

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y FÍSICO DE MEZCLAS DE LODO-CEMENTO CON BAJO CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA PARA SU USO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br.:
Márquez Flores, Dayselis Margarita
Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y FÍSICO DE MEZCLAS DE LODO-CEMENTO CON BAJO CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA PARA SU USO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

TUTORES ACADÉMICOS: Prof. Henry Blanco.

Prof. María Eugenia Korody.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br.:
Márquez Flores, Dayselis Margarita
Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2009

ACTA

El día **28 de octubre de 2009** se reunió el jurado formado por los profesores:

María Eugenia Korody / Henry Blanco

María Virginia Najul

César Peñuela

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: **"Comportamiento Mecánico y Físico de Mezclas de lodo-cemento con bajo Contenido de Materia Orgánica para su Uso como Material de Construcción"**.

Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de **INGENIERO CIVIL**.

Una vez oída la defensa oral que la bachiller hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. Dayselis Margarita Márquez Flores	20	VEINTE

Recomendaciones:

FIRMAS DEL JURADO

María Eugenia Korody 4/30
María Virginia Najul
César Peñuela

Caracas, 28 de octubre de 2009

DEDICATORIA

A Dios por demostrarme que siempre está presente y que me acompaña en todo momento, guiándome y dándome fuerzas para seguir adelante y vencer todos los obstáculos que se puedan presentar.

A la Virgen y a mis Ángeles de la guarda por protegerme día a día.

A mis padres de los cuales soy testigo de todos los sacrificios que han tenido que hacer para darme estudio y culminar mi carrera.

A mi loca familia que siempre me apoya, cada quien con su manera particular de ser.

A todos los que me ayudaron en mi tesis porque de cada uno de ustedes hay un pedacito en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por colocarme al frente a las personas indicadas para seguir adelante así como las herramientas necesarias.

A toda mi familia que de una manera u otra siempre ha estado apoyándome para terminar este Trabajo tanto como mi carrera.

Al Prof. Henry Blanco por su apoyo, atención, motivación y disposición incondicional y por tratar de llevar este trabajo por el camino de la perfección.

A la Profa. María Eugenia Korody por su entusiasmo y motivación en todo momento.

A todo el personal de la Planta de Tratamiento de Potabilización de Aguas de San Felipe, particularmente a la Ing. Luisa Villalobos.

Al Prof. Armando Ramírez y personal del Instituto de Ciencias de la Tierra.

Al personal del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, en especial al Prof. Cesar Peñuela, Prof. Nelson Camacho, Ing. Leonel Rodríguez y sobre todo a Elioner Barrios por ser estar siempre a la disposición cuando se le necesita.

A mis súper ayudantes: Rose, El Llano, Juan, Rafa, Pedro, Gaby y Cubas quienes me regalaron su disposición, ayuda y su tiempo para realizar este Trabajo.

Al que me quiere de más y a todos aquellos que dedicaron su tiempo y entusiasmo para hacer de este trabajo el mejor posible sintiéndose parte del mismo como mis compañeros de tesis.

Márquez F, Dayselis M

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y FÍSICO DE MEZCLAS DE
LODO-CEMENTO CON BAJO CONTENIDO DE MATERIA
ORGÁNICA PARA SU USO COMO MATERIAL DE
CONSTRUCCIÓN**

Tutores Académicos: Prof. Henry Blanco

Prof. María Eugenia Korody

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Civil. 2009, n° pág. 129

Palabras Clave: lodo, diseño de mezcla, reutilización del lodo.

Resumen

En este trabajo se elaboraron y ensayaron mezclas de lodo-cemento con bajo contenido de materia orgánica y así describir el comportamiento de las mezclas para fines de construcción. Estas mezclas de lodo-cemento se han planteado en busca de soluciones para reutilizar el lodo proveniente del proceso de potabilización. Se seleccionaron 10 muestras de lodo provenientes de los sedimentadores de plantas de potabilización cuyas fuentes de abastecimiento fueran principalmente ríos, a las cuales se le determinó el contenido orgánico mediante tres ensayos: colorimétrico, método de Walkley-Black y el Análisis Termogravimétrico. El lodo proveniente de la Planta de San Felipe resultó ser el que poseía menor contenido orgánico. Este lodo fue secado y pulverizado para luego producir mezclas lodo-cemento. Fueron realizados ensayos de resistencia a la compresión, tracción indirecta, absorción y erosión para su caracterización mecánica y ensayos de granulometría, peso específico y peso unitario compacto para su caracterización física. Se realizaron tres mezclas, lodo-cemento (M1-LC), lodo-cemento y piedra (M2-LCP) y lodo-cemento y suelo (M3-LCS), siendo esta última (M3-LCS) la que obtuvo el mejor comportamiento de las tres mezclas estudiadas con una resistencia a la compresión a los 28 días de $5,73 \text{ kgf/cm}^2$, de donde se deduce que la adición de suelo le confiere al lodo-cemento mayor resistencia y durabilidad. Este lodo-cemento suelo (M3-LCS) es posible compararlo con otros materiales de construcción, confiriéndole a este nuevo material factibilidad para su uso en el campo de la construcción con fines no estructurales, tomando en cuenta las dificultades en su manejo (recolección, traslado, secado y pulverizado).

ÍNDICE

CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. APORTES.....	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DE AGUAS	5
2.2. COAGULANTES	6
2.2.1. Coagulantes metálicos.....	6
2.2.2. Polielectrolitos. (Polímeros).....	8
2.3. CARACTERIZACIÓN DE LODOS	9
2.4. MANEJO DE LODOS.....	15
2.4.1. Tratamiento de lodos.....	15
2.4.2. Disposición de los lodos	15
2.4.3. Reutilización	16
2.5. COMPONENTES DE MEZCLAS USADAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.....	18

2.6. DISEÑO DE MEZCLA	25
2.7. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS CONVENCIONALES	26
2.7.1. Concreto	26
2.7.2. Suelo – cemento	28
2.8. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS NO CONVENCIONALES	30
2.8.1. Ripio de Cantera - cemento.....	30
2.8.2. PET- cemento.....	31
2.8.3. Lodo – cemento, con lodos provenientes del Tratamiento de Aguas Residuales	32
2.9. EXPERIENCIAS CON LODOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DE AGUAS COMO MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN.....	35
 CAPÍTULO III	
3. MÉTODO	45
3.1. SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL LODO	45
3.2. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO DEL LODO	47
3.2.1. Ensayo Colorimétrico.....	48
3.2.2. Análisis Termogravimétrico.....	48
3.2.3. Método de Walkley-Black.	50
3.3. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DEL LODO SELECCIONADO	52
3.4. CARACTERÍSTICAS DEL LODO EN ESTADO NATURAL	54

3.5. ACONDICIONAMIENTO DEL LODO PARA LA MEZCLA.....	56
3.5.1. Pruebas iniciales.....	58
3.5.2. Peso específico.....	61
3.5.3. Límites de Atterberg	63
3.5.4. Granulometría	63
3.6. REALIZACIÓN DE MEZCLAS Y PROBETAS DE LODO-CEMENTO	65
3.6.1. Elaboración de diseños de mezcla	66
3.6.2. Elaboración de probetas	68
3.6.3. Almacenamiento y curado de las probetas.....	69
3.7. ENSAYO DE LAS PROBETAS	70
3.7.1. Ensayo de la resistencia a la compresión	70
3.7.2. Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas	71
3.7.3. Ensayo de absorción.....	71
3.7.4. Ensayo de erosión.	72
 CAPÍTULO IV	
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	74
4.1. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO DEL LODO	74
4.2. CARACTERÍSTICAS DEL LODO DE SF EN ESTADO NATURAL	78
4.3. CARACTERÍSTICAS DEL LODO DE SF ACONDICIONADO.....	79
4.3.1. Peso específico	80
4.3.2. Peso unitario compacto	80
4.3.4. Granulometría	81
4.4. ANÁLISIS DE MEZCLAS	84
4.4.1. Proceso de fraguado	86

4.5. ENSAYOS	87
4.5.1. Ensayo de resistencia a la compresión	87
4.5.2. Ensayo de tracción indirecta sobre cilindros.....	96
4.5.3. Ensayo de Absorción.....	100
4.5.4. Ensayo de Erosión.....	105
 CAPÍTULO V	
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
5.1. CONCLUSIONES	108
5.2. RECOMENDACIONES.....	111
 CAPÍTULO VI	
6. BIBLIOGRAFÍA	113
 CAPÍTULO VII	
7. APÉNDICES.....	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Concentraciones de Lodos Sedimentados.....	9
Tabla 1.2. Características del lodo en plantas que usan Sulfato de Aluminio.....	11
Tabla 2.2. Composición de lodo seco.....	12
Tabla 2.3. Características químicas de lodos.....	13
Tabla 2.4. Metales Pesados en lodos.....	14
Tabla 2.6. Diseños de mezcla de distintos materiales.....	25
Tabla 2.7. Principales características de mezclas de lodo-cemento con lodos potables y residuales.....	43
Tabla 3.1. Principales características de las Plantas de Tratamiento.....	46
Tabla 3.2. ATG para suelos.....	49
Tabla 3.3. Diseños de Mezcla.....	67
Tabla 3.4. Número de probetas realizadas.....	67
Tabla 4.1. Contenido orgánico del lodo de distintas plantas potabilizadoras.....	75
Tabla 4.2. Contenido orgánico del lodo de SF.....	78
Tabla 4.3. Pruebas Iniciales.....	80
Tabla 4.4. Resistencias a la compresión promedio.....	88
Tabla 4.5. Resistencia a la compresión de distintas mezclas de lodo-cemento....	92
Tabla 4.6. Resistencia de distintas mezclas estabilizadas con cemento.....	94
Tabla 4.7. Resistencia a la tracción indirecta promedio.....	97
Tabla 4.8. Resistencia a la tracción indirecta de otras mezclas de lodo-cemento..	99
Tabla 4.9. Absorción promedio.....	101
Tabla 4.10. Valores de Absorción de mezclas de lodo-cemento.....	102
Tabla 4.11. Absorción de distintas mezclas estabilizadas con cemento.....	104
Tabla 4.12. Pérdida de material promedio.....	105
Tabla 4.13. Pérdida de material de distintas mezclas.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Análisis Termogravimétrico.....	50
Figura 3.2. Fases del ensayo de Walkley-Black.....	52
Figura 3.3. Recolección del lodo.....	53
Figura 3.4. Cápsulas con las muestras en el horno.....	56
Figura 3.4. Secado, pulverizado y tamizado del lodo.....	57
Figura 3.6 Pruebas iniciales.....	61
Figura 3.7 Algunos ensayos de laboratorio.....	65
Figura 3.7. Elaboración de mezclas y probetas de lodo-cemento.....	69
Figura 3.9 Almacenamiento y curado.....	70
Figura 3.10. Ensayos de las probetas.....	73
Figura 4.1. Correlación entre los métodos de determinación de contenido orgánico.....	77
Figura 4.2. Curva granulométrica del lodo de SF.....	81
Figura 4.3. Curva granulométrica del suelo utilizado.....	82
Figura 4.4. Comparación de las curvas granulométricas del suelo y el lodo utilizado y el de la P.T La Mariposa.....	83
Figura 4.5. Difracción del lodo de SF.....	84
Figura 4.6. Asentamiento de las mezclas.....	85
Figura 4.7. Peso unitario compacto de las mezclas.....	86
Figura 4.8. Resistencia a la compresión a los 7 días.....	88
Figura 4.9. Resistencia a la compresión a los 28 días.....	89
Figura 4.10. Ensayo de resistencia a la compresión.....	90
Figura 4.11. Comparación de resistencia a la compresión a los 7 días de distintas mezclas de lodo-cemento.....	93
Figura 4.12. Comparación de resistencia a la compresión a los 28 días de distintas mezclas de lodo-cemento.....	93

Figura 4.13. Comparación de resistencia a la compresión a los 7 días de distintas mezclas estabilizadas con cemento.....	95
Figura 4.14. Comparación de resistencia a la compresión a los 28 días de distintas mezclas estabilizadas con cemento	95
Figura 4.15. Resistencia a la tracción indirecta a los 7 días.....	97
Figura 4.16. Resistencia a la tracción indirecta a los 28 días.....	98
Figura 4.17. Ensayo a la tracción indirecta.....	98
Figura 4.18. Comparación de Resistencia a la tracción indirecta a los 7 días de mezclas de lodo-cemento.....	99
Figura 4.19. Comparación de Resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de mezclas de lodo-cemento.....	100
Figura 4.20. Absorción.....	101
Figura 4.21. Comparación de absorción de mezclas de lodo-cemento.....	103
Figura 4.22. Comparación de absorción entre distintas mezclas estabilizadas con cemento.....	104
Figura 4.23. Porcentaje de pérdida de material.....	106
Figura 4.23. Comparación de pérdida de material.....	107

1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los compuestos con mayor importancia para el ser humano, la cual en su forma natural puede contener una variedad de impurezas perjudiciales para el hombre. El proceso de potabilización es el encargado de eliminar dichas impurezas y transformar las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua haciéndola apta para el consumo humano. En este proceso, particularmente en el de tipo convencional, uno de los principales insumos es el sulfato de aluminio u otros coagulantes, que si bien es fundamental para la etapa de clarificación, es el mayor componente presente en los lodos que se generan en las operaciones de sedimentación y filtración.

Estos lodos usualmente son vertidos sin tratamiento alguno al cuerpo de agua más cercano, provocando alteraciones en las características físicas, químicas y biológicas de los mismos, por la incorporación de los residuos del tratamiento de potabilización con nuevas sustancias como los coagulantes, así como las impurezas que fueron removidas del agua en el proceso.

Por está razón uno de los aspectos críticos en la operación de plantas potabilizadoras lo constituye el manejo de los lodos producidos en las operaciones de sedimentación y filtración. Este manejo comprende desde el secado y disposición final en sitios tales como rellenos sanitarios hasta la reutilización del mismo en actividades agrícolas e incluso como material de construcción.

Con base en esta última alternativa de uso, en la Universidad Central de Venezuela, Herrera (2006) estudió el comportamiento mecánico de las mezclas de lodo-cemento para ser utilizadas como nuevo material de construcción, pero por el

alto contenido de materia orgánica presente en el lodo seleccionado, el material presentó poca resistencia y durabilidad, y particularmente inconvenientes en el fraguado.

Esta investigación, va dirigida a profundizar la evaluación de este nuevo material para aplicarlo en la construcción, pero en esta oportunidad utilizando lodo con bajo contenido de materia orgánica, generando así la posibilidad de disminuir el impacto ambiental producto de las descargas de los lodos a los cuerpos naturales de agua, y obtener un posible material de construcción más económico para la sociedad.

Para lograr esto, se seleccionaron varias Plantas de Tratamiento de Potabilización de Aguas con el fin de obtener el lodo que presentara menor contenido orgánico. Con el lodo seleccionado se elaboraron mezclas de lodo-cemento a las cuales se le realizaron ensayos para caracterizarlas mecánica y físicamente y luego compararlas con otras mezclas estabilizadas con cemento.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento mecánico y físico de mezclas de lodo-cemento con bajo contenido de materia orgánica para su uso como material de construcción.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Identificar las características físicas de los lodos provenientes de sedimentadores de Plantas de Tratamiento de Potabilización de Aguas con bajo contenido de materia orgánica.
2. Elaborar diseños de mezclas de lodo-cemento utilizando lodos con bajo contenido de materia orgánica provenientes de las Plantas de Tratamiento de Potabilización de Aguas.
3. Describir el comportamiento mecánico y físico de la mezcla de lodo-cemento con los resultados de los ensayos de laboratorio.
4. Contrastar las características físicas y mecánicas de la mezcla lodo-cemento con las mezclas convencionales y no convencionales estabilizadas con cemento.

1.3. APORTES

Este estudio presenta relevancia para el campo de la ingeniería, contribuyendo con la descripción del comportamiento de mezclas de lodo-cemento y con la posibilidad de la utilización del lodo como materia prima para mezclas, pudiendo ser una innovación dentro del área estructural. Esta investigación no sólo es innovación en el área de la construcción, sino que además reviste de gran importancia por la disminución del impacto ambiental y en consecuencia, una mejor calidad de vida a la sociedad. Adicionalmente, de resultar aplicable a la construcción se podrá dar a la comunidad un material más económico.

Esta experiencia representa una medida para reducir el impacto en el ambiente, siendo éste el propósito fundamental en la futura vida profesional del estudiante, propósito que también comparten los creadores de esta línea de investigación y la institución a la que pertenecen por ser pionera en la innovación y desarrollo de conocimientos para contribuir a la sociedad. Además, abre campo a la interdisciplinariedad en las áreas estructural y ambiental dentro de la Ingeniería Civil.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DE AGUAS

La potabilización es el conjunto de operaciones y procesos físicos-químicos, con el objeto de eliminar las impurezas presentes en el agua cruda, a fin de modificar sus características y hacerla apta para el consumo humano. En estos procesos se incluye la eliminación de microorganismos patógenos que garanticen la inocuidad del agua potable.

En muchos casos, el agua presenta sólidos denominados coloides, los cuales principalmente producen la turbiedad y que no pueden ser removidos por decantación simple, por lo que deben aplicarse sustancias químicas que promuevan la aglomeración de las partículas coloidales, para luego separarlas del agua mediante operaciones de clarificación.

El tratamiento para clarificar el agua comprende distintas fases, por lo general, la primera es la coagulación, en la cual se adicionan sustancias químicas o compuestos coagulantes, habitualmente sales de hierro o aluminio. Estos se mezclan en una cámara o unidad de agitación rápida, para dispersar los coagulantes y desestabilizar las partículas coloidales y dar lugar a la formación de partículas de mayor tamaño. En algunos casos, además de los coagulantes metálicos se aplican polímeros para promover la posterior aglomeración y mejorar la sedimentación de los flóculos.

Posteriormente, el flujo pasa a un tanque de mezcla lenta, para darle oportunidad a las partículas coloidales desestabilizadas que se aglutinen y formen flóculos suficientemente grandes y pesados, que luego decanten en el sedimentador por acción de la fuerza de gravedad. Estos flóculos quedan removidos en el fondo del

sedimentador, dando origen a los lodos. El sobrenadante pasa al filtro, en donde el agua fluye en forma descendente generalmente, quedando retenidas el resto de partículas que no fueron eliminadas en la sedimentación, generándose así un volumen adicional de lodos que es removido en el lavado de filtros, generalmente en contraflujo. El efluente filtrado recibe una inyección de cloro (u otro desinfectante) donde se eliminan los microorganismos patógenos.

En este proceso de clarificación descrito, que ocurre en la plantas de potabilización convencionales, los coagulantes por su acción de atraer a las partículas coloidales son los responsables de la formación de los flóculos que posteriormente decantan y se acumulan como lodos en los sedimentadores y lechos filtrantes, estos lodos están constituidos principalmente por los coloides, partículas orgánicas e inorgánicas dependiendo del agua cruda, microorganismos, así como los residuos de los productos químicos utilizados en el tratamiento.

2.2. COAGULANTES

Los coagulantes se pueden clasificar en dos grupos: los coagulantes metálicos y los polielectrolitos o ayudantes de coagulación. Los productos químicos más usados como coagulantes en el tratamiento de las aguas son el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, el sulfato ferroso, cloro-sulfato férrico, policloruro de aluminio (PAC) y polímeros.

2.2.1. Coagulantes metálicos

Los coagulantes metálicos más usados son las sales de aluminio y las de hierro. Entre las de aluminio la más común es el sulfato de aluminio, mejor conocido por su nombre comercial como Alumbre, que tiene como características principales su bajo costo y la formación de flóculos ligeramente pesados.

2.2.1.1. Sales de aluminio

Los más conocidos de estos coagulantes son el sulfato de aluminio y el cloruro de polialuminio. El sulfato de aluminio puede estar en forma sólida o líquida. La remoción de materia orgánica en el proceso es limitada, se generan problemas por el alto contenido de aluminio residual y producen un lodo viscoso y coloidal, difícil de manejar y secar, aparte que pueden tener efectos tóxicos por exceso de aluminio sobre algunos organismos acuáticos. Actualmente, en Venezuela se promueve el uso del sulfato de aluminio líquido, este tiene como ventajas una menor producción de lodos por el bajo contenido de impurezas en comparación con el sólido y la facilidad de su dosificación, señalando que la principal diferencia entre los lodos generados por el sulfato líquido y sólido viene dada por la diferencia del material insoluble entre ambos; el sólido tiene hasta 2,5% de insoluble, mientras que el líquido sólo tiene 0,2% ambos en base seca. (J. Angulo, comunicación personal, Coord_aseg_calidad@ferralca.com.ve, Abril 01, 2009).

El cloruro de polialuminio, en algunos casos denominado policloruro de aluminio (PAC), es un derivado polimérico del aluminio que desde hace algunos años se comenzó a introducir en el mercado de las sustancias para potabilización. Los beneficios de este coagulante son: una mejor formación del floc dependiendo de las características del agua, un rango más amplio de pH, contenido de aluminio residual más bajo, menor generación de lodos y poca o ninguna necesidad de usar conjuntamente polielectrolitos. Su principal desventaja es que tiene mayor costo que el sulfato de aluminio, sin embargo las dosificaciones suelen ser inferiores a las que se requieren con este último, bajo unas mismas condiciones de agua cruda, razón por la cual en ocasiones las diferencias de costos no es significativa. (Rinne, 2001).

2.2.1.2. Sales de hierro

Las sales de hierro más conocidas son: el cloruro férrico, el sulfato férrico y el sulfato ferroso. Logran formar flóculos más pesados y con mayor velocidad de sedimentación que el sulfato de aluminio, además de que pueden trabajar en un rango de pH más amplio y no presentan problemas de aluminio residual. No obstante, la dosis de hierro es mayor a la dosis de aluminio y los lodos provenientes de la coagulación con hierro son ricos en agua de hidratación, difíciles de secar y de concentrar. Adicionalmente, son muy corrosivos, tienen un color café más oscuro y suelen manchar o teñir los objetos y las corrientes de agua, razón por la cual son más difíciles de manejar. En general, los lodos provenientes de la coagulación con hierro, poseen una mayor concentración de sólidos que los provenientes de la coagulación con alumbre, aunque sus características son similares. (Romero, 2004).

2.2.2. Polielectrolitos. (Polímeros) (OPS, 1985)

Los polímeros son sustancias de origen natural o sintético, siendo los de origen natural u orgánico los más comúnmente utilizados como coagulantes primarios o ayudantes de coagulación en el tratamiento de potabilización de aguas. Estos polímeros a los que normalmente se refieren como polielectrolitos, son compuestos de alto peso molecular, agrupados como catiónicos, aniónicos, no iónicos o neutros, de acuerdo a la carga eléctrica de sus macroiones disociados en el agua.

Los polielectrolitos usados como ayudantes de coagulación con coagulantes metálicos comunes, producen flóculos que sedimentan rápidamente, siendo especialmente efectivo con las algas.

Por otra parte, la adición de polímero tiene la ventaja de incrementar la concentración de sólidos, con lo cual el lodo tiene un menor volumen y es más fácil

su secado en relación al lodo de los coagulantes convencionales. Sin embargo, debe limitarse su dosificación ante el riesgo de la presencia de monómeros, tales como la acrilamida, así como por sus altos costos. También pueden reaccionar con las demás sustancias químicas añadidas al agua durante el tratamiento, como el ozono y el cloro, produciéndose sustancias potencialmente peligrosas para la salud.

En la tabla 2.1 se presenta la concentración de lodos sedimentados con relación al coagulante aplicado. Se observa que los lodos provenientes de la coagulación con sulfato de aluminio son los que poseen la menor concentración de sólidos.

Tabla 2.1. Concentraciones de Lodos Sedimentados

Lodos de sedimentación con coagulación de sulfato de aluminio	3,1 a 7,8%
Lodos de sedimentación con sales de hierro	12,2 a 21,1%
Lavado con coagulación de aluminio y cal	3,96 a 10,1%
Lavado con coagulación de hierro y cal	4,62%
Lavado con coagulación de hierro solo	4,62 a 8,95%
Lavado con coagulación de catfloc	11,30%
Lodos de ablandamiento	15,2 a 25,3%

Tomado de Arboleda, 2000.

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LODOS

El lodo es el subproducto del desecho de los procesos de tratamiento de aguas retenido en los sedimentadores y filtros durante el proceso de potabilización. Estos se van extrayendo de forma periódica e intermitente del fondo de los sedimentadores y de los filtros a través del lavado de los mismos. (Herrera, 2006).

Los lodos resultantes son generados a partir de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, al añadir coagulantes, y estos lodos son retenidos tanto

en los sedimentadores, como los retenidos en el lecho filtrante, desalojados con el agua de lavado de filtros. La utilización de coagulantes de hierro y aluminio dan origen a lodos “inorgánicos” que poseen gran contenido de hidróxido de aluminio, e hidróxido férrico, además de arcillas, arenas y material orgánico e inorgánico precipitado por el coagulante. Asimismo, pueden contener microorganismos que fueron removidos en los procesos de clarificación.

Los lodos que se producen en los sedimentadores constituyen entre el 60 y el 70% de los sólidos totales y en los filtros entre el 30 y el 40%. El volumen de lodo generado en los sedimentadores representa entre 0,06 a un 0,25% del volumen de agua tratado por la planta y la concentración de sólidos en los lodos varía apreciablemente durante el drenaje y arrastre de fondo, en un rango de 0,2 a 2%. El lodo depositado en el fondo del sedimentador una vez terminado el drenaje posee concentraciones de 4 a 13%. (Garcés et al., 1996).

Los lodos provenientes del proceso de lavado de filtro tienen una concentración de sólidos totales entre 0,01 a 1%, razón por la cual tienen mayores problemas en su manejo que los provenientes de los sedimentadores, poseen bajo contenido de sólidos, la capacidad de eliminar el agua de los mismos es muy pobre y muchos de los sólidos son difíciles de separar por gravedad sin el uso de ayudantes de coagulación. En la tabla 2.2 se presentan los sólidos suspendidos totales y el pH de los lodos provenientes de la sedimentación y filtración de cuatro plantas distintas, observándose que la concentración de sólidos en la filtración es notablemente menor que en la sedimentación.

Tabla 2.2. Características del lodo en plantas que usan Sulfato de Aluminio

Planta	Sedimentación		Filtración	
	pH	Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	pH	Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)
A	7,1	1110	7,8	47
B	7,1	5105	7,2	104
C	6	19044	7,8	75
D	6	15790	-	100

Adaptado Arboleda, 2000.

