

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL LODO-CEMENTO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Bachiller Willians José
Gregorio Herrera Reyes para optar
al título de Ingeniero Civil

Caracas, febrero de 2006

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL LODO-CEMENTO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Tutores académicos: Prof. Henry Blanco

Prof. María Eugenia Korody

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Bachiller Willians José
Gregorio Herrera Reyes para optar
al título de Ingeniero Civil

Caracas, febrero de 2006

ACTA

Quienes suscriben, integrantes de la totalidad del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL LODO-CEMENTO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION”, presentado por el Br. Willians Herrera, C.I. N° 15.914.854, para optar al título de Ingeniero Civil, acordaron por unanimidad solicitarle a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORÍFICA** al Trabajo de Grado antes mencionado.

Esta solicitud se hace por considerar que el trabajo es un aporte importante en el manejo de los lodos provenientes de Plantas de Tratamiento para Potabilización de Aguas, establece de manera clara una metodología de evaluación de alternativas para su manejo, planteando una propuesta de reutilización de un material que impacta al ambiente, como primera aproximación a la solución del problema.

Se levanta la presente Acta en Caracas, a los dieciseis días del mes de febrero de dos mil seis.



MARIA VIRGINIA NAJUL
Jurado Principal



CESAR PEÑUELA
Jurado Principal



MARIA EUGENIA KORODY
TUTOR

ACTA

El día 16 de febrero de 2006 se reunió el jurado formado por los profesores:

María Eugenia Korody

María Virgina Najul

César Peñuela

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: “**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL LODO-CEMENTO 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 el bachiller hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió la siguiente calificación:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. Willians José Gregorio Herrera Reyes	20	Veinte

Recomendaciones:

FIRMAS DEL JURADO

María E. Korody

Virgina Najul

César Peñuela

Caracas, 17 de febrero de 2006

HERRERA R. WILLIANS J. G.

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL LODO-CEMENTO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN”

**Tutores Académicos: Prof. Henry Blanco y Prof. María E. Korody, Tesis.
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. 2006.**

Palabras Claves: Lodo, potabilización, lodo-cemento, resistencia, durabilidad.

Resumen

Corresponde a este trabajo experimental la tarea de elaborar, ensayar y caracterizar mezclas de lodo-cemento a partir del uso de lodos provenientes del proceso de potabilización de agua como materia prima; para ello se estableció un método basado en una investigación teórica y práctica que determinara el comportamiento mecánico y físico del lodo-cemento con el uso de ensayos de resistencia y durabilidad. El procedimiento para llegar a tal fin comenzó con la obtención de una muestra del material. El lugar escogido fue la planta de potabilización de agua La Mariposa. Inmediatamente se determinaron las características físicas del lodo en su estado natural, entre las cuales se destacaron un contenido de humedad aproximadamente igual a 84% y un alto contenido de materia orgánica. Dado que en este estado no fue posible utilizar el lodo en mezclas para la construcción, se le redujo su contenido de humedad y se volvieron a determinar las características físicas del material, esta vez con el nuevo contenido de humedad. En este caso el contenido de materia orgánica siguió siendo elevado pero se lograron determinar otras características como la granulometría y los límites de Atterberg. Conocidos estos parámetros y establecidas las diferencias con el estado anterior del material, se procedió a establecer los diseños de las mezclas de lodo-cemento, los cuales se diferenciaron por el contenido de humedad del lodo que utilizaron, habiendo pues un lodo con 75%, otro con 50% y otro con 0%. En todas las mezclas se utilizó una cantidad de cemento igual al 15% del peso del lodo. Adicionalmente se llevaron a cabo mezclas de lodo-cemento que contaban también con arena, piedra y suelo. Se evaluaron las probetas con los ensayos de resistencia a compresión, resistencia a tracción, absorción y erosión. Sin embargo, el fraguado de todas las mezclas fue muy lento y en algunos casos nulo. Como resultado de los ensayos y pruebas realizadas, se determinó que, de la forma como se llevó a cabo el estudio en este Trabajo Especial de Grado, el lodo-cemento no debe ser utilizado como material de construcción ya que se trata de una material de poca resistencia y durabilidad. Sin embargo se recomienda que se investiguen las características de los lodos de una forma más específica, incluyendo materiales de diferentes plantas y épocas del año.

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios, por darme lo que tengo, por guiarme y llevarme por este hermoso camino.

