

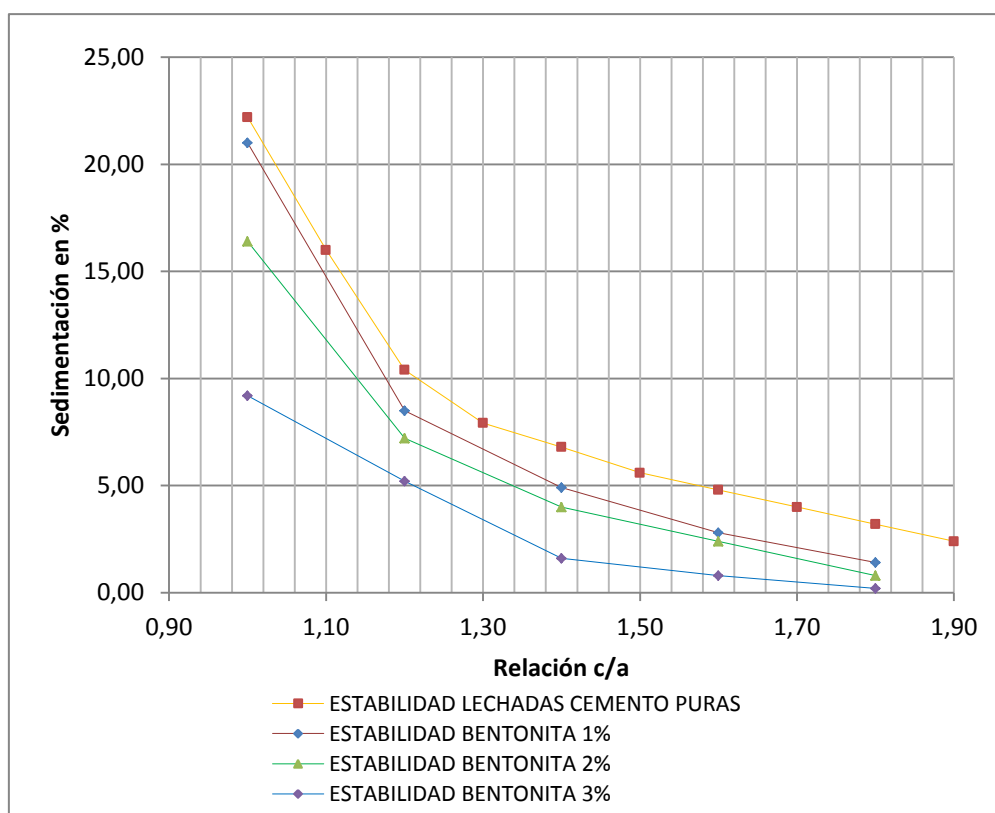


Elaborado por: Maritza Córdova

El GRÁFICO 5. 6 presenta la influencia del porcentaje de Bentonita en la viscosidad de las lechadas. Se observa el incremento de la viscosidad en las tres curvas correspondientes a la adición de Bentonita 1%, 2% y 3%, respecto a la viscosidad medida en las lechadas de cemento puras.

El interés de adicionar Bentonita fue estabilizar las lechadas debido a sus propiedades características; en el GRÁFICO 5. 7 se presenta la influencia de la Bentonita en la estabilidad de las lechadas; se observa que a medida que se adiciona Bentonita, disminuye la sedimentación de las lechadas es decir se vuelven más estables.

GRÁFICO 5. 7 INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE BENTONITA EN LA ESTABILIDAD DE LAS LECHADAS



Elaborado por: Maritza Córdova

Del GRÁFICO 5.6 y GRÁFICO 5.7 se concluye que la adición de Bentonita tiene efectos positivos y negativos; El aspecto positivo es la disminución de sedimentación que hace a la mezcla más estable y el aspecto negativo es el aumento de la viscosidad de la lechada a efectos de trabajabilidad e inyectabilidad.

5.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON ADITIVO

Las lechadas de inyección de cemento con Aditivo fueron ensayadas utilizando equipo que cumple normativa y de acuerdo al procedimiento descrito en el CAPÍTULO 4.

La adición de aditivo a la lechada es indispensable para mantener constantes sus propiedades físicas en el transcurso de una inyección.

El principal objetivo de estos ensayos es evaluar la influencia de la adición de aditivo Megamix especial en las lechadas de cemento y evaluar su eficacia, respecto a su capacidad de ser reductor de agua de alto rango, incluso de aire y retardante.

A la primera serie de ensayos se le añadió el 1% de Aditivo Megamix especial en relación al peso del cemento, caracterizados por una relación c/a comprendida entre 1,0 y 1,8. Las medidas obtenidas de viscosidad, sedimentación, resistencia mecánica a la compresión y densidad, vienen dadas en la TABLA 5.5.

TABLA 5. 5 LECHADAS DE CEMENTO CON ADITIVO 1%

Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	agua	1000,0	833,3	714,3	625,0	555,6
Relación	a/c	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6
	c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		41,40	49,10	59,50	78,44	102,60
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		10,51	11,61	12,56	14,29	18,46
Fluidez Cono de flujos (seg)		8,78	9,15	9,49	10,09	10,78
Sedimentación (%)		18,60	16,80	14,40	12,80	8,40
Resistencia (MPa) 3 días		N/F	N/F	N/F	9,49	10,36
Resistencia (MPa) 7 días		5,95	7,68	11,39	13,99	16,16
Resistencia (MPa) 28 días		8,94	11,55	16,75	20,88	22,88
DENSIDAD gr/cm ³		1,51	1,61	1,68	1,73	1,79

Elaborado por: Maritza Córdova

Se puede observar (TABLA 5.5) que las lechadas con relación c/a 1,0 a 1,4 a los 3 días no inician su fraguado, lo que demuestra la capacidad del aditivo de actuar como retardante; también se observa que el flujo a través del cono Marsh fue posible para todas las relaciones c/a, demostrando así su capacidad de fluidificar la mezcla.

A la segunda serie de ensayos realizados se le añadió el 2% de Aditivo Megamix especial. Las medidas de viscosidad, sedimentación, resistencia mecánica a la compresión y densidad, vienen dadas en la TABLA 5. 6.

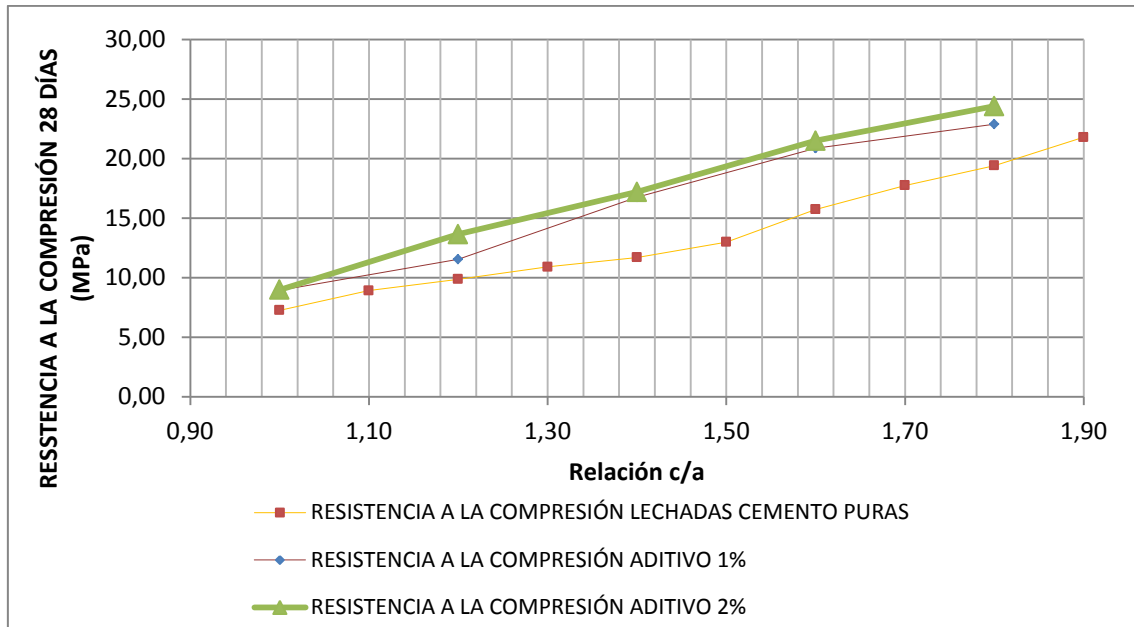
TABLA 5. 6 LECHADAS DE CEMENTO CON ADITIVO 2%

Prueba No.		1	2	3	4	5
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	agua	1000,0	833,3	714,3	625,0	555,6
Relación	a/c	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6
	c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		39,40	42,90	50,38	61,00	76,40
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		10,45	10,73	12,03	13,64	16,75
Fluidez Cono de flujos (seg)		8,50	9,03	9,35	9,94	10,75
Sedimentación (%)		11,24	10,40	8,80	7,20	4,80
Resistencia (MPa) 28 días		8,99	13,65	17,20	21,50	24,40
DENSIDAD gr/cm ³		1,53	1,63	1,67	1,74	1,78

Elaborado por: Maritza Córdova

Si se comparan los resultados de Sedimentación de la TABLA 5.5 y TABLA 5.6 se puede determinar que al incorporar a la lechada mayor porcentaje de aditivo esta se vuelve más estable lo que demuestra la capacidad del aditivo de actuar como dispersante. Por su parte, la resistencia a la compresión final aumenta relativamente conforme se aumenta el aditivo, como se muestra en el GRÁFICO 5.8, donde además se observa el incremento con respecto a los valores de resistencia a la compresión de las lechadas de cemento puras; esto demuestra su capacidad de actuar como reductor de agua.

GRÁFICO 5. 8 INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE ADITIVO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES DE LECHADA A LOS 28 DÍAS.



Elaborado por: Maritza Córdova

A la tercera serie de ensayos realizados se le añadió el 3% de Aditivo Megamix especial. Las medidas de viscosidad, sedimentación, resistencia mecánica a la compresión y densidad, vienen dadas en la TABLA 5. 7

TABLA 5. 7 LECHADAS DE CEMENTO CON ADITIVO 3%

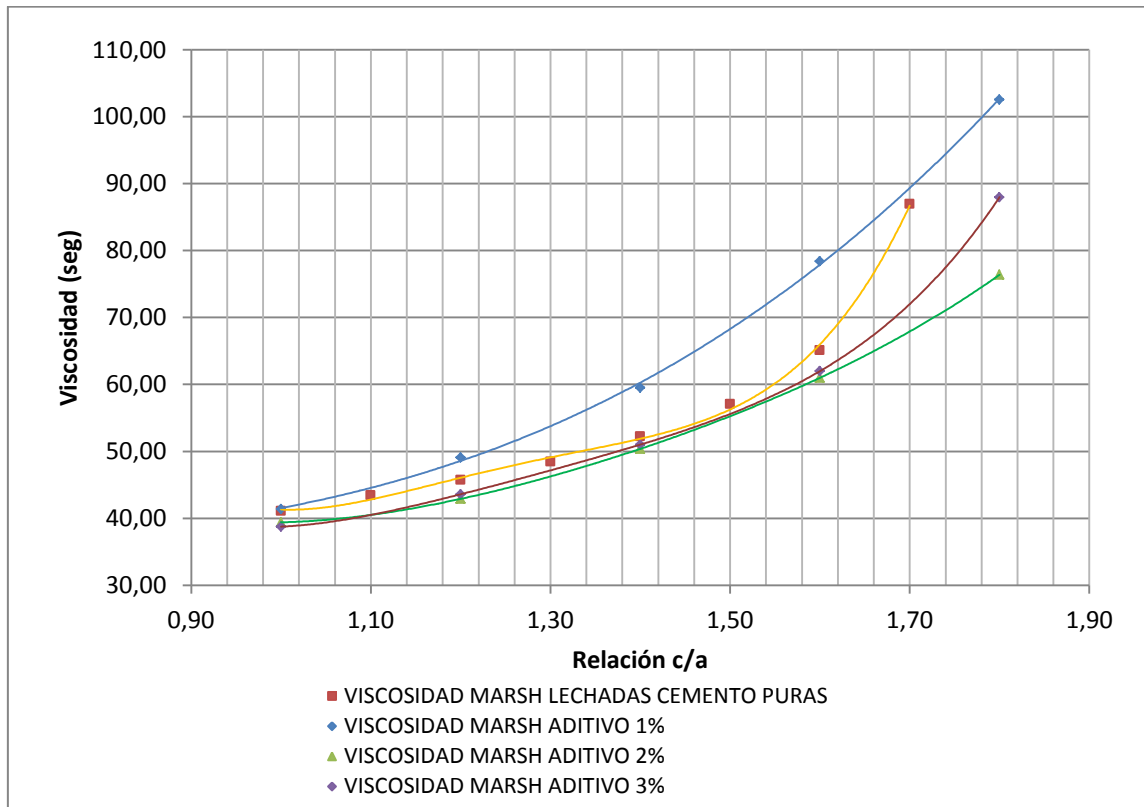
Prueba No.		1	2	3	4	5
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	agua	1000,0	833,3	714,3	625,0	555,6
Relación	a/c	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6
	c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		38,75	43,59	51,01	62,00	88,00
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		10,34	10,81	11,68	12,73	17,15
Fluidez Cono de flujos (seg)		8,35	8,75	9,21	9,41	10,53
Sedimentación (%)		46,00	44,80	40,80	36,80	35,60
DENSIDAD gr/cm ³		1,54	1,61	1,66	1,72	1,79

Elaborado por: Maritza Córdova

Se puede observar que los datos presentados en la TABLA 5. 7 muestran discontinuidad respecto a los datos obtenidos de los ensayos en los que se incorporó el 1% y 2% de aditivo, presentados en las TABLA 5.5 y TABLA 5. 6 respectivamente. Para una mejor interpretación de este fenómeno se muestra a continuación el GRÁFICO 5. 9 y GRÁFICO 5. 10 en las cuales se ilustra la influencia de la incorporación de aditivo en la viscosidad y estabilidad de las lechadas.

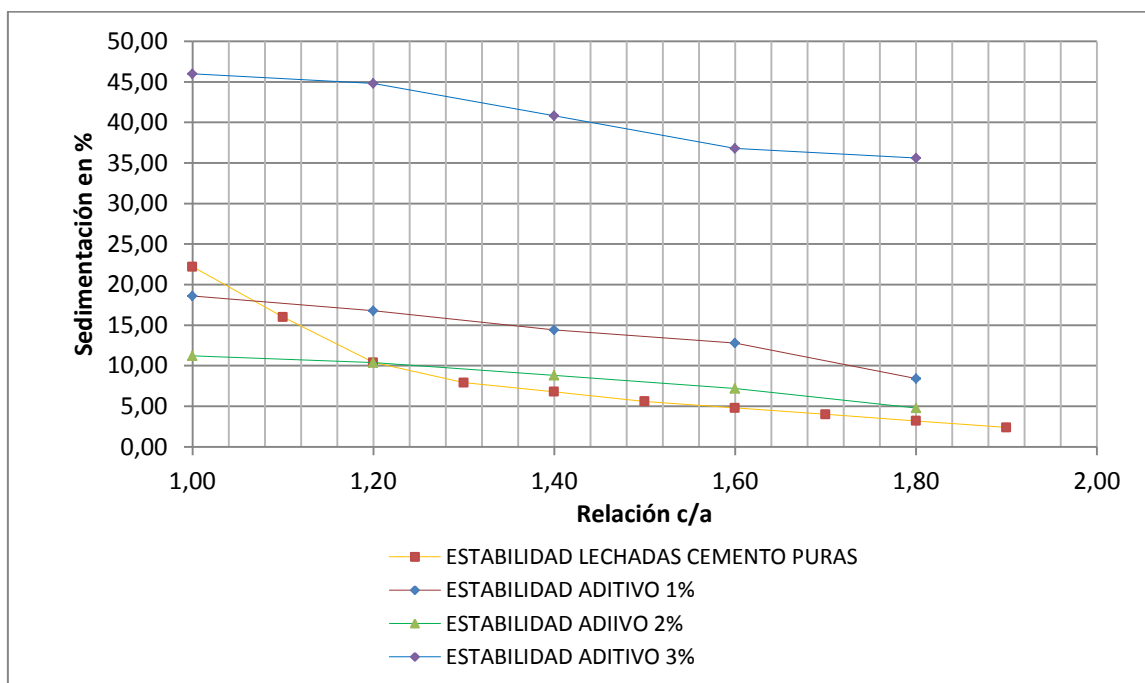
Se observa como comportamiento general, que al adicionar un elemento para fluidificar la mezcla, se produce por defecto una mezcla menos estable.

GRÁFICO 5. 9 INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE ADITIVO EN LA VISCOSIDAD DE LAS LECHADAS



Elaborado por: Maritza Córdova

GRÁFICO 5. 10 INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE ADITIVO EN LA ESTABILIDAD DE LAS LECHADAS



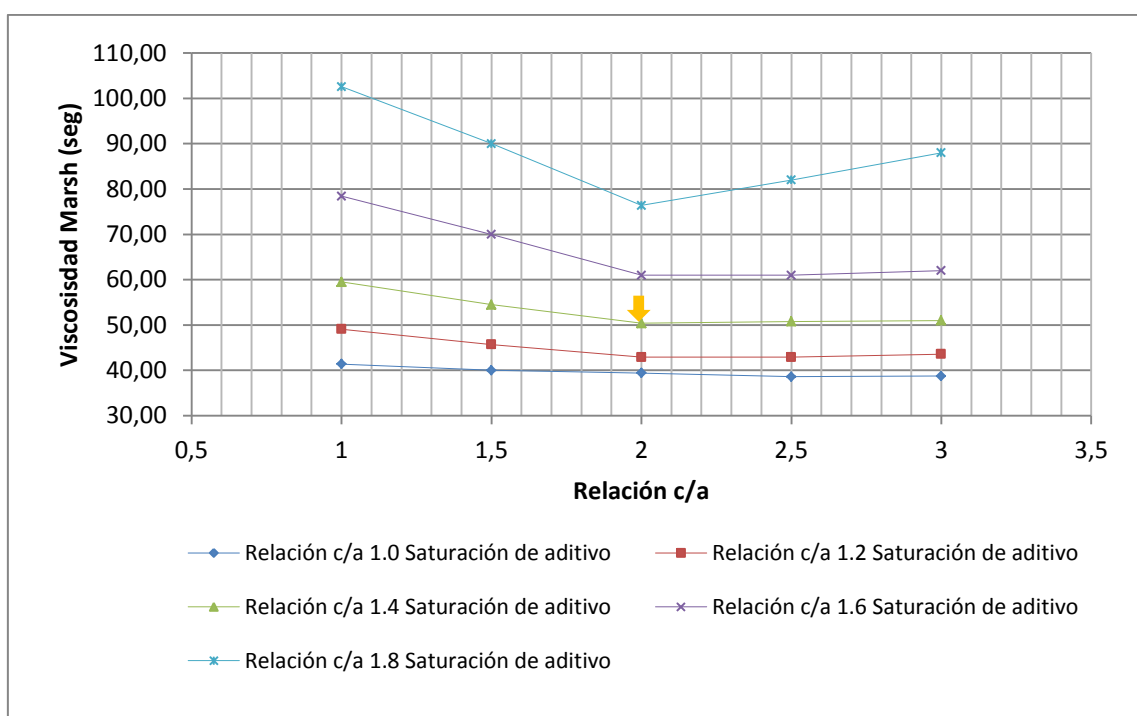
Elaborado por: Maritza Córdova

Se pone de manifiesto en el GRÁFICO 5. 9 y GRÁFICO 5. 10 el fenómeno de saturación de aditivo que consiste en “la dosis a partir de la cual ya no se obtienen mejoras en la fluidez a pesar de aumentar su dosificación y, que por encima de esta cantidad óptima se presentan efectos negativos o se produce un contraefecto” (Mas, 2012). Así sucede al adicionar el 3% de aditivo; en el gráfico 6.9 se puede comprobar que al variar la dosis de aditivo de 1% a 2% disminuye el tiempo de circulación de las lechadas es decir la fluidez de la lechada es mejor, pero al adicionar un 3% se obtiene una lechada con menor fluidez, incluso menos que aquella que no contiene aditivo lo cual es un resultado contraproducente.