Las características del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua potable dependen del origen del agua cruda, así como de los sistemas usados como tratamiento del agua. Diferentes procesos de tratamiento generan diferentes tipos y volúmenes de lodo. En una planta en particular las características pueden variar anual, estacional o diariamente, debido a las fluctuaciones tanto de la composición del agua como de la cantidad de reactivos utilizados durante el tratamiento. (Cornwell y Koppers, citado en Castañeda, 2000).

Considerando que la mayor parte de las sustancias disueltas en el agua cruda no quedarán retenidas en el proceso de tratamiento, a excepción de aquellas como los compuestos de Mn^{++} y Fe^{++} , o aquellas que pueden llegar a precipitar por sobrepasar el producto de solubilidad correspondiente, por ejemplo, sulfatos y carbonatos, los lodos están formados fundamentalmente por el material suspendido y coloidal contenido en el agua cruda, así como microorganismos (bacteria, virus y protozoos) y algas. También se encuentran en el lodo los hidróxidos de aluminio generados al incorporar el coagulante (generalmente sulfato de aluminio), y cualquier otra sustancia insoluble empleada en el tratamiento, como por ejemplo carbón activado, los compuestos orgánicos solubles que hayan podido quedar adsorbidos y por los posibles óxidos e hidróxidos insolubles de hierro y manganeso que pudieran formarse. (Fangos producidos en el agua potable, citado en Herrera, 2006). Estos

hidróxidos contienen grandes cantidades de agua atrapada en su molécula, lo que genera una suspensión de lodo voluminosa y propiedades de deshidratación bajas.

Las características de estos lodos también varían con la proporción de material removido del agua. Aguas que poseen alta turbiedad generalmente producen lodos con mayor concentración, cuyo contenido de agua puede ser eliminado con mayor facilidad. Las aguas con menor turbiedad presentan mayores dificultades cuando se trata del procesamiento del lodo.

La composición tipo de un lodo seco procedente de un agua cruda caracterizada por una turbiedad < 5 UNT, color < 25 UC y materia orgánica (oxidabilidad al MnO_4K en medio ácido) < 5 mg O_2/l , se presenta en la tabla 2.3. Se observa que el principal componente es materia orgánica seguido de sílice y óxido de aluminio.

Tabla 2.3. Composición de lodo seco

Compuestos	%
Sílice + residuo insoluble al ácido (HCl)	25%
Al_2O_3	24%
Fe_3O_3	2%
$\text{CaO} + \text{MgO}$	9%
Materia Orgánica	40%

Tomado de Herrera, 2006.

En la tabla 2.4 se pueden apreciar las características químicas de los lodos provenientes de plantas potabilizadoras presentado por diversos autores, además de la variabilidad en el pH y el contenido de materia orgánica.

Tabla 2.4. Características químicas de lodos

Parámetros	Di Bernardo, 2009	Pavón, 2005	Romero, 2004
pH	7,5	7,8	7,0
Humedad (%)	-	86,7	-
Sólidos Sedimentables (mL/L)	190	98	-
Sólidos Suspendidos (mg/L)	4500	-	-
Sólidos Totales (mg/L)	4954	-	-
Densidad (g/mL)		1,15	-
DBO (mg/L)	-	-	45
DQO (mg/L)	816	-	500
Coliformes (Número/g)	-	-	< 20

Elaboración propia.

El contenido en metales pesados puede variar generalmente entre los valores que se indican en la tabla 2.5. Se puede distinguir un alto contenido de aluminio en la constitución de los lodos, su gran variabilidad en este elemento y los demás metales como consecuencia de los constituyentes que se encuentran presentes en el agua cruda, así como los coagulantes que se utilicen en el proceso de clarificación del agua.

Tabla 2.5. Metales Pesados en lodos

Metales	AWWA, 1998	Di Bernardo, 2009	Pavón, 2005	Romero, 2004
	(mg/kg en base seca)			
Aluminio	107000	65386	19600	212000
Arsénico	25	-	0,025	-
Cadmio	1	-	0,059	-
Calcio	-	-	3190	27000
Cobre	168	23	0,463	-
Cromo	120	-	1,5	-
Fósforo	-	-	-	3500
Hierro	48500	32712	317,5	32000
Magnesio	-	-	2180	4500
Manganeso	1180	3146	760	-
Mercurio	0,1	-	0,0075	-
Níquel	24	-	102	-
Plomo	11	-	50	-
Potasio	-	-	-	17000
Sílice	-	-	-	200000
Zinc	91,7	59	76	-

Elaboración propia.

Aún cuando se aprecia la gran variabilidad del contenido de metales en los lodos procedentes de plantas potabilizadoras, en general, estos lodos están compuestos principalmente de arcilla, sustancias húmicas, microorganismos y productos de la coagulación química, con un contenido de humedad entre 93 y 99.5%. Otra característica común de estos lodos es que constituyen un residuo extremadamente líquido, de valor escaso o nulo, relativamente inerte, con baja biodegradabilidad y pH casi neutral. (Wang et al; citado en Castañeda, 2000).

2.4. MANEJO DE LODOS

El manejo de lodos consiste en una serie de etapas que comprenden desde la homogeneización y eliminación del agua hasta su disposición final. Entre las modalidades que existen para su manejo se encuentran:

2.4.1. Tratamiento de lodos

Mezcla: Se homogeneizan las concentraciones de los lodos que se recogen a través de las purgas de los decantadores, o en el lavado de los filtros.

Espesamiento o Compactación: Consiste en reducir el volumen del lodo tanto como sea posible para los pasos posteriores de recuperación y disposición.

Eliminación del agua: Es el proceso de separación del líquido y del sólido. Los métodos que se utilizan para remover la humedad son: evaporación, gravedad o drenaje, siendo los lechos de secado el mecanismo más común.

2.4.2. Disposición de los lodos (AWWA, 1998)

a. Descarga a un cuerpo de agua natural

Aunque la descarga a cuerpos de agua naturales ha sido la forma predominante en lo que respecta al manejo de los residuos provenientes del tratamiento de potabilización de aguas, es una de las preocupaciones primordiales por la incorporación de contaminantes en el ambiente acuático, en especial por el impacto de la toxicidad del aluminio sobre la biota acuática. También existe impacto sobre la fauna y el ambiente debido a los altos niveles de sólidos, algunas trazas de metales, nitratos y cloro, además del potencial de agregar caudales excesivos.

b. Descarga a una cloaca

También se ha convertido en una opción muy utilizada, debido a que el tratamiento de la mezcla de residuos provenientes del tratamiento de las aguas y las aguas residuales, genera un efecto de dilución de lodos orgánicos e inorgánicos y de sólidos lo cual facilita su disposición.

c. Descarga en una laguna

Si existe suficiente terreno disponible, los lodos diluidos podrán ser dispuestos directamente en lagunas, donde los sólidos provenientes del proceso de coagulación-floculación se concentran hasta 6-10%. Los lodos provenientes del proceso de ablandamiento, se pueden concentrar hasta 20-30% y podrán alcanzar concentraciones de hasta 50% en periodo de años. La presente opción podrá ser atractiva para pequeñas plantas de tratamiento y para el corto plazo, sin embargo es poco práctica para muchas plantas.

d. Disposición en rellenos sanitarios

Los residuos provenientes de una planta de tratamiento de aguas, que son dispuestos en un relleno sanitario, deben tener los sólidos concentrados hasta una forma de “torta” o semisólido. Cuando se haya eliminado el contenido de agua en los mismos, el lodo podrá ser dispuesto con otro tipo de desechos

2.4.3. Reutilización

El método de reutilización de este material ha sido primordialmente desarrollado en el campo de la agricultura. Sin embargo, el éxito ha sido parcial ya

que ha favorecido algunos pocos cultivos y ha resultado contraproducente para otros. (Herrera, 2006).

La utilización de lodos provenientes del proceso de potabilización de agua como fertilizante agrícola ha sido intentada en repetidas oportunidades. El problema de este uso surge debido a que los sólidos presentes en el coagulante utilizado durante el proceso de potabilización obstruyen los poros del suelo e impiden la germinación de las semillas. Sin embargo, se ha encontrado que la ruptura de la corteza de la semilla mitiga de una u otra forma este problema.

Otro uso que se le han dado a los lodos es la recuperación del hierro y aluminio utilizando ácido nítrico, clorhídrico y sulfúrico donde el coagulante recuperado arroja muy buenas eficiencias en el proceso de remoción.

En los últimos años los estudios para emplear los lodos en la fabricación de determinados productos cerámicos, como ladrillos se han extendido dándole a este material una nueva faceta para su reutilización.

Residuos de aluminio, hierro y cloruro de polialuminio presentes en los lodos de potabilización tienen propiedades físicas y químicas similares a la de las arcillas por lo que son ideales para la producción de productos cerámicos. (Cornwell, et al., citado en Mari, 2008).

Estudios en escala de laboratorio mostraron que la adición de lodos, reduce la resistencia a la flexión, aumenta la absorción de agua y la porosidad de los cuerpos de las pruebas quemados a 900-950 °C. Debido a las malas condiciones de la mezcla, estos investigadores llegaron a la conclusión de que un previo secado y pulverización de los lodos podría reducir al mínimo los resultados indeseables y facilitar la incorporación de los residuos. (Mari et al., 2008).

2.5. COMPONENTES DE MEZCLAS USADAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN (Porrero et al., 2004)

En esta nueva faceta de la reutilización del lodo como material de construcción, es importante analizar los componentes usados para mezclas de este tipo y de esta manera explorar sobre su uso para esta finalidad.

Las mezclas usadas para materiales de construcción, se componen principalmente de un conglomerante, agua y agregados. El conglomerante es el material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos. El más utilizado en la elaboración de los materiales de construcción es el cemento, debido a que desarrolla la propiedad conglomerante como resultado de la hidratación. Cuando se habla del cemento, implícitamente se alude al cemento Portland o cemento sobre la base de Portland, ya que son los productos conglomerantes que se usan casi exclusivamente con fines estructurales.

El cemento es el componente activo de la mezcla e influye en todas las características de este material. Sin embargo, el cemento constituye aproximadamente solo el 10% a un 20% del peso, siendo el 80% a 90% de materiales restantes el que condiciona la posibilidad de que se desarrollen las propiedades de la mezcla. En la práctica, también son decisivas la calidad de los agregados, del agua y las proporciones entre los componentes.

El agua a utilizar en la mezcla cumple con dos funciones elementales, la primera es hidratar el cemento para formar una pasta que adquiera unas propiedades en estado fresco que faciliten una adecuada manipulación, colocación y que pueda fraguar para posteriormente endurecer. La segunda función es otorgar trabajabilidad o fluidez a la mezcla.

El contenido de agua debe ser tal que logre hidratar el cemento y a su vez suministre la humedad óptima a la mezcla, logrando así la máxima compactación. La cantidad de agua utilizada es fundamental, ya que un exceso o un defecto de la misma en la mezcla, se reflejaría en la trabajabilidad del material, así como en la resistencia y durabilidad.

Otro componente esencial en la mezcla son los agregados, también denominados áridos o inertes, estos son fragmentos o granos, usualmente pétreos, cuyas finalidades específicas son abaratar la mezcla y dotarla de ciertas características favorables, entre las cuales se destaca la disminución de la retracción de fraguado y retracción plástica.

Las características de los agregados empleados deben ser aquellas que beneficien el desarrollo de ciertas propiedades en la mezcla, entre las cuales destacan: la trabajabilidad, las exigencias del contenido de cemento, la adherencia con la pasta y el desarrollo de resistencias mecánicas.

Los agregados más utilizados para material de construcción comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm y los agregados gruesos, que consisten en una grava o una combinación de grava o agregado triturado (piedra picada, canto rodado) cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm, generalmente entre 9,5 mm y 38 mm.

Los agregados deben cumplir ciertas reglas para darles un uso constructivo óptimo. Los mismos deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia a la pasta del

cemento, siendo indeseables las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse.

Los agregados constituyen la mayor parte de la masa de mezclas como el concreto, ya que alcanzan a representar entre el 70% y 85% de su peso (60% a 75% de su volumen), razón por la cual las propiedades de los inertes resultan tan importantes para la calidad final de la mezcla. En este estudio se pretende explorar el lodo proveniente de las plantas de potabilización como el agregado en mezclas. A continuación se describen las principales propiedades de los agregados:

♦ **Granulometría**

Se entiende por granulometría la composición del material en cuanto a la distribución del tamaño de los granos que lo integran. Esta característica define de manera muy importante, la calidad del material para su uso como componente del mismo.

El tamaño de los granos se mide de forma indirecta mediante su paso a través de cedazos de diferentes aberturas calibradas, los cuales son colocados en cascada, con el de mayor abertura arriba, decreciendo progresivamente hasta disponer el de menor abertura abajo. Al tamizar el material, por agitación, sus granos se distribuyen por tamaños. La forma usual y conveniente de expresarla es como el pasante total por cada cedazo como porcentaje en peso.

La finalidad principal de una granulometría adecuada es obtener mezclas trabajables. Las granulometrías, donde todos los cedazos tienen fracciones retenidas con más del 1% del peso del material, son llamadas granulometrías continuas, preferidas porque suelen producir concretos más trabajables y con buenas resistencias

mecánicas. Las granulometrías que no tienen material retenido en uno o varios cedazos, son llamadas discontinuas y si bien pueden producir buenos concretos, tienen el riesgo de tender a la segregación y a dificultar la trabajabilidad.

♦ Ultrafinos

Se consideran como tales las partículas de agregado de menor tamaño, principalmente las menores de 74 micras (cedazo #200), pero a veces también las menores de 149 micras (cedazo #100) o las de 297 micras (cedazo #50). En los ultrafinos conviene distinguir entre: materiales silíceos, materiales calizos y arcillas, los dos primeros son principalmente parte de los limos, mientras que las arcillas producen las partículas de menor tamaño, incluidos algunos coloides.

Cantidades importantes de ultrafinos en las mezclas pueden producir, desde grandes trastornos hasta grandes beneficios. Los ultrafinos como polvos que son, colaboran en el mecanismo de lubricación de la mezcla conjuntamente con el cemento. Los calizos y en cierta proporción los arcillosos, mejoran la retención del agua, produciendo concretos con mejores características en estado fresco.

En los concretos muy pobres, con muy bajas dosis de cemento, pueden ser muy útiles este tipo de ultrafinos que ayudan a estabilizar la mezcla fresca y favorecen su trabajabilidad y su dosificación, aunque desmejoren las resistencias mecánicas.

♦ Humedad

Los agregados suelen retener algunas cantidades de agua en forma de humedad. La humedad se considera la diferencia de peso entre el material húmedo y

el mismo secado al horno. Se suele expresar como porcentaje en peso, referido al material seco.

Esta humedad se encuentra en los agregados de dos maneras diferentes, una es relleno de los poros y microporos internos de los granos y la otra es como una película o capa envolvente, más o menos gruesa.

El agua interna de los granos no pasa al concreto como agua de mezclado, al contrario, cuando los granos se encuentran muy secos pueden absorber parte del agua de la mezcla. El agua externa de los granos si pasa a formar parte de la mezcla, alterando sus proporciones. El punto de equilibrio entre el grano seco y el húmedo se conoce como el estado de agregado saturado con superficie seca. (Porrero et al., 2004).

El alto porcentaje de humedad de los lodos provenientes de las plantas potabilizadoras es un factor limitante que impide utilizar este material tal como se genera, siendo necesario su secado, para facilitar la condición de agregado saturado con superficie seca.

♦ **Impurezas**

A los agregados los pueden acompañar con cierta frecuencia algunas impurezas perjudiciales, la mayoría de origen natural generalmente en la arena, lo que ocasiona inconvenientes por los efectos adversos que producen en materiales como el concreto. Entre dichas impurezas contaminantes, las más comunes son los finos indeseables (limo y arcilla), la materia orgánica y las sales naturales.

Si bien lo deseable es disponer de agregados completamente libres de estas materias perjudiciales, en la práctica esto no siempre es factible, por lo cual se hace necesario tolerarlas en proporciones suficientemente reducidas para que sus efectos nocivos resulten poco significativos para elaboración de concretos con resistencias estructurales.

Debido a que en este trabajo se está evaluando la posibilidad de utilizar el lodo como agregado en mezclas para material de construcción, ineludiblemente la mezcla tendrá las impurezas mencionadas anteriormente, por lo que el material resultante no será considerado como un material con resistencia estructural, sino más bien con baja resistencia para usos no estructurales.

♦ ***Materia Orgánica***

La materia orgánica que a veces acompañan los agregados suelen hallarse principalmente en forma de humus, fragmentos de raíces y plantas. Las partículas de materia orgánica en descomposición pueden producir trastornos en las reacciones del cemento interfiriendo en el proceso normal de hidratación. Dichas partículas recubren los granos de la pasta retardando el proceso de fraguado, que no es otra cosa que la unión de los citados granos formando un mallado rígido. Dependiendo de la cantidad de materia orgánica contenida en la mezcla, el fraguado puede ser alterado e incluso ser impedido, afectando la resistencia y durabilidad del concreto.

Adicionalmente, la materia orgánica una vez descompuesta, se expande, formando microfisuras dentro del material endurecido. Lo mencionado anteriormente, junto con el hecho de que los lugares ocupados por las partículas de materia orgánica ofrecen casi nula resistencia a las tensiones producidas por agentes externos (como si fueran espacios vacíos), es la razón por lo que la resistencia del

material se ve sensiblemente disminuida en comparación a una mezcla que no posee materia orgánica de forma significativa.

♦ ***Limo y arcilla***

El limo es el material granular fino, sin propiedades plásticas, cuyas partículas tienen tamaños normalmente comprendidos entre 2 y 60 micras aproximadamente, en tanto que la arcilla corresponde al material más fino, integrado por partículas que son menores de 2 micras y que si posee propiedades plásticas. Los limos pueden considerarse como partículas de arenas microscópicas, el cuarzo es el mineral dominante, y en menor proporción se encuentran pequeños fragmentos de feldespastos, micas y óxidos e hidróxidos de hierro. Poseen una cierta plasticidad, cohesión y propiedades absorbentes, debido a las partículas de arcilla que suelen llevar adheridos. (Navarro, 2003; Porrero et al., 2004).

♦ ***Sales Naturales***

Otras impurezas importantes son las sales naturales, entre las cuales las más frecuentes son el cloruro de sodio y el sulfato de calcio, o yeso, o bien las sales procedentes de suelos industriales, que pueden tener una composición muy variada. El ión cloruro de la sal produce la corrosión de las armaduras del concreto reforzado y el ión sulfato de yeso ataca la pasta.

En el lodo proveniente de plantas potabilizadoras las mayores impurezas las constituyen la materia orgánica, limos y arcillas.

2.6. DISEÑO DE MEZCLA

Se conoce como diseño de mezcla el procedimiento por el cual se calculan las cantidades de todos y cada uno de los componentes que intervienen en una mezcla de concreto, suelo-cemento o, en este caso, lodo-cemento, para obtener de ese material el comportamiento deseado, tanto durante su estado fresco como en estado endurecido. Los requisitos que una dosificación adecuada debe cumplir son:

- ◆ Economía y manejabilidad en estado fresco.
- ◆ Resistencias, aspecto y durabilidad en estado endurecido.

Además de cumplir su propósito específico de establecer las cantidades a usar de cada componente, el diseño de mezcla es una importante herramienta para el análisis teórico de la influencia de ciertos cambios en los materiales o en las proporciones de uso que pudieran tener sobre la mezcla. Esto da lugar a la toma de decisiones sobre aspectos relativos a materiales, equipos, costos, controles y otros.

El método de diseño de mezclas considera en primer término un grupo de variables que constituyen el esqueleto fundamental: dosis de cemento, trabajabilidad, relación agua/cemento y resistencia. (Porrero et al., 2004).

En la tabla 2.6 se pueden observar distintos diseños de mezcla.

Tabla 2.6. Diseños de mezcla de distintos materiales

Material	Cemento, %	Arena, %	Piedra picada, %	Suelo, %	Lodo, %
Concreto Porrero et al., 2004	14,7	38,5	46,8	-	-
Suelo-cemento Rodríguez et al., 2002	10	-	-	90	-
Lodo-cemento Herrera, 2006	15	-	-	-	85

Elaboración propia.

2.7. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS CONVENCIONALES

Las mezclas, una vez endurecidas, generan los denominados materiales de construcción que permiten concebir desde las más grandes y resistentes estructuras, hasta las más elementales y sencillas en las cuales su objetivo no es la alta resistencia. Entre estos materiales se encuentran:

2.7.1. Concreto

El concreto es un material que se puede considerar constituido por dos partes: el producto pastoso y moldeable, compuesto por cemento Portland y agua, con la propiedad de endurecer en el tiempo y los trozos pétreos, agregados que quedan englobados en esa pasta. A su vez, la pasta esta constituida por agua y un producto aglomerante o conglomerante, que es el cemento. El agua cumple la doble misión de dar fluidez a la mezcla y de reaccionar químicamente con el cemento dando lugar, con ello, a su endurecimiento, proceso clave para conferirle la resistencia al material.

El concreto común posee una resistencia a la compresión de 150 a 500 kgf/cm², hoy en día existen tipos de concretos especiales que son capaces de resistir hasta 2000 kgf/cm².

El material de construcción más extensamente usado es el concreto por distintas razones, en primer lugar, posee una excelente resistencia al agua, lo cual lo hace un material ideal para construir estructuras destinadas a controlar, almacenar y transportar agua, de allí que sea usado comúnmente en presas, canales, tuberías de agua y tanques de almacenamiento. El concreto también forma un papel fundamental en los elementos expuestos a la humedad tales como pilotes, cimentaciones, zapatas,

pisos, vigas, columnas, techos, muros exteriores y pavimentos. Por otra parte, su alta resistencia al fuego y a la intemperie también le confiere ventajas evidentes.

Otra de las razones, es la facilidad con que los elementos pueden ser moldeados para dar una variedad de formas y tamaños que pueden depositarse y llenar formaleas y moldes de cualquier forma, tamaño y texturizado y que al endurecerse forman una masa resistente para ser usado en un número ilimitado de aplicaciones.

La mayor parte de los materiales constitutivos del concreto, están disponibles a bajo costo lo que hace a este material más económico. Además, es el que se encuentra más accesible en obras, en la mayoría de los casos localmente o muy cerca del sitio de construcción. Su resistencia a la compresión, similar a la de las piedras naturales es alta, haciéndolo apropiado para elementos sometidos principalmente a compresión, tales como columnas o arcos. Asimismo, igual que en las piedras naturales, el concreto es un material relativamente frágil, con baja resistencia a la tensión comparada con la resistencia a la compresión.

Contrastando con la producción de la mayoría de otros materiales para el uso de la ingeniería, la producción de concreto requiere considerablemente menos insumo de energía. Además, muchos desperdicios industriales pueden reciclarse como sustituto de las materias cementantes o de los agregados. Por lo tanto, en el futuro, las consideraciones sobre energía y conservación de recursos naturales serán probablemente la opción para hacer el concreto un material estructural aún más atractivo

Esta consideración contribuye a darle importancia a la evaluación de la factibilidad de uso de agregados no convencionales, como es el caso del lodo, que se analiza en este trabajo de investigación.

La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de agregado.

Las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, se pueden modificar agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida, durante su dosificación. Estos aditivos se usan comúnmente para:

- ◆ Ajustar el tiempo de fraguado.
- ◆ Reducir la demanda de agua.
- ◆ Aumentar la trabajabilidad.
- ◆ Incorporar intencionalmente aire en la mezcla.
- ◆ Ajustar otras propiedades del concreto.

Después de un proporcionamiento adecuado, así como, dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado y curado; el concreto endurecido se transforma en un material de construcción resistente, no combustible, durable, con resistencia al desgaste y prácticamente impermeable, que requiere poco mantenimiento.

2.7.2. Suelo – cemento

El suelo-cemento es la mezcla íntima y homogénea de suelo, cemento Portland y agua, en cantidades controladas y probadas en un laboratorio, para que después de ser mezclado, compactado y curado se logre un importante aporte en su estabilidad, resistencia, impermeabilidad y durabilidad.

El suelo-cemento es una alternativa para la estabilización o mejoramiento de las características físicas y mecánicas de un suelo que en condiciones normales no brindaría el adecuado soporte para la construcción de un pavimento o cualquier edificación.

Existen múltiples experiencias empleando suelo-cemento, pero hasta ahora no existe un criterio específico y confiable para diseñar las mezclas en lo referente al contenido de agua y cemento. Así que los criterios quedan fuertemente ligados a la experiencia e interpretación del ingeniero, combinado con los criterios de tipo económico, que sin duda constituyen un elemento importante en la decisión final. (Rodríguez y Simonpietri, 2002).

El suelo ideal a ser estabilizado con cemento es el que da una resistencia elevada y se contrae poco al secarse. Debe estar compuesto por una mezcla de arena, limo y arcilla, y tener buenas aptitudes para ser compactado.

Es importante señalar que el lodo proveniente de plantas potabilizadoras puede presentar dos de estos elementos en su composición, lo cual consolida el planteamiento de evaluar su factibilidad de uso como material de construcción.

En general, se consideran suelos adecuados para construcciones en suelo-cemento, aquellos que contienen como mínimo 45% de arena y 55% de limo y arcilla, y como máximo 80% de arena con 20% de limo y arcilla. Para mampostería estructural los valores de resistencia de este material oscilan entre 15 y 25 kgf/cm².

Dado que no se tiene un diseño de mezcla para el lodo-cemento, se consideraran como referencias los comportamientos y diseños de mezclas de materiales de construcción con agregados convencionales como lo son el concreto y el suelo-cemento mencionados anteriormente. Adicionalmente, se consideraran

materiales de construcción con agregados no convencionales, donde al igual que el lodo-cemento, buscan darle un mejor uso a un material después de desechado. Dentro de los agregados no convencionales se han hecho trabajos con ripio de cantera, el pet-cemento y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, así como de plantas potabilizadoras. Evidentemente los materiales de construcción provenientes de estas mezclas con agregados no convencionales disminuyen su potencial de uso, en particular para obras o elementos estructurales que requieran alta resistencia.

2.8. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS NO CONVENCIONALES

2.8.1. Ripio de Cantera - cemento

Ripio, es el nombre que se le da al material de desecho, proveniente de los procesos de obtención de los agregados para la industria de la construcción, en consecuencia, el ripio de cantera puede considerarse el resultante del material descartado en el proceso que genera la piedra picada, para el caso de las canteras de piedra, y como el producto del lavado de la arena, en el caso de las canteras o saques de arena.

El ripio, es por tanto piedra, y como tal, posee las características propias de la roca caliza, la más utilizada en la industria de la construcción. En la elaboración de un bloque de ripio se utilizan tres materiales: cemento, agua y ripio siendo este último el componente principal de la mezcla.