Al Prof. Henry Blanco, por darme las directrices a seguir en este trabajo y por tratar de hacer de éste el mejor posible.

A la Prof. María Eugenia Korody, por darme siempre ánimos y buenos consejos a pesar de sus ocupaciones. Gracias por su amistad. No hubiera estudiado esta carrera sin sus consejos.

Al personal del IMME, particularmente a los profesores César Peñuela, Leonel Rodríguez, Nelson Camacho y Gilberto Velazco.

Al ingeniero Seisler Cedeño.

Al personal de la PETA, particularmente a la Prof. María Virginia Najul y a Alejandro Mata.

A la familia López Chacón Chacón, por adoptarme como uno más de su familia y recibirme en su hogar. Muchas gracias, particularmente a la Sra. Alba y a la abuela Carmen.

A Albita, Alesmar, Carlos, Nalia, Rafael y Yan que también estuvieron conmigo y el lodo.

Al personal de la Avícola Santa Brígida.

A mi padre y madre, ¡que también me ayudaron!

DEDICATORIA

A mi mamá Mary, el ser más maravilloso. Me diste la vida y me diste tu vida. Estás siempre cuando te necesito y me lo has dado todo. Esto te lo debo en gran parte a ti, que me has llevado, me has guiado, me has ayudado a levantarme cuando he caído y sigues ahí, pendiente, abnegada. Te quiero mucho!

A mi papá Goyo, el hombre más maravilloso que he conocido. El mejor de los amigos. Siempre alegre, a pesar de los problemas, siempre animando y dándome lo mejor de sí. Eres un padre maravilloso, a ti también te debo esto. Gracias por ser como eres y por como eres conmigo. Te quiero mucho papá!

A mi abuelo Andrés, no pudiste estar aquí en este momento pero sé que lo estás viendo desde el cielo.

A mi abuela Corina, mi abuelo Pepe y mi abuela Laya, esto es por ustedes también.

A mi hermana Cecibell, siempre ejemplo de responsabilidad.

A mis tíos y primos.

A Alesmar, mi niña bella. Llegaste a mi vida para brindarme tu corazón y siempre estás a mi lado. Siempre me das tu cariño. Gracias por estar ahí.

A Vivilla y Ana Héliida, por estar siempre pendientes de mi.

A grandes amigos que me dio la Universidad: Ana Isabel mi gran amiga desde el primer día del primer semestre, Inés también mi gran amiga, sé que te irá muy bien, Carlos, mi pana, ¡Cámara de Lobos!, Albita siempre alegre y Nalia llena de entusiasmo.

A grandes amigos de fuera de la universidad como la familia López Chacón Chacón: la Sra. Alba, el Sr. Juan, la abuela Carmen, Fabiola, César, Jorge, el Sr. Román, la Sra. Nora, Román, Félix y Alejandrito. También Merlín.

A un gran amigo que también se fue al cielo, Mickey. Crecimos juntos, tú también tienes parte de esto.

ÍNDICE

	Pág.
CAPITULO I.	
Introducción.....	1
Objetivos.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Aportes al Conocimiento.....	4
Alcances y Limitaciones.....	5
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.	
2.1. Plantas de Tratamiento de Potabilización de Aguas.....	8
2.1.1. Agua Cruda.....	10
2.1.2. Sustancias Químicas.....	12
2.1.3. Tratamiento de Lodos.....	13
2.2. Características del Lodo Generado en las Plantas de Potabilización.....	15
2.3. Manejo del Lodo.....	18
2.3.1. Disposición.....	19
2.3.2. Reutilización.....	20
2.3.3. Problemas en el Manejo del Lodo.....	21
2.3.4. Cantidades Producidas.....	22
2.4. Experiencias y Características de Materiales de Construcción.....	23
2.4.1. Componentes de una Mezcla de un Material de Construcción.....	24
2.4.1.1. Conglomerante.....	24
2.4.1.2. Agregados.....	25
2.4.1.2.1. Parámetros que Caracterizan a un Agregado.....	26
2.4.1.2.2. Propiedades de un Suelo.....	32
2.4.1.3. Agua.....	41

2.4.2. Diseño de Mezcla.....	42
2.4.3. Propiedades de un Material de Construcción.....	43
2.4.4. Materiales de Construcción con Agregados Convencionales.....	45
2.4.4.1. Concreto.....	45
2.4.4.1.1. Ley de Abrams.....	47
2.4.4.1.2. Relación Triangular.....	49
2.4.4.2. Suelo-Cemento.....	51
2.4.5. Materiales de Construcción con Agregados No Convencionales.....	52
2.4.5.1. Ripio de Cantera.....	52
2.4.5.2. Pet-Cemento.....	53
2.4.5.3. Lodos Provenientes del Tratamiento de Aguas Residuales.....	54
2.5. Ensayos para Cuantificar las Propiedades Mecánicas de un Material de Construcción.....	56
2.5.1. Ensayo de Resistencia a la Compresión.....	56
2.5.2. Ensayo de Tracción Indirecta sobre Probetas Cilíndricas.....	57

CAPITULO III. METODO.