Así también, en el GRÁFICO 5. 10 se puede observar el efecto negativo de la adición del 3% de aditivo, sobre la sedimentación de la lechada la cual aumenta de forma desproporcionada, se consigue una mezcla menos estable que con la adición del 2% de aditivo.

Para conocer qué cantidad de aditivo es óptima para la fabricación de lechadas se determinó el punto de saturación mediante la medición de la viscosidad a diferentes dosis de aditivo de 1%, 1.5%, 2%, 2.5% y 3% y, con las relaciones de cemento aplicadas a los ensayos, correspondientes a 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 y 1.8

GRÁFICO 5. 11 DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE SATURACIÓN DE ADITIVO MEGAMIX ESPECIAL EN LECHADAS DE CEMENTO



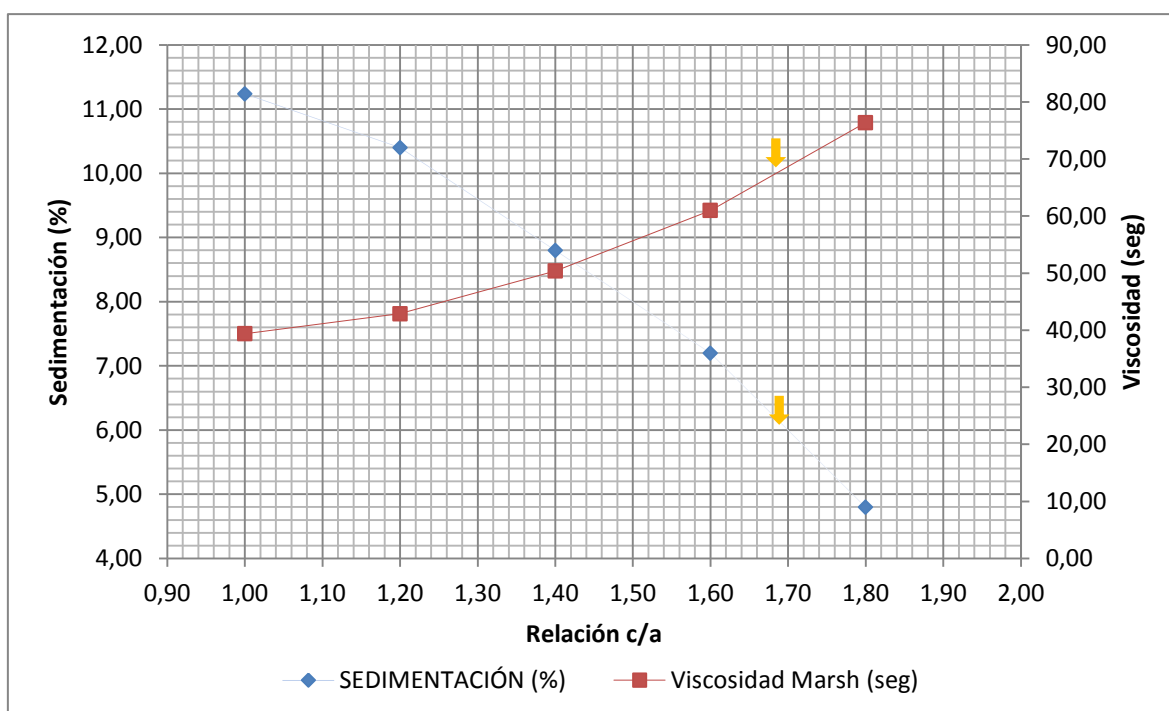
Elaborado por: Maritza Córdova

Las curvas de fluidez obtenidas en el GRÁFICO 5. 11 muestran el punto de saturación del aditivo. Se puede identificar un mínimo en las curvas correspondiente al 2% de aditivo a partir del cual el tiempo de fluidez no disminuye significativamente o que por el contrario aumenta para las relaciones c/a 1.6 y 1.8. Por lo tanto el punto de saturación obtenido corresponde a la dosis de 2% de aditivo en lechadas de cemento.

Una vez que se ha establecido el contenido óptimo de aditivo se presentan los resultados de Sedimentación vs resultados de viscosidad para lechadas de cemento con adición de 2% de Aditivo en el GRÁFICO 5. 12; en el que se puede

ver, después de realizar una interpolación, que la lechada se vuelve relativamente estable a partir de la relación c/a 1,69 hacia 1,90; y que el rango óptimo de viscosidad se da en las lechadas c/a de 1,0 a 1,69. Se determina que la viscosidad y la estabilidad para lechadas de cemento con 2% de aditivo son compatibles en la relación c/a de 1,69.

**GRÁFICO 5. 12 SEDIMENTACIÓN VS VISCOSIDAD (RELACIÓN c/a ÓPTIMA)
EN LECHADAS CEMENTO ADITIVO 2%**



Elaborado por: Maritza Córdova

5.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA

Las lechadas de inyección de cemento con Cangahua fueron ensayadas utilizando equipo que cumple normativa y de acuerdo al procedimiento descrito en el CAPÍTULO 4.

El principal objetivo de estos ensayos es proporcionar morteros económicos mediante el reemplazamiento de una parte del cemento por cangahua. Mientras mayor es la adición de cangahua más se puede disminuir el costo de la lechada.

Esta serie de ensayos determina la cantidad de cangahua máxima admisible en la mezcla de inyección.

Los resultados de los ensayos que se presentan a continuación fueron determinados a partir de la utilización de cangahua extraída de la Avenida Simón Bolívar del sector de La Forestal en Quito, la misma fue caracterizada en su peso volumétrico, su capacidad de absorción, su humedad natural, granulometría y se clasificó de acuerdo al sistema SUCS. Obteniéndose los siguientes datos:

Peso volumétrico suelto = 0,76

% Absorción = 45

% Humedad Natural = 25

Límite Líquido = 33

Índice Plástico = 7

% de Arena = 31

% de Finos = 69

Clasificación = ML Limo arenoso

% de arcilla (menor a 0,002mm) = 7

El reporte de los ensayos elaborados para la caracterización de la cangahua se presenta en el Anexo 3

La dosificación de cangahua se hizo por peso seco en relación al peso del cemento y después de haber sido pasada por el tamiz #8. Al momento de mezclar los elementos se hizo un ajuste de humedad de la cangahua, para que las relaciones c/a no se vieran afectadas al momento en que sus partículas adsorben agua dentro de sus partículas; es decir no tomen parte del agua de mezclado. El

faltante de agua de mezcla para que la cangahua se sature antes de mezclarse con el cemento se completó mediante la siguiente expresión:

$$A = P * (CA)/100$$

Dónde:

A= Agua faltante respecto de la condición SSS

P= Peso seco de la cangahua

CA= Capacidad de absorción de la cangahua

La condición SSS significa que la condición del material es saturada y superficialmente seca, es decir “todos sus poros saturables están llenos de agua pero sin película de humedad en la superficie de las partículas” (Guzmán, 2001).

En la primera serie de ensayos se agregó el 50% de cangahua a la mezcla. Las medidas de viscosidad, sedimentación, resistencia mecánica a la compresión y su densidad, se muestran en la TABLA 5.8.

TABLA 5. 8 LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 50%

Prueba No.		1	2	3	4	5
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	agua de mezcla	1000,0	833,3	714,3	625,0	555,6
	agua de corrección	445,7	445,7	445,7	445,7	445,7
	cantidad total de agua	1445,7	1279,0	1160,0	1070,7	1001,3
Relación	a/c	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6
	c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		48,88	60,57	101,06	240,21	N/P
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		11,22	12,57	17,66	30,43	96,85
Fluidez Cono de flujos (seg)		9,78	9,84	11,11	14,09	27,75
Sedimentación (%)		14,40	4,40	1,00	0,40	0,08
Resistencia (MPa) 3 días		2,61	3,87	4,57	5,72	7,11
Resistencia (MPa) 7 días		3,37	5,00	5,85	7,59	9,75
Resistencia (MPa) 28 días		7,09	10,78	12,08	14,81	20,25
DENSIDAD gr/cm³		1,60	1,66	1,73	1,79	1,84

Elaborado por: Maritza Córdova

En la segunda serie de ensayos se agregó el 100% de cangahua a la mezcla. Las medidas de viscosidad, sedimentación, resistencia mecánica a la compresión y su densidad, se muestran en la TABLA 5. 9.

TABLA 5. 9 LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 100%

Prueba No.		1	2	3	4	5
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	agua	1445,7	1279,0	1160,0	1070,7	1001,3
Relación	a/c	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6
	c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		67,25	N/P	N/P	N/P	N/P
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		13,55	24,22	40,06	N/P	N/P
Fluidez Cono de flujos (seg)		10,03	12,28	16,22	26,89	N/P
Sedimentación (%)		1,60	0,40	0,00	0,00	0,00
Resistencia (MPa) 3 días		1,61	2,47	2,92	3,75	4,12
Resistencia (MPa) 7 días		3,06	4,51	5,40	6,95	7,67
Resistencia (MPa) 28 días		4,93	8,02	9,25	12,59	13,89
DENSIDAD gr/cm³		1,69	1,75	1,79	1,83	1,86

Elaborado por: Maritza Córdova

En la TABLA 5.8 y TABLA 5. 9 se puede observar que a medida que se incrementa el contenido de cangahua aumenta la viscosidad de las lechadas. Así, al añadir 100% de cangahua a la mezcla, fue imposible el flujo completo a través del cono a partir de la relación c/a 1,20. También se observa una considerable mejora en la estabilidad de las lechadas al tener menor sedimentación. También se observa un descenso de la resistencia a la compresión.

No se presentan datos de ensayos con adición de 1,50% de Cangahua debido a la imposibilidad de fluir exitosamente a través del cono, pues eran lechadas muy viscosas que incluso con bajas relaciones de cemento obstruían el orificio del cono, disconforme con los requerimientos de fluidez de una mezcla óptima de inyección.

Para que las lechadas de cangahua pudieran cumplir los requerimientos de mantener constantes sus propiedades durante el tiempo de inyección, se incorporó aditivo Megamix especial, para lo cual se tomó en cuenta las conclusiones ya determinadas respecto a la utilización de aditivo y la cantidad de cangahua admisible. A continuación se presentan los resultados de las lechadas con cangahua y aditivo.

5.4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 50% E INCORPORACIÓN DE ADITIVO

Se realizó una serie de ensayos agregando el 50% de cangahua a la mezcla y 1% de aditivo en relación al peso del cemento. Sus resultados se presentan en la TABLA 5. 10. Donde se puede observar mejoras en la fluidez respecto a las lechadas con 50% de cangahua que no contienen aditivo, pero en el aspecto de estabilidad se observa que es menor debido a una mayor sedimentación existente.

TABLA 5. 10 LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 50% Y 1% DE ADITIVO

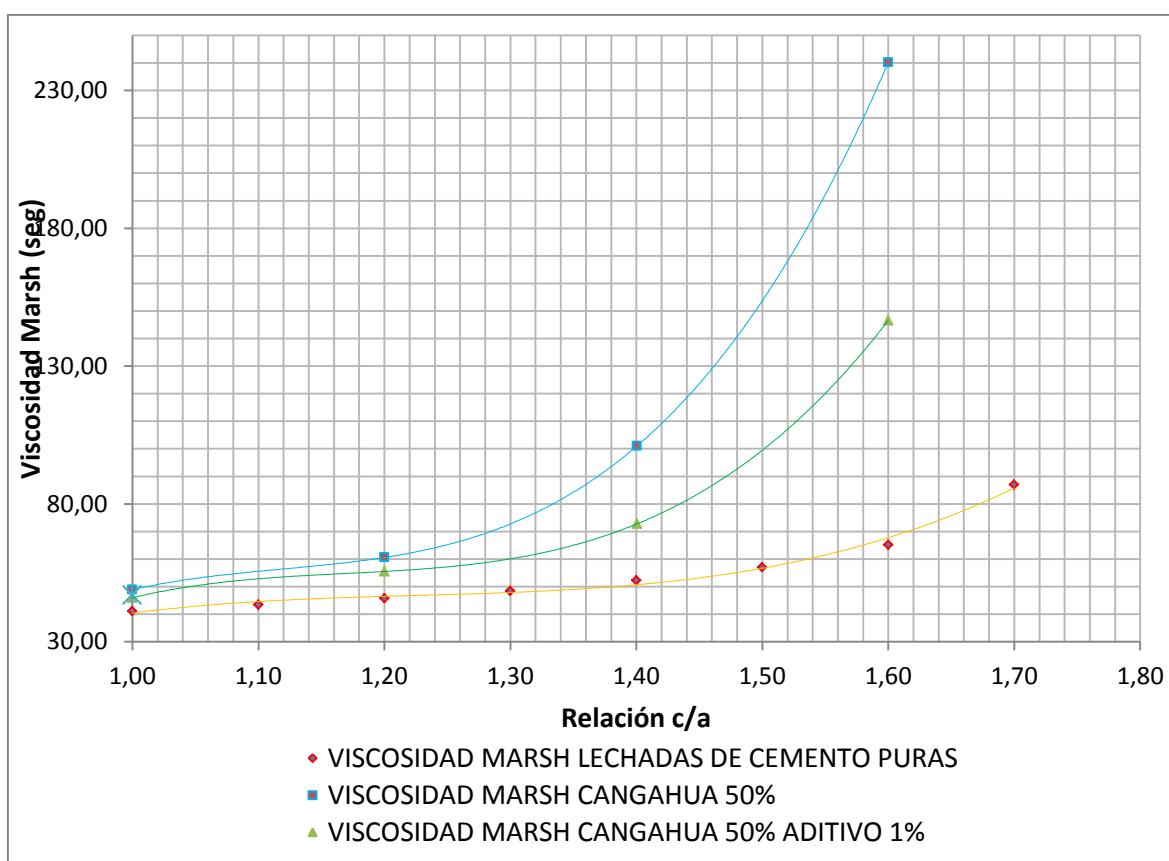
Prueba No.		1	2	3	4	5
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000	1000
	agua	1445,7	1279,0	1160,0	1070,7	1001,3
Relación	a/c	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6
	c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		45,94	55,50	72,78	146,58	N/P
Viscosidad cono Marsh 9mm (seg)		10,66	11,97	14,03	22,69	43,78
Fluidez Cono de flujos (seg)		9,35	9,70	10,22	12,29	17,72
Sedimentación (%)		18,00	10,60	2,60	1,40	0,80
Resistencia (MPa) 3 días		2,74	3,30	4,24	5,97	8,65
Resistencia (MPa) 7 días		4,73	5,51	7,02	9,20	13,09
Resistencia (MPa) 28 días		9,88	12,02	15,38	17,53	21,08
DENSIDAD gr/cm³		1,59	1,66	1,71	1,77	1,82

Elaborado por: Maritza Córdova

Para una mejor apreciación de la variación de la viscosidad de las lechadas con incorporación de 50% de cangahua se presenta el GRÁFICO 5. 13 en el que se

puede observar como la viscosidad de la mezcla aumenta con relación a las lechadas de cemento sin cangahua; y como disminuye al momento en que se incorpora el aditivo, aun así la lechada con 50 % de cangahua y 1% de aditivo continúa siendo más viscosa que la lechada de cemento pura.

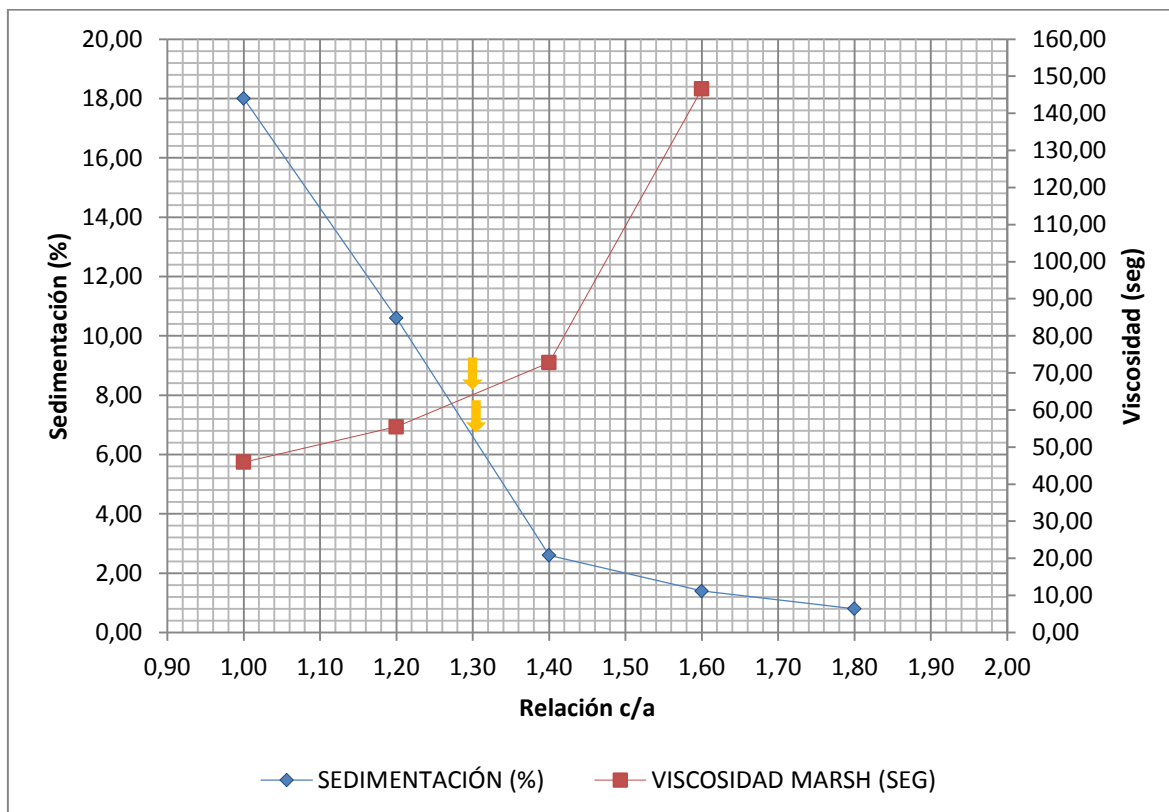
GRÁFICO 5. 13 VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LAS LECHADAS AL INCORPORAR CANGAHUA 50% Y ADITIVO 1%



Elaborado por: Maritza Córdova

Al analizar los resultados de viscosidad y estabilidad obtenidos de las lechadas con 50% de cangahua y 1% de aditivo Megamix especial, se determina que la condición más cercana a la óptima se encuentra con la relación c/a 1,30. Esta determinación se ilustra en el GRÁFICO 5. 14, en el que se puede observar, después de realizar una interpolación, que la lechada se vuelve relativamente estable a partir de la relación c/a 1,30 hacia 1,90; y que el rango óptimo de viscosidad se da en las lechadas c/a de 1,0 a 1,36.