La resistencia a la compresión de las unidades de ripio está en el orden de 4,64 kgf/cm², representando un 95% menos en comparación con la resistencia de los bloques de concreto y un 50% menos con respecto a la resistencia de los bloques

artesanales de adobe, siendo la mampostería estructural el sistema constructivo idóneo para utilizar los bloques de ripio de cantera. (Korody, 1998).

2.8.2. PET- cemento

El Polietilen Tereftalato (PET) es el material plástico con el cual se elaboran los envases de bebidas gaseosas y aguas minerales, entre otras, el cual ha resultado muy beneficioso para la humanidad gracias a la capacidad que posee de conservar todo producto que en él se envase. Sin embargo, su disposición se ha convertido en un gran problema, porque no es biodegradable y aunque el PET es totalmente reciclable, no existe la suficiente capacidad de reciclaje para la cantidad que se produce de este material. (Luis y Rendón, 2005).

Es por ello que se han estado desarrollando investigaciones sobre el uso del PET como agregado en distintas mezclas de concreto y mortero. Estas mezclas de PET-cemento consisten en sustituir parte de los agregados normalmente utilizados en concreto por polietilen tereftalato.

Entre los trabajos realizados con el PET se tiene el llevado a cabo en Argentina en el Centro Experimental de Vivienda Económica (CEVE), donde se desarrolla el programa Micro-proyectos de Tecnologías Apropriadas, el cual propuso el desarrollo de elementos constructivos, en reemplazo de los áridos de un hormigón tradicional, utilizando en su composición plásticos usados como envoltorios de golosina y/o PET. Este trabajo determinó que el PET es un reemplazante adecuado de los agregados pétreos de hormigones comunes, debido a que los elementos constructivos obtenidos tienen un bajo peso específico, suficiente resistencia, excelente aislamiento térmico, baja absorción de agua, buena apariencia, buen comportamiento a la intemperie, buena adherencia con revoques tradicionales, bajo costo y cualidades ecológicas. (Berretta, et al., 2005).

En la Universidad de Sonora (Unison) se diseñó el proyecto "Elaboración de concreto polimérico" donde se elaboraron ladrillos y vigas de soporte para construcción que duplican la resistencia que presentan los materiales de construcción convencionales. Destacando que en el caso del ladrillo convencional, éste soporta de 30 a 40 kgf/cm², mientras que el ladrillo PET resiste hasta 60 kgf/cm².

En la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Buenos Aires existe un programa para convertir los envases de PET en ladrillos. El PET molido reemplaza a la piedra y a un 60% de la arena que se utiliza en la confección de tejas, losas y paneles. Este se mezcla con cemento, arena y un producto químico que favorece la combinación, y al fraguar queda convertido en viguetas o bloques aptos para levantar paredes, techos o pavimentos. (Videla, 2002).

En Venezuela se realizó un trabajo sobre el PET, desarrollado en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Central de Venezuela, en el cual se propusieron diversos diseños de mezclas. Las mezclas de PET-cemento estuvieron conformadas por 5%, 10% y 15% de PET además de arena y piedra, dependiendo de sí la mezcla es para mortero o concreto. Esta investigación arrojó buenos resultados para el uso de dicho material en la construcción con una resistencia a la compresión de 180 kgf/cm² aproximadamente, recomendándose su uso en elementos que no requieran alta estética ni soporte de mucha carga.

2.8.3. Lodo – cemento, con lodos provenientes del Tratamiento de Aguas Residuales

Al igual que las mezclas de lodo-cemento, el lodo proveniente del tratamiento de aguas residuales también ha sido investigado, evaluando su posible uso como material de construcción y así tener una mejor utilidad después de desechado.

En el trabajo titulado “Materiales de Construcción a partir de Lodos de Tratamiento de Agua, mediante infiltración con dióxido de carbono supercrítico”, desarrollado en la Universidad del Valle, Colombia, se describe cómo se fabricaron y ensayaron ladrillos utilizando como materia prima el lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Inicialmente los lodos fueron sometidos a una temperatura de 573 °C con el fin de remover la materia orgánica. La ceniza resultante se mezcló con arena y luego se dosificaron con cal y agua. Posteriormente, los materiales se mezclaron, moldearon y sometieron a prensado para conformar ladrillos de 10 x 20 x 5 cm. Después de ser infiltrados con dióxido de carbono supercrítico, los ladrillos se sometieron a pruebas de resistencia a compresión.

Los resultados obtenidos permitieron establecer que materiales cuya composición de cal sea superior al 20% y sean infiltrados por 20 minutos a una presión de 70 kgf/cm² pueden lograr resistencias a la compresión superiores a 80 kgf/cm², valor que corresponde a la mínima resistencia establecida en la Norma Colombiana NTC-922 para materiales de mampostería. (Cabezas et al., 2001).

Igualmente, se encuentra la investigación desarrollada por Francesc Albareda en España, la cual lleva por título “Durabilidad de Hormigones con Adición de Lodos Secos de Depuradora de Aguas Residuales”. Este estudio explicó cuáles son los efectos de la adición de lodo seco proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales en el concreto. La investigación muestra la posibilidad de la estabilización y la solidificación de estos lodos en una matriz con material cementante como el cemento Portland.

Este trabajo concluyó que se debe utilizar, para obtener los mejores resultados, un cemento de resistencia media-alta y que el máximo de la adición de lodo húmedo

debe ser de un 35%, aunque no se recomienda el uso de adiciones de lodos en el concreto estructural sino en piezas o elementos prefabricados que no estén destinados a soportar cargas excesivas. (Albareda, 2003).

En la investigación denominada “Utilización de lodo seco de depuradora de aguas residuales como adición en adoquines de hormigón prefabricado”, (2002), se usó el lodo seco de origen biológico de la Planta de Sabadell (Riu Sec), como suplemento en la preparación de adoquines, concluyendo que la adición de lodos produce, en la mayoría de los casos, una disminución de las porosidades y de los coeficientes de absorción y un aumento en las resistencias mecánicas, por lo que cabe esperar una mayor durabilidad de estos adoquines. (Yagüe, et al., 2002).

Otro de los trabajos encontrados corresponde al proyecto de nuevos materiales cerámicos para la construcción mediante valorización de lodos de aguas residuales urbanas: Proyecto *Ecobrick*, el cual tuvo como finalidad demostrar la correcta inertización del lodo en el material cerámico y encontrar la formulación de composiciones óptimas de arcilla, lodo y residuo forestal para las cuales la resistencia a la compresión fuese la suficiente y el aislamiento térmico el máximo. Este proyecto concluyó que el producto resultante (bloques) posee idénticas o superiores propiedades tecnológicas respecto a sus homólogos convencionales con precios de mercado competitivos. El material *Ecobrick* presentó un menor peso y un mayor poder de aislamiento térmico y acústico que los de sus competidores, aunque una resistencia mecánica inferior, 79 kgf/cm^2 en comparación con el bloque cerámico convencional de 250 kgf/cm^2 . (Cusidóp, y Cremades, 2000).

La investigación titulada “Estudio del uso del lodo residual de la empresa Extralum S.A. como material alternativo en la fabricación de elementos especiales” realizado en Costa Rica por Vargas y Montero en el 2004, partió de secar los lodos residuales húmedos a 110°C por 24 horas, luego se molió y tamizó el material seco.

Se prepararon 4 mezclas cementantes con distintas proporciones de cemento y lodo con la siguiente composición: cemento 100% - lodo 0%, cemento 75% - lodo 25%, cemento 50% - lodo 50% y por último cemento 25% - lodo 75%. Se le realizaron ensayos de resistencia a la compresión donde la mezcla de 50 - 50 registró el valor más elevado con 31,2 kgf/cm² a los 28 días. También se midió la porosidad y la conductividad térmica. Las mezclas arrojaron valores de absorción de agua en el orden del 60 al 99% y presenta conductividades térmicas cercanas al asbesto convirtiéndolo en un material interesante para el desarrollo de aislantes para fines constructivos. Finalmente, este estudio concluyó que el lodo incorporado al cemento modifica el tiempo de fraguado y reduce la resistencia del material que por ser muy baja indican que el material no puede utilizarse para fines estructurales. (Vargas y Montero, 2004).

Adicionalmente, existen propuestas en actual desarrollo tales como el proyecto de valorización de lodos de depuradora, donde plantean como objetivo principal incorporar los lodos de depuradora de aguas residuales en la composición de un pavimento de hormigón que posea todas las garantías de calidad exigibles al producto. La composición elegida para la preparación del hormigón destinado a la construcción de elementos estructurales se estudiará previamente, con el fin de asegurar que es capaz de proporcionar hormigones cuyas características mecánicas, reológicas y de durabilidad mantengan las características de la mezcla. (ZICLA, 2008).

2.9. EXPERIENCIAS CON LODOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DE AGUAS COMO MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado investigaciones que persiguen el mismo objeto de este Trabajo Especial de Grado, cuya finalidad es explorar el uso del

lodo de las plantas potabilizadoras como componente de mezcla y evaluar sus propiedades. A esta mezcla se le ha denominado lodo-cemento. Entre algunos de estos trabajos se tienen:

♦ “Análisis del Comportamiento del lodo-cemento como material de construcción”, desarrollado en la Universidad Central de Venezuela por Herrera en el 2006, cuyo objetivo fue elaborar, ensayar y caracterizar mezclas de lodo-cemento a partir del uso de lodos provenientes de la Planta de Tratamiento para Potabilización de Aguas La Mariposa, ubicada en la ciudad de Caracas.

Se diseñaron mezclas de lodo-cemento con distintos contenidos de humedad del lodo: 75%, 50% y 0%. En todas las mezclas se utilizó una cantidad de cemento igual al 15% del peso del lodo. Adicionalmente, se prepararon mezclas de lodo-cemento incluyendo arena, piedra y suelo.

Se evaluaron las probetas con los ensayos de resistencia a compresión, resistencia a tracción, absorción y erosión, obteniéndose un fraguado lento y en algunos casos, nulo; provocando que en la mayoría de los casos no se pudieran ensayar las probetas. Como resultado de dicho trabajo se determinó que, de la forma en que fue realizada la experiencia, el lodo no puede ser incorporado en la mezcla tal como se genera. Por otra parte, su baja resistencia ($2,46 \text{ kgf/cm}^2$) y durabilidad no permite calificarlo como un adecuado material de construcción, recomendándose realizar otros estudios con lodos secos provenientes de diferentes plantas en distintas épocas del año.

♦ “Estudio para el reuso de los residuos generados en la Planta Potabilizadora San Felipe Hueyotlipan”, desarrollado en la Universidad de las Américas, Puebla-México, por Rodrigo Larios Solórzano en el 2005, propuso la integración del residuo en la fabricación del concreto como una solución para la reutilización del lodo de una

manera eficaz tanto económica como ambiental. Concluyó que el lodo puede utilizarse como agregado o incluso como cementante, en una proporción de 25 y 20% respectivamente para lograr la mayor resistencia, propia de diversas aplicaciones tales como pisos, trabes firmes, losas, banquetas y zapatas.

En la mezcla para la elaboración de tabiques de concreto, 52% corresponde a la arena, 22% a la grava y 26% al cemento, y se le puede adicionar hasta un 25% de lodo si es utilizado como agregado, es decir, en sustitución de parte de dos componentes de la mezcla (arena y grava), las mezclas arrojaron en sus ensayos valores de $f'c$ aproximadamente de 300 kgf/cm². Cuando el lodo se utilizó como cementante, es decir, en sustitución del 26% de cemento necesario en la mezcla, la proporción que arrojó mejores resultados fue 5,2% de lodo y el 21,8% restante de cemento. Éste señaló que al aumentar más allá del 25% y 20% de adición de lodos, provocaría que los tabiques tengan una menor resistencia a la compresión. Otra de las observaciones realizadas es que la resistencia varía dependiendo de la cantidad de lodo incorporado, por lo que esta debe establecerse en función de la aplicación a la cual se destinará el concreto. (Larios, 2005).

♦ “Tecnologías para el tratamiento de los lodos generados en sistema de potabilización del agua” (2003-2005), en dicha investigación se evaluaron diferentes alternativas de aprovechamiento de lodos aluminosos generados en plantas de potabilización y su viabilidad económica, estas alternativas incluyen la recuperación del aluminio para su manejo, su utilización en sistemas de tratamiento químico de algunos vertimientos industriales y su uso como agregado en materiales de construcción de baja y alta resistencia. Inicialmente, se demostró que técnicamente es viable recuperar alumbre a partir de lodos aluminosos por medio de resuspensión con ácido sulfúrico.

Los resultados de los ensayos en laboratorio sugieren que es posible el reemplazo del sulfato de aluminio y el polielectrolito aniónico en el tratamiento de aguas residuales de curtiembre, por lodos de plantas de potabilización, lo cual permitiría reducir los costos de tratamiento, además de encontrar un uso alternativo a dichos lodos.

De igual manera, se demostró que la composición mineralógica, el tamaño de partícula y la plasticidad de los lodos aluminosos generados en la planta de potabilización de agua de la ciudad de Pereira, lo constituyen como un material apto para ser utilizado como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos y las pruebas de absorción de humedad y resistencia a la compresión, permitieron identificar a la arena como el material a ser reemplazado por los lodos aluminosos. Con los experimentos realizados, se evidenció, que existe una tendencia a disminuir la resistencia de las probetas en la medida que se incrementa el porcentaje de lodo aluminoso utilizado, asimismo, se puede concluir que la utilización de lodos aluminosos como agregado en la fabricación de materiales de construcción de alta resistencia, puede comprometer la calidad de estos. (Paredes, 2005).

♦ “Viabilidad técnica de incorporación de lodos de decantadores en estaciones de tratamiento de agua 3 y 4 de Campinas en bloques de cerámica”, este tuvo como objetivo evaluar la viabilidad técnica y la ventaja de utilizar los lodos generados en ETA 3 y 4 de la ciudad de Campinas-Sao Paulo en una industria cerámica de Valinhos-Sao Paulo. En la investigación se realizó una mezcla de arcillas variando en 10, 15, 20 y 25% en volumen de lodo. Se realizaron pruebas físicas y mecánicas en los bloques de la industria de la cerámica. Se determinó el contenido de humedad, el tamaño, la liquidez y límites de consistencia al lodo y se hicieron los ensayos de la resistencia a la compresión, absorción de agua, desplazamiento de la plaza, las dimensiones y la planitud de las caras.

Las pruebas demostraron que los lodos pueden ser incorporados al cuerpo de cerámica sólo en proporciones de 10% (v / v) y 6,5% en masa, dado que el contenido de humedad del material es un factor limitante y ha impedido la producción de bloques con otras proporciones de lodos. Después de un tratamiento posterior de los lodos en el lecho de secado, hubo mejoría en los resultados y se descubrió que la incorporación de 15% (v / v) de los lodos y 10,7% en masa, producen bloques de cerámica que se ajustan a las normas brasileñas de calidad. Los valores de resistencia a la compresión arrojados son alrededor de 11,22 kgf/cm² para 10% y 10,20 kgf/cm² para el 15%.

Se concluyó que los lodos pueden sustituir a una de las arcillas utilizadas en el proceso industrial. Además, el lodo con un contenido de humedad alrededor del 70%, podría ser incorporado en una proporción de aproximadamente 6,5% en masa en las materias primas para la producción de bloques de calidad. Por último, el contenido de humedad, ha demostrado ser limitante para la incorporación de los lodos en mayor proporción y así convertirse en una alternativa poco atractiva por no aportar gran ahorro en materias primas al fabricante. (Menni et al., 2005).

♦ “Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistemas de potabilización, mediante su incorporación como agregados en materiales de construcción”, desarrollado por Hernández et al. (2006) en Colombia, evaluó el uso de los lodos aluminosos generados en la Planta Potabilizadora de la Empresa de Aguas y Aguas de Pereira S.A-ESP mediante su incorporación en la fabricación de ladrillos cerámicos. Inicialmente se determinó la composición mineralógica, el tamaño de partícula y los límites de Atterberg. Posteriormente, se evaluaron variables como resistencia a la compresión y absorción de humedad a unidades experimentales, incorporando lodo aluminoso en diferentes proporciones.

El análisis mineralógico se realizó mediante la técnica de Difracción de Rayos X presentando como resultado una alta presencia de cuarzo, ausencia de silicatos y presencia de caolinita aunque no es el elemento más representativo del lodo. Desde el punto de vista mineralógico, estos lodos pueden ser utilizados como un material magro, poco plástico, no cohesivo. El análisis granulométrico indicó que existe la predominancia de limos sobre arcillas, y los límites de Atterberg clasificaron al lodo como un material poco plástico. Estas características permitieron concluir que el lodo aluminoso se comporta como la arena utilizada en la fabricación de ladrillos cerámicos.

El ladrillo se compone de 50% de arcilla roja, 25% de arcilla negra y 25% de arena. A partir de esto se elaboraron distintos diseños de mezclas, reemplazando la arena y la arcilla negra por lodos aluminosos variando su contenido desde el 0 al 100%. Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos reflejan que las mayores resistencias fueron alcanzadas por las probetas donde se sustituyó la arena y que a partir del 50% de reemplazo se comienza a comprometer la resistencia media a la compresión, la cual alcanzó $86,79 \text{ kgf/cm}^2$ para un rango de 10 a 40% de reemplazo no cumpliendo con la Norma Colombiana NTC 4205. En cuanto a la absorción de humedad, esta se incrementa con el uso de lodos aluminosos y compromete la resistencia a la compresión de las probetas. Las unidades experimentales cuyo porcentaje de reemplazo se encuentra entre el 0 y el 90% están por debajo del 20% de absorción de humedad, entre un rango de 15 y 19%. Según los resultados obtenidos, no es posible utilizar el lodo aluminoso como agregado en ladrillos cerámicos recomendando continuar estudiando esta alternativa.

♦ “Viabilidad técnica de la incorporación del lodo de los decantadores de la estación de tratamiento de agua de Campinas y agregados reciclados en bloques de concreto”, el cual tuvo como objetivo evaluar la viabilidad técnica de la

incorporación de los residuos para la fabricación de bloques de hormigón estándar estabilizados con cemento. Por lo tanto, se incorporó, a la mezcla de árido reciclado, la cantidad máxima de lodos para así reducir al mínimo el cemento.

Se fabricaron mezclas con relaciones de masa en 0, 1, 3, 5, del 10 al 15% de lodo y 100, 89, 87, 85, 80 a 75% del total, que establece una proporción de cemento en un 10%. El objetivo fue incorporar en los bloques el importe máximo de lodos, utilizando la cantidad de cemento (CP-Portland tipo II) pre-establecido, con una buena humedad obtenida a partir de ensayos Proctor (11,8 a 13,6%) con el fin de obtener la máxima compresión. Los resultados mostraron una posible incorporación de hasta un 5% de los flujos de lodo de plantas de tratamiento de agua 3 y 4 de Campinas. (Chávez, Lima, de y Mar, s.f.).

♦ “Aprovechamiento de los lodos generados en la planta potabilizadora Los Berros, sistema Cutzamala en México, primera etapa” (2005-2006), en este trabajo se planteó como objetivo, proponer y evaluar conceptualmente tres opciones viables, desde los puntos de vista técnico, económico, social y ambiental, para aprovechar en diferentes opciones los lodos depositados y generados en el tren de tratamiento de la planta potabilizadora Los Berros, sistema Cutzamala.

En dicho estudio se determinó, que las principales opciones de aprovechamiento de lodos reportadas que se aplican en plantas potabilizadoras o a nivel de planta piloto son: 1) elaboración de cemento-clinker; 2) aplicación en suelos (elaboración de brechas cortafuego en suelos forestales y, en menor grado, aprovechado como mejorador de suelos en invernaderos); 3) elaboración de productos de la construcción (tabicones); 4) elaboración de productos cerámicos de alfarería (vasijas ornamentales y ladrillos); 5) elaboración de adsorbentes y

catalizadores a base de alúmina, y 6) recirculación de lodos en el tren de tratamiento de plantas potabilizadoras.

Las pruebas de aprovechamiento arrojaron buenos resultados en la elaboración de materiales de la construcción y productos cerámicos de alfarería. La estimación de la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de cada opción se realizó aplicando el método de matriz de decisión multicriterio. Se consideró la calificación total ponderada, la cual tomó en cuenta los cuatro aspectos evaluados (técnico, económico, social y ambiental). Las cuatro mejores opciones de aprovechamiento de lodos, fueron las siguientes (en orden decreciente): 1) aplicación en suelos (66-67,5%); 2) elaboración de cemento-clinker (65% para lodo espesado); 3) elaboración de tabicones y productos cementantes 62,6% para lodo deshidratado, y 4) productos cerámicos (55,1%). (Ramírez, et al., 2005/2006).

A continuación, la tabla 2.7, resume las características de algunos trabajos de lodo-cemento mencionados anteriormente, mostrando la composición de las mezclas utilizadas y las características mecánicas del material resultante.

Tabla 2.7. Principales características de mezclas de lodo-cemento con lodos potables y residuales

Autor y Año	Composición de la mezcla	Resultados obtenidos			Observaciones
LODOS DE POTABILIZACIÓN					
Herrera, 2006	1. LC3: 13% cemento, 87% lodo. 2. LCS: 13% cemento, 43,5% lodo, 43,5% suelo. 3. LCA2: 13% cemento, 43,5% lodo, 43,5% arena. 4. LCP: 13% cemento, 50,7% lodo, 36,3% piedra.	Rc (kgf/cm²)		Absorción (%)	- Las probetas presentaron lento fraguado y en algunos casos, nulo. - Su baja resistencia y durabilidad no permite calificarlo como un adecuado material de construcción.
		7 días	28 días		
		1. -	1. 2,46	1. 12,26	
		2. 2,72	2. -	2. 4,75	
		3. 2,62	3. -	3. 9,30	
		4. 1,90	4. -	4. 5,97	
Larios, 2005	1. M0: 52% arena, 22% grava, 26% cemento, 0% lodo. 2. M25: 39% arena, 16,5 grava, 19,5 cemento, 25% lodo. 3. M50: 26% arena, 11% grava, 13% cemento, 50% lodo.	Rc (kgf/cm²)		Absorción (%)	25% de lodo es la máxima cantidad que podrán contener los bloques.
		1. 144,44		1. -	
		2. 451,50		2. 7,14	
		3. 11,11		3. -	
Menni et al., 2005	1. L1: 10 % (v/v) de lodos. 2. L2: 15 % (v/v) de lodos. 3. L3: 20 % (v/v) de lodos. 4. L4: 25 % (v/v) de lodos.	Rc (kgf/cm²)		Absorción (%)	- Incorporación de 15% (v/v) de los lodos en la cerámica. - El contenido de humedad, es limitante para la incorporación de los lodos en mayor proporción.
		1. 11,22		1. 16,00	
		2. 10,20		2. 16,00	
		3. 8,16		3. 17,50	
		4. 7,14		4. 18,50	

Hernández et al., 2006	1. B1: 75% arcilla, 25% arena, 0% lodo.	Rc (kgf/cm²)		Absorción (%)	- No es posible utilizar el lodo aluminoso como agregado en ladrillos cerámicos. - Se recomienda continuar estudiando esta alternativa.
	2. B2: 75% arcilla, (22,5-15%) arena, (2,5-10%) lodo	1. 100,76		1. 16,91	
	3. B3: 75% arcilla, (12,5-2,5%) arena, (12,5-22,5%) lodo.	2. 86,79		2. 18,61	
	4. B4: 75% arcilla, 0% arena, 25% lodo.	3. 68,41		3. 14,58	
4. 60,91					
4. 25,99					
LODOS RESIDUALES					
Vargas y Montero, 2004	1. M1: 100% cemento, 0% lodo.	Rc (kgf/cm²)		Absorción (%)	- El lodo incorporado al cemento modifica los tiempos de fraguado y reduce la resistencia del material. - No puede utilizarse para fines estructurales.
	2. M2: 75% cemento, 25% lodo.	7 días	28 días		
	3. M3: 50% cemento, 50% lodo.	1. 176,90	1. 126,00	1. 10,19	
	4. M4: 25% cemento, 75% lodo.	2. 8,00	2. 8,40	2. -	
3. 30,00					
4. 9,60					
4. 11,60					
4. 86,76					
Cusidóp et al., 2000.	ECOBRIK 30% de lodos residuales, 5% de residuos forestales y 65% de arcillas.	Rc (kgf/cm²) 79,0			Los bloques poseen idénticas o superiores propiedades tecnológicas respecto de sus homólogos convencionales

3. MÉTODO

El siguiente trabajo se encuentra dentro del marco de una investigación de desarrollo, empírica y experimental, debido a que se proponen diseños de mezclas y se caracterizan sus propiedades a través de diversos ensayos. El mismo hecho de realizar y analizar mezclas de lodo-cemento le atribuye esta característica a la investigación.

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo a través de una serie de etapas que incluyeron desde la selección del lodo a utilizar, siguiendo por la caracterización y acondicionamiento del mismo y finalizando con la elaboración de las probetas de lodo-cemento, para su posterior ensayo.

La caracterización del lodo, en términos de la determinación del contenido de materia orgánica, se realizó en el Instituto de Ciencias de la Tierra (ICT-UCV) y la elaboración de las probetas y sus ensayos se llevo a cabo en el Instituto de Modelos y Materiales Estructurales (IMME-UCV).

A continuación se describen las etapas que fueron desarrolladas a lo largo del trabajo para el alcance de los objetivos propuestos.

3.1. SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL LODO

Para poder identificar un lodo con bajo contenido de materia orgánica, se seleccionaron varias Plantas de Tratamiento de Potabilización de Aguas en Venezuela cuya fuente de abastecimiento fueran preferiblemente ríos, evitando fuentes con mayor concentración de materia orgánica. Seguidamente se procedió a contactar al personal responsable de estas plantas, específicamente del área de control de calidad y operación de la empresa hidrológica correspondiente, a quienes se les solicitó la

captación de muestras de lodo cuando fuese realizado el mantenimiento y vaciado de los sedimentadores.

Para esta actividad fue elaborado un instructivo sencillo en el cual se describieron los pasos a seguir, con el fin de estandarizar la toma de muestras de lodo. El instructivo indicaba que se colocara una muestra de lodo en un recipiente para su posterior secado al sol, este instructivo se encuentra en el apéndice A-6.

Del total de 58 plantas potabilizadoras identificadas, se obtuvieron 10 muestras de lodos de los sedimentadores de las plantas, cuyas principales características se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Principales características de las Plantas de Tratamiento

Planta	Fuente de Abastecimiento	Caudal (L/s)	Población Abastecida (hab)
Pie de Cerro	Río Gabante y Curtidor	130	44850
José Pequiven*	Río Manzanares	300	No aplica
Tirgua	Río Tirgua	550	-
La Mariposa	Embalse La Mariposa	3530	498791
San Felipe	Río Yurubi	250	56969
Aroa	Río Minas de Aroa	80	11457
Caicara	Río Guama	80	13745
Cumaripa	Embalse Cumaripa	510	88520
Yaritagua	Manantiales Mariquita y Almorzadero	170	62739
Toro Muerto	Embalse Macagua	1700	705845

Fuente: Hidroven (2009) y Pequiven (2008).