3.1. Materiales y Equipos.....	59
3.2. Etapas del Trabajo Experimental.....	61
3.2.1. Recolección de la Muestra de Lodo.....	61
3.2.1.1. Selección del Sitio.....	61
3.2.1.2. Planta de Potabilización de Agua la Mariposa.....	63
3.2.1.3. Toma de Muestras.....	64
3.2.1.4. Transporte y Almacenamiento de la Muestra.....	65
3.2.2. Características de Lodo en Estado Natural.....	66
3.2.2.1. Pruebas de Campo.....	66
3.2.2.1.1. Prueba del Olor.....	66
3.2.2.1.2. Prueba del Tacto.....	67
3.2.2.1.3. Prueba de la Vista.....	67
3.2.2.2. Ensayos de Laboratorio.....	67

3.2.2.2.1. Peso Específico.....	67
3.2.2.2.2. Peso Unitario Compacto.....	69
3.2.2.2.3. Contenido de Materia Orgánica.....	71
3.2.2.2.4. Contenido de Humedad.....	72
3.2.3. Disminución del Contenido de Humedad del Lodo.....	73
3.2.4. Características de los Lodos cuyo Contenido de Humedad fue Disminuido.....	76
3.2.4.1. Pruebas Iniciales.....	76
3.2.4.1.1. Prueba de Lavado de Manos.....	77
3.2.4.1.2. Prueba del Brillo.....	77
3.2.4.1.3. Prueba de la Sacudida o Reacción al Agitado.....	78
3.2.4.1.4. Prueba del Cordón.....	79
3.2.4.1.5. Prueba de la Cinta.....	79
3.2.4.2. Ensayos de Laboratorio.....	80
3.2.4.2.1. Granulometría.....	80
3.2.4.2.2. Límites de Atterberg.....	82
3.2.4.2.3. Peso Unitario Compacto.....	83
3.2.5. Elaboración de Probetas de Lodo-Cemento.....	84
3.2.5.1. Elaboración de Diseños de Mezcla de Lodo-Cemento.....	84
3.2.5.2. Elaboración de Probetas Cilíndricas y Cúbicas.....	86
3.2.5.3. Almacenamiento y Curado de las Probetas.....	80
3.2.6. Ensayo de las Probetas.....	91
3.2.6.1. Ensayo de Resistencia a la Compresión.....	91
3.2.6.2. Ensayo de Tracción Indirecta sobre Probetas Cilíndricas.....	92
3.2.6.3. Ensayo de Absorción.....	92
3.2.6.4. Ensayo de Erosión.....	94

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1. Análisis del Lodo en Estado Natural.....	98
4.1.1. Pruebas de Campo.....	98

4.1.1.1. Prueba del Olor.....	98
4.1.1.2. Prueba del Tacto.....	99
4.1.1.3. Prueba de la Vista.....	99
4.1.2. Ensayos de Laboratorio.....	99
4.1.2.1. Peso Específico.....	99
4.1.2.2. Peso Unitario Compacto.....	100
4.1.2.3. Contenido de Materia Orgánica.....	100
4.1.2.4. Contenido de Humedad.....	100
4.2. Prueba Preliminar del Lodo-Cemento.....	101
4.3. Análisis del Lodo cuyo Contenido de Humedad fue Disminuido.....	101
4.3.1. Pruebas Iniciales.....	102
4.3.1.1. Prueba del Olor.....	103
4.3.1.2. Prueba del Tacto.....	103
4.3.1.3 Prueba de la Vista.....	103
4.3.1.4 Prueba del Lavado de Manos.....	104
4.3.1.5. Prueba del Brillo.....	104
4.3.1.6. Prueba de la Sacudida o Reacción al Agitado.....	104
4.3.1.7. Prueba del Cordón.....	105
4.3.1.8. Prueba de la Cinta.....	105
4.3.2. Ensayos de Laboratorio.....	105
4.3.2.1. Peso Unitario Compacto.....	106
4.3.2.2. Contenido de Materia Orgánica.....	108
4.3.2.3. Contenido de Humedad.....	109
4.3.2.4. Granulometría.....	110
4.3.2.5. Límites de Atterberg.....	113
4.3.2.5.1. Límite Líquido.....	113
4.3.2.5.2. Límite Plástico.....	114
4.3.2.5.3. Índices Derivados.....	114