**GRÁFICO 5. 14 SEDIMENTACIÓN VS VISCOSIDAD (RELACIÓN c/a ÓPTIMA)
EN LECHADAS CEMENTO CON CANGAHUA 50% Y ADITIVO 1%**

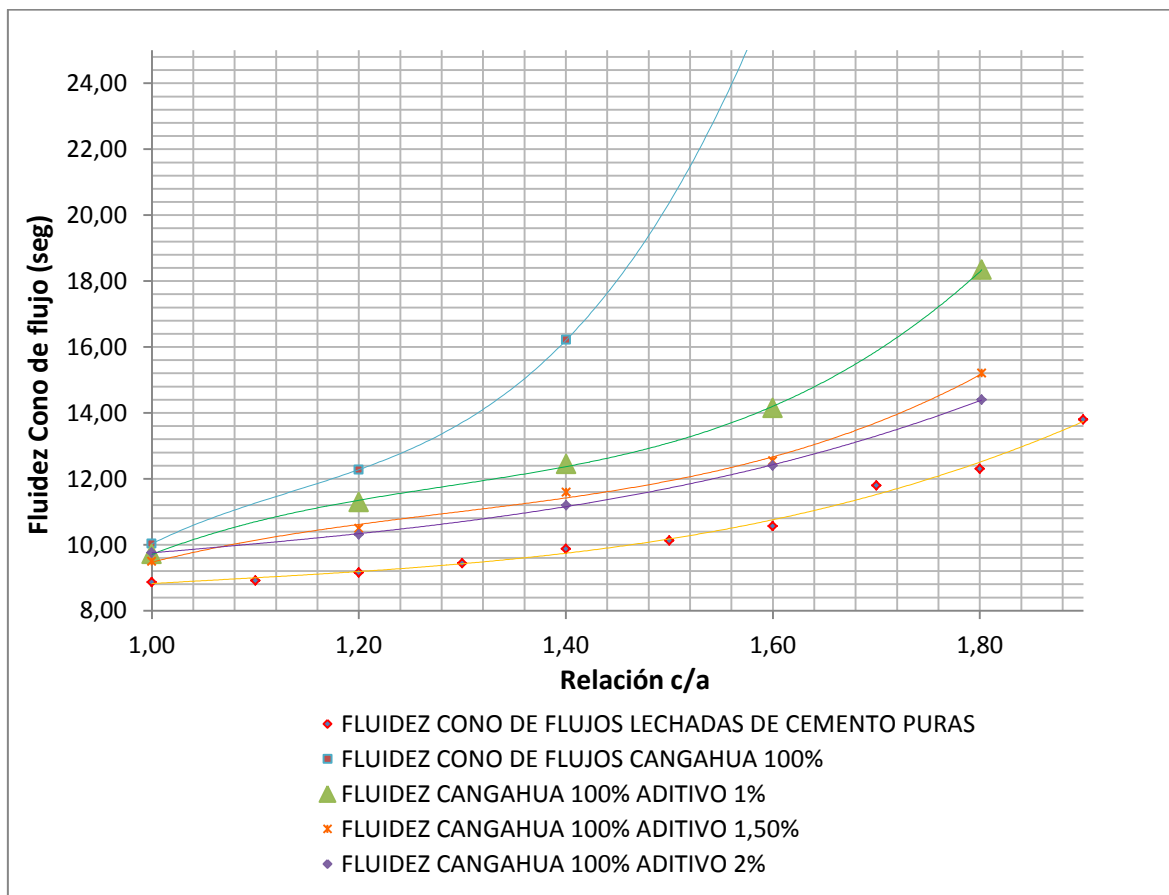


Elaborado por: Maritza Córdova

5.4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 100% E INCORPORACIÓN DE ADITIVO

Se realizó una serie de ensayos con el 100% de cangahua respecto al peso del cemento e incorporación de aditivo en dosis de 1%, 1,5% y 2%. La variación de la viscosidad respecto a estas variables se puede apreciar en el GRÁFICO 5. 15 presentado a continuación. Para apreciar claramente las diferencias obtenidas se evalúa la influencia del aditivo en el cono de Flujos; pues las lechadas con 100% de cangahua sin aditivo a partir de la relación c/a 1,20 no fluye por el cono Marsh y no se tienen datos comparables (TABLA 5. 9).

GRÁFICO 5. 15 VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LAS LECHADAS AL INCORPORAR CANGAHUA 100% Y ADITIVO 1%, 1.5% y 2%

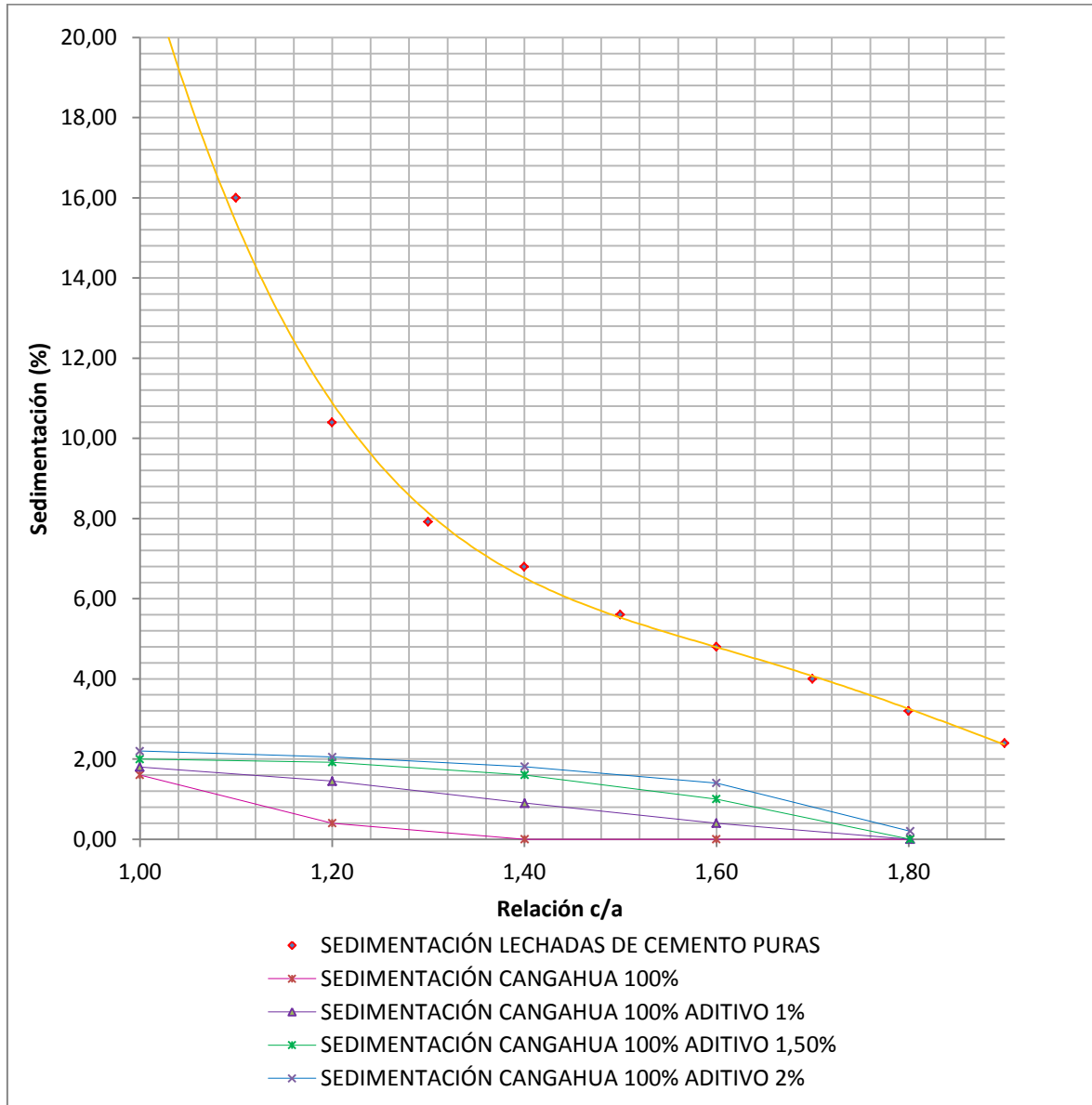


Elaborado por: Maritza Córdova

Se puede observar como la viscosidad de la mezcla aumenta considerablemente en relación a las lechadas de cemento sin cangahua; y como disminuye con la incorporación del 1% de aditivo, aún más fluidez le proporciona el 1,5% de aditivo; pero el 2% no tiene influencia significativa en la mejoría de fluidez; por lo que se determina que la dosis óptima de aditivo corresponde a 1,5%.

Para efectos de conocer la variación de la estabilidad de lechadas con 100% de cangahua y la influencia de la incorporación de diferentes dosis de aditivo, se presenta a continuación los resultados en el GRÁFICO 5. 16.

GRÁFICO 5. 16 VARIACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LAS LECHADAS AL INCORPORAR CANGAHUA 100% Y ADITIVO 1%, 1.5% Y 2%.



Elaborado por: Maritza Córdova

Se puede observar en el GRÁFICO 5. 16 que al incorporar 100 % de cangahua en la mezcla de inyectado se consigue incrementar notablemente la estabilidad respecto a las lechadas de cemento puras.

Pero por su parte la adición de aditivo en lechadas con cangahua no consigue su efecto de dispersión de partículas; este fenómeno queda comprobado al observar

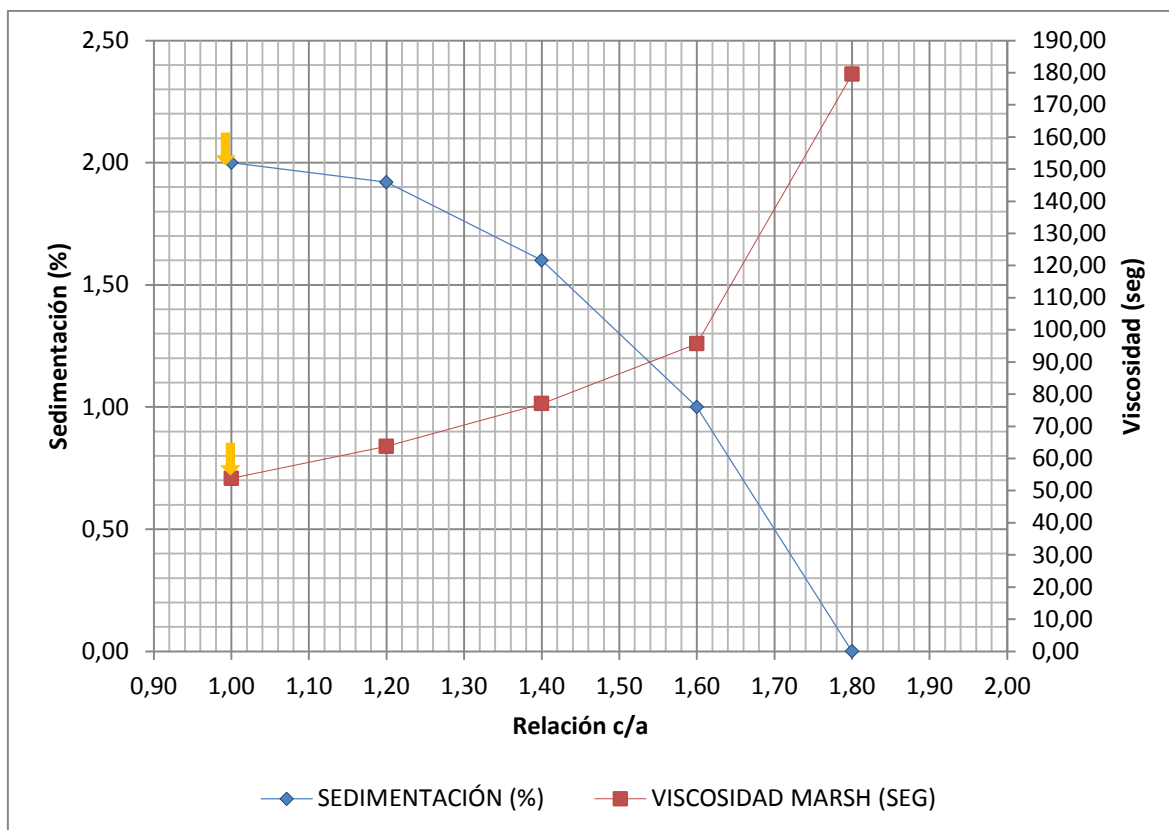
como aumenta la sedimentación a medida que aumenta la cantidad de aditivo. Sin embargo, esta variación es insignificante, pues se observa que todas las series de lechada con 100% de cangahua cumplen los parámetros de estabilidad es decir consiguen una sedimentación menor al 5%.

Se observa en el GRÁFICO 5. 15 que administrar una dosis de 2% de aditivo ya no proporciona mejoras en la fluidez de la mezcla y en el GRÁFICO 5. 16, que aumenta relativamente su sedimentación. Se deduce que el punto de saturación en la lechada con cangahua corresponde a una dosis de aditivo del 1.5%, esto marca una diferencia en el comportamiento del aditivo en las lechadas de cemento con cangahua comparado con el que se consigue en las lechadas de cemento puras cuya dosis máxima de aditivo para condiciones óptimas es mayor. También se piensa que a mayores cantidades de aditivo se produce una incompatibilidad del aditivo Megamix especial con la cangahua, pues la cangahua clasificada como un limo arenoso ejerce un efecto sobre el aditivo.

Se piensa que este fenómeno se produce debido a que la cangahua puede tener la capacidad de retener aditivo en su superficie, imposibilitando que sea el cemento el que adsorba el aditivo; en efecto el desempeño del aditivo no tiene lugar si no es adsorbido completamente sobre las fases del cemento.

Al analizar los resultados de viscosidad y estabilidad obtenidos de las lechadas con 100% de cangahua y adiciones de aditivo se determina que la dosificación óptima se encuentra en la relación c/a 1,0 con utilización de 1,5% de aditivo Megamix especial. Esta determinación se ilustra en el GRÁFICO 5. 17, en el que se puede observar que la lechada es estable desde el inicio de las pruebas; y que el rango óptimo de viscosidad se da en las lechadas c/a de 1,0 a 1,40.

**GRÁFICO 5. 17 SEDIMENTACIÓN VS VISCOSIDAD (RELACIÓN c/a ÓPTIMA)
EN LECHADAS CEMENTO CON CANGAHUA 100% E INCORPORACIÓN DE
ADITIVO 1,5%**



Elaborado por: Maritza Córdova

Una vez que se finalizaron las pruebas con la cangahua extraída del Sector de La Forestal de Quito y se obtuvieron resultados de cantidades óptimas, se consideró este aporte y se elaboraron ensayos con cangahua de diferentes yacimientos, los resultados más relevantes se presentan en la TABLA 5. 11

TABLA 5. 11 LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA 100% DE DIFERENTE YACIMIENTO

Yacimiento	Relación c/a	Aditivo	%	Sedimentación (%)	Viscosidad (seg)	Densidad lechada gr/cm ³
Tababela	1	-	-	15,2	53,5	1,64
Pifo	1	-	-	2,6	57,5	1,64
Pifo	1	Megamix especial	0,5	11,6	51,37	1,63
Pifo	1	Lignosulfonato	0,2	6,5	48,28	1,62

Elaborado por: Maritza Córdova

La cangahua con la que se elaboraron las mezclas provenían de Tababela y Pifo (TABLA 5. 11), puede observarse que la lechada elaborada con cangahua de Tababela sin aditivo muestra mayor sedimentación en comparación a las demás. Se obtuvo mejor resultado en cuanto a sedimentación con lechadas elaboradas con cangahua de Pifo, para la cual se tiene una viscosidad dentro de los parámetros; se considera que esta variación se suscita en función del contenido de partículas finas (limos y arcillas) constituyentes de la cangahua y que al ser menor su porcentaje, existirá mayor cantidad de sólidos precipitados.

Así, se incorporó aditivo Megamix especial a lechadas con cangahua de Pifo, en dosis anteriormente consideradas como óptimas pero se encontró que no era compatible, se piensa que este fenómeno sucede debido al efecto que tienen las partículas de cangahua sobre el aditivo por su composición química; razón por la cual se experimentó la compatibilidad de lechadas con cangahua de Pifo incorporando 0,2% aditivo Lignosulfonato puro, se pudo determinar eficiencia del aditivo al ser mayor el efecto fluidificante y menor la sedimentación de la mezcla de inyección.

Se concluye que el comportamiento de las lechadas con cangahua variará dependiendo del yacimiento al que pertenece, por efecto del contenido de limo y arcilla constituyentes, por lo tanto la cangahua que se prevea incorporar a las lechadas, deberá ser caracterizada en su peso volumétrico, su capacidad de absorción, su humedad natural, granulometría y clasificación SUCS; así también

debe probarse la compatibilidad y dosis óptima de aditivo a utilizar en las mezclas con cangahuas de diferentes yacimientos.

5.4.3 OBSERVACIONES DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA E INCORPORACIÓN DE ADITIVO.

Al ser menor el costo que se consigue con mayor adición de cangahua se determina como cantidad óptima la incorporación del 100% de cangahua; esta consigue estabilizar a la lechada, pero sin el empleo de un aditivo no se conseguiría cumplir los requerimientos de fluidez, para proporcionar esta característica se añadió el 1,5% de aditivo Megamix especial.

Al evidenciar el efecto que los aditivos ejercen sobre las lechadas con cangahua, se establece como procedimiento operacional que antes de incorporar aditivo, se debe corroborar la plena compatibilidad entre el aditivo y los materiales a emplear, además debe obtenerse el punto de saturación a partir del cual pueden existir efectos contraproducentes.

5.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA ARCILLA

Una alternativa viable para reproducir una lechada de menor costo se encontró al sustituir una parte del cemento por crudo de caliza arcilla. Contrariamente a las lechadas que se elaboraban con un pequeño porcentaje de bentonita, estas lechadas están dosificadas en menor proporción de cemento y permiten mayor porcentaje de crudo caliza arcilla en comparación a la Bentonita que es mucho más coloidal. Al mismo tiempo, la adición de coloides tiene un efecto muy favorable para la disminución de sedimentación de las lechadas.

Esta serie de ensayos, a diferencia de las demás, fueron ensayadas con relación c/a comprendida entre 1,0 y 1,4 porque después de obtener cuantiosos resultados se observa como tendencia general que las lechadas con compatibilidad en los

parámetros de estabilidad y viscosidad se encuentran en las relaciones con menor cantidad de cemento.

Se determinó la cantidad máxima admisible de crudo de caliza y arcilla en la mezcla para lo cual se fabricaron lechadas con adición de crudo entre 20% y 35%. A continuación se presentan los resultados en la TABLA 5. 12 y TABLA 5. 13.