* La P.T. José Pequiven no es operada por una empresa hidrológica y abastece las empresas del complejo.

Las muestras recolectadas fueron tomadas por el mismo personal de las plantas, estos colocaron el lodo al sol para su secado tal como se indicaba en el instructivo, y en la mayoría de los casos fueron pulverizadas y enviadas por medio de la valija de Hidroven, en los otros, las muestras fueron obtenidas en estado natural y se secaron al sol o en un horno a temperatura de 55 °C. En todas las muestras el secado se realizó hasta que estas presentaron un aspecto terroso. Una vez secas las muestras se trituraron y pulverizaron manualmente con un mortero y se pasaron por el tamiz N° 200 para realizar los análisis correspondientes.

El horno fue utilizado para secar el lodo proveniente de la P.T. Pie de Cerro, de donde se recibió el lodo húmedo y así agilizar el secado de la muestra, debido a que esta muestra fue analizada principalmente para familiarizarse con los métodos de determinación de contenido orgánico. Es importante mencionar que actualmente en la P.T. Toro Muerto-Puerto Ordaz, Edo. Bolívar, se encuentra una empresa que procesa el lodo, extrayendo el material inorgánico de lodo para así utilizar la parte orgánica en el acondicionamiento de suelos. En este sentido a este lodo se le analizó la fracción orgánica e inorgánica.

3.2. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO DEL LODO

Para la determinación del contenido orgánico, se realizaron tres (3) ensayos distintos: Análisis Termogravimétrico, Método de Walkley-Black y el Ensayo Colorimétrico, con la finalidad de comparar los resultados y efectivamente seleccionar la muestra con menor contenido orgánico para realizar las mezclas de lodo-cemento, así como comparar los otros dos métodos con el ensayo colorimétrico.

Debido a que el ensayo colorimétrico es cualitativo, los dos ensayos adicionales (Análisis Termogravimétrico y Método Walkley-Black) permitieron cuantificar la materia orgánica en los lodos.

El procedimiento para realizar los ensayos mencionados anteriormente se describe a continuación:

3.2.1. Ensayo Colorimétrico

Este ensayo sigue las especificaciones de la Norma Venezolana COVENIN 256:1977: “Método de Ensayo para la Determinación Cualitativa de Impurezas Orgánicas en Arenas para Concreto (Ensayo Colorimétrico)”.

- a. Se colocó una muestra de lodo en un envase de vidrio y se le agregó una solución al 3% de hidróxido de sodio en una proporción de 3 veces más que la muestra.
- b. Para homogeneizar la muestra se agitó el cilindro y se dejó reposar durante 24 horas.
- c. Se comparó el color del líquido presente en el cilindro con la escala de referencia, conocida como escala de Gardner, y se registró el número correspondiente asociado a la cantidad de materia orgánica presente.

3.2.2. Análisis Termogravimétrico

- a. Se pesaron los crisoles vacíos.
- b. Se pesaron los crisoles con las muestras de lodo.
- c. Se colocaron en la mufla a 105 °C por 2 horas.
- d. Después de transcurrido el tiempo, se retiraron de la mufla y se esperó 20 min aproximadamente para que se enfriaran.

- e. Se pesaron los crisoles nuevamente para determinar la pérdida del material por diferencia de peso.
- f. Análogamente, las muestras se colocaron en la mufla para las temperaturas de 300, 500 y 800 °C y se repitieron los últimos dos pasos (d,e) para cada una de ellas.

El Análisis Termogravimétrico (ATG), está basado en el porcentaje de pérdida de peso sometiendo la muestra a distintas temperaturas. La tabla 3.2 presenta las transformaciones que sufren las muestras a cada temperatura.

Tabla 3.2. ATG para suelos

Temperatura (°C)	Transformaciones que ocurren en la muestra
105	Pérdida de humedad
300	Pérdida de agua cristalizada
500	Volatilización de materia orgánica y pérdida de humedad de las arcillas
800	Descomposición de Carbonato de Calcio

Adaptado López et al., 2005.

En la figura 3.1 se presentan imágenes que muestran algunas de las fases del método.



a-. Pesado de crisoles con las muestras



b-. Crisoles con las muestras pesadas



c-. Crisoles con las muestras en la mufla

Figura 3.1. Análisis Termogravimétrico

3.2.3. Método de Walkley-Black, 1934.

- Las muestras de lodo fueron pesadas y dispuestas en fiolas.
- Se agregaron 10 ml de Dicromato de Potasio ($K_2Cr_2O_7$), 1 N con una pipeta a cada una de las muestras.
- Se añadieron 20 ml de Ácido Sulfúrico concentrado con un cilindro graduado.

- d. Para que se enfriaran las muestras se esperó una hora aproximadamente y luego se le agregó agua destilada hasta completar 100 ml en la fiola.
- e. Se le agregaron 5 gotas de ferroina a cada una de las muestras y se tituló con Sulfato Ferroso Amoniacal a 0,5 N.
- f. El carbono orgánico se calculó a través de la siguiente expresión obtenida de una regresión lineal.

$$Y = a * X$$

Donde:

Y: N° meq consumidos

a: Carbono Orgánico*0,3, %

X: Peso de la muestra, g

El método de combustión húmeda de Walkley-Black, cuantifica el carbono orgánico presente en los suelos para determinar indirectamente la materia orgánica, el carbono orgánico representa aproximadamente la mitad de la materia orgánica total. En la figura 3.2 se muestran algunos de los pasos de este método.

Una vez determinado el contenido orgánico por cada uno de los métodos, se procedió a comparar los resultados y a seleccionar la planta cuya muestra de lodo presentó menor contenido de materia orgánica.



a-. Fiolas con las muestras



b-. Adición del dicromato de potasio



c-. Adición del indicador



d-. Titulación

Figura 3.2. Fases del ensayo de Walkley-Black

3.3. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DEL LODO SELECCIONADO

Seleccionado el lodo con menor contenido orgánico, se procedió a la captación del material para la posterior elaboración de las probetas y los respectivos ensayos para describir el comportamiento físico y mecánico del material.

La toma de muestra fue realizada una vez que el sedimentador de la planta seleccionada estuvo vacío; como consecuencia de las labores de mantenimiento rutinario. La muestra se captó de la siguiente manera:

- a. Se introdujo un envase de 20 L de capacidad dentro del sedimentador vacío, el cual se llenó con el material del fondo (lodos) en varias ocasiones.
- b. Se procedió a llenar tanques de 500 L de capacidad con los envases de 20 L.
- c. Se llenaron 4 tanques hasta la mitad aproximadamente hasta completar un total de 720 L de lodo.

Es importante destacar que esta actividad fue realizada por personal de la planta y encargados del mantenimiento de los sedimentadores.

En la figura 3.3 se presentan imágenes de la actividad realizada en esta fase de recolección de muestras del lodo.



a-. Extracción del lodo del sedimentador con el envase de 20 L



b-. Llenado de los tanques de 500 L



c-. Tanques con los lodos

Figura 3.3. Recolección del lodo

Para identificar las características físicas del lodo proveniente de los sedimentadores de Plantas de Tratamiento de Potabilización de Aguas como objetivo de esta investigación se le realizaron pruebas al lodo, tanto en su estado natural como después del proceso de secado. A continuación se presentan dichas pruebas para el lodo en estado natural.

3.4. CARACTERÍSTICAS DEL LODO EN ESTADO NATURAL

Al lodo se le realizaron pruebas preliminares que caracterizan al material desde el punto de vista cualitativo y ensayos de laboratorio que permiten tener algunas características cuantitativas. Entre las pruebas preliminares se encuentra la prueba del olor, la cual consistió en tomar la muestra de lodo y a través del olfato apreciar el tipo de olor que posee. Otra de las pruebas es la del tacto, donde se tomó una pequeña cantidad de muestra y se frotó entre los dedos y la palma de la mano a fin de determinar la textura del lodo. Por último, se tiene la prueba de la vista que consistió en observar cada una de las muestras para distinguir color y consistencia del lodo.

Dentro de los ensayos de laboratorio se determinó el peso unitario compacto y el contenido de humedad.

Para realizar el ensayo de peso unitario compacto se procedió como se describe a continuación: (Luis y Rendón, 2005).

- a. Se dispuso de un envase de volumen conocido.
- b. Se llenó el envase en tres capas.
- c. Se le aplicó 10 golpes a cada una de las capas con la barra de compactación.
- d. Se retiró el exceso de lodo con la misma barra.
- e. Se pesó el molde con el lodo.

- f. El peso unitario compacto del lodo se determinó por medio de la siguiente expresión:

$$\gamma_{\text{lodo}} = \frac{P_{\text{muestra}}}{V_{\text{molde}}}$$

Donde:

γ_{lodo} : Peso Unitario compacto del lodo, kg/m³.

P_{muestra} : Peso de la muestra, kg.

V_{molde} : Volumen del envase, m³.

Por último, se determinó el contenido de humedad con el siguiente procedimiento:

- Se llevaron las cápsulas a peso constante a través del secado al horno a una temperatura de 105 °C durante 12 horas.
- Se extrajeron las cápsulas del horno y se dejaron enfriar durante media hora a temperatura ambiente dentro de un desecador.
- Se pesaron las cápsulas con una balanza analítica.
- Se colocaron las muestras de lodo en las cápsulas y se secaron al horno a una temperatura de 105 °C durante 24 horas.
- Se retiraron las cápsulas con las muestras del horno y se enfriaron a temperatura ambiente.
- Se pesaron las cápsulas con las muestras en la balanza analítica.
- El contenido de humedad se determinó utilizando la siguiente expresión:

$$w(\%) = \frac{P_H - P_S}{P_H}$$

Donde:

w : Contenido de humedad, %.

P_H : Peso húmedo, g.

P_S : Peso seco, g.

En la figura 3.4 se observan las cápsulas con las muestras.



Figura 3.4. Cápsulas con las muestras en el horno

3.5. ACONDICIONAMIENTO DEL LODO PARA LA MEZCLA

Ahora, para poder identificar las características del lodo en estado seco, este fue acondicionado. Primeramente, este proceso consistió en el secado del lodo recolectado para posteriormente ser utilizado en las distintas mezclas, el secado se inició en la planta potabilizadora, colocando pequeñas cantidades del lodo en recipientes rectangulares poco profundos expuestos al sol (Ver figura 3.4.a). Cuando el lodo fue adquiriendo un aspecto terroso era almacenado en bolsas de escombros de alta resistencia para su posterior traslado a la PETA-UCV e IMME-UCV.

Debido a que el proceso de secado en esta forma fue muy lento, ya que a los 30 días no se había secado ni la cuarta parte del material, el lodo fue trasladado en condiciones húmedas. Una vez en la UCV se colocó en un horno a una temperatura de 90 °C existente en el IMME-UCV. En 7 días se pudo obtener el completo secado de los 720 L de lodo húmedo que se convirtieron en 150 kg de lodo seco aproximadamente.

Luego del secado se procedió a triturar el lodo manualmente con un rodillo de concreto, para luego proceder a su tamizado por una malla fina de apertura de 5 mm

aproximadamente, al material retenido nuevamente se le pasó el rodillo y este proceso se repitió, hasta que quedase pulverizado en su totalidad el lodo seco. La figura 3.5 muestra el proceso de acondicionamiento del lodo.



a-. Secado al sol del lodo



b-. Secado en el horno del lodo



c-. Pulverización del lodo



d-. Tamizado del lodo

Figura 3.5. Secado, pulverizado y tamizado del lodo

Con este procedimiento se obtuvo el lodo seco pulverizado para elaborar las mezclas de lodo-cemento que posteriormente fueron ensayadas para determinar su comportamiento mecánico y físico.

El lodo seco fue sometido a pruebas iniciales y ensayos de laboratorio para caracterizarlo físicamente. Estas pruebas iniciales se describen a continuación:

3.5.1. Pruebas iniciales (Rodríguez y Simonpietri, 2002).

3.5.1.1. Prueba de lavado de manos

- a. Se tomó la muestra de lodo y se lavaron las manos con esta como si fuese jabón.
- b. Se enjuagaron las manos observando la forma como se removía la muestra.

Si el enjuague se realiza fácilmente se trata de un material arenoso, pero si el mismo se dificulta, se trata posiblemente de un material arcilloso. Los materiales limosos son polvorientos, y no presentan dificultad en el enjuague.

3.5.1.2. Prueba de brillo

- a. Se tomó un poco de lodo y se le añadió agua para hacerlo ligeramente húmedo y se formó una bolita.
- b. Con una espátula se cortó por la mitad la bolita formada.
- c. Se observó la superficie de las mitades cortadas para determinar el brillo de la muestra.

Si la superficie de corte es opaca, el material es arenoso; si es brillante se trata de una arcilla de alta plasticidad y si es poco brillante o casi mate se trata, probablemente de un material limoso o de una arcilla de baja plasticidad.

3.5.1.3. Prueba de la sacudida o reacción al agitado

Esta prueba llamada también de la dilatancia, se realiza para los componentes finos, siguiendo los pasos que se presentan a continuación:

- a. Se tomó una muestra de lodo, se humedeció y se formó con ella una bolita de 2 ó 3 cm de diámetro.
- b. Luego se aplastó en la palma de la mano hasta formar una especie de pastilla.
- c. Se golpeó vigorosamente en varias ocasiones el costado de la mano con la otra, para que el agua contenida en la muestra salga.

La rapidez con que aparece o desaparece el agua en la superficie al golpear, determina la clase de finos que componen el material. Si el agua sale a la superficie entre los 5 y 10 primeros golpes, es una reacción rápida y se trata de una arena muy fina o de limos gruesos sin materia orgánica. Entre 20 y 30 golpes es una reacción lenta e indica un limo ligeramente plástico o una arcilla limosa y si la reacción es muy lenta o existe ausencia de reacción, el material es arcilloso.

3.5.1.4. Prueba del cordón

Esta prueba es un complemento de la prueba de la sacudida y permite apreciar la cohesión del material a seleccionar.

- a. Se tomó una pequeña porción de lodo pulverizado y se humedeció con agua para hacerlo moldeable y sin que se adhiriese a los dedos.
- b. La muestra se hizo rodar por una superficie plana y limpia, hasta formar un cordón.
- c. Se continuó rodando el cordón progresivamente hasta que se rompió en pequeños trozos, poniendo atención a la consistencia del material durante el amasado.
- d. Luego los trozos se amasaron nuevamente sin agregar más agua, para hacer una bola.

- e. Se rompió la masa de la bola apretándola entre los dedos pulgares e índice midiendo el esfuerzo requerido para ello. La cohesividad del material se mide según el esfuerzo requerido para romper dicha pelota.

Si el material se fragmenta fácilmente sin lograr hacer el cordón, este contiene poca arcilla. Si se logra hacer el cordón y este es duro, el contenido de arcilla es alto, si es frágil el material contiene mucho limo o arena y poca arcilla y si el cordón es blando y esponjoso se trata de tierras orgánicas.

3.5.1.5. Prueba de la cinta

Este ensayo sirve para estimar la plasticidad del material.

- a. Se tomó una muestra de lodo pulverizado.
- b. Se amasó con agua hasta hacerla lo suficientemente húmeda para enrollarla y formar un cilindro de 12 mm de diámetro y aproximadamente 20 cm de largo.
- c. Se colocó el cilindro en la palma de la mano, y comenzando por un extremo se fue aplastando por presión del pulgar y el índice hasta obtener una cinta de 3 a 6 mm de espesor.
- d. Luego se midió la longitud en la cual la cinta se rompe.

Cuando la cinta es larga, 25 a 30 cm, indica que el material posee un alto contenido de arcilla y cuando la cinta es corta de 10 a 15 cm, el contenido de arcilla oscila entre poco y medio.

En la figura 3.6 se muestran imágenes de ejecución de las pruebas iniciales realizadas al lodo seleccionado.



a-. Prueba de brillo



b-. Prueba de la sacudida



c-. Prueba del cordón y de la cinta

Figura 3.6. Pruebas iniciales

En el marco de los ensayos de laboratorio que se le realizaron al lodo, se encuentra el peso unitario compacto, el cual siguió el procedimiento descrito anteriormente para el lodo en estado natural. Adicionalmente se le hicieron otros ensayos que se explican a continuación:

3.5.2. Peso específico (Sánchez, 2008).

Para la determinación del peso específico, es necesario conocer el peso del picnómetro lleno con agua destilada a la temperatura del ensayo, por lo que se debe calibrar el peso del instrumento a diferentes temperaturas a fin de obtener la curva de

calibración. Por esta razón el procedimiento se divide en dos (2) fases: Calibración del Picnómetro y Determinación del Peso Específico. La metodología correspondiente a cada una de ellas se encuentra a continuación:

3.5.2.1. Calibración del Picnómetro

- a. Se limpió y secó el picnómetro.
- b. Se pesó el picnómetro para obtener su peso vacío (W_p).
- c. Se llenó con agua destilada hasta la seña de aforo y se colocó a hervir de 5 a 10 minutos en baño María para eliminar el aire disuelto en el agua.
- d. Una vez retirado el picnómetro del “baño María” fue tomada la temperatura a diferentes profundidades dentro del agua para verificar que la temperatura sea uniforme.
- e. El picnómetro se secó cuidadosamente, en su exterior y dentro del cuello sobre el nivel del agua. Con la ayuda de una pipeta se hizo coincidir la parte inferior del menisco con la marca de aforo y se pesó para obtener ($W_{p\omega T}$).
- f. A medida que la temperatura fue bajando, se tomaron al menos seis (6) lecturas de temperatura y $W_{p\omega T}$ a fin de tener puntos suficientes para dibujar la curva de calibración.

3.5.2.2. Determinación del Peso específico

- a. La muestra de lodo fue tamizada a través de la malla #40.
- b. La muestra preparada se colocó en el picnómetro utilizando un embudo de vidrio.
- c. Se pesó el picnómetro con el lodo para luego añadirle agua destilada hasta la mitad y dejar reposar por 12 horas.
- d. Transcurrido el tiempo se añadió agua destilada hasta que la marca de aforo coincidió con el fondo del menisco.

- e. Se limpió y secó exteriormente el picnómetro y el interior de su cuello.
- f. Se pesó el picnómetro con el lodo y el agua destilada para obtener (W1) y se tomó la temperatura del contenido.
- g. Con la temperatura obtenida se entró en la curva de calibración construida para determinar el peso del picnómetro más agua (W2).
- h. El peso específico fue calculado por la siguiente expresión:

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_2 - W_1} * \frac{Y_{wT}}{Y_{w20}}$$

Donde:

Ws: Peso de las partículas sólidas del suelo.

W₁: Peso del picnómetro con agua destilada y suelo a T °C.

W₂: Peso del picnómetro con agua destilada a T °C.

Y_{wT}/Y_{w20}: Peso Específico del agua o del líquido empleado a la temperatura T.

3.5.3. Límites de Atterberg

Los valores correspondientes a los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) y los índices derivados de estos (índice de plasticidad e índice de consistencia) se calcularon siguiendo las especificaciones de la Norma Venezolana COVENIN 1125-77: “Suelos. Método para la determinación de los Límites Líquido y Plástico”.

3.5.4. Granulometría

Para llevar a cabo el análisis granulométrico, se realizó un tamizado por lavado del material utilizando para ello los cedazos 10, 20, 40, 60, 100, 200. Luego,

debido a la característica de finura que presenta el lodo, se realizó un ensayo de sedimentación. Se utilizó el método del hidrómetro el cual consiste en lo siguiente:

- a. Se tomó una muestra de 50 g del material seco pasante del tamiz N° 40.
- b. Se colocó la muestra en un vaso de precipitado y se cubrió con agua destilada.
- c. Se le agregó 5 g de un agente defloculante y se dejó en remojo durante un día.
- d. Luego del período de inmersión, se revolvió el contenido del vaso con un agitador por espacio de 5 min.
- e. Se vertió la solución en un cilindro de sedimentación, enjuagando bien el vaso de la mezcladora, completando el volumen a un litro con agua destilada.
- f. Se agitó la solución durante un minuto invirtiendo el cilindro varias veces y tapando la boca del mismo con la palma de la mano.
- g. Inmediatamente se colocó el cilindro sobre una superficie horizontal, se sumergió el hidrómetro y se tomaron las lecturas a los 0, 0,5, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos y a las 1, 2, 4 y 24 horas.
- h. Después de cada lectura se colocó el hidrómetro en agua limpia y se midió la temperatura de la suspensión.

Una vez tomada la lectura final del hidrómetro, se procedió a realizar el análisis de la fracción fina del material contenido en el cilindro de sedimentación, siguiendo las especificaciones de la Norma Venezolana COVENIN 258-77: “Método de ensayo para la determinación por lavado del contenido de materiales más finos que el cedazo COVENIN 74 micras en agregados minerales”. La pérdida en peso debido al tratamiento de lavado, se calcula como un porcentaje por peso de la muestra original y se dice que es el porcentaje de material más fino que el cedazo COVENIN 74 μ (#200).

El lodo por ser un material muy fino, y por efectos de practicidad, se determinó su granulometría con el equipo Mastersizer 2000, el cual es un analizador

de tamaño de partículas por la tecnología de difracción láser, en este se coloca la muestra y el resultado del tamaño de partícula es suministrado por el software del equipo. Esta técnica opera bajo la predicción del comportamiento de las partículas sobre la dispersión de luz, las partículas dispersan luz en todas las direcciones con un patrón de intensidad que es dependiente de su tamaño. En la figura 3.7 se encuentran imágenes de dos de los ensayos de laboratorio que fueron realizados al lodo seco.



a-. Picnómetro con el lodo



b-. Colocación del lodo en el Mastersizer

Figura 3.7. Algunos ensayos de laboratorio

3.5.5. Difracción de Rayos X

La técnica de Difracción de Rayos X no forma parte del método de este trabajo de investigación, sin embargo el lodo fue analizado por este procedimiento, ya que en el ICT-UCV, el equipo se encontraba a plena disposición de esta investigación.

3.6. REALIZACIÓN DE MEZCLAS Y PROBETAS DE LODO-CEMENTO

Para poder analizar el lodo-cemento como material de construcción fue necesario realizar probetas con distintas mezclas para ensayarlas posteriormente. Para ello fue necesario lo siguiente:

3.6.1. Elaboración de diseños de mezcla

Los diseños de mezclas a elaborar en esta investigación, no siguen los procedimientos de algún método de diseño en particular, sino que obedecen a un método empírico basado en experiencias de mezclas de concreto y suelo-cemento, así como las experiencias previas de lodo-cemento. Para todas las mezclas, la dosis de cemento es, medida en peso, el equivalente al 15% del peso de la dosis de los agregados en la mezcla, ya que es la cantidad máxima admitida en mezclas de suelo-cemento.

Se diseñaron tres mezclas, una de lodo-cemento y las otras dos mejoradas con agregados utilizados en materiales de construcción como lo son la piedra y el suelo. No se considero el uso de arena por criterios económicos y preservación ambiental, criterios básicos iniciales asumidos en esta investigación.

En todas las mezclas se utilizó el lodo seco debido a que las experiencias anteriores con mezclas de lodo-cemento reportan e indican que al utilizar el lodo húmedo, tal como se genera, las mezclas no presentan un buen fraguado por la gran cantidad de agua que aporta a la mezcla.

El agua necesaria para la mezcla se estableció de acuerdo a los diseños de suelo-cemento, los cuales utilizan como agua de mezclado el porcentaje de humedad óptima del suelo, en este caso se utilizó 9,5% de humedad óptima. Dado que la mezcla no presentó trabajabilidad con ese contenido de agua, se le agregó el agua necesaria hasta lograr una buena fluidez. Los otros materiales utilizados para las mezclas fueron cemento tipo Portland “La Vega” y piedra picada de 1”.

En la tabla siguiente se presenta el diseño de mezcla utilizado en este trabajo de investigación.

Tabla 3.3. Diseños de Mezcla

	MEZCLAS		
	M1-LC	M2-LCP	M3-LCS
Lodo (kg)	60	34	30
Cemento (kg)	9	10,2	9
Suelo (kg)	0	0	30
Piedra (kg)	0	34	0
Agua (kg)	42	26	24

Donde:

- ◆ M1-LC: lodo-cemento.
- ◆ M2-LCP: lodo-cemento con piedra picada.
- ◆ M3-LCS: lodo-cemento con suelo.

Es importante destacar, que las cantidades utilizadas de cada componente en la mezcla y específicamente la cantidad de lodo obedecieron al número de probetas previstas para ensayar en cada caso, considerando que la masa de lodo seco obtenido a partir de los 720 L fue de 150 kg aproximadamente.

En la tabla 3.4 se presenta el número de probetas consideradas para cada prueba y ensayo.

Tabla 3.4. Número de probetas realizadas

ENSAYOS	MEZCLAS			TOTAL
	M1-LC	M2-LCP	M3-LCS	
Compresión 30 x 15 cm	7	5	5	17
Tracción Indirecta 30 x 15 cm	3	4	2	9
Absorción 10 x 5 cm	3	3	3	9
Erosión 15 x 15 x 15 cm	2	2	2	6
TOTAL	15	14	12	41

3.6.2. Elaboración de probetas

La elaboración de las probetas se ejecutó mediante el siguiente procedimiento:

- a. Una vez pesadas las cantidades de materiales establecidas en el diseño de mezcla, los materiales fueron colocados con sumo cuidado, uno por uno, manteniendo la mezcladora encendida. Primero se colocó el agregado grueso (en los casos que hubo), después el lodo seguido del cemento y por último el agua.
- b. Se determinó el asentamiento de la mezcla a través del método del Cono de Abrams, siguiendo las especificaciones de la Norma Venezolana COVENIN 339: “Método para la medición del asentamiento con el Cono Abrams”.
- c. Se determinó el peso unitario compacto de las mezclas.
- d. Se engrasó con gasoil la superficie interior de los moldes a utilizar.
- e. Se llenaron los moldes con tres capas de igual volumen de mezcla, con una altura aproximada de un tercio de la altura del molde por cada capa. A cada capa se le dio 25 golpes con la varilla de compactación.
- f. Se enrasó la parte superior de la probeta con la misma barra compactadora desde el centro de la probeta hacia los extremos, para garantizar una superficie lisa y uniforme.
- g. Se identificaron las probetas con un marcador.
- h. Se almacenaron las probetas, cuidando que no fuesen golpeadas, inclinadas o alteradas en su superficie.