4.3.2.5.4. Comparación de los Límites de Atterberg del Lodo con un Suelo Utilizado en Mezclas de Suelo-Cemento.....	115
4.4. Análisis de las Mezclas de Lodo-Cemento.....	118
4.4.1. Peso Unitario Compacto y Asentamiento.....	118
4.4.2. Proceso de Fraguado.....	120
4.4.3 Propiedades Mecánicas y de Durabilidad.....	121
4.4.3.1. Ensayo de Resistencia a la Compresión.....	122
4.4.3.2. Ensayo de Tracción Indirecta.....	126
4.4.3.3. Ensayo de Absorción.....	129
4.4.3.4. Ensayo de Erosión.....	132
CONCLUSIONES.....	136
RECOMENDACIONES.....	140
BIBLIOGRAFÍA.....	143
ANEXOS.....	149

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Diagrama Esquemático del Proceso de Potabilización de Aguas.....	9
Figura 2.2. Diagrama Esquemático del Proceso de Potabilización como proceso industrial.....	9
Figura 2.3. Carta de Plasticidad de Casagrande.....	38
Figura 2.4. Resistencia versus relación w/C	49
Figura 3.1. Esquema de la Escala de Gardner.....	72
Figura 4.1. Contenido de Materia Orgánica del Lodo.....	100
Figura 4.2. Contenido de Materia Orgánica de los Lotes de Lodo con contenido de humedad disminuido.....	108

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Diferencias entre color y turbiedad.....	11
Tabla 2.2. Análisis Químico de un Lodo Seco.....	16
Tabla 2.3. Contenido de Metales de un Lodo Seco.....	17
Tabla 2.4. Contaminantes Biológicos del Agua Cruda y sus efectos.....	18
Tabla 2.5. Algunas Características Físicas de los Agregados.....	29
Tabla 2.6. Valores Usuales de las Relaciones Peso/Volumen de los Agregados Livianos.....	31
Tabla 2.7. Rangos de Plasticidad del Suelo.....	36
Tabla 2.8. Rango de Consistencia de Suelo.....	37
Tabla 2.9. Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS).....	39
Tabla 2.10. Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS) (cont)	39
Tabla 2.11. Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS) (cont)	40
Tabla 2.12. Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS) (cont)	40
Tabla 2.13. Ventajas y Desventajas del uso del Concreto como Material de Construcción.....	50
Tabla 3.1. Diseños de mezcla.....	85
Tabla 3.2. Número de golpes para compactación.....	88
Tabla 3.3. Probetas fabricadas y ensayos.....	89
Tabla 4.1. Pruebas Iniciales.....	102
Tabla 4.2. Peso unitario de agregados convencionales	107
Tabla 4.3. Granulometría del Suelo.....	111
Tabla 4.4. Índices Derivados.....	114
Tabla 4.5. Límite Líquido de un suelo.....	115
Tabla 4.6 Límite Plástico e índices derivados de un suelo.....	116
Tabla 4.7. Características de los Diferentes Lotes de Lodo.....	117
Tabla 4.8. Resistencia a la compresión de distintos materiales.....	124

Tabla 4.10. Absorción de diferentes materiales de construcción.....	130
Tabla 4.11. Erosión del PET- Cemento y suelo-cemento.....	133

INDICE DE FÓRMULAS

	Pág.
Fórmula 2.1. Índice de Plasticidad.....	36
Fórmula 2.2. Índice de Consistencia.....	37
Fórmula 2.3. Relación agua/Cemento.....	47
Fórmula 2.4. Ley de Abrams.....	48
Fórmula 2.5. Relación Triangular.....	49
Fórmula 2.6. Resistencia a la compresión.....	56
Fórmula 2.7. Módulo de rotura.....	57
Fórmula 3.1. Peso Específico.....	68
Fórmula 3.2. Peso Específico.....	69
Fórmula 3.3. Peso de Agua.....	70
Fórmula 3.4. Volumen de Agua.....	70
Fórmula 3.5. Peso Unitario Compacto.....	71
Fórmula 3.6. Contenido de humedad.....	73
Fórmula 3.7. Absorción.....	93

INDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 3.1. Instrumentos y herramientas del Laboratorio.....	61
Foto 3.2. Planta de Tratamiento la Mariposa.....	62
Foto 3.3. Embalse La Mariposa.....	63
Foto 3.4. Planta de Potabilización de Agua La Mariposa.....	64
Foto 3.5. Toma de Muestra del Lodo.....	65
Foto 3.6. Vaciado del Sedimentador.....	65
Foto 3.7. Envases Plásticos de 60 litros utilizados para transformar y almacenar lodo.....	66
Foto 3.8. Disminución del Contenido de Humedad del lodo a la intemperie...	74
Foto 3.9. Lodo cuyo contenido de humedad fue disminuido a la intemperie...	74
Foto 3.10. Disminución del Contenido de Humedad por medio de estufas....	75
Foto 3.11. Disminución del Contenido de Humedad por medio de estufas....	76
Foto 3.12. Lodo cuyo contenido de humedad fue disminuido con el uso de estufas.....	76
Foto 3.13. Muestra de lodo examinada con la prueba del brillo.....	77
Foto 3.14. Muestra de lodo examinada con la prueba de la sacudida.....	78
Foto 3.15. Equipo utilizado para determinar la granulometría del lodo.....	81
Foto 3.16. Determinación de los límites de Atterberg del lodo.....	83
Foto 3.17. Medición del Asentamiento de la mezcla con el cono de Abrams..	88
Foto 3.18. Fabricación de una probeta cilíndrica de lodo-cemento.....	89
Foto 3.19. Almacenamiento de las Probetas de lodo-cemento.....	90
Foto 3.20. Laboratorio de agregados del IMME.....	90
Foto 3.21. Ensayo de resistencia a la compresión.....	91
Foto 3.22. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta.....	92
Foto 3.23. Ensayo de Absorción.....	94
Foto 3.24. Ensayo de Erosión por cepillado.....	96

	Pág.
Foto 4.1. Disminución del Contenido de humedad del lodo.....	102
Foto 4.2. Proceso de Fraguado del lodo-cemento.....	121

INDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 4.1. Peso Unitario Compacto.....	106
Gráfico 4.2. Comparación de pesos unitarios compactos.....	107
Gráfico 4.3. Contenido de Humedad.....	110
Gráfico 4.4. Curva Granulométrica del Lodo.....	110
Gráfico 4.5. Curva Granulométrica del Suelo.....	112
Gráfico 4.6. Comparación de las curvas granulométricas del lodo y del suelo.....	112
Gráfico 4.7. Límite Líquido.....	113
Gráfico 4.8. Comparación de los límites líquidos del lodo y un suelo.....	116
Gráfico 4.9. Peso Unitario Compacto de las mezclas.....	118
Gráfico 4.10. Asentamiento de las mezclas.....	119
Gráfico 4.11. Resistencia a la compresión mezclas de lodo-cemento con agregado.....	123
Gráfico 4.12. Resistencia a la compresión promedio de mezclas de lodo- cemento con agregado.....	123
Gráfico 4.13. Comparación de resistencia a la compresión a los 7 días.....	125
Gráfico 4.14. Comparación de resistencias a la compresión a los 28 días.....	125
Gráfico 4.15. Resistencia a la tracción indirecta de las probetas de lodo – cemento.....	126
Gráfico 4.16. Resistencia a la tracción indirecta.....	127
Gráfico 4.17. Comparación de resistencias a la tracción.....	129
Gráfico 4.18. Absorción de Mezclas de lodo-cemento.....	129
Gráfico 4.19. Comparación de absorción entre el lodo-cemento y diferentes materiales de construcción.....	131
Gráfico 4.20. Erosión de las mezclas de lodo cemento.....	132
Gráfico 4.21. Comparación de pérdida por erosión de distintos materiales.	133

**Capítulo I:
INTRODUCCIÓN**

Las aguas destinadas al consumo humano deben cumplir con ciertas características físicas, químicas y bacteriológicas de manera que no sean perjudiciales para la salud del consumidor. Estas características se logran a través de un proceso de potabilización, que como cualquier proceso industrial requiere de materia prima, que es el agua cruda, insumos, entre los cuales está el coagulante, y genera desechos, en donde los lodos son los más significativos.