**TABLA 5. 12 LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA ARCILLA
20%**

Prueba No.		1	2	3	4
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000
	agua	1000,0	909,1	833,3	714,3
Relación	a/c	1,0	0,9	0,8	0,7
	c/a	1,00	1,10	1,20	1,40
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		46,60	51,53	59,97	145,80
Fluidez Cono de flujos (seg)		11,74	12,90	14,70	21,80
Sedimentación (%)		2,80	2,00	1,44	0,40
Resistencia (MPa) 3 días		3,99	4,29	4,45	5,01
Resistencia (MPa) 7 días		6,45	7,28	7,55	8,25
Resistencia (MPa) 28 días		7,71	9,07	10,31	12,50
DENSIDAD gr/cm ³		1,62	1,64	1,68	1,75

Elaborado por: Maritza Córdova

**TABLA 5. 13 LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA ARCILLA
35%**

Prueba No.		1	2	3	4
Dosificación	Cemento	1000	1000	1000	1000
	agua	1000,0	909,1	833,3	769,2
Relación	a/c	1,0	0,9	0,8	0,8
	c/a	1,00	1,10	1,20	1,30
Viscosidad cono Marsh 5mm (seg)		64,32	78,84	124,39	N/P
Fluidez Cono de flujos (seg)		16,45	17,87	21,54	31,57
Sedimentación (%)		1,60	1,20	0,68	0,20
Resistencia (MPa) 28 días		8,55	10,34	11,45	12,65
DENSIDAD gr/cm3		1,62	1,66	1,71	1,75

Elaborado por: Maritza Córdova

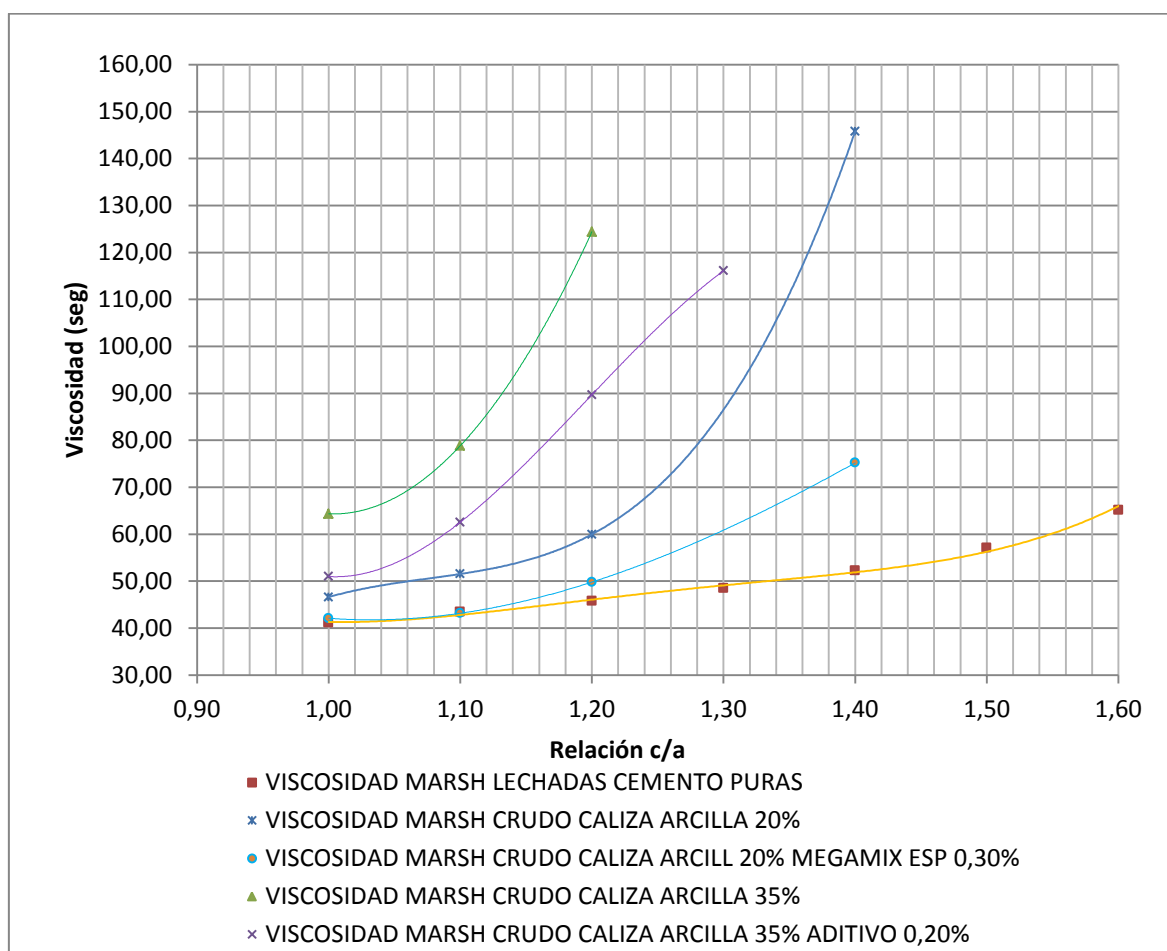
Los ensayos elaborados indican (TABLA 5. 12 y TABLA 5. 13) que la cantidad de crudo caliza arcilla fue admitida en un máximo de 35%, pues al relacionar con las lechadas del 20% se observa cómo aumenta la viscosidad, y a partir de la relación c/a 1,10 no se cumplen con los requerimientos. Para tener una viscosidad conveniente y para un buen mantenimiento de la fluidez durante el tiempo de inyección, se adiciona aditivo.

En primera instancia se incorporó aditivo Megamix especial a las lechadas con 20% de crudo de caliza arcilla, en que se determinó un efecto adverso en la estabilidad de la lechada. Se manifiesta que el aditivo Megamix especial, a base de policarboxilato, reacciona diferentemente en las lechadas con crudo de caliza que en las lechadas de cemento puras. Este fenómeno puede producirse debido al comportamiento del aditivo con las partículas de crudo caliza arcilla, que pueden estar cargadas eléctricamente en su superficie de manera diferente al cemento; se presume una aleación de cargas entre los elementos, que termina por precipitar a los sólidos. Por este motivo se realizaron pruebas con aditivo

lignosulfonato puro, para probar su compatibilidad con el crudo de caliza-arcilla y el cemento; este aditivo mostró un efecto positivo al proporcionar fluidez a las mezclas sin alterar su estabilidad.

Para una apreciación más clara se presentan en las gráficas siguientes la variación de la viscosidad y estabilidad en lechadas con crudo de caliza arcilla con 20% y 35% y las adiciones de Megamix especial 0,3% y lignosulfonato 0,2%.

GRÁFICO 5. 18 VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LAS LECHADAS AL INCORPORAR CRUDO DE CALIZA ARCILLA Y ADITIVO

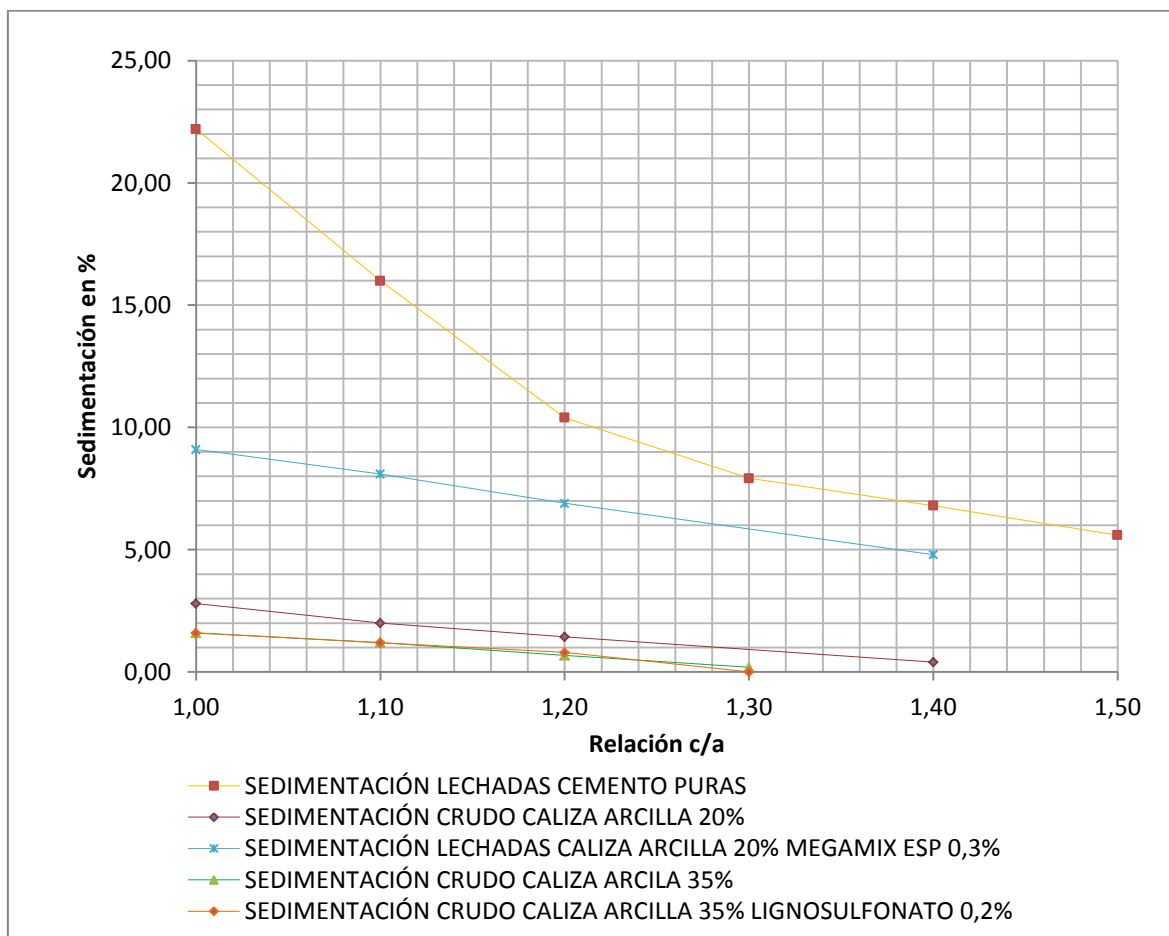


Elaborado por: Maritza Córdova

La viscosidad se incrementa con la adición de crudo de caliza arcilla, así se observa en el GRÁFICO 5. 18 las lechadas a las que se incorporó el 35% de crudo tienen menor fluidez que aquellas con 20% y estas también son mayores respecto a las lechadas de cemento puras. La adición del 0,3% de Megamix

especial a la lechada con 20% de crudo caliza arcilla como el 0,25 % de lignosulfonato puro a la lechada con 35% de crudo caliza arcilla, por su parte favorecen la fluidez de la lechada significativamente.

GRÁFICO 5. 19 VARIACIÓN DE LA ESTABILIDAD EN LAS LECHADAS AL INCORPORAR CRUDO DE CALIZA ARCILLA Y ADITIVO



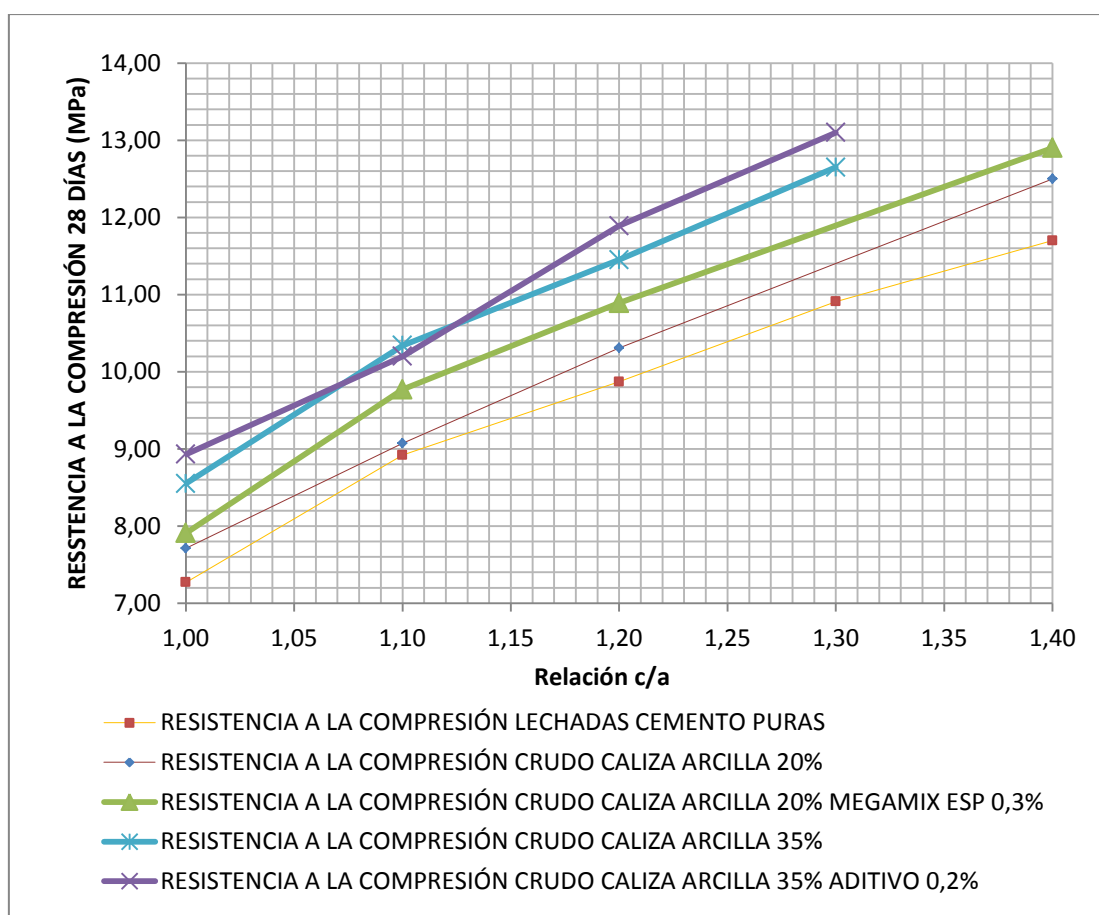
Elaborado por: Maritza Córdova

La sedimentación disminuye casi completamente con la adición del crudo de caliza arcilla; en el GRÁFICO 5.19 se puede evidenciar un porcentaje menor a 3% para las lechadas con 20% y 35% de crudo de caliza arcilla. También se puede observar que al añadir el aditivo Megamix especial a la lechada, se produce una anomalía en la sedimentación, obteniéndose una mezcla menos estable. No

sucede lo mismo al adicionar lignosulfonato que en su dosis óptima mantiene la sedimentación casi constante y por debajo del 3%.

Asimismo se demuestra en el GRÁFICO 5. 20 que la adición de crudo caliza arcilla y aditivo produce un pequeño aumento de resistencia en los especímenes así elaborados. Se señala para este efecto que la lechada de crudo caliza arcilla 35% y 0,2% de aditivo posee la mayor resistencia a los 28 días que las lechadas con menor dosificación de crudo y así también mayor que la lechada de cemento sin adiciones.

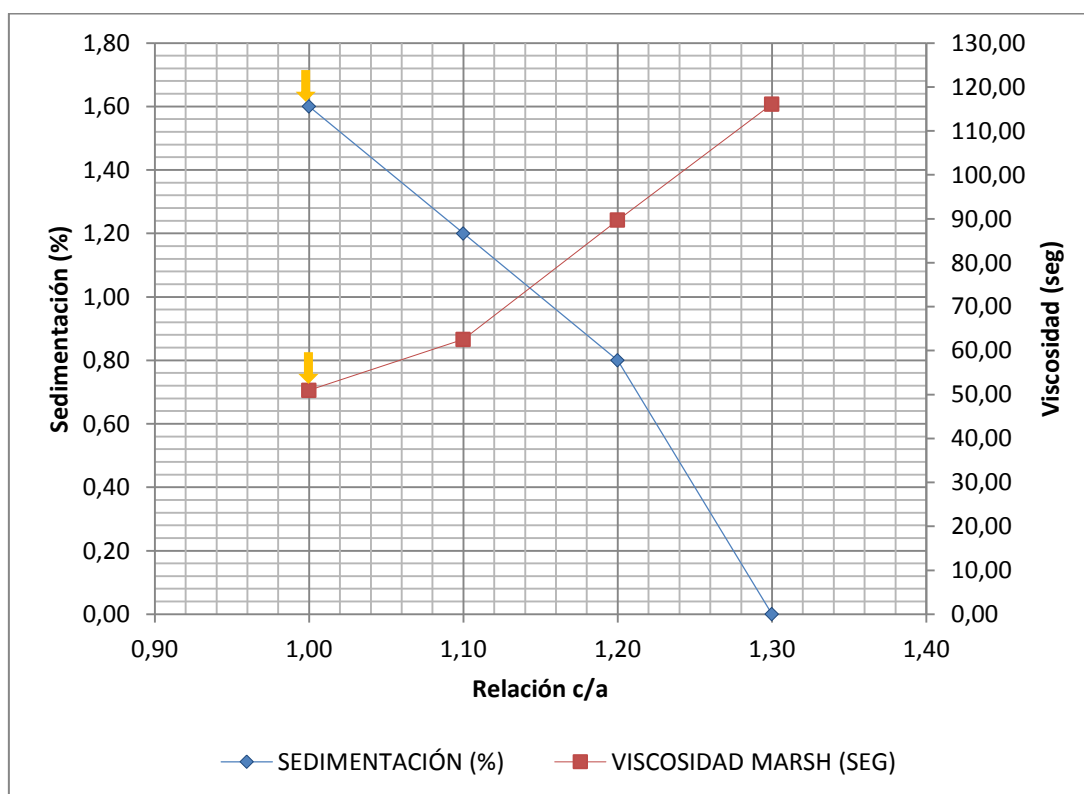
GRÁFICO 5. 20 INFLUENCIA DEL CRUDO CALIZA ARCILLA Y ADITIVO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES DE LECHADA



Elaborado por: Maritza Córdova

Al analizar los resultados de viscosidad y estabilidad obtenidos de las lechadas con crudo de caliza arcilla y adiciones de aditivo se determina que la dosificación óptima se encuentra en la relación c/a 1,0 de las lechadas con 35% de crudo caliza arcilla y con utilización de 0,25% de aditivo lignosulfonato. Esta determinación se ilustra en el GRÁFICO 5. 21, en el que se puede observar que la lechada es estable desde el inicio de las pruebas; y que el rango óptimo de viscosidad se da en las lechadas c/a de 1,0 a 1,14.

**GRÁFICO 5. 21 SEDIMENTACIÓN VS VISCOSIDAD (RELACIÓN c/a ÓPTIMA)
EN LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO CALIZA ARCILLA Y ADITIVO**



Elaborado por: Maritza Córdova

5.5.1 OBSERVACIONES DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA ARCILLA E INCORPORACIÓN DE ADITIVO

La lechada de caliza arcilla consigue sustituir una cantidad de cemento menor a la lechada de cangahua, pero aun así resulta una solución de menor costo; por esta

razón puede ser utilizada en lugar de las lechadas con cangahua si las condiciones del medio a tratar no permiten la introducción de partículas del tamaño de las cangahuas.

Se determina como cantidad óptima la incorporación del 35% de crudo de caliza arcilla, pues consigue estabilizar a la lechada, pero es indispensable el empleo de un aditivo para cumplir los requerimientos de fluidez, esta característica se proporcionó añadiendo el 0.2% de aditivo Lignosulfonato puro.

Antes de incorporar aditivo en la lechada con crudo de caliza arcilla, se debe evidenciar la existencia de compatibilidad entre el aditivo y los elementos constituyentes y obtener el cantidad máxima de aditivo admisible.

5.6 PRESENTACIÓN DE MEZCLAS COMPATIBLES EN FUNCIÓN DE VISCOSIDAD Y ESTABILIDAD.

A fin de resumir el análisis de los ensayos indicados anteriormente se muestra en el Anexo 4 el esquema que determina los rangos en que las lechadas cumplen con los parámetros técnicos, así como la determinación de las lechadas de inyección óptimas en función de la viscosidad y estabilidad, que utiliza en lo posible una débil dosificación de cemento.

5.7 DOSIFICACIÓN PARA ELABORAR 1m³ DE LECHADA

En la TABLA 5. 14 se presentan las lechadas óptimas con sus respectivos valores de viscosidad, estabilidad y densidad; de las cuales se establecen las proporciones de los elementos constituyentes necesarios para elaborar 1m³, y de esta manera poder conocer su precio unitario.

TABLA 5. 14 RESUMEN DE LECHADAS ÓPTIMAS

N°	LECHADA	Relación c/a	Viscosidad (seg)	Sedimentación (%)	Densidad de mezcla kg/m ³
1	Cemento - agua	1,55	60	5,1	1720
2	Cemento - Bentonita 1%	1,35	62	5	1650
3	Cemento - Bentonita 2%	1,3	67	5,8	1620
4	Cemento - Aditivo Megamix especial 2%	1,69	69	6,1	1759
5	Cemento - Cangahua 50% - Aditivo Megamix especial 1%	1,3	64	6,4	1685
6	Cemento - Cangahua 100% - Aditivo Megamix especial 1,5%	1	54	2	1610
7	Cemento - Crudo de caliza-arcilla 35% - Aditivo Lignosulfonato 0,2%	1	51	1,6	1650

Elaborado por Maritza Córdova

La proporción de los elementos que constituyen la lechada se calcula conociendo la relación c/a y la masa de la mezcla necesaria para producir 1m³ en kg, la cual corresponde a la suma de los elementos constituyentes. Los elementos a dosificar se miden en relación al peso del cemento y en peso seco de cada material.