Imágenes del proceso de mezclado y de la elaboración de las probetas se presentan en la figura 3.8.



a-. Proceso de mezclado



b-. Elaboración de las probetas



c-. Cono de Abrams



d-. Cilindros vaciados

Figura 3.8. Elaboración de mezclas y probetas de lodo-cemento

3.6.3. Almacenamiento y curado de las probetas

Las probetas de lodo-cemento fueron almacenadas bajo techo en un lugar fresco. Por limitaciones en el uso de los implementos del laboratorio del IMME-UCV las mezclas se realizaron en 2 fases, en la primera fase se realizaron las mezclas de lodo-cemento (M1-LC) y la que se le incorporo piedra picada (M2-LCS) y en la segunda la mezcla que contenía lodo-cemento-suelo.

Se desencofraron las probetas a los 6 días después del vaciado en las mezclas con solo lodo (M1-LC) y piedra con lodo (M2-LCS) a causa de un fraguado retardado

y a los 3 días para el caso de la mezcla de lodo con suelo (M3-LCS). Luego del desencofrado se hizo un curado intermitente, que consistió en sumergir durante unos pocos segundos cada una de las probetas en agua y en colocarle cartón o periódico en forma de envoltura, para mantener la humedad como proceso de curado durante 7 días después del desencofrado. En la figura 3.9 se muestran imágenes del curado y almacenado de las probetas.



a-. Probetas desencofradas



b-. Curado de las probetas

Figura 3.9. Almacenamiento y curado

3.7. ENSAYO DE LAS PROBETAS

Los ensayos a las probetas estuvieron dirigidos a describir el comportamiento mecánico y físico de las mezclas de lodo-cemento, esto se logró con la determinación de su resistencia y durabilidad a través de los ensayos de resistencia a la compresión, tracción indirecta, absorción y erosión.

3.7.1. Ensayo de la resistencia a la compresión

Este ensayo se realizó siguiendo las especificaciones de la Norma Venezolana COVENIN 338-2002: “Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto”.

3.7.2. Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas

Este ensayo se llevó a cabo siguiendo las especificaciones de la Norma Venezolana COVENIN 341-1979: “Método de ensayo para determinar la tracción indirecta del concreto usando probetas cilíndricas”.

3.7.3. Ensayo de absorción (Rodríguez y Simonpietri, 2002).

El procedimiento de absorción es el siguiente:

- a. Se secaron las probetas al horno a una temperatura de 105 °C durante 24 horas.
- b. Se extrajeron las probetas del horno y se dejaron enfriar a temperatura ambiente para proceder a pesarlas.
- c. Luego se sumergieron las probetas completamente en agua durante 24 horas a una temperatura entre 15,5 °C y 30 °C.
- d. Se sacaron las probetas del agua y se secaron con un paño húmedo.
- e. Se pesaron las probetas inmediatamente en los primeros cinco minutos después de retiradas del agua.
- f. La absorción de agua de las probetas de lodo-cemento se calculó con el uso de la siguiente expresión:

$$Ab = \frac{(P_2 - P_1)}{P_2} * 100$$

Donde:

Ab: Absorción de agua en la muestra, %.

P₁: Peso seco de la muestra, g.

P₂: Peso de la muestra después de haber sido sumergida en agua, g.

3.7.4. Ensayo de erosión (Rodríguez y Simonpietri, 2002).

Este ensayo se llevó a cabo a través de la técnica del cepillado. Los pasos a seguir para la ejecución de este ensayo fueron los siguientes:

- a. Se secaron las probetas al horno a una temperatura de 105 °C, durante 24 horas.
- b. Se sumergieron cada una de las probetas en la cámara húmeda durante 24 horas y se cercioró de que la probeta se encuentre cubierta totalmente por el agua.
- c. Se sacaron las probetas del agua.
- d. Con un movimiento suave se cepilló la probeta con un cepillo de cerdas duras, noventa veces hacia arriba y noventa veces hacia abajo, cuidando no llegar a las orillas para no romperlas.
- e. El material resultante se dispuso en envases plásticos y se dejó reposar hasta el siguiente día.
- f. Se extrajo el agua sobrenadante del envase y se aseguró que quedara en el fondo el material desprendido.
- g. Se transvaso el material desprendido a un envase metálico pequeño.
- h. Se colocaron al horno a 105 °C por 24 horas y se pesó.

En la figura 3.10 se muestran imágenes de los ensayos mecánicos y de durabilidad.



a-. Ensayo de la resistencia a la compresión



b-. Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas



c-. Probetas sumergidas



d-. Ensayo de erosión

Figura 3.10. Ensayos de las probetas

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados presentados siguen el mismo orden descrito en el método de este Trabajo Especial de Grado, el cual parte desde la selección del lodo, su caracterización en estado natural, los ensayos realizados al lodo en estado seco, la realización de las mezclas y por último las características físicas y mecánicas del material.

El análisis final está dirigido a describir el comportamiento del material para fines de construcción, y contrastar los valores obtenidos en los ensayos con otros tipos de materiales convencionales y no convencionales.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos experimentales con el análisis de los mismos, mediante la interpretación de las tablas y figuras que se presentan a lo largo de este capítulo y la data obtenida en los diferentes ensayos se incluyen en los apéndices.

4.1. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO DEL LODO

La tabla 4.1 presenta los resultados obtenidos en la determinación del contenido orgánico por los tres métodos antes descritos.

Tabla 4.1. Contenido orgánico del lodo de distintas plantas potabilizadoras

Planta Potabilizadora	Pérdida a 500 °C (%)	Carbono Orgánico (%)	Ensayo Colorimétrico
Pie de Cerro	4,89	0,83	-
Pequiven	4,15	2,6	5
Tirgua	3,43	2,22	4
La Mariposa	4,62	2,37	5
San Felipe	0,77	0,28	2
Aroa	4,61	0,60	2
Caicara	1,25	0,61	2
Cumaripa	17,53	9,36	5
Yaritagua	0,61	0,31	2
Toro Muerto inorg*	8,51	3,48	5
Toro Muerto org	17,66	18,82	5

*Esta muestra se denominó inorgánica debido a que el contenido orgánico se le fue reducido.

Tal como se observa en la tabla 4.1, los valores obtenidos por el método colorimétrico establecen rangos del contenido orgánico del lodo. Los colores obtenidos con este ensayo varían entre 2 y 5, los valores de 4 y especialmente los de 5 representan un alto contenido de materia orgánica, mientras que los valores de 2 se asocian a bajo contenido orgánico.

En relación a lo anterior, el lodo proveniente de las plantas de San Felipe, Aroa, Caicara y Yaritagua son los que presentan el menor contenido orgánico con respecto a los demás.

Vale destacar que aunque por el método colorimétrico no hay diferencia entre las dos fracciones de lodo de la P.T. Toro Muerto (5), esta diferencia si se observa con los dos otros métodos cuantitativos.

El valor arrojado por el método de Walkley-Black es aproximadamente la mitad del obtenido por el Análisis Termogravimétrico en la mayoría de los casos, con algunas excepciones como el caso de Aroa donde posiblemente a 500 °C además de volatilizarse la materia orgánica, pierden la humedad las arcillas presentes en el lodo.

Con respecto a los valores obtenidos por el método termogravimétrico y Walkley-Black el menor contenido de materia orgánica estuvo en el lodo proveniente de las plantas de San Felipe, Caicara, Yaritagua y Aroa, y a su vez están asociados a un valor de 2 en el ensayo colorimétrico (Ver figura 4.1).

El lodo proveniente de las plantas de San Felipe y Yaritagua son los que presentaron el menor contenido de materia orgánica consistentemente en los tres métodos. Finalmente, el lodo seleccionado fue el de la **Planta de San Felipe (SF)**, debido a que la actividad de mantenimiento correspondiente al vaciado de los sedimentadores fue la más inmediata, además del fácil acceso a la planta y su cercanía con la zona de Caracas con respecto a la otra planta (Yaritagua), favoreciendo la logística del traslado del lodo.

Vale la pena destacar que el método colorimétrico sigue representando, aunque de forma cualitativa, las restricciones del uso de agregados con alto contenido de materia orgánica, tal como se observa en la figura 4.1. Se aprecia que cuando el método colorimétrico da como resultado 2, el porcentaje de contenido orgánico obtenido por Walkley-Black y ATG es menor a 1% aproximadamente. Esto sugiere que efectivamente el valor de 2 en el ensayo colorimétrico es representativo del bajo contenido de materia orgánica en el lodo para su uso como agregado en materiales de construcción.

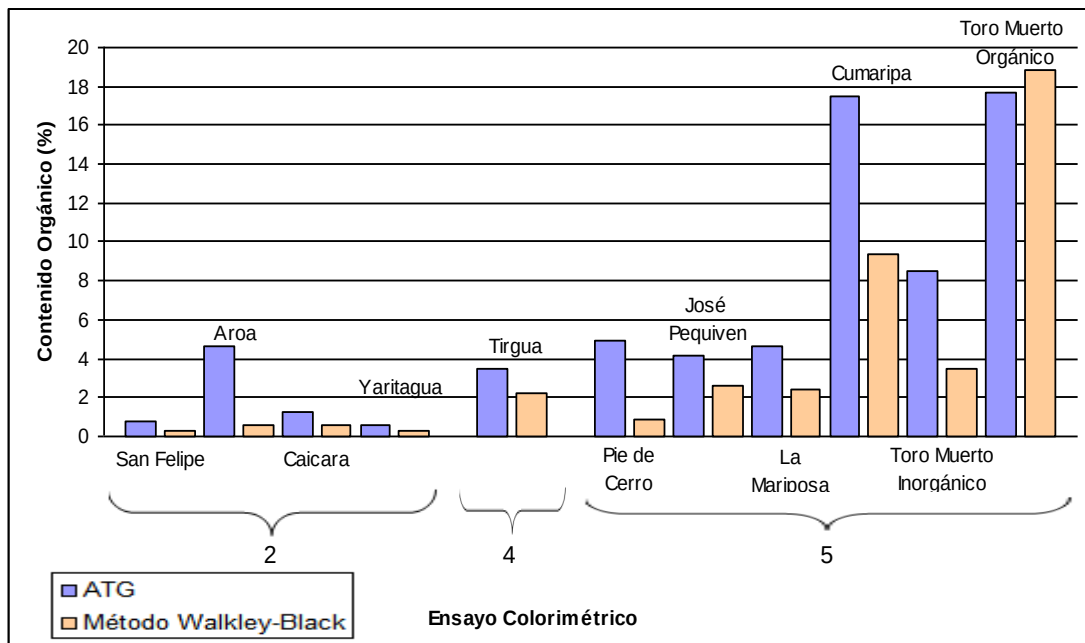


Figura 4.1. Correlación entre los métodos de determinación de contenido orgánico

La tabla 4.2 presenta los valores obtenidos del contenido orgánico del lodo que constituyó las mezclas analizadas, donde se observa que su contenido orgánico es bastante superior al obtenido en la selección inicial (Tabla 4.1). No haber realizado el ensayo colorimétrico en sitio, impidió evidenciar la modificación de las características iniciales de este lodo. Posteriormente, se pudo constatar que este cambio en el contenido orgánico del lodo pudo ser consecuencia de la modificación de la calidad del agua cruda que alimentó a la planta como consecuencia de las labores de remoción de terreno en la cabecera del río Yurubi por trabajos en la obra de toma.

Tabla 4.2. Contenido orgánico del lodo de SF

Planta San Felipe		
Pérdida a 500 °C (%)	Carbono Orgánico (%)	Ensayo Colorimétrico
2,48	2,19	5

A pesar de este incremento de materia orgánica en el lodo de la P.T. San Felipe con respecto a su caracterización inicial, el mismo siguió siendo uno de los menores en lo que a contenido orgánico se refiere, inclusive menor con respecto al de la P.T. La Mariposa, donde se realizó la investigación precedente a este trabajo.

Finalmente, cabe destacar que la diferencia entre los resultados por pérdida a 500 °C y el método de Walkley-Black es muy estrecho, por lo que se puede inferir que este lodo posee poca cantidad de arcilla, y que la pérdida presente se debe en su mayoría a la materia orgánica, razón por la cual ambos valores son tan cercanos.

4.2. CARACTERÍSTICAS DEL LODO DE SF EN ESTADO NATURAL

- ♦ Prueba del Olor: El lodo expele un olor de mohoso a fétido lo que indica la presencia de partículas en descomposición en el lodo.
- ♦ Prueba del Tacto: Presenta una textura lisa y es de consistencia gelatinosa.
- ♦ Prueba de la Vista: Muestra un color entre gris y verde oscuro.

El lodo de SF en estado natural posee un peso unitario compacto igual a 1446 kg/m³, ubicándose cerca del límite inferior de los rangos para agregados no livianos presentados por Porrero, en 2004, por lo que puede considerarse como agregado liviano. Este valor es ligeramente superior que el presentado por Herrera (2006), de 1005 kg/m³.

El contenido de humedad del lodo de SF en estado natural fue de 55,4% lo que demuestra una cantidad de agua entre moderada y elevada. Aún cuando se encuentra en los rangos establecidos por Mujica, (2006), hay que mencionar que ya el lodo había tenido pérdida de su contenido de humedad al momento de realizar el ensayo, razón por la cual no se ubica en el rango de humedad usual que contienen los lodos. (90%)

4.3. CARACTERÍSTICAS DEL LODO DE SF ACONDICIONADO

En las pruebas iniciales, el lodo no presentó dificultad alguna a la hora del enjuagado de manos en la prueba de lavado de manos, en la de brillo las superficies de las caras cortadas poseían una superficie mate, en la prueba de sacudida o reacción al agitado, la pastilla formada presentó una reacción rápida al agitado por mostrar en menos de 5 golpes la presencia de agua en su superficie, por último, las pruebas del cordón y de la cinta no pudieron ser realizadas porque no se logró formar el cordón ni la cinta ya que el material se desboronaba.

Los resultados del lodo seco en las pruebas iniciales se muestran en la tabla 4.3. En general, estas pruebas iniciales permiten caracterizar al lodo como un material fundamentalmente limoso y con poca arcilla.

Tabla 4.3. Pruebas Iniciales

Prueba	Resultado obtenido	Tipo de Material
Lavado de manos	Fácil enjuagado	Limoso
Brillo	Mate	Limoso
Sacudida	Reacción rápida	Arena muy fina o limos gruesos
Cordón	No se formó el cordón	Poca cantidad de arcilla
Cinta	No se formó la cinta	-

4.3.1. Peso específico

El peso específico del lodo se determinó como se describió anteriormente en el método, dando como resultado 2,58 que al compararlo con otras investigaciones como la de Hernández, 2006 y Herrera, 2006, se observa que se encuentra en el mismo orden de magnitud que otros lodos de potabilización.

4.3.2. Peso unitario compacto

El lodo seco de SF posee un peso unitario compacto igual a $753,8 \text{ kg/cm}^3$, el cual es la mitad del peso unitario compacto del lodo en estado natural calculado anteriormente. Se encuentra en el mismo orden de magnitud del valor obtenido por Herrera, 2006 de $701,75 \text{ kg/cm}^3$.

4.3.3. Límites de Atterberg

Al lodo no se le realizaron los límites de Atterberg por presentar poca plasticidad, dado que al colocar la muestra en el aparato de Casagrande, esta se cuarteaba impidiendo realizar el ensayo, lo que ratifica que no se trata de un material arcilloso.

4.3.4. Granulometría

La figura 4.2 muestra la curva granulométrica del lodo, en la cual se puede apreciar que el diámetro de partículas del lodo oscila entre 0,25 a 0,005 mm. El criterio DIN 4022 clasifica el tamaño de las partículas entre 0,25 y 0,06 mm como arena, entre 0,06 y 0,002 mm como limos y menor a 0,002 mm como arcilla.

De acuerdo a esta clasificación aproximadamente el 26% de las partes constituyentes de la muestra es arena, el 71% es limo y solo el 3% es arcilla. Por tanto, nuevamente el lodo de SF puede considerarse un material principalmente limoso con presencia de arenas muy finas y poca arcilla.

Vale destacar que es factible la presencia de estas arenas finas en el lodo ya que el desarenador que existe en la P.T San Felipe posee un tiempo de retención teórico de 4 min aproximadamente y una tasa de desbordamiento superficial de $297 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ con lo que se puede inferir que allí fundamentalmente se remueven las arenas gruesas.

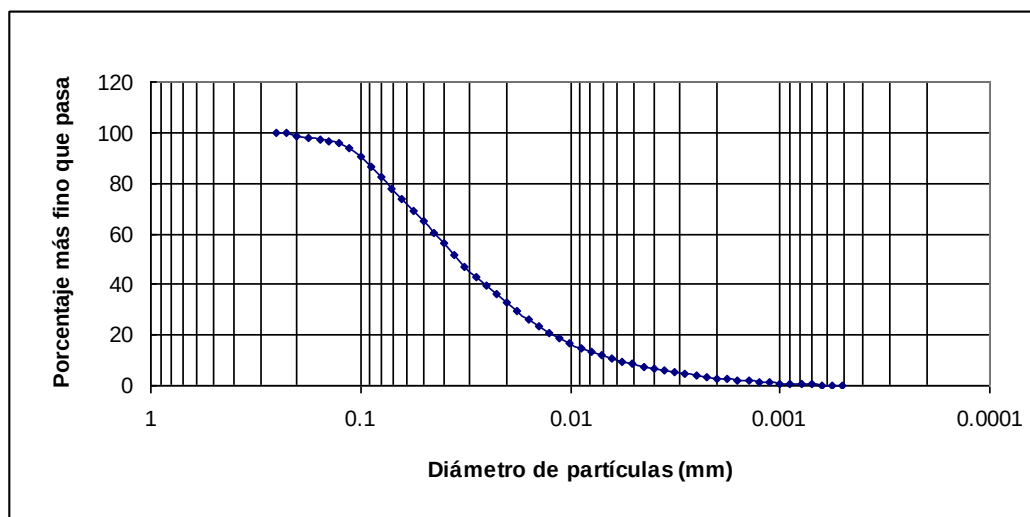


Figura 4.2. Curva granulométrica del lodo de SF

La curva granulométrica del suelo utilizado para realizar la mezcla con suelo, M3-LCS, se presenta en la figura 4.3, observándose que el tamaño de partículas oscila entre 19,1 y 0,074 mm, con lo cual evidentemente se trata de un material más grueso que el lodo. En la figura 4.4 se muestra la comparación entre las curvas granulométricas de lodos y del suelo (incluyendo el lodo utilizado por Herrera, 2006), evidenciándose que el suelo posee partículas de mayor diámetro que el lodo y que el estudiado en este trabajo es más grueso que el utilizado en la investigación de Herrera, 2006, el cual además fue clasificado como un material arcilloso.

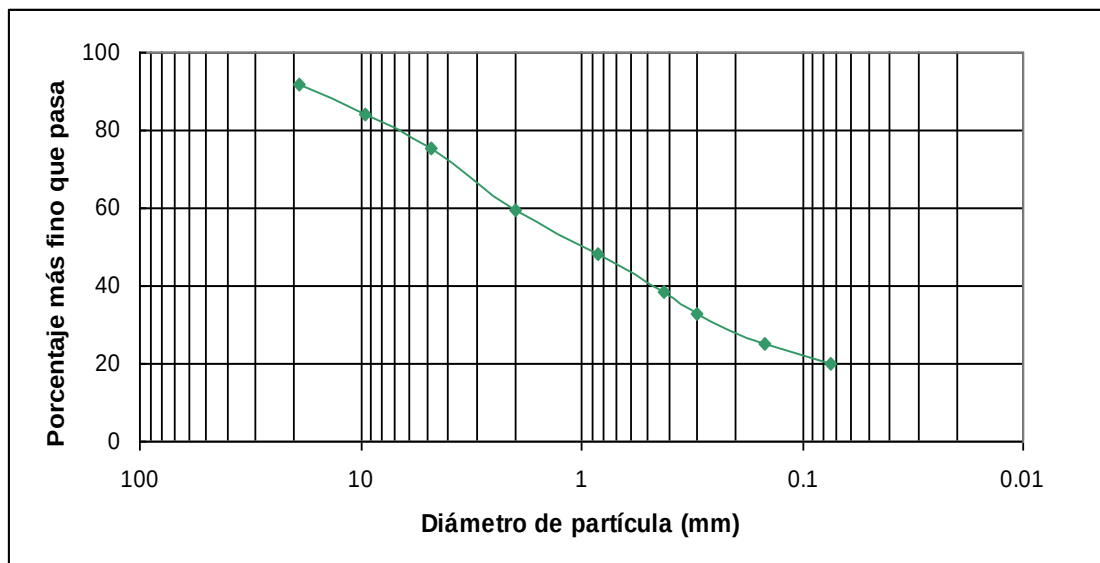
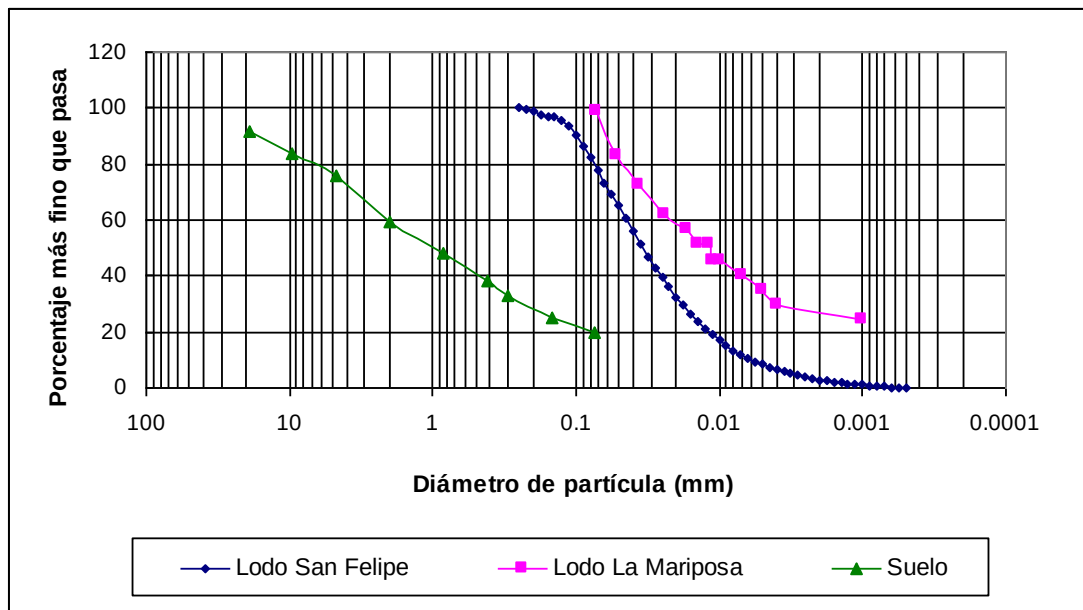


Figura 4.3. Curva granulométrica del suelo utilizado



retracción en el proceso de secado. Por su parte, una de las principales aplicaciones de la moscovita es la aislación térmica. En la figura 4.5 se puede apreciar la difracción del lodo.

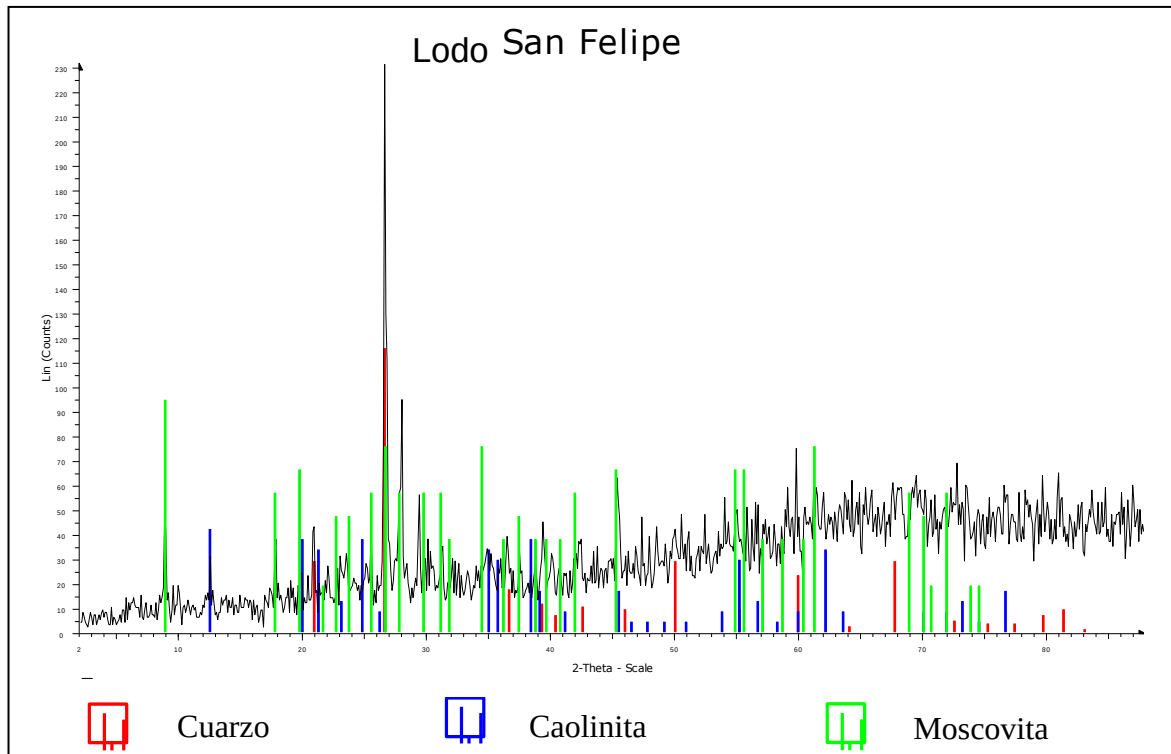


Figura 4.5. Difracción del Lodo de SF

4.4. ANÁLISIS DE MEZCLAS

Al elaborar las mezclas de lodo-cemento (M1-LC), incorporando piedra picada (M2-LCP) e incorporando suelo (M3-LCS) según se indicó en el método, se realizó el ensayo del Cono de Abrams con la finalidad de determinar el asentamiento de las mismas como una manera de definir su comportamiento en cuanto a su trabajabilidad.

La mezcla que presentó más fluidez en términos de trabajabilidad fue la del lodo-cemento (M1-LC), al obtener 5,5 cm de asentamiento, seguida de la que se le incorporó piedra picada (M2-LCP) con 3,4 cm de asentamiento y por último la que contenía suelo (M3-LCS) con 2,2 cm. En la figura 4.6 se observan los valores de asentamiento mencionados anteriormente.