Estos lodos residuales tradicionalmente han sido vertidos directamente al ambiente sin ningún tipo de tratamiento, generalmente a los cauces de aguas más cercanos, y contienen todos los constituyentes eliminados de la fase acuosa del agua cruda, así como con los componentes químicos consecuencia del uso de coagulantes durante el proceso. Estos lodos causan impacto en el ambiente por lo que se genera la necesidad de una correcta disposición, siendo importante la búsqueda de un método de reutilización del lodo de manera que redunde en beneficio tanto del ambiente como de la planta que lo produce.

La reutilización de los lodos como material de construcción plantea una interesante línea de investigación no desarrollada que, de concretarse, representaría una solución para la disposición de los mismos y una disminución en el impacto ambiental en los cauces de aguas debido a la reducción de las cantidades vertidas al ambiente.

Entre los aspectos a investigar reviste particular importancia analizar el comportamiento mecánico de la mezcla de cemento y lodo con fines constructivos. El cemento añadido a una mezcla conduce a una modificación en el comportamiento de las partículas, mejorando su estabilidad y transformando la masa resultante en una estructura difícil de alterar, de mayor resistencia y durabilidad.

Para utilizar el cemento en la construcción es necesario proponer “diseños de mezcla”, un procedimiento mediante el cual se calculan las cantidades que debe haber

de cada uno de los componentes que intervienen en la mezcla, con el objetivo de obtener un material con la trabajabilidad, resistencia y uniformidad deseada.

La idea fundamental de estudiar la posibilidad de preparar mezclas con estos lodos provenientes de las plantas de potabilización, radica en la oportunidad de reutilizar un material que de por sí es desecho, formando con él mezclas de lodo-cemento que puedan ser encofradas y que al fraguar, posea un comportamiento mecánico deseable como para formar un elemento que pueda ser usado en la industria de la construcción, como un material alternativo, inerte al medio ambiente.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Analizar el comportamiento mecánico y físico de mezclas de lodo-cemento para su uso como material de construcción.

Objetivos Específicos:

1. Describir las características físicas de los lodos provenientes de los sedimentadores de una planta de potabilización de agua.
2. Comparar las características físicas de los agregados utilizados en las mezclas estabilizadas con cemento con las de los lodos provenientes de los sedimentadores de una planta de potabilización de agua.
3. Elaborar diseños de mezclas de lodo-cemento, utilizando lodos provenientes de los sedimentadores de una planta de potabilización de agua.
4. Analizar el comportamiento mecánico y físico de la mezcla lodo-cemento con los resultados de los ensayos de laboratorio.

APORTES AL CONOCIMIENTO

En el ámbito de la ingeniería puede resultar interesante el desarrollo de nuevos materiales de construcción, a partir de desechos que constituyen un problema ambiental.

Con el uso de los lodos, es posible reducir las cantidades de este material vertidos al ambiente, disminuyendo los niveles de contaminación y produciendo un beneficio económico para el que los genera. Dependiendo de los resultados, puede generar un material de construcción útil para ciertos usos cuyo costo económico sea menor que el de los materiales actuales.

El desarrollo de una línea de investigación nueva, como es la del uso de lodo como componente de un material de construcción, permitirá evaluar a lo largo de todo el recorrido de la misma las características que son necesarias para poder aceptar o rechazar el material. Además, se está creando un nexo que permite entrelazar áreas de la ingeniería civil, como lo son el impacto ambiental y materiales de construcción.

ALCANCE Y LIMITACIONES

El presente trabajo es un estudio de factibilidad del uso de mezclas de lodo-cemento como material de construcción a través de la determinación y análisis de parámetros comúnmente utilizados para calificar la capacidad que poseen los materiales para ser destinados para dicho fin. Estos parámetros son los siguientes:

- ✓ Resistencia a compresión.
- ✓ Módulo de Rotura.
- ✓ Absorción.
- ✓ Erosión.

En este trabajo especial de grado se analizan mezclas de lodo-cemento cuya materia prima es lodo proveniente de un sedimentador de una planta de potabilización de agua. Por consiguiente, se estudia un lodo cuyas características no son necesariamente iguales a las de otro que se produzca en otra época del año o en otra planta de potabilización de agua. Sin embargo, inicialmente se pretende evaluar si es posible considerar que la mezcla lodo-cemento cuenta con unas condiciones tales que permitan calificarla como material utilizable para la construcción.