Los cálculos que determinan la composición de los materiales por m³ de mezcla se detallan en el Anexo 5, cuyos resultados se presentan a continuación:

Lechada óptima 1 (Cemento-agua):

Cemento..... 1046 kg

Agua..... 675 litros

Lechada óptima 2 (Cemento - Bentonita 1%)

Cemento.....	943 kg
Agua.....	698 litros
Bentonita.....	9 kg

Lechada óptima 3 (Cemento - Bentonita 2%)

Cemento.....	905 kg
Agua.....	697 litros
Bentonita.....	18 kg

Lechada óptima 4 (Cemento – Aditivo Megamix especial 2%)

Cemento.....	1091 kg
Agua.....	646 litros
Aditivo Megamix especial.....	22 kg

Lechada óptima 5 (Cemento – Cangahua 50% y Aditivo Megamix especial 2%)

Cemento.....	739 kg
Agua.....	569 litros
Aditivo Megamix especial.....	7 kg
Cangahua.....	370 kg

Lechada óptima 6 (Cemento – Cangahua 100% y Aditivo Megamix especial 1,5%)

Cemento..... 534 kg

Agua..... 534 litros

Aditivo Megamix especial..... 8kg

Cangahua..... 534 kg

Lechada óptima 7 (Cemento – Crudo caliza-arcilla 35% y Aditivo Lignosulfonato puro 0,2%)

Cemento..... 702 kg

Agua..... 702 litros

Aditivo Lignosulfonato puro.....1 kg

Crudo de caliza-arcilla..... 245 kg

5.8 ANÁLISIS DE COSTOS DE LECHADAS ÓPTIMAS Y DETERMINACIÓN DE LA LECHADA MÁS ECONÓMICA

El costo de producción de materiales de construcción está estrechamente influenciado por sus componentes, en este sentido el éxito económico se consigue con una optimización adecuada de las proporciones de los materiales empleados en la elaboración de lechadas de inyección. A continuación se presenta el análisis de precios unitarios de cada lechada que de antemano cumple con los aspectos técnicos, pero que además intenta cumplir con los requisitos de factibilidad económica.

5.8.1 PRECIO UNITARIO ACTUAL DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DE LECHADAS

La presentación en el mercado de los elementos utilizados en las mezclas estudiadas y su costo actual, se muestran en la TABLA 5.15, a excepción de la cangahua, de la cual se obtiene el costo unitario en el apartado 5.8.2, por no ser un producto de carácter comercial, sino el suelo empleado como material de construcción. El crudo de caliza-arcilla tampoco es un producto de venta al público, pero mediante un acuerdo con la empresa fabricante de cemento se establece su costo y su abastecimiento.

TABLA 5.15 PRESENTACIÓN Y COSTO ACTUAL DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DE LECHADAS (ABRIL 2014)

DESCRIPCIÓN	PRESENTACIÓN	COSTO GLOBAL INCLUIDO TRANPORTE (\$)	UNIDAD	COSTO UNITARIO INCLUIDO TRANPORTE(\$)
Cemento Portland Tipo IP	saco (50kg)	7,63	kg	0,15
Aditivo Megamix especial	Kg	1,9	kg	1,90
Aditivo Lignosulfonato	Kg	1,25	kg	1,25
Bentonita	saco (22,5kg)	17,2	kg	0,76
Crudo de caliza arcilla	Ton (1000kg)	58,2	kg	0,06
Agua	m3 (1000Lit)	1,05	Lt.	0,001

Elaborado por Maritza Córdova

5.8.2 RECOMENDACIÓN DE PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CANGAHUA

En vista de intentar reproducir lo más fielmente posible los diseños de mezclas de inyectado de laboratorio a nivel de obra, debe seguirse el modo operativo establecido por el laboratorio; para esto, la cangahua a ser utilizada debe ser caracterizada en su peso volumétrico, su capacidad de absorción, su humedad natural, granulometría y clasificación SUCS y, de esta manera poder establecer una similitud entre la cangahua con la que se elaboraron los ensayos y la cangahua del yacimiento del que se estime su extracción.

Una vez que se haya definido el yacimiento de cangahua que posea mayor semejanza en su contenido de limo y arcilla y se encuentre a no más de 8km a la

redonda, puede ser extraída de la misma manera que se hacen desbanques de material de construcción, utilizando una retro-excavadora y transportando en volquetas. Además debe ser sometida a un proceso de homogenización en el sitio de inyección.

De la misma manera que en el laboratorio se utilizó un tamiz para evitar la obstrucción del cono por el flujo de lechadas de cangahua, en campo las partículas de tamaño superior a "1,18 mm", deben ser retiradas mediante la utilización de una zaranda N°16; para esto, la cangahua debe secarse hasta un nivel en que el tamizado pueda llevarse a cabo. Con este fin, el secado y homogenización del material puede efectuarse dentro de un hangar elaborado con plástico de invernadero.

El material extraído debe abastecer para todo el proceso de inyección, por esta razón debe estimarse la cantidad necesaria de material, de manera que después de ser desecado y removido, pueda ser almacenado o apilado.

5.8.3 DETERMINACIÓN DEL COSTO UNITARIO DE CANGAHUA

Para determinar el costo unitario de cangahua como material de construcción debe tomarse a consideración el procedimiento de producción indicado. Para esto se estiman los siguientes rubros:

- Rubro 001.1: Desbanque de cangahua a máquina.
- Rubro 001.2: Desalojo de cangahua en volquetas
- Rubro 002: Transporte de cangahua en volquetas
- Rubro 003: Hangar elaborado con plástico de invernadero para preparación de cangahua.
- Rubro 004.1: Preparación - Secado de cangahua
- Rubro 004.2: Preparación - Tamizado de cangahua.

El desarrollo de los rubros con sus respectivas especificaciones técnicas puede encontrarse en el Anexo 6 y el análisis de precios unitarios de cada rubro, en el Anexo 7.

5.8.3.7 Costo unitario de cangahua

El costo unitario de la cangahua queda determinado por la suma de precio de los rubros desarrollados en el Anexo 7, de la siguiente manera:

Costo por m³ de cangahua:

(A) Precio de 1m³ de desbanque de cangahua + (B) Precio de 1m³ de desalojo de cangahua + (C) Precio de 1m³ de transporte de cangahua al sitio de inyección (8km a la redonda) + (D) Precio de 1m² de hangar con plástico invernadero (en 1m² se prepara 1m³ de cangahua) + (E) Precio de 1m³ de secado de cangahua + (F) Precio de 1m³ de cangahua que ha sido tamizado. Se estima un 20% de pérdida de material.

Precio de 1m³ de cangahua = (A)+ (B)+(C)+ (D)+ (E)+ (F)

Precio de 1m³ de cangahua = \$(0,58 + 0,92 + 2,08 + 10,82 + 1,75 + 7,72)*1,2

Precio de 1m³ de cangahua = \$15,66

Para obtener el costo por kg de cangahua se utiliza la relación:

$$D = \frac{m}{V}$$

Donde:

D= densidad de la cangahua en estado suelto y humedad natural. Su valor se encuentra determinado en la previa caracterización del material en el Anexo 3.

m= masa en kg que corresponde a 1m³ de volumen de cangahua

V= Volumen de cangahua (1m³)

m= D*V

m= 1129kg/m³*1m³

Costo de 1kg de cangahua = 15,66 \$/m³ / 1129kg/m³

Costo de 1kg de cangahua = 0,014 \$/kg

5.8.4 PRECIO UNITARIO DE LECHADAS ÓPTIMAS

En la tabla 5.15 se presenta el precio para 1m³ de las lechadas óptimas obtenidas del análisis en el Anexo 8, en la cual se corrobora que la lechada más económica por optimizar las proporciones de los elementos empleados corresponde a la lechada óptima 6 (Cemento – Cangahua 100% y Aditivo Megamix especial 1,5%).

Se puede evidenciar que al minimizar el contenido de cemento se reducen los costos de las lechadas.

TABLA 5. 16 PRECIO PARA 1m³ DE LECHADAS ÓPTIMAS

DESCRIPCIÓN (LECHADAS ÓPTIMAS)	PRECIO UNITARIO \$/m ³
Lechada óptima 1 (Cemento-agua)	160,25
Lechada óptima 2 (Cemento - Bentonita 1%)	151,76
Lechada óptima 3 (Cemento - Bentonita 2%)	152,74
Lechada óptima 4 (Cemento – Aditivo Megamix especial 2%)	208,70
Lechada óptima 5 (Cemento – Cangahua 50% y Aditivo Megamix especial 2%)	132,58
Lechada óptima 6 (Cemento – Cangahua 100% y Aditivo Megamix especial 1,5%)	104,67
Lechada óptima 7 (Cemento – Crudo caliza-arcilla 35% y Aditivo Lignosulfonato puro 0,2%)	123,91

Elaborado por Maritza Córdova

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Son varios los procedimientos que pueden adoptarse para conseguir el mejoramiento o rehabilitación del terreno, estos actúan mejorando las características portantes del terreno, reduciendo su permeabilidad, incrementando su densidad o disminuyendo sus deformaciones, pero en lo posible se debe evitar proyectar construcciones sobre medios inapropiados pues el costo de las operaciones encarece.

La ejecución de los diferentes tipos de procedimientos, depende de la necesidad, respecto a problemas de diseño, ejecución y/o protección de estructuras, así también de la rectificación de asientos de edificaciones o restauración de cimientos, destacando que cada método puede ser útil en cierta circunstancia y descartable en otras, su selección dependerá de buen criterio técnico y económico.

La inyección de suelos es un procedimiento geotécnico de costo elevado, motivo por el cual su aplicación no es recomendable, con excepción de que las características del medio no permitan la adopción de otro método de mejoramiento, este puede ser el caso de presencia de asentamientos en construcciones existentes, restauración de cimientos que pueden ser defectuosos por piedra natural que se ha agrietado o suelos que se han desplazado, impermeabilización de represas o soporte de túneles.

Al disminuir el costo de las lechadas de inyección reemplazando el consumo de cemento por cangahua o crudo de caliza-arcilla, este procedimiento geotécnico puede ser aplicado de manera más económica en las circunstancias en que otro

método geotécnico no sería satisfactorio para las exigencias de la obra y del terreno.

El costo de producción de lechadas de inyección como el de cualquier material de construcción está influenciado por el precio de sus componentes, al ser el cemento el elemento más costoso de los materiales constituyentes, se minimizó su contenido y se pudo evidenciar la reducción de los costos de lechadas.

Se determinó que la lechada más económica por optimizar las proporciones de los elementos empleados corresponde a la lechada óptima de Cemento – Cangahua 100% y Aditivo Megamix especial 1,5%, cuya disminución del costo en comparación a las lechadas de cemento con aditivo comprende un 50%; lo que para un proyecto de gran extensión constituye un ahorro significativo.

Existen diferentes métodos de inyección, su selección se realiza conforme se necesite tratamiento en rocas fisuradas, arenas y gravas o aluviones, suelos arcillosos blandos o fábricas defectuosas. En función del método de inyección, del medio a tratar y un reconocimiento previo del terreno, pueden determinarse los diferentes tipos de mezclas a utilizar durante el tratamiento, esto se debe a que para concluir los trabajos satisfactoria y económicamente se necesita contar con una amplia gama de morteros.

Existen tres clases de mezclas inyectables: las mezclas líquidas, las suspensiones inestables, las suspensiones estables. De las cuales, las primeras son aplicables en casi todos los medios con excelentes resultados pero tienen el impedimento de ser excesivamente caras, por lo que su uso es muy limitado, las segundas por el contrario relativamente baratas por su débil dosificación en cemento, son poco utilizadas en la actualidad debido a su característica de inestabilidad o pronta sedimentación de las partículas de cemento. Se prefieren las mezclas estables por poseer mejores características de fluidez, capacidad de ser bombeables e inyectables.

En el presente estudio se ha buscado determinar las diferentes proporciones de los elementos que compongan una mezcla estable, para lo cual las mezclas debían cumplir con parámetros de viscosidad y estabilidad.

En la búsqueda de optimización del costo de las mezclas estables y el cumplimiento de parámetros técnicos (viscosidad y estabilidad) se presentaron efectos que se deben tomar muy en cuenta al momento de elaborar lechadas para inyección de los diferentes medios, los cuales son mencionados a continuación:

A medida que incrementa la cantidad de cemento aumenta la viscosidad, disminuye el porcentaje de sedimentación de la lechada e incrementa la resistencia a la compresión.

La adición de Bentonita tiene efectos positivos y negativos; el aspecto positivo es la disminución de sedimentación que hace a la mezcla más estable y el aspecto negativo es el aumento de la viscosidad de la lechada a efectos de trabajabilidad e inyectabilidad.

El comportamiento de la bentonita es totalmente diferente, si la bentonita se utiliza inmediatamente en combinación con el cemento, o se utiliza después de diluida al estar en contacto con el agua para saturarse, en este caso el producto final es mucho más coloidal en comparación al primer método de mezcla.

La fluidez de la lechada disminuye conforme transcurre el tiempo, debido al fraguado inicial que experimenta por su contenido de cemento, por esto es absolutamente indispensable el empleo de un aditivo que mantenga constantes las propiedades físicas de la lechada en el transcurso de la inyección.

En la fabricación de lechadas con incorporación de aditivo se manifestó el fenómeno de saturación que es la dosis a partir de la cual ya no se obtienen mejoras en la fluidez y, por encima de esta cantidad óptima se presentan resultados contraproducentes, por ejemplo disgregación de fases sólida y líquida de la mezcla.

Para la correcta selección del aditivo se debe tener en cuenta que el más conveniente no es solamente el que proporciona mayor fluidez a la mezcla, sino que debe necesariamente considerarse aspectos como, su comportamiento frente a la sedimentación o su compatibilidad con los diferentes elementos constituyentes, y también se debe determinar la dosis máxima admisible de aditivo en la mezcla.

Se debe determinar la capacidad de absorción y humedad antes de utilizar cangahua en una lechada, para hacer un ajuste de humedad al momento de mezclar los elementos, de tal manera que las relaciones c/a no se vean afectadas, es decir que las partículas de cangahua no tomen parte del agua de mezclado.

A medida que incrementa el contenido de cangahua, aumenta la viscosidad de la lechada, disminuye la sedimentación y la resistencia a la compresión, en función del primer y segundo parámetro respectivamente, la cantidad máxima de cangahua admisible en la lechada corresponde al 100%

La sedimentación de la lechada con cangahua varía dependiendo del yacimiento de donde esta proviene; se considera que esta variación se suscita en función del contenido de partículas finas (limos y arcillas) constituyentes de la cangahua y que al ser menor su porcentaje, existirá mayor cantidad de sólidos precipitados, por lo tanto la cangahua que se prevea incorporar a las lechadas, deberá ser caracterizada en su peso volumétrico, su capacidad de absorción, su humedad natural, granulometría y clasificación SUCS; y poseer propiedades similares a la cangahua con la que se llevó a cabo el programa experimental.

Como aspecto negativo, al caracterizar la cangahua se determinó, que posee características variables, provocando discontinuidad en los parámetros de lechadas elaboradas con cangahua de otros yacimientos.

El aditivo proporciona fluidez a las lechadas de cemento, pero en las mezclas de cemento con cangahua, el comportamiento del aditivo Megamix especial es diferente, pues el punto de saturación se suscita con menor porcentaje de aditivo

comparado al que se produce en las lechadas de cemento puras, además al fluidificarse la mezcla también hay un pequeño aumento en su sedimentación; se estima que la cangahua tiene la capacidad de retener aditivo en la superficie de sus partículas, imposibilitando que sea el cemento el que adsorba el aditivo, dicho de otro modo el aditivo Megamix especial presenta incompatibilidad con las partículas finas o arcillosas de la cangahua.

Se experimentó la compatibilidad de las lechadas con cangahua de diferentes yacimientos con aditivo lignosulfonato puro y, se pudo determinar su eficiencia al ser mayor el efecto fluidificante y menor la sedimentación de la mezcla. Por lo tanto, se establece como procedimiento operacional, incorporar aditivo a las lechadas después de corroborar la plena existencia de compatibilidad, además se debe obtener el punto de saturación a partir del cual puede haber efectos contraproducentes.

La elaboración de lechadas con crudo de caliza arcilla es una alternativa viable para promover una lechada de menor costo, que contrariamente a la Bentonita que es mucho más coloidal permite la producción de lechadas débilmente dosificadas en cemento. Al mismo tiempo, la adición de coloides tiene un efecto muy favorable para la disminución de sedimentación de las lechadas.

Al ser la lechada de caliza arcilla una opción viable por cumplir perfectamente los parámetros técnicos y resulta también una solución de menor costo, puede ser utilizada en lugar de las lechadas con cangahua, si las condiciones del medio a tratar no permiten la introducción de partículas del tamaño de las cangahuas.

La viscosidad se incrementa con la adición de crudo de caliza arcilla, al ser este hecho un efecto no deseado y con el fin de mantener constantes las propiedades de la mezcla, se debe incorporar aditivo. Al adicionar aditivo Megamix especial se pudo observar un efecto adverso en la estabilidad de la lechada, se concluye que el aditivo Megamix especial a base de policarboxilato reacciona diferentemente que en las lechadas de cemento puras, y puede producirse debido a que las partículas de crudo de caliza arcilla pueden estar cargadas eléctricamente en su superficie de manera opuesta al cemento; se presume una aleación de cargas

entre los elementos, que termina precipitando a los sólidos. Por este motivo se realizaron pruebas con aditivo lignosulfonato puro, para probar la compatibilidad con el crudo de caliza-arcilla y el cemento; este aditivo mostró un efecto positivo al proporcionar fluidez a las mezclas sin alterar su estabilidad.

El no acatar el modo operativo establecido por el laboratorio para dosificación de lechadas, implicaría mayor variación en los parámetros necesarios de la mezcla de inyección

La gama de mezclas inyectables determinadas en el presente proyecto constituyen una herramienta útil para un especialista en inyecciones que determine necesario el cambio de mezclas durante el transcurso de la inyección, con el propósito de cuidar los aspectos técnicos y económicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Usos y aplicaciones de la Bentonita.* (24 de 4 de 2006). Obtenido de Quiminet.com: <http://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-de-las-bentonitas-7708.htm>
- ASTM. (2010). Método de prueba Standard para el flujo de lechada. *ASTM C939-10*.
- Bernardo de la Peña R, R. B. (2000). *Nuevos aditivos reductores de agua. Su aporte a la tecnología del hormigón.* Sika Chile S.A.
- Bowles, J. E. (1982). *Propiedades Geofísicas de los Suelos.* Bogotá: Mc Graw-Hill Latinoamericana.
- Cambefort, H. (1968). *Inyección de Suelos.* Barcelona: Ediciones OMEGA, S.A.
- Cambefort, H. (1975). *Geotécnica del Ingeniero.* Barcelona : Editores técnicos asociados, s.a. .
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones.* México: Limusa, SA de CV.
- Dirección Nacional Agrícola. Quito-Ecuador. (s.f.). PDF. La cangahua en el Ecuador: caracterización Morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión. Ecuador.
- Editores Técnicos Asociados, S. (1975). *Mecánica de Suelos, Reunión de Ingenieros.* (J. J. Llano, Trad.) Barcelona: Gersa, Llorens y Barba.

Emilia García Romero, Mercedes Suárez Barrios. (s.f.). *Las Arcillas: Propiedades y usos*. Obtenido de <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/arcillas.htm>

Facultad de agronomía-Universidad de la República. (2004). *Propiedades físicas de los suelos*. Obtenido de <http://www.fagro.edu.uy/~edafologia/curso/Curso%202014/Material/fisicas.pdf>

Gallardo Lancho, J. (2006). Reutilización de Suelos Volcánicos Erosionados sin promover más degradación. Ecuador: X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.

González, M. (2001). *El terreno*. Barcelona: Edicions UPC.

Guzmán, D. S. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Santafé de Bogotá: Bhandar Editores Ltda.

Keller Terra. (s.f.). Inyecciones de compensación. *El proceso Soilfrac*. Madrid.

Mas, P. B. (Diciembre de 2012). Criterios de selección del aditivo superplastificante en HAC. *3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante*. Madrid.

NTE INEN Instituto Ecuatoriano de normalización. (2009). NTE INEN 155 Mezclado mecánico de pastas y morteros de consistencia plástica. *Norma Técnica Ecuatoriana*.

NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). NTE INEN 155 Mezclado mecánico de pastas y morteros de consistencia plástica. *Norma Técnica Ecuatoriana*.

NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). NTE INEN 156 Cemento hidráulico - Determinación de la densidad. *Norma técnica Ecuatoriana*.

- NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). NTE INEN 157 Cemento hidráulico - Determinación de la consistencia normal - Método de Vicat. *Norma técnica Ecuatoriana*.
- NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). NTE INEN 158 Determinación de tiempo de fraguado. Método de Vicat. *Norma Técnica Ecuatoriana*.
- NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). NTE INEN 488 Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50mm de arista. *Norma Técnica Ecuatoriana*.
- NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 151 Cemento hidráulico - Definición de términos. *Norma Técnica Ecuatoriana*.
- NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 152 Cemento portland - Requisitos. *Norma Técnica Ecuatoriana*.
- NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 159 Determinación de tiempos de fraguado de pastas de cemento hidráulico. Método de Gillmore. *Norma Técnica Ecuatoriana*.
- NTE INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). NTE INEN 155 Mezclado mecánico de pastas y morteros de consistencia plástica. *Norma Técnica Ecuatoriana*.
- Ortiz, J. E. (2006). *Mecánica de fluidos e hidráulica*. Cali: Programa Editorial Universidad del Valle.
- Rico Rodríguez, A. (1978). *La ingeniería de los Suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas Volumen 2*. México: Limusa.
- Rico Rodríguez, A. (1978). *La ingeniería de los Suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Volumen 2*. México: Limusa.

- Rico Rodríguez, A. (2005). *La ingeniería de los Suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. México: Limusa.
- Robert, M. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson Educación.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. (2002). *Manual de construcción geotécnica* (Vol. 2). México: Mesa directiva Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.
- Técnicas Hidrotermales y estética del bienestar*. (s.f.). Madrid: Ediciones Paraninfo S.A.
- Tomlinson, M. J. (1996). *Cimentaciones: Diseño y Construcción*. México: Trillas.
- Torres, P. (2005). *Compactación de cangahuas*.
- Valcárcel, J. P. (s.f.). *Mejora y consolidación de suelos*. Obtenido de <http://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Profesores/valcarcel/MaterMRHE-0809/6-Mejora%20suelos.pdf>
- Zebrowski, C. (1996). *Los suelos con cangahua en el Ecuador*. Quito.

ANEXOS

ANEXO No 1

**PROGRAMA EXPERIMENTAL DE DOSIFICACIÓN DE
LECHADAS DE INYECCIÓN**

PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LECHADAS DE INYECCIÓN

1. LECHADAS DE CEMENTO PURAS										
Cantidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Relación c/a	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
2. LECHADAS DE CEMENTO CON BENTONITA										
BENTONITA 1%, 2%, 3%, 4%, 5%										
Cantidad	1	2	3	4	5					
Relación c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80					
3. LECHADAS DE CEMENTO CON ADITIVO										
ADITIVO 1%, 2%, 3%, 4%										
Relación c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80					
4. LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA										
CANGAHUA 50%, 100%, 150%										
Relación c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80					
5. LECHADAS DE CEMENTO CON CANGAHUA Y ADITIVO										
CANGAHUA 50% ADITIVO 1%, 2%, 3%										
Relación c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80					
CANGAHUA 150% ADITIVO 1%, 2%, 3%										
Relación c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80					
CANGAHUA 100% ADITIVO 1%, 2%, 3%										
Relación c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80					
6. LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA ARCILLA										
CRUDO DE CALIZA ARCILLA 20%, 30%										
Relación c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80					
6. LECHADAS DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA ARCILLA Y ADITIVO										
CRUDO DE CALIZA ARCILLA 20% ADITIVO 1%										
Relación c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80					
CRUDO DE CALIZA ARCILLA 30% ADITIVO 1%										
Relación c/a	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80					

<u>VARIABLES</u>	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	TOTAL ENSAYOS PLANIFICADOS
CEMENTO-AGUA	X	X	X	X	X	X	X	
BENTONITA		X						
CANGAHUA				X	X			
ADITIVO					X		X	
CRUDO DE CALIZA-ARCILLA						X	X	
N° DE PRUEBAS	10	25	20	15	45	10	10	135

ANEXO No 2

**DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y RECUENTO
FOTOGRAFICO DE EQUIPO UTILIZADO EN LOS
ENSAYOS DE LABORATORIO**

EQUIPO NECESARIO PARA EL MEZCLADO MECÁNICO DE LECHADAS EN LABORATORIO

En las fotografías 1 y 2 se pueden apreciar los equipos utilizados para el mezclado mecánico de las lechadas.



Fotografía 1.- Mezcladora Tipo Hobart



Fotografía 2.- Balanza Y Recipiente Baño María

PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO MECÁNICO DE LAS LECHADAS EN LABORATORIO

Mezclado mecánico de lechadas de cemento puras

El cemento y el 100% del agua se mezclan a baja velocidad durante 60seg
A continuación se cambia a velocidad media para un mezclado adicional de 30 segundos.

Se detiene la mezcladora y se deja reposar la lechada durante 90 segundos, durante los primeros 15 segundos se limpian las paredes de la mezcladora empujando hacia adentro la mezcla que se haya adherido a los lados del tazón, el resto del tiempo debe cubrirse el tazón con una tapa.

Finalmente se vuelve a mezclar durante 60 segundos más a velocidad media.

Mezclado mecánico de lechadas de cemento-bentonita

El cemento y la bentonita se combinan en seco antes de mezclarse con el agua para evitar la formación de grumos indeseables

Se añade la combinación al agua y se repiten los pasos para mezclado de lechadas de cemento puras.

En ensayos posteriores mediante observación, para obtener más beneficios de esta arcilla, se elaboró primero una suspensión al mezclarla con un 20% de agua por 30 segundos.

Mientras se continúa con el mezclado se añade la cantidad de cemento y el 80% del agua restante durante un período de 30 segundos a baja velocidad

A continuación se cambia a velocidad media para un mezclado adicional de 30 segundos.

Se detiene la mezcladora y se continúa con los pasos restantes.

Mezclado mecánico de lechadas de cemento-aditivo Megamix especial

Se realiza el mismo procedimiento para mezclado de lechadas de cemento, pero en el intervalo de 15 segundos de reposo, se quita la tapa y se añade la cantidad de aditivo estimada.

Mezclado mecánico de lechadas de cemento-cangahua:

La cangahua y el porcentaje de agua para su saturación se mezclan a velocidad baja durante 30 segundos.

Mientras se continúa con el mezclado se añade la cantidad de cemento y agua restante durante otro período de 30 segundos a baja velocidad, se continúa con el procedimiento de mezcla mencionado anteriormente para lechadas de cemento puras.

Mezclado mecánico de lechadas de cemento- crudo caliza arcilla:

El cemento y el crudo de caliza-arcilla se combinan en seco antes de mezclarse con el agua para evitar la formación de grumos indeseables.

Se continúa con el procedimiento descrito para lechadas de cemento con bentonita.

En ensayos posteriores mediante observación, para obtener más beneficios del crudo caliza-arcilla, se elaboró previamente una suspensión del crudo al mezclarlo con 20% de agua, se continúa con el procedimiento mencionado para lechadas de cemento con bentonita.

Para lechadas de cemento - crudo caliza arcilla - aditivo:

Se elabora una suspensión del crudo al mezclarlo con un 20% de agua por 30 segundos, se continúa con el procedimiento de mezcla y en el intervalo de 15 segundos de reposo, se quita la tapa y se añade la cantidad de aditivo estimada.

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LECHADAS EN LABORATORIO

Utilizando la siguiente relación se obtuvo el volumen del recipiente y la densidad de la lechada en cuestión, de la siguiente manera.

VOLUMEN DEL RECIPIENTE:

Masa de un recipiente

Masa del mismo recipiente lleno con agua al ras = masa del recipiente + agua

Masa del agua = (masa del recipiente + agua) – masa del recipiente

$$\text{Densidad del agua} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Vol recipiente}}$$

$$\text{Densidad del agua} = 1$$

$$1 = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Vol recipiente}}$$

$$\text{Vol recipiente} = \text{Masa del agua}$$

DENSIDAD DE LA LECHADA:

$$\text{Densidad del fluido} = \frac{\text{Masa del fluido}}{\text{Vol recipiente}}$$

EQUIPO NECESARIO PARA MEDICIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LECHADAS EN LABORATORIO

Se utilizaron viscosímetros con las siguientes características:

Tipo Marsh, el apéndice inferior tiene 5mm de diámetro

Tipo Mécasol, cuyo apéndice es de 9mm.

Tipo Prepakt, provisto de un apéndice de 14mm.



Fotografía 3.- Equipo Para Medición de Viscosidad (Cono Marsh)

Los conos tipo Marsh y Mécasol tienen las mismas dimensiones, variando nada más en el diámetro del tubo de descarga de 5mm a 9mm respectivamente, mientras que el cono de flujos tiene las dimensiones detalladas en la Figura 1 “Dimensiones de cono de Flujo” con un tubo de descarga de 12mm.

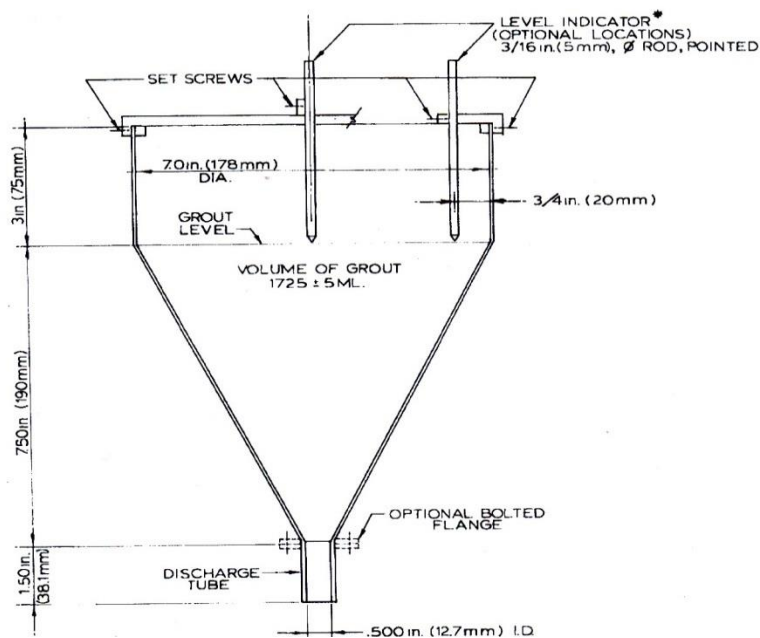


Figura 1 Dimensiones De Cono De Flujo
Fuente: ASTM C939

PROCEDIMIENTO PARA CALIBRACIÓN DE CONO Y MEDIDA DE LA VISCOSIDAD DE LECHADAS EN LABORATORIO

Los conos de medición se calibraron introduciendo en el cono Marsh y Mécasol 1000mL y en el cono de flujos 1725mL de agua marcando el nivel de la superficie de agua que posteriormente sería el nivel a llenar con mortero.

Después de tener un volumen calibrado en el cono, se monta el cono de flujo en el soporte de anillo. Se mide la viscosidad siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C939; el tiempo indicado por el cronómetro es el tiempo de flujo del mortero, se compararon las medidas de tiempo obtenidas en los tres conos y se determinó que el cono apto para las pruebas de viscosidad de lechada que garantice su fluidez corresponde al Cono Marsh con apéndice inferior de 5mm.

EQUIPO NECESARIO Y PROCEDIMIENTO PARA MEDICIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LECHADAS EN LABORATORIO

Se controló la estabilidad mediante la prueba descrita de agua libre o sedimentación que consistió en colocar 250cm³ en una probeta cilíndrica de 50mm de diámetro, gradada como se muestra en la Fotografía 5, donde cada división corresponde a 2cm³ de fluido. Se mide después de dos horas la cantidad de agua libre que queda en la parte superior de la probeta.



Fotografía 5.- Probeta cilíndrica para determinación de estabilidad.

La estabilidad de la lechada se determina mediante la relación:

$$\text{Sedimentación}(\%) = \frac{\text{Vol de agua libre}}{\text{Vol de lechada inicial}} * 100$$

EQUIPO NECESARIO PARA PARA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Se utilizaron moldes metálicos para especímenes como se muestran en la Fotografía 6, una máquina de ensayo de resistencia a la compresión como se muestra en la Fotografía 7 y se siguió el procedimiento según norma NTE INEN 488.



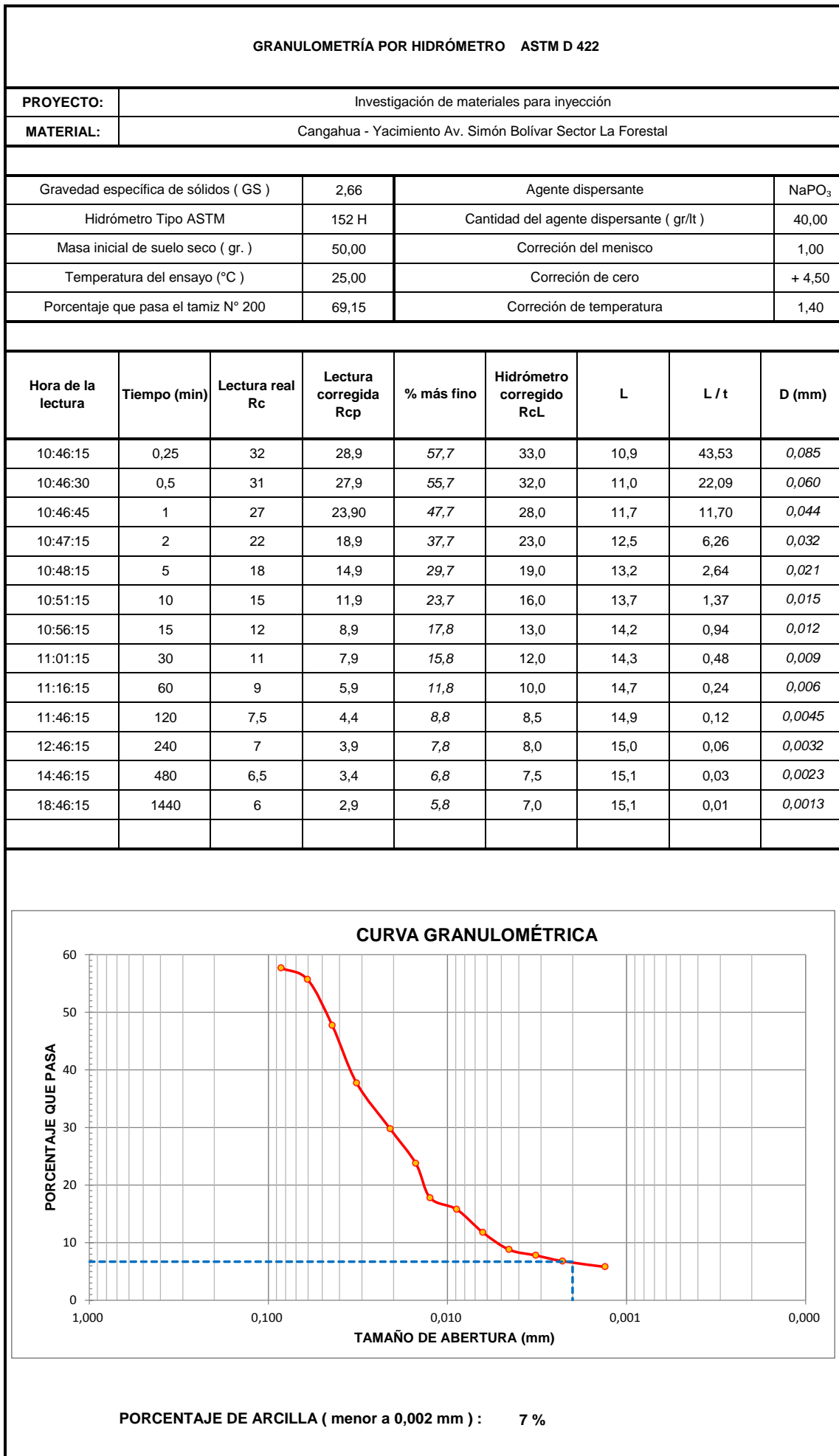
Fotografía 6.- Moldes metálicos de 50mm de arista para especímenes



Fotografía 7.- Máquina de ensayo de compresión adaptada para especímenes de arista 50mm

ANEXO No 3

**ENSAYOS ELABORADOS PARA CARACTERIZACIÓN DE
CANGAHUA EXTRAÍDA DEL SECTOR DE LA FORESTAL EN
QUITO UTILIZADA EN EL ESTUDIO DE LECHADAS**



DETERMINACIÓN DE ABSORCIÓN ASTM C128

PROYECTO:	Investigación de materiales para inyección
MATERIAL:	Cangahua - Yacimiento Av. Simón Bolívar Sector La Forestal

	MUESTRA 1	MUESTRA 2
msss= Masa de la muestra en estado sss (gr)=	56,20	62,80
ms = Masa de la muestra seca (gr)=	39,00	43,30

Absorción= ms-msss (w%)

W%= 44,10

W%= 45,03

W% Promedio
44,57 %

PESO VOLUMÉTRICO SUELTO ASTM C 29																			
PROYECTO:	Investigación de materiales para inyección																		
MATERIAL:	Cangahua - Yacimiento Av. Simón Bolívar Sector La Forestal																		
<p style="text-align: center;">DATOS RECIPIENTE:</p> <p>Diametro: 10,1 Altura: 11,6 (A) Volumen (cm3): 929,37 (B) Peso del recipiente(gr): 4283,5</p>																			
Psss: Peso volumétrico seco y suelto en gr/cm3																			
<p style="text-align: center;">Psss =(C-B) / A</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 40%;"></th> <th style="width: 10%;">PRUEBA 1</th> <th style="width: 10%;">PRUEBA 2</th> <th style="width: 10%;">PRUEBA 3</th> <th style="width: 10%;">PROMEDIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(C) Peso del recipiente + muestra (gr) :</td> <td style="text-align: center;">4980</td> <td style="text-align: center;">4999</td> <td style="text-align: center;">4995</td> <td style="text-align: center;">4991</td> </tr> <tr> <td>Peso volumétrico seco y suelto (gr/cm3):</td> <td style="text-align: center;">0,749</td> <td style="text-align: center;">0,770</td> <td style="text-align: center;">0,766</td> <td style="text-align: center;">0,762</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">Psss promedio: 0,762 gr/cm3</p>						PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PROMEDIO	(C) Peso del recipiente + muestra (gr) :	4980	4999	4995	4991	Peso volumétrico seco y suelto (gr/cm3):	0,749	0,770	0,766	0,762
	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PROMEDIO															
(C) Peso del recipiente + muestra (gr) :	4980	4999	4995	4991															
Peso volumétrico seco y suelto (gr/cm3):	0,749	0,770	0,766	0,762															
Pshn: Peso volumétrico suelto con humedad natural en gr/cm3																			
<p style="text-align: center;">Pshn =(C-B) / A</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 40%;"></th> <th style="width: 10%;">PRUEBA 1</th> <th style="width: 10%;">PRUEBA 2</th> <th style="width: 10%;">PRUEBA 3</th> <th style="width: 10%;">PROMEDIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(C) Peso del recipiente + muestra (gr) :</td> <td style="text-align: center;">5330</td> <td style="text-align: center;">5337</td> <td style="text-align: center;">5331</td> <td style="text-align: center;">5333</td> </tr> <tr> <td>Peso volumétrico suelto con humedad natural (gr/cm3):</td> <td style="text-align: center;">1,126</td> <td style="text-align: center;">1,134</td> <td style="text-align: center;">1,127</td> <td style="text-align: center;">1,129</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">Pshn promedio: 1,129 gr/cm3</p>						PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PROMEDIO	(C) Peso del recipiente + muestra (gr) :	5330	5337	5331	5333	Peso volumétrico suelto con humedad natural (gr/cm3):	1,126	1,134	1,127	1,129
	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PROMEDIO															
(C) Peso del recipiente + muestra (gr) :	5330	5337	5331	5333															
Peso volumétrico suelto con humedad natural (gr/cm3):	1,126	1,134	1,127	1,129															

ENSAYO DE CLASIFICACIÓN SUCS (ASTM D 2484)

PROYECTO: Investigación de materiales para inyección
MATERIAL: Cangahua - Yacimiento Av. Simón Bolívar Sector La Forestal

ASTM D2487 - ASTM D422 - ASTM D2216 - ASTM D4318

GRANULOMETRÍA

Peso suelo húmedo (gr): 283,61
 Peso suelo seco (gr): 227,47

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
2"	50,00	0	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0	0,00	100,00
1"	25,00	0	0,00	100,00
3/4"	19,00	0	0,00	100,00
1/2"	12,50	0	0,00	100,00
3/8"	9,53	0	0,00	100,00
4	4,75	0	0,00	100,00
10	2,000	11,5	5,06	94,94
40	0,425	18,4	8,09	91,91
200	0,075	70,2	30,86	69,14