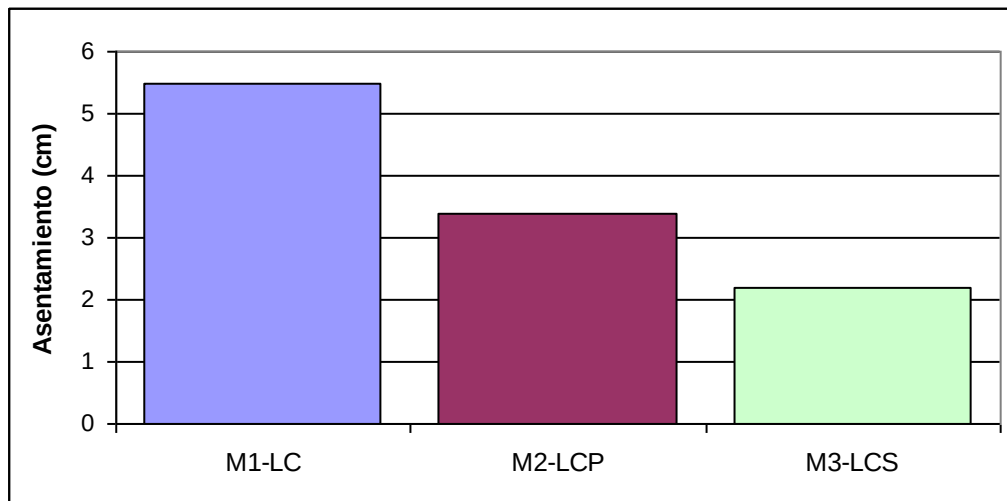


Figura 4.6. Asentamiento de las mezclas

Laura (2006) clasifica la consistencia de una mezcla como seca cuando presenta valores de asentamiento entre 0 y 5 cm, plástica entre 7,5 y 10 cm y fluida cuando sean mayores o iguales a 12,5 cm. Por lo tanto, las mezclas con suelo y piedra pueden ser consideradas secas y la mezcla con solo lodo como seca con un poco de plasticidad. El rango de asentamiento típico para la mayoría de las aplicaciones en concreto es de 7,5 a 10 cm. Esto indica que todas las mezclas presentaron valores de asentamiento menores a los usuales de otro material de construcción típico, aunque los rangos de asentamiento varían de acuerdo al uso que se le vaya a dar al material. A pesar de ser consideradas secas, las mezclas de este trabajo presentaron buena trabajabilidad en su manejo.

El peso unitario compacto en las mezclas estuvo entre 1500 y 2000 kg/m^3 , siendo la más pesada la que contiene suelo (M3-LCS) con un peso unitario compacto de 2022,1 kg/m^3 y la más liviana la que solo tiene lodo (M1-LC) con 1654,4 kg/m^3 , como se observa en la figura 4.7. Aquella mezcla que contiene piedra (M2-LCP) presentó un peso unitario compacto igual a 1893,4 kg/m^3 . Estas mezclas presentaron pesos similares a los obtenidos por Herrera (2006).

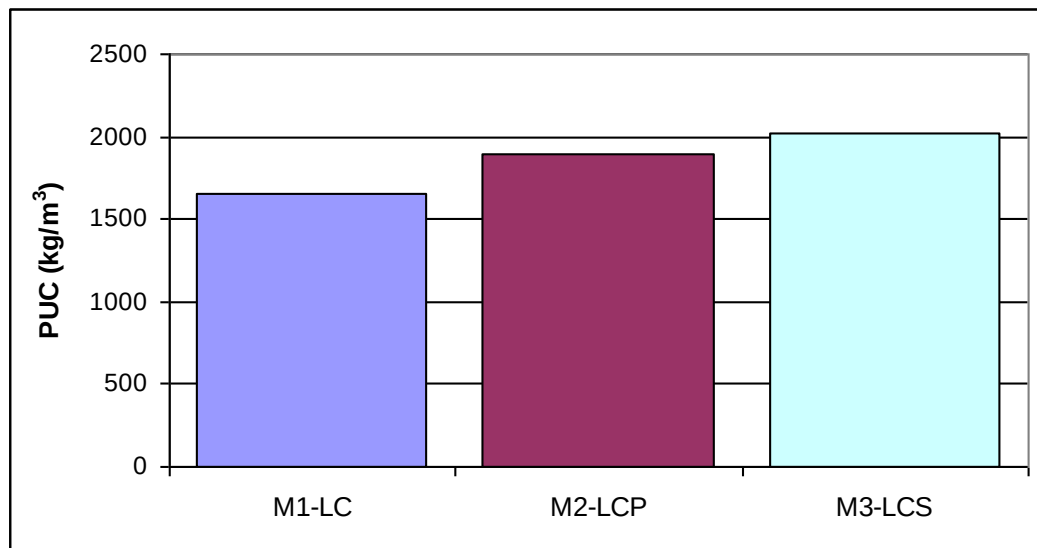


Figura 4.7. Peso unitario compacto de las mezclas

Es importante destacar que las mezclas de concreto presentan pesos unitarios alrededor de 2375 kg/m^3 (González, 2004) por lo que las mezclas estudiadas en este trabajo pueden considerarse como livianas.

4.4.1. Proceso de fraguado

A los 3 días después del vaciado de las probetas se observó que presentaban una consistencia débil y moldeable con los dedos en su superficie, en vista de ello, las probetas de lodo solo y lodo con piedra (M1-LC y M2-LCP) fueron desencofradas a

los 6 días del vaciado, notándose que las probetas retenían gran parte de humedad y que por medio de la formaleta fue más difícil liberar dicha humedad, ya que presentaba una película delgada de agua y gotas (condensación) en la superficie de la formaleta. Esto retrasó el fraguado de las mezclas y después del desencofrado fue notorio el avance en el secado de las probetas, por lo cual esto influye desfavorablemente en las resistencias alcanzadas por las mezclas.

Debido a la experiencia obtenida en cuanto a M1-LC y M2-LCP con respecto al proceso de fraguado, la mezcla con lodo y suelo (M3-LCS) fue desencofrada a la edad de los 3 días para evitar el efecto de condensación, por lo que a los 7 días superficialmente ya se encontraban secas y duras, pudiendo esto haber influido en los resultados obtenidos, en términos de la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta.

Todas las probetas presentaron retracción durante su fraguado, notándose visiblemente una disminución entre 1 y 2 cm en su altura. Esta retracción se puede atribuir al alto contenido de agua utilizado en la mezcla así como a la presencia de finos en el lodo. Una vez secas las probetas presentaron fragilidad en sus bordes, resquebrajándose los mismos solo con su manipulación.

4.5. ENSAYOS

4.5.1. Ensayo de resistencia a la compresión

En la tabla 4.4 se presentan los valores de la resistencia a la compresión promedio de las mezclas analizadas en este trabajo y en la figura 4.8 se pueden visualizar específicamente estos para los 7 días.

A los 7 días, los cilindros de solo lodo (M1-LC) no fueron ensayados por no fraguar a tiempo. Por lo tanto, se ensayaron los cilindros pertenecientes a las mezclas con piedra y suelo (M2-LCP y M3-LCS) siendo esta última la que arrojó el mayor resultado a la compresión con 1,83 kgf/cm² ante el 0,61 kgf/cm² obtenido por la mezcla que contenía piedra. Se observó que en M2-LCP no hubo cohesión entre sus componentes debido a que la piedra se desprendía por sí sola o con gran facilidad del material, lo cual explica este resultado.

Tabla 4.4. Resistencias a la compresión promedio

Mezcla	Rc promedio (kgf/cm ²)	
	7 días	28 días
M1-LC	-	4,14
M2-LCP	0,61	1,44
M3-LCS	1,83	5,73

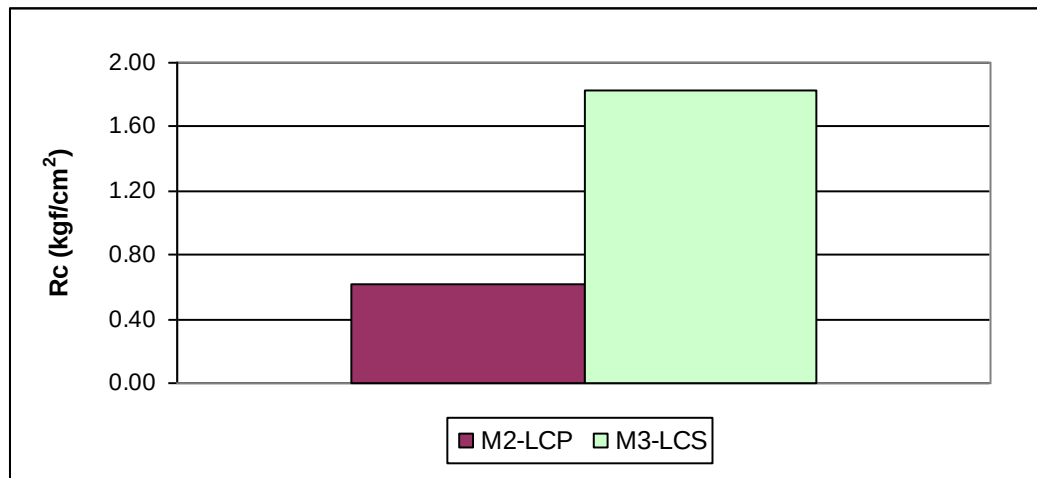


Figura 4.8. Resistencia a la compresión a los 7 días

Todos los cilindros presentaron fallas generalizadas horizontales con desprendimiento de las capas superficiales del material, adicionalmente se evidenció una alta presencia de humedad en el interior de los cilindros. Estos resultados

permiten afirmar que efectivamente el fraguado de este tipo de material utilizando lodo es lento, situación que deberá ser considerada en caso de su utilización, ya que afecta su resistencia al no estar completamente seco.

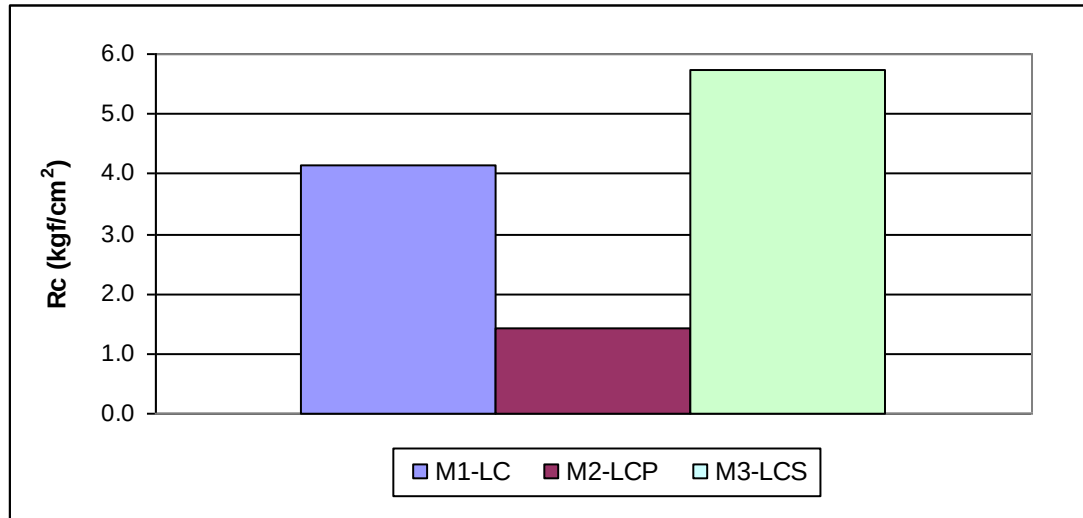


Figura 4.9. Resistencia a la compresión a los 28 días.

Tal como se observa en la figura 4.9, a los 28 días, la mezcla constituida por lodo, cemento y suelo (M3-LCS) presentó la mayor resistencia a la compresión (5,73 kgf/cm²) probablemente porque la distribución de tamaños entre sus componentes permitió una mejor cohesión debido a una mejor degradación de tamaño de partículas y por ende una mayor resistencia.

Por otro lado la resistencia a compresión a los 28 días resultó muy baja para la mezcla con piedra (M2-LCP), lo cual pudo deberse a la diferencia significativa entre la distribución de tamaños de partículas que no propició la efectiva cohesión, situación que se agrava por ser el lodo un material limoso, por lo que estos dos factores afectan la resistencia disminuyéndola.

Al igual que los cilindros ensayados a los 7 días, estos presentaron fallas generalizadas horizontales con desprendimiento de material, tal como se puede observar en la figura 4.10. La mezcla con piedra (M2-LCP) obtuvo el comportamiento más bajo a la compresión de todas las mezclas tanto para los 7 días como para los 28 días.



a-. Principio de falla



b-. Cilindro ensayado

Figura 4.10. Ensayo de resistencia a la compresión

El comportamiento a la compresión varía entre las tres mezclas, sin embargo la mezcla lodo-cemento (M1-LC) representa un 72% de la resistencia alcanzada por la mezcla lodo-cemento-suelo (M3-LCS), por lo que podría considerarse que no es significativamente menor. No ocurrió así cuando se empleó piedra picada de 1" (M2-LCP) cuya resistencia apenas alcanzó un 25% de la mezcla de lodo-cemento-suelo.

Si bien es cierto que estos resultados pueden variar dependiendo del tipo de suelo que se utilice, lo importante a destacar es que es preferible utilizar suelo como agregado en este tipo de mezclas que piedra picada, con lo cual resulta más económica la mezcla para una resistencia a la compresión mayor.

Por otra parte, las mezclas presentan una notable variación en el incremento de su resistencia de acuerdo a las edades, M2-LCP a los 28 días incrementó su resistencia en 2,31 veces con relación a los 7 días, siendo esta el 42% de la resistencia lograda. Asimismo la resistencia de M3-LCS a los 28 días aumentó 3,13 veces, representando la resistencia a los 7 días solo el 32% de la resistencia máxima alcanzada. En mezclas de concreto el factor de incremento en la resistencia por edades varía en un rango entre 1,1 y 1,6, como se observa anteriormente ese factor en las mezclas aquí estudiadas está entre 2 y 3 aproximadamente, por lo que es notable el aumento acelerado de la resistencia entre los 7 y 28 días, lo cual se atribuye al secado de las probetas, ya que a los 7 días aún se encontraban húmedas.

Como se mencionó anteriormente en el método, para elaborar las mezclas de lodo-cemento en forma empírica, se tuvo que añadir agua hasta que las mezclas presentaron trabajabilidad. El alto contenido de agua en proporción a la cantidad de cemento establecido en el diseño afectó la relación agua/cemento de estas mezclas siendo este otro factor que disminuyó la resistencia de las mismas.

Uno de los objetivos presentados en este trabajo es la comparación del resultado de esta investigación con valores de otras mezclas convencionales y no convencionales estabilizadas con cemento, recordando que dentro de las mezclas no convencionales se encuentran aquellas con lodos de potabilización y de aguas residuales como agregado. Es por esto que a continuación y en lo que resta de este capítulo se presentaran diversos análisis comparativos.

La tabla 4.5 muestra valores de resistencia a la compresión de mezclas de lodo-cemento con lodos tanto de potabilización como de aguas residuales, reportados en el marco teórico y las figuras 4.11 y 4.12 presentan dichos valores gráficamente para los 7 y 28 días respectivamente.

Tabla 4.5. Resistencia a la compresión de distintas mezclas de lodo-cemento

	Mezcla	Composición de la mezcla	Rc (kgf/cm ²)	
			7 días	28 días
Herrera, 2006	LCA2	13% cemento, 43,5% lodo, 43,5% arena	2,62	-
	LCP	13% cemento, 50,7% lodo, 36,3% piedra	1,9	-
	LCS	13% cemento, 43,5% lodo, 43,5% suelo.	2,72	-
	LC3	13% cemento, 86,7% lodo	-	2,46
Larios, 2005	M0	52% arena, 22% grava, 26% cemento, 0% lodo	-	144,44
	M25	39% arena, 16,5 grava, 19,5% cemento, 25% lodo	-	451,5
	M50	26% arena, 11 grava, 13% cemento, 50% lodo	-	11,11
Menni, 2005	L1	10 % (v/v) de lodos	-	100,76
	L2	15 % (v/v) de lodos	-	86,79
	L3	20 % (v/v) de lodos	-	68,41
	L4	25 % (v/v) de lodos	-	60,91
Hernández, 2006	B1	75% arcilla, 25% arena, 0% lodo residual	176,9	126
	B2	75% arcilla, (22,5-15%) arena, (2,5-10%) lodo residual	8	8,4
	B3	75% arcilla, (12,5-2,5%) arena, (12,5-22,5%) lodo residual	30	31,2
	B4	75% arcilla, 0% arena, 25% lodo residual	9,6	11,6
Vargas, 2004	M1	100% cemento, 0% lodo residual	-	79
	M2	75% cemento, 25% lodo residual	-	11,22
	M3	50% cemento, 50% lodo residual	-	10,20
	M4	25% cemento, 75% lodo residual	-	8,16
C, 2000	ECOBRIK	30% lodos residuales, 5% residuos forestales y 65% arcillas	-	7,14
2009	M1-LC	13,% cemento, 87% lodo	-	4,14
	M2-LCP	13% cemento, 43,5% lodo, 43,5% piedra.	0,61	1,44
	M3-LCS	13% cemento, 43,5% lodo, 43,5% suelo.	1,83	5,73

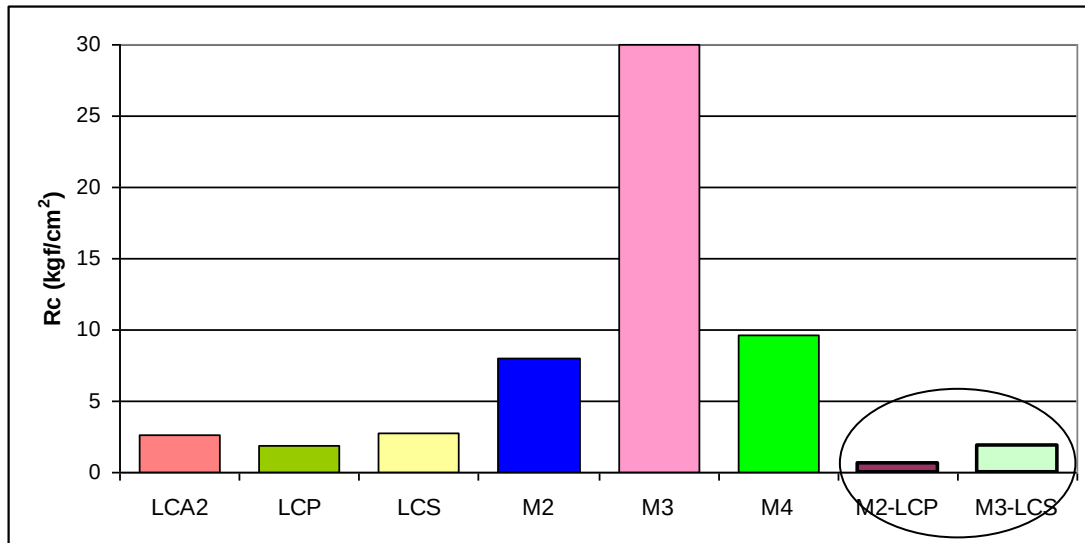


Figura 4.11. Comparación de resistencia a la compresión a los 7 días de distintas mezclas de lodo-cemento

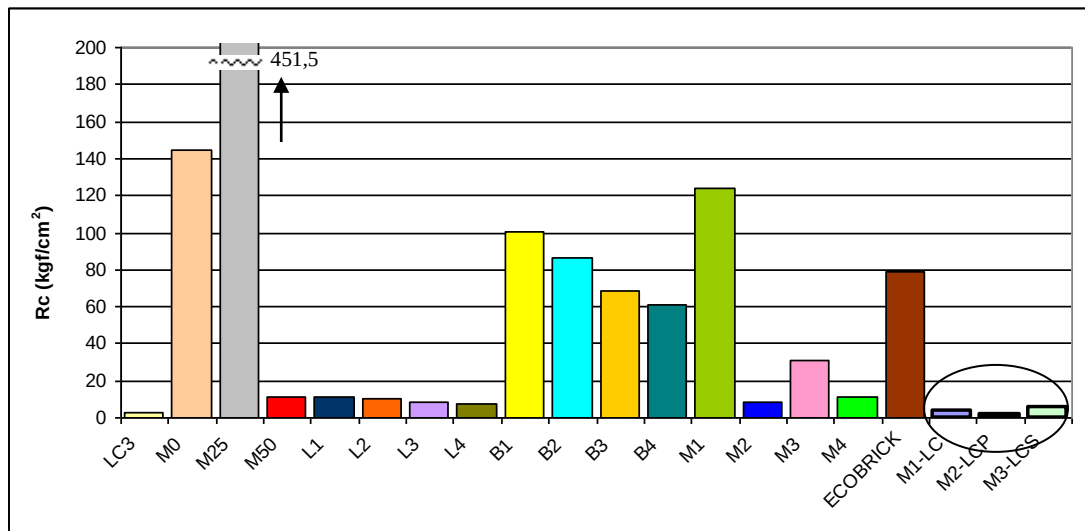


Figura 4.12. Comparación de resistencia a la compresión a los 28 días de distintas mezclas de lodo-cemento

Para los 7 días las mezclas ensayadas en este trabajo presentaron un comportamiento inferior en relación a las otras mezclas con lodo contrastadas,

inclusive para los 28 días se presentó el mismo comportamiento, a excepción de LC3, mezcla con el mismo porcentaje de composición que M1-LC, la cual alcanzó una resistencia 68% mayor que LC3, lo que se atribuye a que el lodo utilizado en esta investigación posee menor contenido de materia orgánica con respecto al utilizado para LC3 mejorando así la resistencia mecánica.

Cabe destacar que la proporción de lodo presente en cada una de las mezclas varía notablemente, siendo en su mayoría inferior al utilizado en este trabajo. Asimismo, en algunos casos los materiales no se encuentran bajo las mismas condiciones ya que estos son sometidos a altas temperaturas para producir ladrillos, influyendo en los valores de resistencia obtenidos sobre todo por la disminución del contenido orgánico en el material.

Valores de resistencia a la compresión obtenidos con otras mezclas estabilizadas con cemento se presentan en la tabla 4.6 y en las figuras 4.13 y 4.14.

Tabla 4.6. Resistencia de distintas mezclas estabilizadas con cemento.

Mezcla	Rc (kgf/cm ²)	
	7 días	28 días
Suelo-cemento Rodríguez et al., 2002	23,5	25,1
Ripio de Cantera Korody, 1998	4,15	4,64
PET-cemento Luis et al., 2005	60,71	180,61
M1-LC	-	4,14
M2-LCP	0,61	1,44
M3-LCS	1,83	5,73

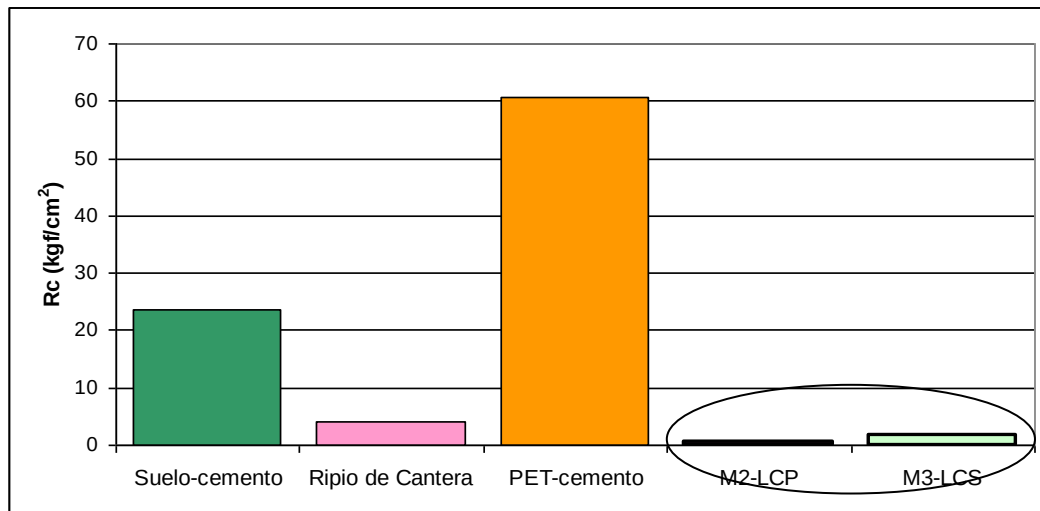


Figura 4.13. Comparación de resistencia a la compresión a los 7 días de distintas mezclas estabilizadas con cemento

Comparando los valores obtenidos de resistencia a la compresión a los 7 días con probetas elaboradas con otros agregados, se observa que la resistencia alcanzada es inferior a los valores arrojados por otros materiales, influyendo el hecho de que a los 7 días las probetas se encontraban húmedas internamente.

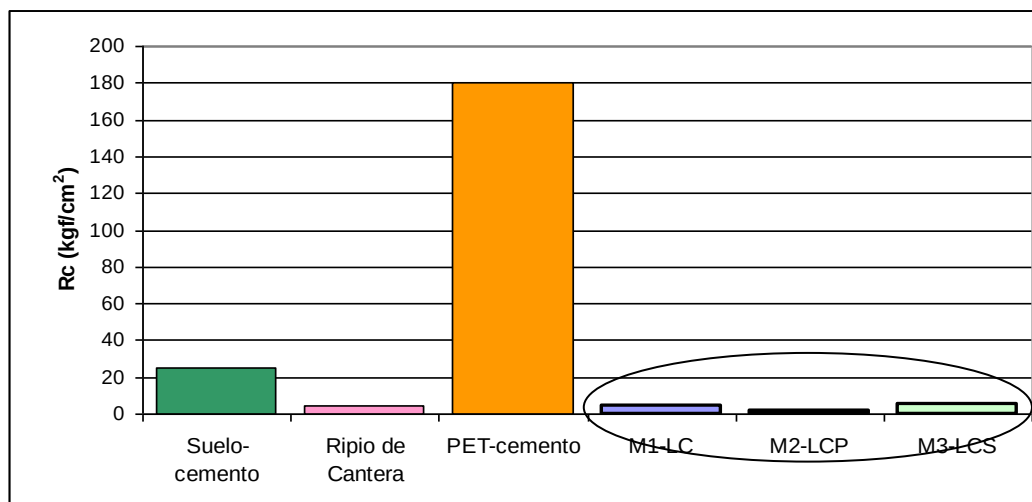


Figura 4.14. Comparación de resistencia a la compresión a los 28 días de distintas mezclas estabilizadas con cemento

La mezcla de lodo-cemento-suelo (M3-LCS) logró desarrollar una resistencia a la compresión a los 28 días superior aproximadamente en un 20% cuando se utiliza ripio de cantera como agregado, siendo este material recomendado para algunos usos constructivos que no requieran de mucha carga, por lo que el lodo-cemento con incorporación de suelo podría también ser utilizado en estas aplicaciones, lo que hace a este nuevo material factible para uso en el campo de la construcción. Dentro de este contexto, el suelo-cemento y el PET-cemento presentaron valores muy superiores a las mezclas ensayadas en este trabajo.