La planta de potabilización de agua escogida para la obtención de la muestra es La Mariposa, debido a su cercanía al lugar de realización de las mezclas y ensayos, y la buena disposición que tiene el personal que opera de dicha planta para colaborar con la realización de este Trabajo Especial de Grado, además de representar un sistema típico de las plantas de potabilización existentes en el país.

También se contempla estudiar mezclas de lodo-cemento mejoradas con otro tipo de agregado (arena, piedra picada y suelo); el estudio de estas mezclas se lleva a cabo bajo las mismas condiciones que las mezclas que solo contienen lodo como

agregado. Sin embargo, es importante destacar que las mezclas mejoradas no son el objeto de estudio principal de este trabajo.

Debido a que no se conseguieron antecedentes del uso de los lodos provenientes de los sedimentadores de las plantas de potabilización de agua como material de construcción, se toma como base el estudio de concreto y suelo-cemento por ser materiales similares en cuanto a elaboración y características de los componentes.

Capítulo II:
MARCO TEÓRICO

2.1.- PLANTAS DE TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DE AGUAS.

El tratamiento de agua es un proceso industrial de naturaleza físico y químico, mediante el cual se eliminan una serie de sustancias y microorganismos que implican riesgo para el consumo o le proporcionan un aspecto o calidad organoléptica no deseable, transformándola en un líquido apto para el consumo humano. Este proceso se lleva a cabo en las plantas de potabilización de agua.

En una planta de potabilización, el agua circula por una serie de unidades, que mediante un proceso continuo, someten al agua cruda a una de serie procesos que se describen esquemáticamente en la Figura 2.1. La primera etapa es la captación, mediante la cual el agua es recogida de la fuente de abastecimiento a través de obras de toma. Dependiendo del origen, la captación puede ser de aguas superficiales (ríos, embalses, diques, lagunas, etc.) o aguas subterráneas (pozos de bombeo o excavaciones). Una vez captada el agua, pasa a la etapa de coagulación, proceso por el cual, y mediante la adición de sustancias químicas conocidas como coagulantes, se desestabilizan a las partículas coloidales dispersas en la masa acuosa y se convierten en otras más voluminosas y pesadas que pueden ser fácilmente removidas. A continuación se llega a la floculación, etapa en la cual se aglomeran las partículas previamente desestabilizadas y que después, en la etapa de la sedimentación, son removidas a través de la acción de la fuerza de gravedad. De aquí, el agua pasa a la filtración donde se remueve el material en suspensión que superó las anteriores etapas para posteriormente llegar a la desinfección, etapa en la cual se eliminan los microorganismos patógenos, y ser finalmente distribuida entre los consumidores.

Como cualquier proceso industrial, una planta para potabilización de agua requiere de materia prima e insumos, y genera desechos en la obtención del producto final. La materia prima está representada por el agua cruda, los insumos por las sustancias químicas utilizadas en el tratamiento y la energía eléctrica, los desechos por el material acumulado separado en el tratamiento, el cual se llama lodo; siendo el

producto final el agua potable. En la Figura 2.2 se puede observar un esquema del proceso de potabilización con el enfoque industrial.