HUMEDAD NATURAL

N° CÁPSULA	P CÁP+S HÚMEDO	P CÁP+S SECO	P CÁP	% HUMEDAD	% HUMEDAD PROMEDIO
A	68,69	58,20	15,63	24,64	24,68
48A	70,44	59,8	16,75	24,72	

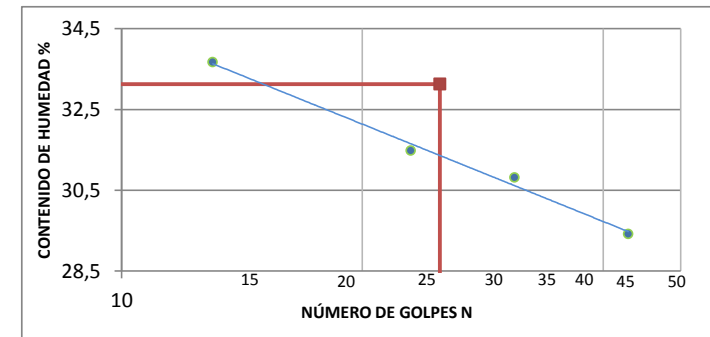
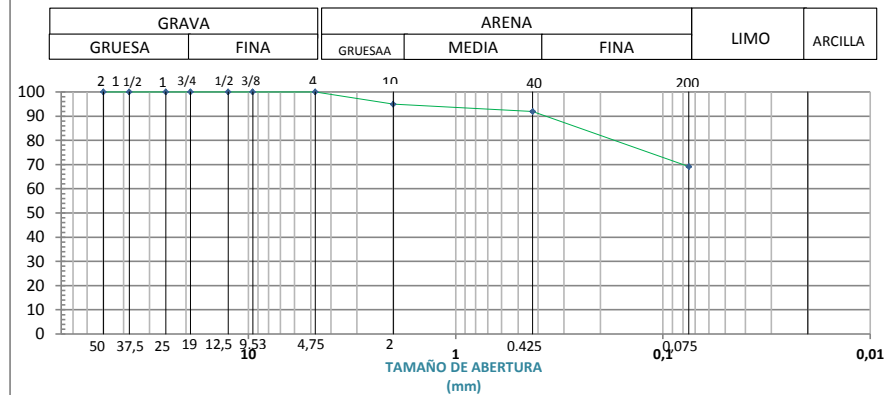
LÍMITE LÍQUIDO

N° CÁPSULA	N° GOLPES	P CÁP+S HÚMEDO	P CÁP+S SECO	P CÁP	% HUMEDAD
A	43	21,77	18,14	5,80	29,42
B	31	22,50	18,67	6,24	30,81
C	23	21,87	18,19	6,50	31,48
D	13	24,37	19,72	5,91	33,67

LÍMITE PLÁSTICO

N° CÁPSULA	P CÁP+S HÚMEDO	P CÁP+S SECO	P CÁP	% HUMEDAD	% HUMEDAD PROMEDIO
E	7,39	7,13	6,13	26,00	25,86
F	7,67	7,38	6,23	25,22	
H	7,47	7,23	6,32	26,37	

CURVA GRANULOMÉTRICA



GRAVA:	0 %	W %:	25	I.P.:	7
ARENA:	31 %	L.L.:	33	SUCS:	ML
FINOS:	69 %	L.P.:	26		

ANEXO No 4

**ESQUEMA QUE DETERMINA LOS RANGOS EN QUE LAS
LECHADAS CUMPLEN CON LOS PARÁMETROS DE
VISCOSIDAD Y ESTABILIDAD**

DETERMINACIÓN DE LOS RANGOS EN QUE LAS LECHADAS CUMPLEN CON LOS PARÁMETROS DE VISCOSIDAD Y ESTABILIDAD

Cemento - agua	Viscosidad	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65					
	Estabilidad				10,4						6,8			5,6			5,1						4,8				
	Relación c/a	1,1			1,2				1,3			1,4			1,5			1,55					1,6				
	Viscosidad	[Barra amarilla]																									
Estabilidad	[Barra amarilla]																	[Barra verde]									
Cemento - Bentonita 1%	Viscosidad	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67			
	Estabilidad	15				7									5,8				5					4,4			
	Relación c/a	1,1				1,2									1,3				1,35					1,4			
	Viscosidad	[Barra amarilla]																									
Estabilidad	[Barra amarilla]																	[Barra verde]									
Cemento - Bentonita 2%	Viscosidad	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67			
	Estabilidad						7,2								6,5			6,2						5,8			
	Relación c/a						1,2								1,25			1,26						1,3			
	Viscosidad	[Barra amarilla]																									
Estabilidad	[Barra verde]																										
Cemento - Aditivo Megamix especial 2%	Viscosidad	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
	Estabilidad						8,8											7,2									6,1
	Relación c/a						1,4											1,6									1,69
	Viscosidad	[Barra amarilla]																									
Estabilidad	[Barra amarilla]																	[Barra verde]									
Cemento - Cangahua 50% - Aditivo Megamix especial 1%	Viscosidad	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
	Estabilidad		18										10,6								6,4						6,9
	Relación c/a		1										1,2														1,3
	Viscosidad	[Barra amarilla]																									
Estabilidad	[Barra amarilla]																	[Barra verde]									
Cemento - Cangahua 100% - Aditivo Megamix especial 1,5%	Viscosidad	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60										
	Estabilidad										2																
	Relación c/a										1																
	Viscosidad	[Barra amarilla]																									
Estabilidad	[Barra verde]																										
Cemento - Crudo de caliza-arcilla 35% - Aditivo Lignosulfonato 0,2%	Viscosidad	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	
	Estabilidad							1,6												1,2							
	Relación c/a							1												1,1							
	Viscosidad	[Barra amarilla]																									
Estabilidad	[Barra amarilla]																	[Barra verde]									

ANEXO No 5

CÁLCULOS PARA DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LOS ELEMENTOS NECESARIOS PARA PRODUCIR 1m³ DE LECHADA

DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA PRODUCIR 1m³ DE LECHADA DE CEMENTO PURA.

El cálculo presente corresponde a la lechada óptima N°1 que es la lechada de cemento pura mostrada en la Tabla 5.14, cuya relación c/a es igual a 1,55.

La masa determinada para elaborar 1m³ de esta lechada corresponde al valor de 1720 kg obtenido de la densidad de la mezcla, y es igual a la suma del cemento más el agua.

Para determinar la proporción del cemento y el agua para 1m³, se utilizan las siguientes relaciones:

$$1) C + A = D$$

$$2) C = \frac{C}{A} * A$$

Donde:

C = contenido de cemento en kg/m³

A = contenido de agua en Lt/m³

D = densidad de la mezcla en kg/m³

$\frac{C}{A}$ = relación cemento/agua

2) en 1)

$$\left(\frac{C}{A} * A\right) + A = D$$

$$\left(\frac{C}{A} + 1\right) * A = D$$

$$A = \frac{D}{\left(\frac{C}{A} + 1\right)}$$

$$A = \frac{D}{\left(\frac{C}{A} + 1\right)}$$

$$A = \frac{1720 \text{ kg/m}^3}{(1,55 + 1)}$$

$$A = 674,51 \text{ lit/m}^3$$

A) en 2)

$$C = 1,55 * 674,51$$

$$C = 1045,49 \text{ kg/m}^3$$

DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA PRODUCIR 1m³ DE LECHADA DE CEMENTO BENTONITA 1%

El cálculo presente corresponde a la lechada óptima N°2 que es la lechada de cemento con adición de 1% de Bentonita, mostrada en la Tabla 5.14, cuya relación c/a es igual a 1,35.

La masa determinada para elaborar 1m³ de esta lechada corresponde al valor de 1650 kg obtenido de la densidad de la mezcla, y es igual a la suma del cemento más el 1% de Bentonita, más el agua.

Para determinar la proporción del cemento, agua y bentonita se utilizan las siguientes relaciones:

$$1) C + A + B = D$$

$$2) C = \frac{C}{A} * A$$

Donde:

C = contenido de cemento en kg/m³

A = contenido de agua en Lt/m³

D = densidad de la mezcla en kg/m³

B= bentonita en kg/m³ B=1% cemento

$\frac{C}{A}$ = relación cemento/agua

B en 1)

$$C + A + 0,01C = D$$

$$3) 1,01C + A = D$$

2) en 3)

$$1,01 * \left(\frac{C}{A} * A\right) + A = D$$

$$\left(1,01 * \frac{C}{A} + 1\right) * A = D$$

$$A = \frac{D}{\left(1,01 * \frac{C}{A} + 1\right)}$$

$$A = \frac{1650 \text{ kg/m}^3}{\left((1,01 * 1,35) + 1\right)}$$

$$A = 698,12 \text{ lit/m}^3$$

A) en 2)

$$C = 1,35 * 698,12$$

$$C = 942,46 \text{ kg/m}^3$$

$$B = 0,01C$$

$$B = 0,01 * 942,46$$

$$B = 9,42 \text{ kg/m}^3$$

DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA PRODUCIR 1m³ DE LECHADA DE CEMENTO BENTONITA 2%

El cálculo presente corresponde a la lechada óptima N°3 que es la lechada de cemento con adición de 2% de Bentonita, mostrada en la Tabla 5.14, cuya relación c/a es igual a 1,30.

La masa determinada para elaborar 1m³ de esta lechada corresponde al valor de 1620 kg obtenido de la densidad de la mezcla, y es igual a la suma del cemento más el 2% de Bentonita, más el agua.

Para determinar la proporción del cemento, agua y bentonita se utilizan las siguientes relaciones:

$$1) C + A + B = D$$

$$2) C = \frac{C}{A} * A$$

Donde:

C = contenido de cemento en kg/m³

A = contenido de agua en Lt/m³

D = densidad de la mezcla en kg/m³

B= bentonita en kg/m³ B=2% cemento

$\frac{C}{A}$ = relación cemento/agua

B en 1)

$$C+A+0,02C = D$$

$$3) 1,02C+A = D$$

2) en 3)

$$1,02 * \left(\frac{C}{A} * A\right) + A = D$$

$$\left(1,02 * \frac{C}{A} + 1\right) * A = D$$

$$A = \frac{D}{\left(1,02 * \frac{C}{A} + 1\right)}$$

$$A = \frac{1620 \text{ kg/m}^3}{\left((1,02 * 1,30) + 1\right)}$$

$$A = 696,47 \text{ lit/m}^3$$

A) en 2)

$$C = 1,30 * 696,47$$

$$C = 905,42 \text{ kg/m}^3$$

$$B=0,02C$$

$$B=0,02*905,42$$

$$B=18,11 \text{ kg/m}^3$$

DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA PRODUCIR 1m³ DE LECHADA DE CEMENTO Y ADITIVO MEGAMIX ESPECIAL 2%

El cálculo presente corresponde a la lechada óptima N°4 que es la lechada de cemento con incorporación de 2% de aditivo Megamix especial, mostrada en la Tabla 5.14, cuya relación c/a es igual a 1,69.

La masa determinada para elaborar 1m³ de esta lechada corresponde al valor de 1759 kg obtenido de la densidad de la mezcla, y es igual a la suma del cemento más el 2% de aditivo Megamix especial, más el agua.

Para determinar la proporción del cemento, agua y aditivo se utilizan las siguientes relaciones:

$$1) C + A + M = D$$

$$2) C = \frac{C}{A} * A$$

Donde:

C = contenido de cemento en kg/m³

A = contenido de agua en Lt/m³

D = densidad de la mezcla en kg/m³

M= aditivo Megamix especial en Lt/m³ M=2% cemento

$\frac{C}{A}$ = relación cemento/agua

M en 1)

$$C + A + 0,02C = D$$

$$3) 1,02C + A = D$$

2) en 3)

$$1,02 * \left(\frac{C}{A} * A\right) + A = D$$

$$\left(1,02 * \frac{C}{A} + 1\right) * A = D$$

$$A = \frac{D}{\left(1,02 * \frac{C}{A} + 1\right)}$$

$$A = \frac{1759 \text{ kg/m}^3}{\left((1,02 * 1,69) + 1\right)}$$

$$A = 645,79 \text{ lit/m}^3$$

A) en 2)

$$C = 1,69 * 645,79$$

$$C = 1091,38 \text{ kg/m}^3$$

$$M = 0,02C$$

$$M = 0,02 * 1091,38$$

$$M = 21,83 \text{ kg/m}^3$$

**DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA
PRODUCIR 1m³ DE LECHADA DE CEMENTO CON CANGAHUA 50% Y
ADITIVO MEGAMIX ESPECIAL 1%**

El cálculo presente corresponde a la lechada óptima N°5 que es la lechada de cemento con 50% de cangahua e incorporación de 1% de aditivo Megamix especial, mostrada en la Tabla 5.14, cuya relación c/a es igual a 1,30.

La masa determinada para elaborar 1m³ de esta lechada corresponde al valor de 1685 kg obtenido de la densidad de la mezcla, y es igual a la suma del cemento más el 50% cangahua, más el 1% de aditivo Megamix especial, más el agua.

Para determinar la proporción del cemento, cangahua, agua y aditivo se utilizan las siguientes relaciones:

$$1) C + A + M + Ca = D$$

$$2) C = \frac{C}{A} * A$$

Donde:

C = contenido de cemento en kg/m³

A = contenido de agua en Lt/m³

D = densidad de la mezcla en kg/m³

M= aditivo Megamix especial en Lt/m³ M=2% cemento

Ca = Cangahua en kg/m³ Ca=50% cemento

$\frac{C}{A}$ = relación cemento/agua

M y Ca en 1)

$$C+A+0,01C+0,5C = D$$

$$3) 1,51C+A = D$$

2) en 3)

$$1,51 * \left(\frac{C}{A} * A\right) + A = D$$

$$\left(1,51 * \frac{C}{A} + 1\right) * A = D$$

$$A = \frac{D}{\left(1,51 * \frac{C}{A} + 1\right)}$$

$$A = \frac{1685 \text{ kg/m}^3}{\left((1,51 * 1,30) + 1\right)}$$

$$A = 568,68 \text{ lit/m}^3$$

A) en 2)

$$C = 1,30 * 568,68$$

$$C = 739,28 \text{ kg/m}^3$$

$$M=0,01C$$

$$M=0,01*739,28$$

$$M=7,39 \text{ kg/m}^3$$

$$Ca=0,50C$$

$$Ca=0,50*739,28$$

$$Ca=369,64 \text{ kg/m}^3$$

DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA PRODUCIR 1m³ DE LECHADA DE CEMENTO CON CANGAHUA 100% Y ADITIVO MEGAMIX ESPECIAL 1,5%

El cálculo presente corresponde a la lechada óptima N°6 que es la lechada de cemento con 100% de cangahua e incorporación de 1,5% de aditivo Megamix especial, mostrada en la Tabla 5.14, cuya relación c/a es igual a 1,0.

La masa determinada para elaborar 1m³ de esta lechada corresponde al valor de 1610 kg obtenido de la densidad de la mezcla, y es igual a la suma del cemento más el 100% de cangahua, más el 1,5% de aditivo Megamix especial, más el agua.

Para determinar la proporción del cemento, cangahua, agua y aditivo se utilizan las siguientes relaciones:

$$1) C + A + M + Ca = D$$

$$2) C = \frac{C}{A} * A$$

Donde:

C = contenido de cemento en kg/m³

A = contenido de agua en Lt/m³

D = densidad de la mezcla en kg/m³

M= aditivo Megamix especial en Lt/m³ M=2% cemento

Ca = Cangahua en kg/m³ Ca=100% cemento

$\frac{C}{A}$ = relación cemento/agua

M y Ca en 1)

$$C+A+0,015C+1,0C = D$$

$$3) 2,015C+A = D$$

2) en 3)

$$2,015 * \left(\frac{C}{A} * A\right) + A = D$$

$$\left(2,015 * \frac{C}{A} + 1\right) * A = D$$

$$A = \frac{D}{\left(2,015 * \frac{C}{A} + 1\right)}$$

$$A = \frac{1610 \text{kg/m}^3}{\left((2,015 * 1,0) + 1\right)}$$

$$A = 534,0 \text{ lit/m}^3$$

A) en 2)

$$C = 1,0 * 534,00$$

$$C = 534,00 \text{ kg/m}^3$$

$$M = 0,015C$$

$$M = 0,01 * 534,00$$

$$M = 8,00 \text{ kg/m}^3$$

$$Ca = 1,0C$$

$$Ca = 1,0 * 534,00$$

$$Ca = 534,00 \text{ kg/m}^3$$

**DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA
PRODUCIR 1m³ DE LECHADA DE CEMENTO CON CRUDO DE CALIZA
ARCILLA 35% Y ADITIVO LIGNOSULFONATO PURO 0,2%**

El cálculo presente corresponde a la lechada óptima N°7 que es la lechada de cemento con 35% de crudo de caliza-arcilla e incorporación de 0,2% de aditivo lignosulfonato puro, mostrada en la Tabla 5.14, cuya relación c/a es igual a 1,0.

La masa determinada para elaborar 1m³ de esta lechada corresponde al valor de 1650 kg obtenido de la densidad de la mezcla, y es igual a la suma del cemento más el 35% de crudo de caliza-arcilla, más el 0,2% de aditivo lignosulfonato puro, más el agua.

Para determinar la proporción del cemento, crudo de caliza-arcilla, agua y aditivo se utilizan las siguientes relaciones:

$$1) C + A + L + Cr = D$$

$$2) C = \frac{C}{A} * A$$

Donde:

C = contenido de cemento en kg/m³

A = contenido de agua en Lt/m³

D = densidad de la mezcla en kg/m³

L= aditivo lignosulfonato puro en Lt/m³ L=0,2% cemento

Cr = Crudo de caliza-arcilla en kg/m³ Cr=35% cemento

$\frac{C}{A}$ = relación cemento/agua

M y Ca en 1)

$$A = \frac{1650 \text{ kg/m}^3}{((1,352 * 1,0) + 1)}$$

$$C + A + 0,002C + 0,35C = D$$

$$3) 1,352C + A = D$$

$$A = 701,53 \text{ lit/m}^3$$

2) en 3)

A) en 2)

$$1,352 * \left(\frac{C}{A} * A \right) + A = D$$

$$C = 1,0 * 701,53$$

$$C = 701,53 \text{ kg/m}^3$$

$$\left(1,352 * \frac{C}{A} + 1 \right) * A = D$$

$$L = 0,002C$$

$$L = 0,002 * 701,53$$

$$L = 1,40 \text{ kg/m}^3$$

$$A = \frac{D}{\left(1,352 * \frac{C}{A} + 1 \right)}$$

$$Cr = 0,35C$$

$$Cr = 0,35 * 701,53$$

$$Cr = 245,54 \text{ kg/m}^3$$

ANEXO No 6

DESARROLLO DE RUBROS PARA DETERMINACIÓN DE
PRECIO UNITARIO DE CANGAHUA

Rubro 001.1: Desbanque de cangahua a máquina**Descripción:**

Se procede a la extracción de cangahua una vez que se ha determinado el yacimiento apropiado, el cual no debe ubicarse a una distancia mayor de 8 km pues el proyecto es viable en la zona andina del Ecuador en que se tiene gran abundancia de este material.

Unidad: m3

Contenido del rubro: Retroexcavadora, operador de maquinaria pesada Estructura ocupacional C1, ayudante de maquinaria Estructura ocupacional C3.

Rendimientos:

Se ha observado que un operador de maquinaria pesada y un ayudante de maquinaria, utilizando una retroexcavadora pueden desbanca 130m³ en 2 horas.

$$R=h/m^3$$

$$R= 2h/130m^3$$

$$R= 0,015h/m^3$$

Precio unitario:

El precio de 1m³ de desbanque de cangahua es \$0,58 y su análisis se encuentra detallado en el Anexo 7.