Las bajas resistencias a los 7 días en comparación con otros materiales ya sean con lodos o estabilizados con cemento se pueden atribuir al hecho de que a esa edad los cilindros aún estaban húmedos en su interior como se evidenció durante el ensayo a la compresión, atribuyendo así estos resultados al lento fraguado de las mezclas lodo-cemento, con o sin agregados.

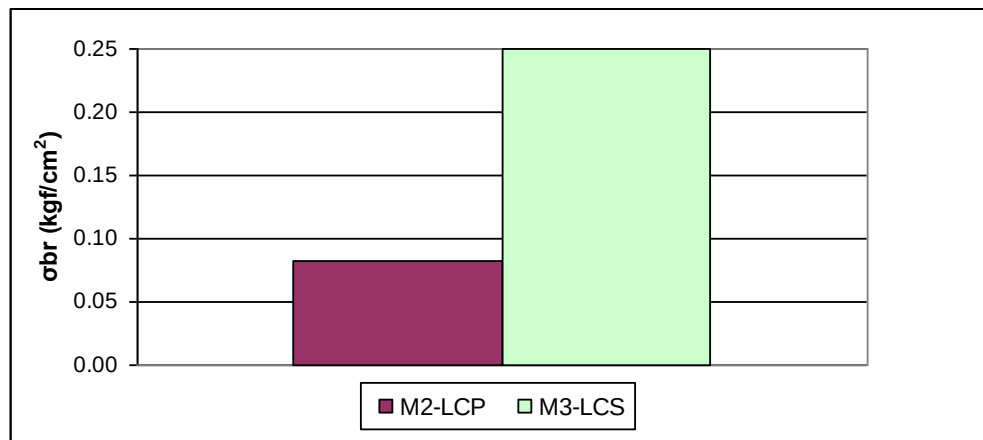
4.5.2. Ensayo de tracción indirecta sobre cilindros

Los valores promedio obtenidos del ensayo a la tracción indirecta se muestran en la tabla 4.7 y se visualizan gráficamente para los 7 días en la figura 4.15.

Los valores logrados a los 7 días equivalen al 13% de la resistencia alcanzada a la compresión en el caso de M2-LCP y al 13,7% para M3-LCS. Los cilindros mostraron fallas generalizadas longitudinales y al igual que los cilindros ensayados a compresión, estos presentaron humedad internamente.

Tabla 4.7. Resistencia a la tracción indirecta promedio

Mezcla	σ_{br} promedio (kgf/cm ²)	
	7 días	28 días
M1-LC	-	0,56
M2-LCP	0,08	0,31
M3-LCS	0,25	-

**Figura 4.15. Resistencia a la tracción indirecta a los 7 días**

En la figura 4.16 se observan los resultados para los 28 días. Los valores alcanzados correspondientes a las mezclas de solo lodo y aquella que contenía piedra (M1-LC y M2-LCP) son 0,56 kgf/cm² y 0,31 kgf/cm² respectivamente, estos resultados representan el 13,5% de la resistencia a la compresión para M1-LC y el 21,5% para M2-LCP. También presentaron fallas generalizadas longitudinales, como se observa en la figura 4.17. En líneas generales se puede decir que los resultados obtenidos corresponden aproximadamente al 13% de la resistencia a la compresión.

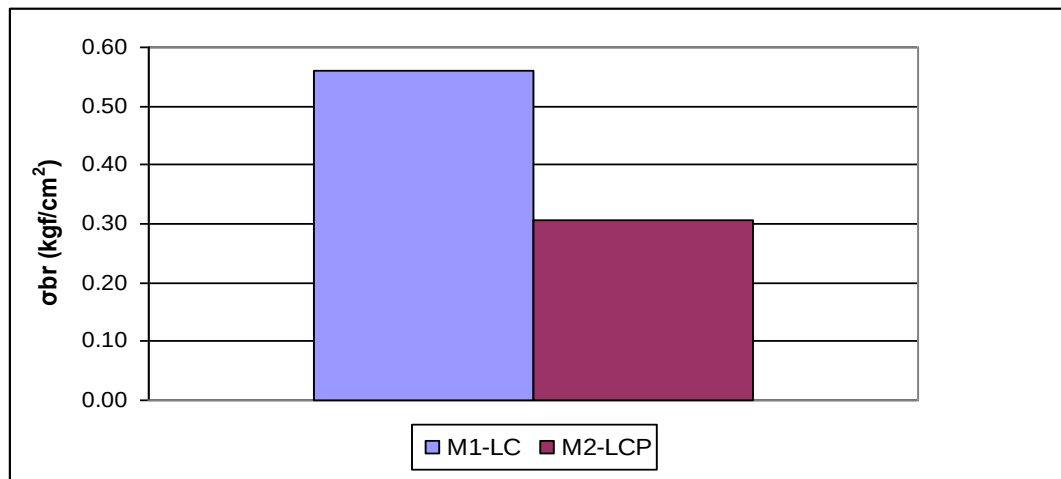


Figura 4.16. Resistencia a la tracción indirecta a los 28 días



a-. Principio de falla



b-. Cilindro ensayado

Figura 4.17. Ensayo a la tracción indirecta

En la tabla 4.8 y en la figura 4.18 se presentan los valores de resistencia a la tracción indirecta de otras mezclas de lodo-cemento y las obtenidas en este trabajo. Los resultados obtenidos reflejan que para los 7 días no superan los valores de resistencia de otras mezclas de lodo.

Sin embargo, a los 28 días la mezcla de lodo-cemento (M1-LC) fue superior a los valores obtenidos para LC3 en un 55% por la diferencia entre contenidos de materia orgánica mencionada anteriormente. Estos resultados se pueden apreciar en las figuras 4.19.

Tabla 4.8. Resistencia a la tracción indirecta de otras mezclas de lodo-cemento

	Mezcla	σ_{br} (kgf/cm ²)	
		7 días	28 días
Herrera, 2006	LCA2	0,39	-
	LCP	0,25	-
	LCS	0,41	-
	LC3	-	0,36
2009	M1-LC	-	0,56
	M2-LCP	0,08	0,31
	M3-LCS	0,25	-

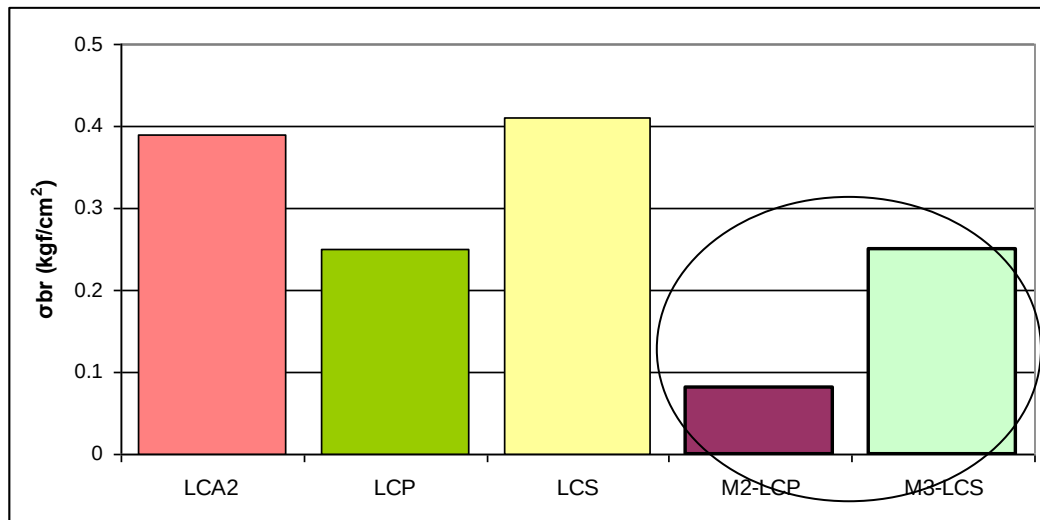


Figura 4.18. Comparación de resistencia a la tracción indirecta a los 7 días de mezclas de lodo-cemento

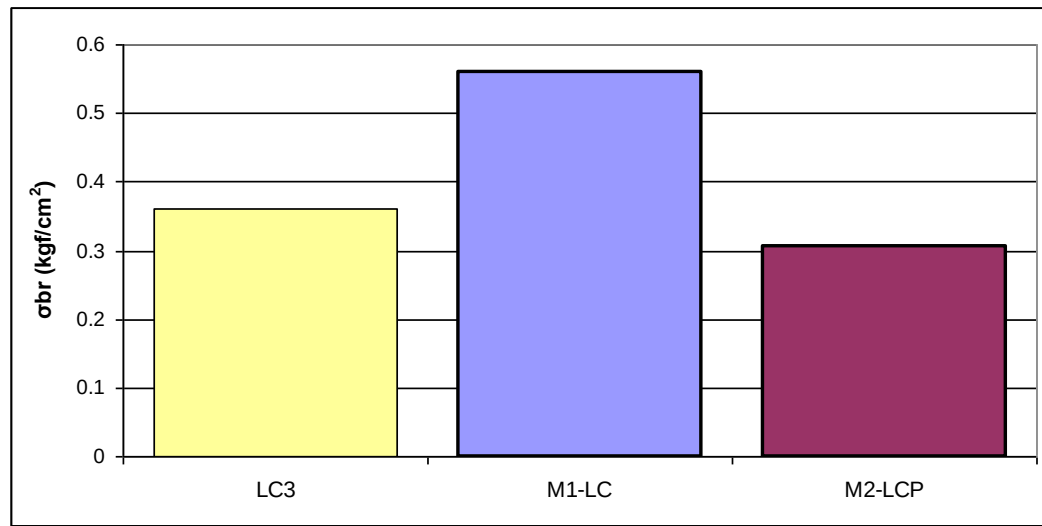


Figura 4.19. Comparación de resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de mezclas de lodo-cemento

La resistencia a tracción en concretos con agregados livianos suele estar comprendida entre el 10 y el 12% de la resistencia a la compresión por lo que los resultados de las mezclas de lodo-cemento se encuentran ligeramente por encima de este orden de magnitud.

Convencionalmente, en suelo-cemento los valores obtenidos por el ensayo de la tracción indirecta representan 20% de la resistencia a la compresión, en este trabajo solo la mezcla con incorporación de piedra (M2-LCP) alcanzó el 20% de la resistencia a la compresión, sin embargo esta fue la mezcla que presentó el comportamiento más bajo a la compresión.

4.5.3. Ensayo de Absorción

Los valores promedio de absorción a los 28 días obtenidos para las mezclas ensayadas en este trabajo, se encuentran en un rango entre 20 y 40%, indicando que el

material presenta gran absorción de humedad. Estos resultados se pueden visualizar en la figura 4.20 y en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Absorción promedio

Absorción (%)		
M1-LC	M2-LCP	M3-LCS
38,6	28,7	23,6

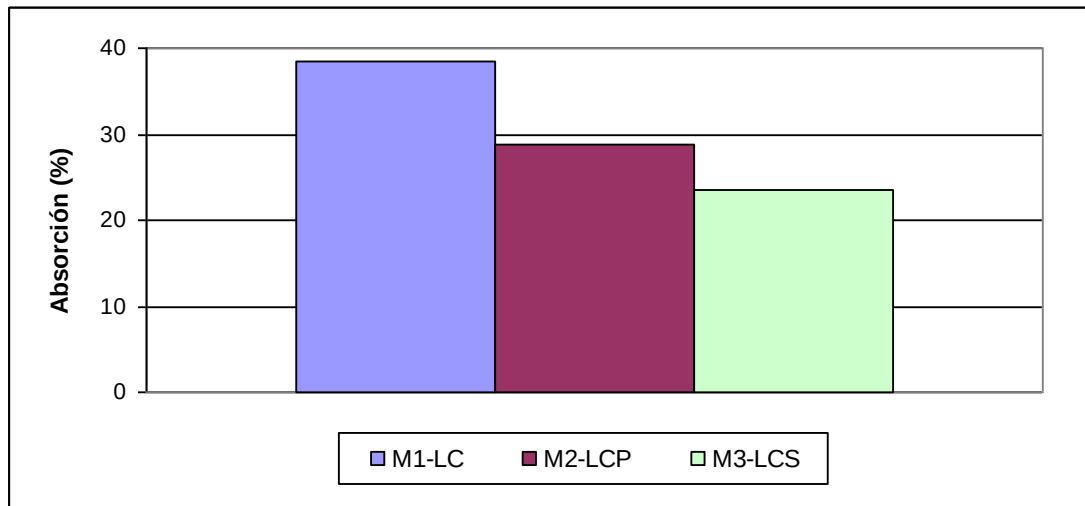


Figura 4.20. Absorción

La alta absorción de la mezcla M1-LC puede estar relacionada con la cantidad de lodo en la misma, debido a que es la que posee mayor contenido de lodo, ya que cuanto mayor es la cantidad de lodo en la mezcla, aumenta la absorción de agua, lo que implica también un aumento en la porosidad del material lodo-cemento, con lo cual se podría explicar su menor resistencia a la compresión cuando se compara con la mezcla en la que se agregó suelo.

La tabla 4.10 y la figura 4.21 presentan valores de absorción de agua de otras mezclas elaboradas con lodo.

Tabla 4.10. Valores de Absorción de mezclas de lodo-cemento

	Mezcla	Composición de la mezcla	Absorción (%)
Herrera, 2006	LCA2	13% cemento, 43,5% lodo, 43,5% arena	9,30
	LCP	13% cemento, 50,7% lodo, 36,3% piedra	5,97
	LCS	13% cemento, 43,5% lodo, 43,5% suelo	4,75
	LC3	13% cemento, 87% lodo	12,26
L., 2005	M50	26% arena, 11 grava, 13% cemento, 50% lodo	7,14
Menni ., 2005	L1	10 % (v/v) de lodos	16,00
	L2	15 % (v/v) de lodos	16,00
	L3	20 % (v/v) de lodos	17,50
	L4	25 % (v/v) de lodos	18,50
Hernández, 2006	B1	75% arcilla, 25% arena, 0% lodo residual	16,91
	B2	75% arcilla, (22,5-15%) arena, (2,5-10%) lodo residual	18,61
	B3	75% arcilla, (12,5-2,5%) arena, (12,5-22,5%) lodo residual	14,58
	B4	75% arcilla, 0% arena, 25% lodo residual	25,99
Vargas , 2004	M1	100% cemento, 0% lodo residual	10,19
	M2	75% cemento, 25% lodo residual	60,31
	M3	50% cemento, 50% lodo residual	86,76
2009	M1-LC	13% cemento, 87% lodo	38,56
	M2-LCP	13% cemento, 43,5% lodo, 43,5% piedra	28,74
	M3-LCS	13% cemento, 43,5% lodo, 43,5% suelo	23,58

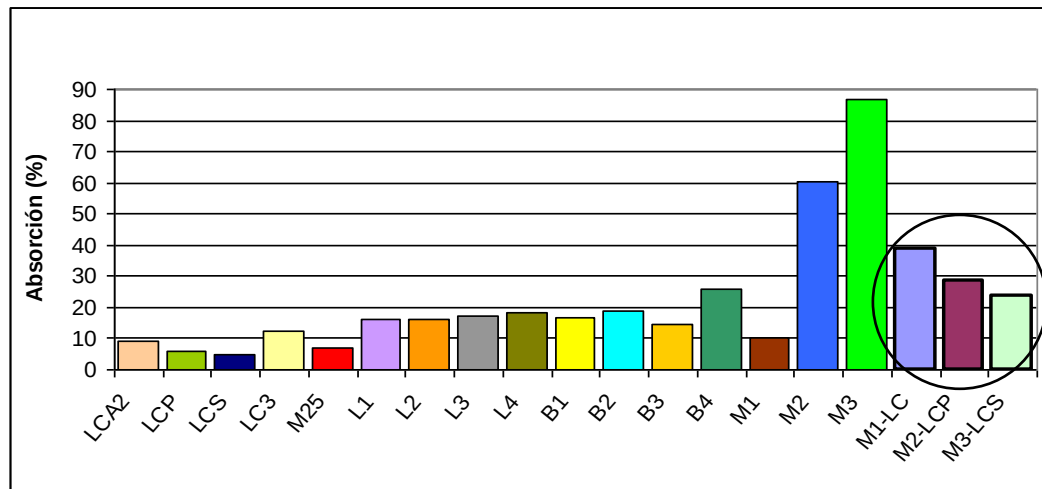


Figura 4.21. Comparación de absorción de mezclas de lodo-cemento

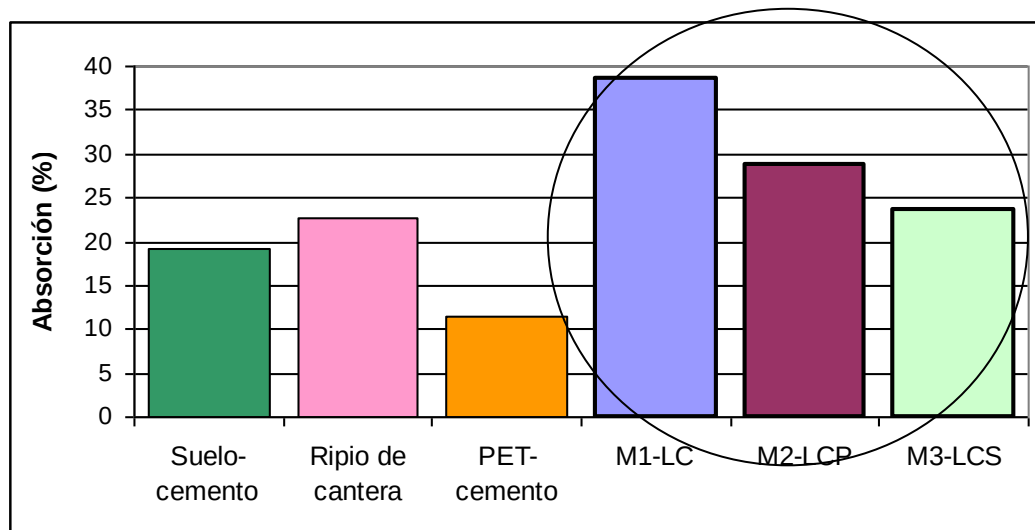
Como se puede observar las mezclas ensayadas en este trabajo presentan valores de absorción superiores a la mayoría de otras mezclas con lodo, a excepción de M2 y M3, estas están compuestas de lodos residuales, estos por su alto contenido de materia orgánica poseen mayor absorción de agua debido al efecto de volatilización.

Las mezclas objeto de estudio en este trabajo presentan valores superiores de absorción, posiblemente a que el lodo de San Felipe es limoso por lo cual tiene un tamaño de granos mayor en comparación con otras mezclas, como por ejemplo las estudiadas por Herrera (2006), lo que hace que absorba mayor cantidad de agua ya que genera un material con mayor porosidad.

En relación con otras mezclas estabilizadas con cemento, los valores obtenidos se encontraron por encima de los reportados en la Tabla 4.11. Cabe señalar que M3-LCS se sitúa en el mismo orden de valores que suelo-cemento y el ripio de cantera como se puede observar en la figura 4.22, por lo cual se sigue calificando con posibilidades de uso para la construcción como lo puede ser el suelo-cemento o ripio de cantera.

Tabla 4.11. Absorción de distintas mezclas estabilizadas con cemento

Mezcla	Absorción (%)
Suelo-cemento Rodríguez et al., 2002	19,12
Ripio de Cantera Korody, 1998	22,68
PET-cemento Luis et al., 2005	11,38
M1-LC	38,56
M2-LCP	28,74
M3-LCS	23,58

**Figura 4.22. Comparación de absorción entre distintas mezclas estabilizadas con cemento**

Un valor usual de porosidad de concreto sería de 11%, los bloques de arcilla para losas nervadas manejan un 25% de absorción de agua promedio (COVENIN 4-82) y los bloques de concreto huecos para paredes que no soportan cargas, admiten un 20% de absorción máxima de agua (COVENIN 42-82).

Las mezclas analizadas en este trabajo se encuentran por encima del rango de absorción de humedad del concreto por lo que hace una vez más que el lodo-cemento

pueda ser considerado como un material para su uso no estructural. No obstante, la mezcla con suelo (M3-LCS) obtuvo un porcentaje de absorción que puede ser aceptado por los exigidos en la norma COVENIN 4-82 ubicándolo nuevamente como factible para su uso en la construcción por lo menos en términos de durabilidad.

Por otra parte, la absorción es una característica que se puede relacionar con la resistencia a compresión del material, debido a que a mayor absorción de humedad del material, este posee menor resistencia a la compresión. Por lo tanto, la mezcla con incorporación de suelo (M3-LCS) fue la que presentó menor porcentaje de absorción y a su vez la mayor resistencia a la compresión de las tres mezclas ensayadas en este trabajo.

4.5.4. Ensayo de Erosión

En el ensayo de erosión por cepillado se obtuvo una pérdida de material entre 0,02 y 0,28% (ver tabla 4.12 y figura 4.23), siendo la mezcla con piedra la de menor pérdida, aunque el valor obtenido por la mezcla con suelo es muy cercano a esta última, siendo despreciable la diferencia entre ambos resultados. La diferencia entre las tres mezclas fue significativa con la que tenía solo lodo y cemento, lo cual evidentemente la hace más susceptible al desgaste, pues tiene menor cohesión ya que se trata de una mezcla con material fino solamente. Los resultados del ensayo de erosión corresponden a los 28 días.

Tabla 4.12. Pérdida de material promedio

Pérdida de Material (%)		
M1-LC	M2-LCP	M3-LCS
0,28	0,02	0,03

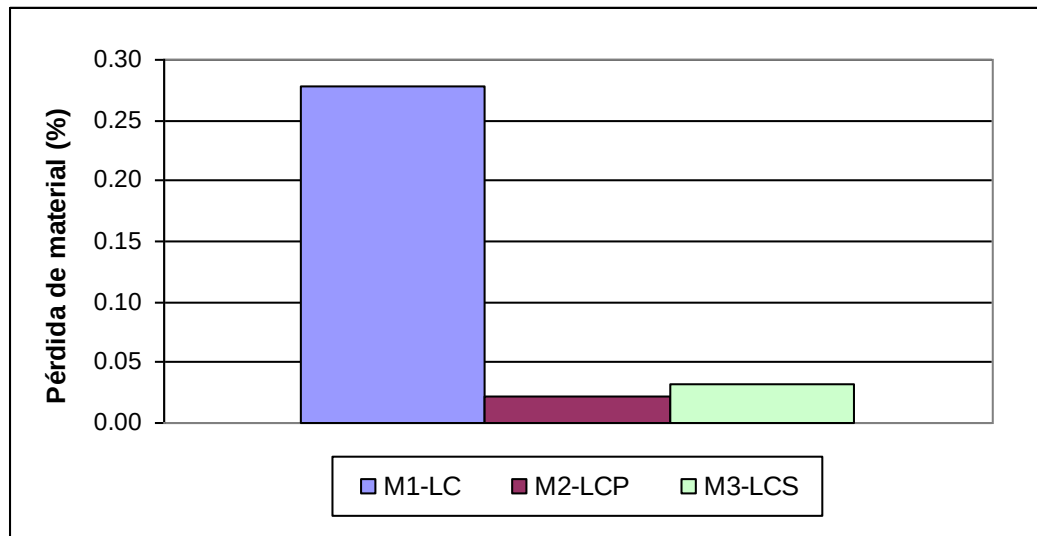


Figura 4.23. Porcentaje de pérdida de material

La tabla 4.13 y la figura 4.24 presentan la comparación de los valores alcanzados por las mezclas estudiadas en este trabajo con otros materiales. Los resultados obtenidos se ubicaron muy por debajo de todos ellos, a excepción de M1-LC que está por encima del PET-cemento y es la que posee el comportamiento más bajo de durabilidad con respecto a las otras mezclas analizadas en esta investigación. Esta situación evidencia que las mezclas de lodo-cemento, con otros agregados como suelo y piedra pueden generar un material durable factible para su uso en la construcción siempre y cuando se cuiden los otros aspectos como la presencia de finos, materia orgánica, granulometría, entre otros.

Tabla 4.13. Pérdida de material de distintas mezclas

Mezcla		Pérdida de Material (%)
Suelo-cemento Rodríguez et al., 2002		0,31
PET-cemento Luis et al., 2005		0,16
Herrera, 2006	LCA2	8,70
	LCP	15,57
	LCS	2,37
	LC3	4,09
M1-LC		0,28
M2-LCP		0,02
M3-LCS		0,03

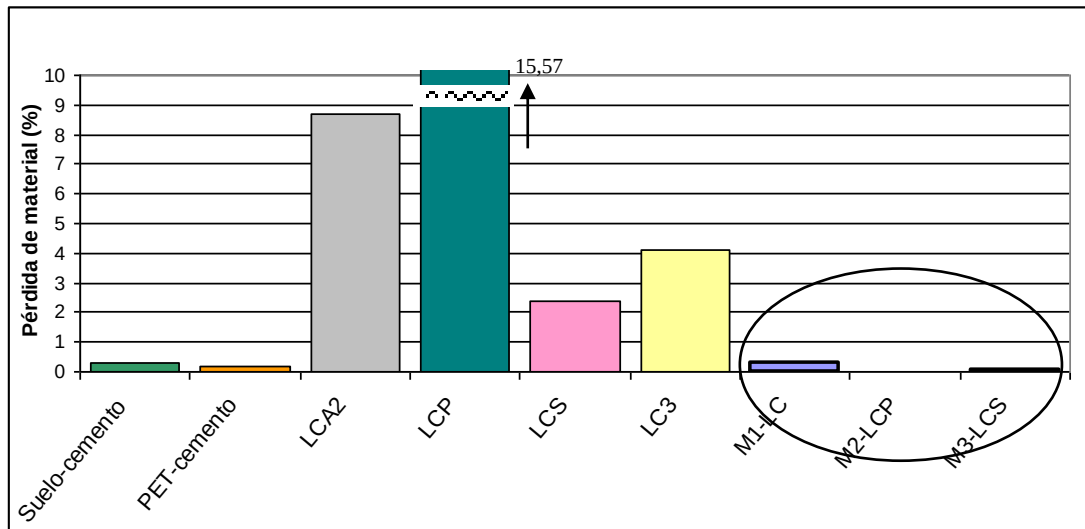


Figura 4.24. Comparación de pérdida de material

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo con su posterior análisis permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- ◆ El contenido de materia orgánica y composición de los lodos varía significativamente de una planta potabilizadora a otra y también en una misma planta.
- ◆ El lodo de SF es un material limoso, con baja cantidad de arcilla, contenido de humedad elevado y puede considerarse como un material muy fino y liviano.
- ◆ La difracción de Rayos X del lodo reportó que el cuarzo, la moscovita y la caolinita son minerales presentes en el lodo que le confieren baja plasticidad y poca cohesión al material.
- ◆ Las mezclas realizadas con el lodo presentan buena trabajabilidad pero tiempos de fraguado relativamente largos.
- ◆ Las mezclas lodo-cemento son livianas en comparación con otros materiales convencionales.