Rubro 001.2: Desalojo de cangahua en volquetas**Descripción:**

El material obtenido por excavación debe ser acarreado de inmediato en volquetas una vez que se han removido impurezas, capa vegetal y cualquier elemento innecesario, hacia el lugar de tratamiento de cangahua. Se debe evitar la acumulación del material para contrarrestar mayor esponjamiento por humedad.

Unidad: m3

Contenido del rubro: Cargadora frontal, volqueta de 12m³, operador de maquinaria pesada Estructura ocupacional C1, Chofer licencia tipo C, ayudante de maquina Estructura ocupacional C3.

Rendimientos:

Se ha observado que un operador de equipo pesado, un chofer con licencia tipo C, y un ayudante de maquinaria, pueden cargar una volqueta de 12m³ de cangahua empleando una cargadora frontal que posee un cucharón de 1,5m³ en 10 minutos.

$$R=h/m^3$$

$$R= 0,16h/12m^3$$

$$R= 0,013 h/m^3$$

Precio unitario:

El precio de 1m³ de desalojo de cangahua es \$0,85 y su análisis se encuentra detallado en el Anexo 7.

Rubro 002: Transporte de cangahua en volquetas**Descripción:**

Una vez que el material ha sido cargado en volquetas se lo traslada al sitio de tratamiento.

Unidad: m³

Contenido del rubro: Volqueta de 12m³, Chofer licencia tipo C.

Observación:

El actual costo del transporte de materiales pétreos en el Ecuador redondea el valor de \$0,26 m³/km.

Precio unitario:

El precio de 1m³ de transporte de cangahua a una distancia de 8km es \$2,08 y su análisis se encuentra detallado en el Anexo 7.

Rubro 003: Hangar elaborado con plástico de invernadero para preparación de cangahua.**Descripción:**

El material extraído del yacimiento debe ser depositado en un sitio cercano al proyecto de inyección para su tratamiento. Este lugar puede ser un hangar elaborado con plástico invernadero que facilite su homogenización y secado. El cual debe poseer las siguientes características:

Estructura de madera (pingos), cubierta posterior, superior y laterales de plástico invernadero, sin puertas y el lado frontal sin cubrimiento, adicionalmente en el piso se debe colocar plástico polietileno como aislante de humedad. Las dimensiones del hangar estarán dadas de acuerdo a la necesidad del proyecto de inyección, la altura del hangar debe tener mínimo 3m, para facilitar el tratamiento del material.

La dimensión del hangar dependerá del volumen requerido de cangahua.

Unidad: m²

Contenido del rubro: plástico invernadero, pingos de madera, clavos, alambre galvanizado. Herramienta menor, albañil Estructura ocupacional D2, peón Estructura ocupacional E2.

Rendimientos:

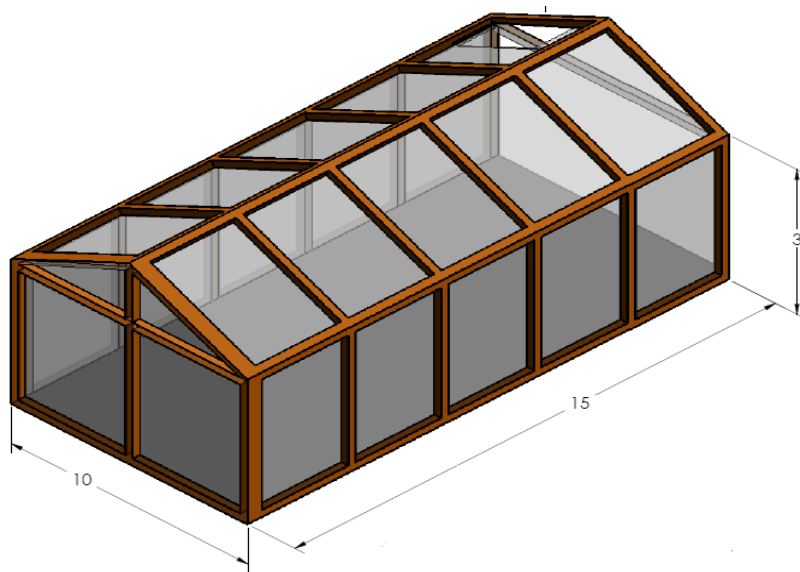
Para efectos del proyecto se considera un hangar de las siguientes características (Ver gráfico 5.1):

Área = 10*5 m²

Altura = 3m

Ángulo inclinación de cubierta= 25°

FIGURA 1 HANGAR ELABORADO CON PLÁSTICO DE INVERNADERO



Elaborado por Maritza Córdova

La construcción del hangar demanda 12 pingos de 4m y 1 pingo de 5m que constituyen los parantes, asimismo 6 pingos de 6m que forman las vigas de la estructura, y 3 pingos de 6m fijan la cubierta.

El revestimiento de la estructura se realiza con plástico invernadero cuya área suma 131.7m², correspondientemente distribuidos, en la cubierta 60 m², en los laterales 54m² y en la parte posterior 17.7m².

En el suelo del hangar se coloca 50m² de plástico polietileno como aislante de humedad.

Rendimiento pingos

Se necesita 107ml para la construcción de 50m² del hangar invernadero.

$$R = \text{ml/m}^2$$

$$R = 107\text{ml}/50\text{m}^2$$

$$R = 2,14\text{ml/m}^2$$

Rendimiento plástico invernadero

Se necesita 131,7m² para la construcción de 50m² del hangar invernadero.

$$R = m^2/m^2$$

$$R = 131,7m^2/50m^2$$

$$R = 2,63 \text{ m}^2/m^2$$

Rendimiento plástico polietileno

Se necesita 50m² de plástico polietileno para 50m² del hangar invernadero.

$$R = m^2/m^2$$

$$R = 50m^2/50m^2$$

$$R = 1,00 \text{ m}^2/m^2$$

Rendimiento Mano de Obra

Se necesitan 2 albañiles, y 1 peón para la construcción de 50m² del hangar invernadero en 2 días laborables.

$$R = HH \text{ (albañil)}/m^2$$

$$R = 32 \text{ HH}/50m^2$$

$$R = 0,64 \text{ HH (albañil)}/m^2$$

$$R = HH \text{ (peón)}/m^2$$

$$R = 16 \text{ HH}/50m^2$$

$$R = 0,32 \text{ HH (albañil)}/m^2$$

Precio unitario:

El precio de 1m² de hangar invernadero es \$10,82 y su análisis se encuentra detallado en el Anexo 7.

Rubro 004.1: Preparación - Secado de cangahua**Descripción:**

El material depositado en el hangar de plástico invernadero es sometido a un proceso de homogenización y secado. Para esto, el material debe ser extendido en capas de 30 cm y removido a mano durante el tiempo necesario.

Unidad: m3

Contenido del rubro: Herramienta menor, peón Estructura ocupacional E2.

Rendimientos:

A efectos del proyecto se estima que el material depositado en capas de 30cm en el área del hangar de 50m² corresponde a 15m³. Este volumen es secado en un tiempo de 4 horas en condiciones ambientales óptimas, siendo removido en dos períodos de media hora por 7 peones.

$$R = HH(\text{peón})/m^3$$

$$R = 7HH/15m^3$$

$$R = 0,47 HH (\text{peón})/m^3$$

Precio unitario:

El precio de homogenización y secado a mano de 1m³ de cangahua es \$1,75 y su análisis se encuentra detallado en el Anexo 7.

Rubro 004.2: Preparación - Tamizado de cangahua.**Descripción:**

El material que ha sido secado se tamiza mediante la utilización de una zaranda N°16.

Unidad: m³

Contenido del rubro: zaranda N°16, Herramienta menor, peón Estructura ocupacional E2.

Rendimiento:

A efectos del proyecto se estima que 2 peones utilizan 2 horas para zarandear 2m³ de cangahua, empleando dos zarandas de dimensiones de 2,00m*1,50m

$R = HH \text{ (peón)}/m^3$

$R = 4HH/2m^3$

$R = 2 HH \text{ (peón)}/m^3$

Precio unitario:

El precio de tamizado a mano de 1m³ de cangahua es \$7,72 y su análisis se encuentra detallado en el Anexo 7.

ANEXO No 6

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE RUBROS PARA
PRODUCCIÓN DE 1m³ DE CANGAHUA**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Rubro: Desbanque de cangahua a máquina Unidad: m3 Precio unitario: 0,58			Código: 001.1	
MATERIALES				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO
				-
			SUBTOTAL M	-
EQUIPO				
DESCRIPCION	UNIDAD	HORA EQUIPO	COSTO HORA	SUBTOTAL
Retroexcavadora	Hora	0,015	30	0,46
			SUBTOTAL N	0,46
MANO DE OBRA				
DESCRIPCION	CATEGORIA	HORA HOMBRE	COSTO HORA	SUBTOTAL
Operador Retroexcavadora (Estr.Oc C1)	OEP 1	0,015	3,79	0,06
Ayudante de maquinaria (Estr.Oc C3)	Cat II	0,015	3,63	0,06
			SUBTOTAL O	0,11
TRANSPORTE				
DESCRIPCION	UNIDAD	CONSUMO	TARIFA/KM	SUBTOTAL
				-
			SUBTOTAL P	-
TOTAL COSTOS DIRECTOS (M+N+O+P)				0,58

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Rubro: Desalojo de cangahua en volquetas de 12m3 Unidad: m3 Precio unitario: 0,92			Código: 001.2	
MATERIALES				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO
				-
			SUBTOTAL M	-
EQUIPO				
DESCRIPCION	UNIDAD	HORA EQUIPO	COSTO HORA	SUBTOTAL
Cargadora frontal	Hora	0,013	30	0,40
Volqueta 12m3	Hora	0,013	30	0,40
			SUBTOTAL N	0,80
MANO DE OBRA				
DESCRIPCION	CATEGORIA	HORA HOMBRE	COSTO HORA	SUBTOTAL
Operador cargadora frontal	(Estr.Oc C1)	0,013	3,79	0,05
Chofer licencia tipo C	(Estr.Oc D2)	0,013	5,12	0,07
Ayudante de maquinaria	(Estr.Oc C3)	0,013	3,63	0,05
			SUBTOTAL O	0,12
TRANSPORTE				
DESCRIPCION	UNIDAD	CONSUMO	TARIFA/KM	SUBTOTAL
				-
			SUBTOTAL P	-
TOTAL COSTOS DIRECTOS (M+N+O+P)				0,92

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Rubro: Transporte de cangahua en volquetas Unidad: m3 Precio unitario: 2,08			Código: 002	
MATERIALES				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO
				-
			SUBTOTAL M	-
EQUIPO				
DESCRIPCION	UNIDAD	HORA EQUIPO	COSTO HORA	SUBTOTAL
			SUBTOTAL N	-
MANO DE OBRA				
DESCRIPCION	CATEGORIA	HORA HOMBRE	COSTO HORA	SUBTOTAL
			SUBTOTAL O	-
TRANSPORTE				
DESCRIPCION	UNIDAD	CONSUMO	TARIFA/KM	SUBTOTAL
Trasnporte de cangahua a 8km	m3/km	8	0,26	2,08
			SUBTOTAL P	2,08
TOTAL COSTOS DIRECTOS (M+N+O+P)				2,08

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Rubro: Hangar elaborado con plástico de invernadero para preparación de cangahua.			Código: 003	
Unidad: m2				
Precio unitario: 10,82				
MATERIALES				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO
Pingos	ml	2,14	1,17	2,50
Plástico invernadero	m2	2,63	1,41	3,71
Plástico polietileno	m2	0,50	0,45	0,23
Clavos	kg	0,05	1,09	0,05
Alambre galvanizado N°18	kg	0,45	1,55	0,70
			SUBTOTAL M	7,19
EQUIPO				
DESCRIPCION	UNIDAD	HORA EQUIPO	COSTO HORA	SUBTOTAL
Herramienta menor (5% MO)				0,17
			SUBTOTAL N	0,17
MANO DE OBRA				
DESCRIPCION	CATEGORIA	HORA HOMBRE	COSTO HORA	SUBTOTAL
Albañil	(Estr.Oc D2)	0,64	3,61	2,31
Peón	(Estr.Oc E2)	0,32	3,58	1,15
			SUBTOTAL O	3,46
TRANSPORTE				
DESCRIPCION	UNIDAD	CONSUMO	TARIFA/KM	SUBTOTAL
				-
			SUBTOTAL P	-
TOTAL COSTOS DIRECTOS (M+N+O+P)				10,82

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Rubro: Secado de cangahua Unidad: m3 Precio unitario: 1,75			Código: 004.1	
MATERIALES				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO
			SUBTOTAL M	0,00
EQUIPO				
DESCRIPCION	UNIDAD	HORA EQUIPO	COSTO HORA	SUBTOTAL
Herramienta menor (5% MO)				0,08
			SUBTOTAL N	0,08
MANO DE OBRA				
DESCRIPCION	CATEGORIA	HORA HOMBRE	COSTO HORA	SUBTOTAL
Peón	(Estr.Oc E2)	0,47	3,58	1,67
			SUBTOTAL O	1,67
TRANSPORTE				
DESCRIPCION	UNIDAD	CONSUMO	TARIFA/KM	SUBTOTAL
				-
			SUBTOTAL P	-
TOTAL COSTOS DIRECTOS (M+N+O+P)				1,75

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Rubro: Tamizado de cangahua Unidad: m3 Precio unitario: 7,72			Código: 004.2	
MATERIALES				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO
Zaranda N °16	m2	0,04	5	0,20
			SUBTOTAL M	0,20
EQUIPO				
DESCRIPCION	UNIDAD	HORA EQUIPO	COSTO HORA	SUBTOTAL
Herramienta menor (5% MO)				0,36
			SUBTOTAL N	0,36
MANO DE OBRA				
DESCRIPCION	CATEGORIA	HORA HOMBRE	COSTO HORA	SUBTOTAL
Peón	(Estr.Oc E2)	2,00	3,58	7,16
			SUBTOTAL O	7,16
TRANSPORTE				
DESCRIPCION	UNIDAD	CONSUMO	TARIFA/KM	SUBTOTAL
				-
			SUBTOTAL P	-
TOTAL COSTOS DIRECTOS (M+N+O+P)				7,72

ANEXO No 8

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE LECHADAS
ÓPTIMAS**

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE LECHADA ÓPTIMA DE CEMENTO PURA.

El análisis de precio unitario expuesto en la Tabla 1, corresponde a la lechada óptima N°1 que es la lechada de cemento pura proporcionada como se muestra en apartado 5.7.

**Tabla 1. Lechada óptima 1
(Cemento-agua)**

Unidad: m3

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	PRECIO UNITARIO (B)	SUBTOTAL (A*B)	%
Cemento Portland Tipo IP	kg	1045	0,15	159,54	99,56
Agua	Lt.	675	0,001	0,71	0,44
					100,00

Elaborado por: Maritza
Córdova

TOTAL \$/m3	160,25
-------------	--------

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE LECHADA ÓPTIMA DE CEMENTO Y BENTONITA 1%

El análisis de precio unitario de la lechada óptima N°2 que es la lechada de cemento con adición de 1% de Bentonita, proporcionada como se muestra en el apartado 5.7, se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Lechada óptima 2 (Cemento - Bentonita 1%)

Unidad: m3

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	PRECIO UNITARIO (B)	SUBTOTAL (A*B)	%
Cemento Portland Tipo IP	kg	942	0,15	143,82	94,77
Agua	Lt.	698	0,001	0,73	0,48
Bentonita	kg	9	0,764	7,20	4,75
					100,00

Elaborado por: Maritza
Córdova

TOTAL \$/m3	151,76
-------------	--------

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE LECHADA ÓPTIMA DE CEMENTO Y BENTONITA 2%

El análisis de precio unitario de la Tabla 3, corresponde a la lechada óptima N°3 que es la lechada de cemento con adición de 2% de Bentonita, proporcionada como se muestra en el apartado 5.7

Tabla 3. Lechada óptima 3 (Cemento - Bentonita 2%)

Unidad: m3

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	PRECIO UNITARIO (B)	SUBTOTAL (A*B)	%
Cemento Portland Tipo IP	kg	905	0,15	138,17	90,46
Agua	Lt.	696	0,001	0,73	0,48
Bentonita	kg	18	0,764	13,84	9,06
					100,00

Elaborado por: Maritza
Córdova

TOTAL \$/m3	152,74
-------------	--------

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE LECHADA ÓPTIMA DE CEMENTO Y ADITIVO MEGAMIX ESPECIAL 2%

El análisis de precio unitario de la Tabla 4, perteneciente a la lechada óptima N°4 corresponde a la lechada de cemento con adición de 2% de aditivo megamix especial, proporcionada como se muestra en el apartado 5.7

Tabla 4. Lechada óptima 4 (Cemento – Aditivo Megamix especial 2%)

Unidad: m3

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	PRECIO UNITARIO (B)	SUBTOTAL (A*B)	%
Cemento Portland Tipo IP	kg	1091	0,15	166,55	79,80
Agua	Lt.	646	0,001	0,68	0,32
Aditivo Megamix especial	kg	22	1,90	41,47	19,87
					100,00

Elaborado por: Maritza
Córdova

TOTAL \$/m3	208,70
-------------	--------

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE LECHADA ÓPTIMA DE CEMENTO CON CANGAHUA 50% Y ADITIVO MEGAMIX ESPECIAL 1%

El análisis de precio unitario de la lechada óptima N°5 expuesto en la Tabla 5, pertenece a la lechada de cemento con adición de 50% de cangahua e incorporación de 1% de aditivo megamix especial, proporcionada como se muestra en el apartado 5.7

Tabla 5. Lechada óptima 5 (Cemento – Cangahua 50% y Aditivo Megamix especial 1%)

Unidad: m3

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	PRECIO UNITARIO (B)	SUBTOTAL (A*B)	%
Cemento Portland Tipo IP	kg	739	0,15	112,81	85,09
Agua	Lt.	569	0,001	0,60	0,45
Aditivo Megamix especial	kg	7	1,90	14,05	10,59
Cangahua	kg	370	0,01	5,13	3,87
					100,00

Elaborado por: Maritza

Córdova

TOTAL \$/m3	132,58
-------------	--------

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE LECHADA ÓPTIMA DE CEMENTO CON CANGAHUA 100% Y ADITIVO MEGAMIX ESPECIAL 1,5%

El análisis de precio unitario obtenido en la Tabla 6 corresponde a la lechada óptima N°6, de cemento con adición de 100% de cangahua e incorporación de 1,5% de aditivo megamix especial, proporcionada como se muestra en el apartado 5.7

Tabla 6. Lechada óptima 6 (Cemento – Cangahua 100% y Aditivo Megamix especial 1,5%)

Unidad: m3

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	PRECIO UNITARIO (B)	SUBTOTAL (A*B)	%
Cemento Portland Tipo IP	kg	534	0,15	81,49	77,85
Agua	Lt.	534	0,001	0,56	0,54
Aditivo Megamix especial	kg	8	1,90	15,22	14,54
Cangahua	kg	534	0,01	7,41	7,07
					100,00

Elaborado por: Maritza

Córdova

TOTAL \$/m3	104,67
-------------	--------

**ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE LECHADA ÓPTIMA DE CEMENTO CON
CRUDO DE CALIZA ARCILLA 35% Y ADITIVO LIGNOSULFONATO PURO
0,2%**

El análisis de precio de la lechada óptima N°7 mostrado en la Tabla 7, corresponde a la lechada de cemento con adición de 35% de crudo de caliza-arcilla e incorporación de 0,2% de aditivo lignosulfonato puro, proporcionada como se muestra en el apartado 5.7

Tabla 7. Lechada óptima 7 (Cemento – Crudo caliza-arcilla 35% y Aditivo Lignosulfonato puro 0,2%)

Unidad: m3

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	PRECIO UNITARIO (B)	SUBTOTAL (A*B)	%
Cemento Portland Tipo IP	kg	702	0,15	107,05	86,40
Agua	Lt.	702	0,001	0,74	0,59
Aditivo Lignosulfonato puro	kg	1	1,25	1,75	1,42
Crudo de caliza-arcilla	kg	246	0,06	14,36	11,59
					100,00

Elaborado por: Maritza

Córdova

TOTAL \$/m3	123,91
-------------	--------