- ◆ La mayor resistencia a la compresión la alcanzó la mezcla de lodo-cemento-suelo ($5,73 \text{ kgf/cm}^2$) seguida de la mezcla de lodo-cemento ($4,14 \text{ kgf/cm}^2$) y por último la mezcla lodo-cemento-piedra ($1,44 \text{ kgf/cm}^2$).
- ◆ El coeficiente de absorción de los cilindros de lodo-cemento estuvo entre un 20 y 40%.
- ◆ En general, todas las mezclas presentaron poca erosión sin embargo, las probetas ensayadas presentaron fragilidad en sus bordes.
- ◆ A los 7 días las mezclas de lodo-cemento no superaron los resultados de resistencia a la compresión de otras mezclas con agregados convencionales y no convencionales estabilizadas con cemento debido a la presencia de humedad interna en las probetas.
- ◆ Las mezclas con solo lodo y con agregado de suelo (M1-LC y M3-LCS) alcanzaron a los 28 días una resistencia equivalente a la presentada cuando se utiliza el ripio de cantera como agregado.
- ◆ Del análisis del comportamiento mecánico y físico de las mezclas se concluye que, la mezcla constituida por lodo-cemento y suelo (M3-LCS) fue la que obtuvo el mejor comportamiento.

- ◆ El ensayo colorimétrico permite establecer que un valor menor o igual a 2 conduce a lodos con bajo contenido de materia orgánica.
- ◆ Las mezclas de lodo-cemento, particularmente con suelo (M3-LCS) pueden utilizarse como material de construcción para fines no estructurales.

5.2. RECOMENDACIONES

- ◆ Llevar a cabo una investigación donde se elimine totalmente la materia orgánica en el lodo y por ende a las mezclas de lodo-cemento.
- ◆ Fomentar investigaciones de las características de lodos provenientes de sedimentadores de plantas de tratamiento de potabilización de aguas del país utilizando Difracción de Rayos X.
- ◆ Aplicar métodos alternativos más prácticos para el secado y pulverizado del lodo, que facilite el uso posterior del mismo como agregado en la mezcla.
- ◆ Desarrollar una metodología para determinar el porcentaje de absorción de humedad del lodo.
- ◆ Establecer una dosificación óptima de agua para las mezclas de lodo-cemento.
- ◆ Estudiar la factibilidad de inclusión del lodo en la constitución de materiales para la realización de alfarería.
- ◆ Evaluar la modificación del comportamiento de la mezcla lodo-cemento utilizando arena como agregado, considerando los costos asociados de esta inclusión.
- ◆ Construir bloques con mezclas lodo-cemento para evaluar el comportamiento de los mismos y definir su funcionamiento como material de construcción.

- ◆ Realizar una investigación bajo las mismas proporciones de los componentes en las mezclas utilizando lodos residuales.
- ◆ Estudiar la aplicación de las mezclas de lodo-cemento en jardineras, muros perimetrales de poca altura o vivienda de bajo costo con techo liviano.
- ◆ Realizar el ensayo colorimétrico antes de iniciar la logística del traslado de lodos para verificar el contenido de materia orgánica.
- ◆ Evaluar la inclusión de lodos en mezclas secas compactadas.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Albareda, F. (2003). *Durabilidad de Hormigones con adición de lodos secos de depuradora de aguas residuales*. [Documento en línea]. Trabajo Especial de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible: <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/3387>. [Consulta: Noviembre, 23].
2. American Water Work Association. (1998). *Water Treatment Plant Design*. 3ra ed. Estados Unidos de América. Mc Graw-Hill.
3. Arboleda, J. (2000). *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua*. 3ra ed. Colombia: Mc GrawHill.
4. Blanco, H. y Najul, M. (2003). *Manejo Eficiente de Plantas de Tratamiento para Potabilización de Aguas*. Instituto Tecnológico, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
5. Berretta, H., Arguello, R., Gatani, M. y Gaggino, R. (2005). *Nuevos materiales para la construcción: Los plásticos reciclados*. [en línea]. Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE). Disponible: http://www.ave.org.ar/plastico_reciclado_pet.pdf. [Consulta: 2008, Noviembre 03].
6. Cabezas, C., Bolaños, G. y Salazar, A. (2001, Agosto). *Materiales de construcción a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, mediante infiltración con dióxido de carbono supercrítico*. [Documento en línea]. Ponencia presentada en el XXI Congreso Colombiano de Ingeniería Química, Bogotá. Disponible: <http://supercriticos.univalle.edu.co/Publicaciones.htm>. [Consulta: 2008, Noviembre 23].

7. Castañeda Sarabia, O. (2000). *Determinación de la Toxicidad de los Lodos Generados por una Planta Potabilizadora, Utilizando Bioensayos*. [en línea]. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Disponible: <http://potablewater.iespana.es/toxicidad%20de%20lodos.pdf>. [Consulta: 2008, Noviembre 03].
8. Chávez, A., Lima, R., de y Mar, D. (s.f). *Viabilidade técnica da incorporaçõ do lodo dos decantadores da estação de tratamento de água de campinas e agregados reciclados miúdos em blocos de concreto*.
9. Cusidóp, J. y Cremades, L. (2000). *Nuevos materiales cerámicos para la construcción mediante valorización de lodos de aguas residuales urbanas: Proyecto Ecobrick*. [en línea]. Disponible: http://www.aepro.com/congresos/2000_1/pdf/CH01.pdf. [Consulta: 2008, Noviembre 02].
10. Di Bernardo, L. (2009, Octubre). *Tecnologías de Tratamiento de los residuos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas*. Ponencia presentada en las VII Jornadas de Ferralca y Empresas Hidrológicas “Ing. Humberto Antonorsi”, Caracas.
11. Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S. y Vitoux, F. (1990). *Construir con tierra*. Tomo II. Colombia: Fondo Rotatorio Editorial.
12. Garcés, F., Díaz, J.C. y Dellepiane, O. (1996, Noviembre). *Acondicionamiento de lodos producidos en el Tratamiento de Agua Potable*. Ponencia presentada en el XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, México.

13. González, F. (2004). *Manual de Supervisión de Obras de Concreto*. [Libro en línea]. Editorial Limusa S.A. Disponible: http://books.google.co.ve/books?id=d_ufCPVAYtIC&pg=PA46&lpg=PA46&dq=peso+concreto+fresco&source=bl&ots=yxZjBRuXny&sig=GM3gScLOPdj6dEOq1wenum4mW7k&hl=es&ei=mS6rSrzsAYfslAfJ2MXMBg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=2#v=onepage&q=peso%20concreto%20fresco&f=false. [Consulta: 2009, Agosto 20].
14. Hernández, D., Villegas, J.D., Castaño, J.M. y Paredes, D. (2006). Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistemas de potabilización, mediante su incorporación como agregados en materiales de construcción. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*, [Revista en línea], vol.5, no.8, 119-132. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/750/75050810.pdf>. [Consulta: 2009, Junio 10].
15. Herrera, W. (2006). *Análisis del comportamiento de las mezclas de lodo-cemento como nuevo material de construcción*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
16. Korody, M.E. (1998). *Estudio de la Factibilidad de Utilización del Ripio de Cantera como Material Estructural para Viviendas de Bajo Costo*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
17. Larios, R. (2005). *Estudio para el reuso de los residuos generados en la planta potabilizadora San Felipe Hueyotlipan*. [en línea]. Tesis profesional, Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México. Disponible: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/larios_s_r. [Consulta: 2008, Mayo 11].

18. Laura, Samuel. (2006). *Diseño de Mezclas de Concreto*. [Documento en línea]. Universidad Nacional del Altiplano, Perú. Disponible: <http://www.arquitectuba.com.ar/apuntes-arquitectura/manual-de-diseno-de-mezclas-de-concreto/>. [Consulta: 2009, Julio 20].
19. Luis, A. y Rendón, N. (2005). *Diseño de mezcla de Polietilen Tereftaleno-Cemento*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
20. Mari, D., Souza, P. de y Menni, R. (2008). *Uso de lodo de Estação de Tratamento de água em Cerâmica Vermelha*. Ponencia presentada en el Seminário Nacional sobre tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água, São Paulo.
21. Menni, R., Lima, R. de, Mari, D. y Souza, P. de. (2005). *Viabilidade técnica da incorporação dos lodos dos decantadores das Estações de Tratamento de água 3 e 4 de Campinas em blocos cerâmicos*. Ponencia presentada en el 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Saneamento Ambiental Brasileiro: Utopia ou Realidade?, Campo Grande. Rio de Janeiro.
22. Mujica, V., Pérez, C., Ledesma, G., Ortega, M. (2006). *Propuesta Técnica para el Tratamiento y Disposición Final de los Lodos Provenientes de una Planta Potabilizadora*. [en línea]. Disponible: http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/VE05190_Mujica.pdf. [Consulta: 2008, Noviembre 28].

23. Navarro, G. (2003). *Química Agrícola*. [Libro en línea]. Editorial Mundi Prensa Libros. Disponible: <http://books.google.co.ve/books?id=G3ixH8ALMpcC&printsec=frontcover&dq=quimica+agricola#v=onepage&q=quimica%20agricola&f=false> [Consulta: 2009, Agosto, 20].
24. Norma Venezolana COVENIN 04:1982: Bloques de Arcillas para Losas Nervadas. Especificaciones.
25. Norma Venezolana COVENIN 42:1982: Bloques Huecos de Concreto.
26. Norma Venezolana COVENIN 256:1977: Método de Ensayo para la Determinación Cualitativa de Impurezas Orgánicas en Arenas para Concreto (Ensayo Colorimétrico).
27. Norma Venezolana COVENIN 258-77: Método de ensayo para la determinación por lavado del contenido de materiales más finos que el cedazo COVENIN 74 micras en agregados minerales.
28. Norma Venezolana COVENIN 338:2002: Concreto. Método de Elaboración, Curado y Ensayo de Probetas Cilíndricas de Concreto.
29. Norma Venezolana COVENIN 339:2003: Método para la Medición del Asentamiento con el Cono de Abrams.
30. Norma Venezolana COVENIN 341:1979: Método de Ensayo para Determinar la Resistencia a la Tracción Indirecta del Concreto usando Probetas Cilíndricas.

31. Norma Venezolana COVENIN 1125-77: Suelos. Método para la determinación de los Límites Líquido y Plástico.
32. Organización Panamericana de la Salud, Oficina Sanitaria Panamericana y Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. (1985). *Aspectos de Salud involucrados en el uso de polielectrolitos en tratamiento de aguas de consumo humano*. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/017824/017824.pdf>. [Consulta: 2008, Noviembre 23].
33. Paredes, D. (2005). *Tecnologías para el tratamiento de los lodos generados en sistema de potabilización del agua*. Investigaciones UTP. [en línea]. Disponible: <http://www.utp.edu.co/investigacion/proyectos/detalleProyectoHTML.php?cod=225>. [Consulta: 2008, Mayo 11].
34. Pavón, T., Pacheco, V. y Cárdenas, L.M. (2005). *Tratamiento de Lodos de una Planta Potabilizadora para la Recuperación de Aluminio y Hierro como Coagulantes*. [en línea]. Disponible: <http://www.aidisar.org/ISA/isa78.pdf>. [Consulta:2008, Noviembre 04].
35. Porrero, J.; Ramos, C.; Grases, J. y Velazco, G. (2004). *Manual del Concreto Estructural*. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas.
36. Ramírez, R., Chantal, N., Millan, S., Espejel F., Rodríguez, A. y Rojas, M. (2005-2006). *Aprovechamiento de los lodos generados en la planta potabilizadora Los Berros, sistema Cutzamala, primera etapa*. Universidad Nacional Autónoma de México. [en línea]. Disponible: http://proyectos.iingen.unam.mx/Proyectos_2005_2006/07/7.3.4.pdf. [Consulta: 2008, Mayo 12].

37. Rinne, T. (2001). *Potabilización con Diferentes Coagulantes de Aluminio y Hierro*. [Documento en línea]. Ponencia presentada en el XXII Congreso de Centroamérica y Panamá de Ingeniería Sanitaria y Ambiental “Superación Sanitaria y Ambiental: El Reto”. Disponible: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia18.pdf>. [Consulta: 2008, Noviembre 23].
38. Rodríguez, L. y Simonpietri, M. (2002). *Diseño de Mezclas para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo-Cemento*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
39. Romero, J. (2004). *Potabilización del Agua*. 3ra ed. Escuela Colombiana de Ingeniería Editorial.
40. Rondón, A y Sánchez, C. (2009). *Factibilidad de Utilización de un Aditivo en los Diseños de Mezclas de Suelo-cemento para la fabricación de Bloques*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
41. Sánchez, Y. (2008). *Manual Digitalizado de Laboratorio de Suelos I*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
42. Solís-Carcaño, R y Moreno, E. (2006). Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*. [Revista en línea], vol.21, no.3, 57-68. Disponible: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652006000300004&lng=es&nrm=iso. [Consulta: 2009, Agosto 20].
43. Trabajo 2 - *Características del Concreto*. [en línea]. Disponible: <http://www.construaprende.com/t/02>. [Consulta: 2009, Febrero 05].

44. Torres, P. (2005). *Aprovechamiento de Lodos Aluminosos (de la Etapa de Sedimentación) de Sistemas de Potabilización como Agregado en la Fabricación de Ladrillos Cerámicos*. [Resumen en línea]. Universidad del Valle. Cali, Colombia. Disponible: <http://pisa.univalle.edu.co/public/index.php?seccion=TESIS&tesis=73>. [Consulta: 2008, Noviembre 11].
45. Ugas, C. (1985). *Ensayos de Laboratorio en Mecánica de Suelos, Discusión, Evaluación, Procedimiento*. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales. 3ra ed. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
46. Universidad de Sonora. (2005, Enero 13). *Estudiantes obtienen material de construcción con plástico reciclado*. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.uson.mx/noticias/default.php?id=1424>. [Consulta: 2008, Noviembre 01].
47. Videla, E. (2002, Marzo 30). *Un material de construcción realizado con basura reciclada*. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.ecofield.com.ar/notas3/n-367.htm>. [Consulta: 2008, Noviembre 02].
48. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. (2006). *Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales*. 4ª ed. Caracas: Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador.
49. Vargas, M. y Montero, M. (2004). *Estudio del uso del lodo residual de la empresa Extralum S.A. como material alternativo en la fabricación de elementos especiales*.

50. Walkley, A and Black, I.A. (1934). *An examination of the Degtjareff methods for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method*, Soil Science 37, 29-38.
51. Yagüe, A., Valls, S., Vázquez, E. y Kuchinow V. (2002). *Utilización de lodo seco de depuradora de aguas residuales como adición en adoquines de hormigón prefabricado*. Construmática. [en línea]. Disponible: <http://www.construmatica.com/articulos/2002/07/01/utilizacion-de-lodo-seco-de-depuradora-de-aguas-residuales-como-adicion-en-adoquines-de-hormigon-prefabricado/>. [Consulta: 2008, Noviembre 02].
52. [ZICLA productos reciclados](#). (2008, Marzo 05). *Valorización de lodos de depuradora*. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.hotfrog.es/Empresas/Zicla-Eco-Productos-Const/FullPressRelease.aspx?id=3752>. [Consulta: 2008, Noviembre 02].

7. APÉNDICES

A-1. Contenido orgánico

A.1.1. Análisis Termogravimétrico

PLANTA	% a 105 °C (g)	% a 300 °C (g)	% a 500 °C (g)	% a 800 °C (g)
Pie de Cerro	0,75	4,89		-
José Pequiven	2,04	7,62	4,15	0
Tirgua	3,03	4,77	3,43	2,48
La Mariposa	7,41	7,49	4,62	0,37
San Felipe	0,97	0,87	0,77	3,04
Aroa	3,78		4,61	4,21
Caicara	2,25		1,25	7,21
Cumaripa	12,01		17,53	8,05
Yaritagua	0,91		0,61	9,02
Toro muerto ino	16,43		8,51	1,81
Toro muerto org	12,78		17,66	18,1

A.1.2. Método de Walkley-Black

PLANTA	N° Fiola	Peso Muestra (g) X	Sulfato Ferroso (ml)	Diferencia $K_2Cr_2O_7$ (meq) Y	Carbono Orgánico (%)
PIE DE CERRO	1	0,112	21,10	0,41	0,83
	2	0,254	20,20	0,82	
	3	0,527	18,60	1,55	
	4	0,751	17,00	2,27	
	5	1,030	15,50	2,95	
	6	1,504	12,30	4,41	
	7	2,005	9,40	5,73	
	8	2,502	6,70	6,95	
JOSÉ PEQUIVEN	52	0,258	16,10	2,41	2,6
	5	0,510	11,20	4,72	
	6	1,010	2,20	8,96	
TIRGUA	59	0,253	17,20	1,89	2,22
	9	0,510	13,20	3,77	
	10	1,010	5,30	7,50	
LA MARIPOSA	45	0,255	17,00	1,98	2,37
	13	0,510	12,30	4,20	
	14	1,000	4,50	7,88	
SAN FELIPE	17	1,010	19,30	0,90	0,28
	18	2,030	17,10	1,93	
	19	3,010	15,40	2,74	
	20	4,010	13,20	3,77	
AROA	18	0,510	19,60	0,75	0,6
	3	1,010	17,40	1,79	
CAICARA	14	0,520	18,80	1,13	0,61
	4	1,010	16,70	2,12	
CUMARIPA	2	0,260	4,00	8,11	9,36
YARITAGUA	17	0,520	20,10	0,52	0,31
	8	1,020	19,00	1,04	
TORO MUERTO INORGÁNICO	52	0,520	8,40	6,04	3,48
TORO MUERTO ORGÁNICO	13	0,055	14,60	3,11	18,82
	11	0,110	6,90	6,75	

A-1.3. Análisis Termogravimétrico de San Felipe

% Perdida a 300 °C	% Perdida a 500 °C	% Perdida a 800 °C
7,63	2,48	3,41

A-1.4. Método de Walkley-Black para San Felipe

N° Fiola	Peso Muestra (g) X	Sulfato Ferroso (ml)	Diferencia K ₂ Cr ₂ O ₇ (meq) Y	Carbono Orgánico (%)
1	0,3264	17,20	2,1101	2,19
2	0,6094	12,80	4,1284	
3	0,9047	7,60	6,5138	
4	1,2053	3,40	8,4404	

A-2. Ensayos de Laboratorio al lodo en estado natural**A-2.1. Contenido de humedad**

Cápsula	Peso cápsula (g)	Peso cápsula + muestra húmeda (g)	Peso muestra húmeda (g)	Peso cápsula + muestra seca (g)	Peso muestra seca (g)	w (%)	w promedio (%)
3	59,18	79,63	20,45	68,36	9,18	55,11	55,37
5	61,48	82,14	20,66	70,75	9,27	55,13	
6	61,45	82,86	21,41	70,9	9,45	55,86	

A-2.2. Peso unitario compacto del lodo natural

Peso molde + muestra (g)	Peso del molde (g)	Volumen del molde (cm ³)	Peso muestra (g)	Peso Unitario Compacto (kg/m ³)
226,7	4,4	294,9	222,3	753,81

A-3. Análisis del Lodo seco

A-3.1. Ensayos de Laboratorio

A-3.1.2. Peso específico

Peso Picnómetro (g)	Peso Picnómetro + lodo (g)	Peso Picnómetro + lodo + agua (g)	Peso Específico
49,241	65,033	108,356	2,58

A-3.1.3. Peso unitario compacto del lodo seco

Peso molde + muestra (g)	Peso del molde (g)	Volumen del molde (cm ³)	Peso muestra (g)	Peso Unitario Compacto (kg/m ³)
430,9	4,4	294,9	426,5	1446,25

A-3.1.4. Granulometría del lodo

Tamaño de partículas (mm)	% pasante	Tamaño de partículas (mm)	% pasante	Tamaño de partículas (mm)	% pasante
0,251785	100	0,070963	77,78	0,02	32,6
0,224404	99,77	0,063246	73,5	0,017825	29,37
0,2	98,86	0,056368	69,36	0,015887	26,34
0,17825	97,91	0,050238	65,13	0,014159	23,55
0,156866	97,22	0,044774	60,65	0,012619	21,04
0,141589	96,61	0,039905	55,99	0,011247	18,82
0,126192	95,59	0,035566	51,4	0,010024	16,85
0,112468	93,68	0,031698	47,09	0,008934	15,07
0,100237	90,64	0,028251	43,14	0,007962	13,44
0,089337	86,68	0,025179	39,47	0,007096	11,96
0,079621	82,25	0,02244	35,97	0,006325	10,64

Tamaño de partículas (mm)	% pasante
0,005637	9,49
0,005024	8,49
0,004477	7,58
0,00399	6,73
0,003557	5,93
0,00317	5,2
0,002825	4,55
0,002518	3,97
0,002244	3,45
0,002	2,96
0,001783	2,51

Tamaño de partículas (mm)	% pasante
0,001589	2,1
0,001416	1,75
0,001262	1,45
0,001125	1,21
0,001002	1
0,000893	0,81
0,000796	0,63
0,00071	0,45
0,000632	0,27
0,000564	0,12
0,000502	0,02

A-4. Ensayos a las probetas

A-4.1. Ensayo de resistencia a la compresión.

A los 7 días								
Mezcla	Cilindro	Peso (kg)	Diámetro Promedio (cm)	Altura Promedio (cm)	Área (cm ²)	P (kg)	Rc (kgf/cm ²)	Rc promedio (kgf/cm ²)
M2-LCP	1	9,273	14,69	29,37	169,41	100	0,59	0,61
	2	9,445	14,67	29,33	168,95	107	0,63	
M3-LCS	1	8,534	14,50	28,92	165,21	324	1,96	1,83
	2	8,614	14,54	28,87	165,93	314	1,89	
	5	8,62	14,57	29,04	166,61	274	1,64	

A los 28 días								
Mezcla	Cilindro	Peso (kg)	Diámetro Promedio (cm)	Altura Promedio (cm)	Área (cm ²)	P (kg)	Rc (kgf/cm ²)	Rc promedio (kgf/cm ²)
M1-LC	4	5,924	14,436	28,625	163,68	651	3,98	4,14
	6	5,888	14,352	28,31	161,78	697	4,31	
	7	5,827	14,432	28,285	163,58	685	4,19	
	9	5,879	14,334	28,44	161,37	658	4,08	
M2-LCP	5	8,047	14,68	29,67	169,30	240,00	1,42	1,44
	6	8,043	14,77	29,42	171,38	223,00	1,30	
	7	7,967	14,70	29,42	169,76	272,00	1,60	
M3-LCS	6	7,246	14,55	28,82	166,18	930,00	5,60	5,73
	7	7,308	14,55	28,89	166,23	976,00	5,87	

A-4.2. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta

A los 7 días								
Mezcla	Cilindro	Peso (kg)	Diámetro Promedio (cm)	Altura Promedio (cm)	Área (cm ²)	P (kg)	σ_{br} (kgf/cm ²)	σ_{br} promedio (kgf/cm ²)
M2-LCP	3	9,089	14,60	29,25	671,96	60	0,09	0,08
	4	9,365	14,64	29,32	675,18	50	0,07	
M3-LCS	3	9,089	14,51	28,93	657,33	161	0,24	0,25
	4	9,365	14,44	28,84	653,25	166	0,25	

A los 28 días								
Mezcla	Cilindro	Peso (kg)	Diámetro Promedio (cm)	Altura Promedio (cm)	Área (cm ²)	P (kg)	σ_{br} (kgf/cm ²)	σ_{br} promedio (kgf/cm ²)
M1-LC	1	6,052	14,41	28,40	633,47	314	0,49	0,56
	2	5,882	14,43	28,17	623,25	340	0,54	
	10	5,900	14,30	28,32	629,68	402	0,64	
M2-LCP	8	8,186	14,70	29,42	679,56	200	0,29	0,31
	9	7,937	14,86	29,42	679,79	216	0,32	

A-4.3. Ensayo de Absorción

Mezcla	Cilindro	Peso Seco (g)	Peso Húmedo (g)	Coefficiente de Absorción	Promedio de Ab (%)
M1-LC	1	186	258	38,7	38,6
	2	183	255	39,3	
	3	186	256	37,6	
M2-LCP	1	243	308	26,7	28,7
	2	218	285	30,7	
M3-LCS	1	241	298	23,7	23,6
	2	241	297	23,2	
	3	239	296	23,8	

A-4.4. Ensayo de erosión por cepillado

Mezcla	Probetas	Peso Inicial (kg)	Pérdida de Material (g)	Pérdida de Material (%)	Pérdida de Material Promedio (%)
M1-LC	1	3417	4,03	0,12	0,28
	2	3371	14,73	0,44	
M2-LCP	1	4855	0,79	0,02	0,02
	2	4821	1,27	0,03	
M3-LCS	1	4596	0,24	0,06	0,03
	2	4532	0,34	0,01	

A-5. Granulometría del suelo utilizado

Tamiz	Tamaño tamiz (mm)	Peso retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje pasante
3/4"	19,1	63	8,4	8,4	91,6
3/8"	9,5	58,3	7,7	16,1	83,9
Nº 4	4,76	62,8	8,3	24,4	75,6
Nº 10	2	121,1	16,1	40,5	59,5
Nº 20	0,84	84,4	11,2	51,7	48,3
Nº 40	0,42	75,2	10	61,7	38,3
Nº 60	0,3	40,9	5,4	67,1	32,9
Nº 100	0,149	60	8	75,1	24,9
Nº 200	0,074	36	4,8	79,9	20,1

A-6. Instructivo

1. Tomar una muestra de lodo del sedimentador de aprox. 2 L.
2. Colocar la muestra en un envase de plástico u otro material de sección rectangular donde sea fácil el secado.
3. Colocar la muestra al sol hasta que presente una consistencia terrosa.
4. Colocar el lodo seco en una bolsa plástica con cierre hermético (bolsas Ziploc u otra).
5. Enviar a través de la Valija de Hidroven con atención al Prof. Henry Blanco – UCV.