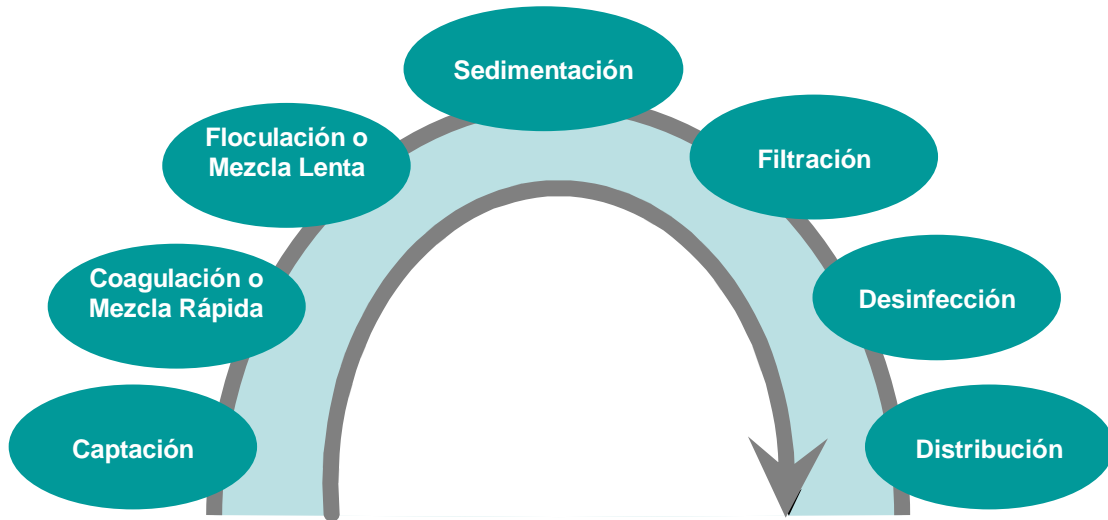


Figura 2.1. Diagrama esquemático del proceso de potabilización de aguas.

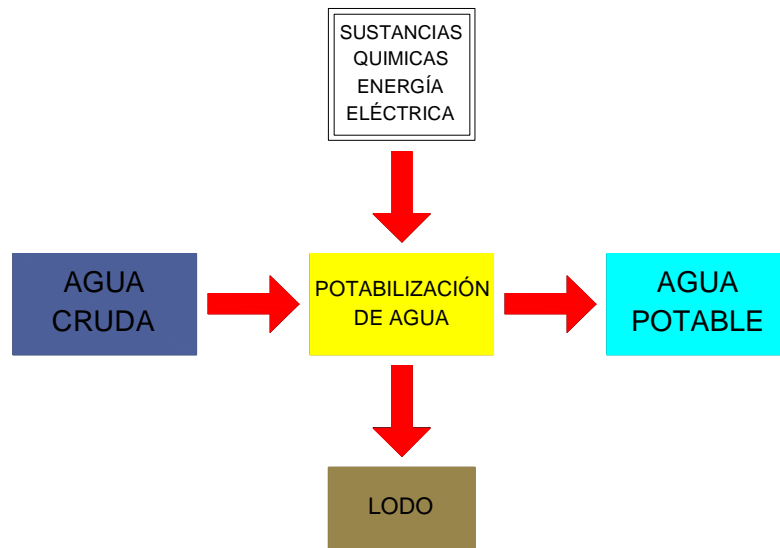


Figura 2.2. Diagrama del proceso de potabilización como proceso industrial.

Una planta de tratamiento es una obra de infraestructura donde se llevan a cabo los procesos mediante los cuales se remueven las impurezas contenidas en el

agua que no permiten calificarla como potable. Estas impurezas del agua pueden ser removidas por operaciones físicas o procesos químicos.

El lodo, como residuo del proceso de potabilización, posee unas características que dependen a su vez de las pertenecientes a la materia prima (agua cruda) y a los insumos (sustancias químicas, representadas por el coagulante), por lo que se hace necesario describir estos parámetros:

2.1.1.- AGUA CRUDA.¹

El agua en su forma molecular no existe en la naturaleza, por cuanto contiene sustancias que pueden estar en suspensión o en solución verdadera según el tamaño de disgregación del material que acarrea.

Por otra parte, de acuerdo con el tipo de impurezas presentes, el agua puede aparecer como turbia o coloreada, o ambas.

La turbiedad, que no es más que la capacidad de un líquido de diseminar un haz luminoso, puede deberse a partículas de arcilla en suspensión provenientes de la erosión del suelo, a algas o a crecimientos bacterianos. El término arcilla comprende una gran variedad de compuestos, pero en general se refiere a tierra fina (0,002 mm de diámetro de grano o menos), a veces coloreada, que adquiere plasticidad al mezclarse con limitadas cantidades de agua. Químicamente son silicatos de aluminio con fórmulas bastante complejas.

El color está constituido por sustancias químicas, la mayoría de las veces provenientes de la degradación de la materia orgánica, tales como hojas y plantas acuáticas con las cuales entra en contacto. El tamaño de las partículas productoras de

¹ ARBOLEDA, Jorge. (2000). **“Teoría y Práctica de la Purificación del Agua”** (3ra ed.). Bogotá: McGraw Hill.

color es inferior a 3,5 μm . Algunas diferencias entre el color y la turbiedad están contenidas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Diferencias entre color y turbiedad.²

Item	Color	Turbiedad
Composición Física	Sustancias disueltas parcialmente coloidales	Arcillas coloidales
Composición Química	Ácidos orgánicos con pesos moleculares entre 200 y 50.000 o más	Cristales de silicatos
Origen	Orgánico	Mineral
Tamaño de la dispersión	87% < 0,01 μm	Entre 0,1 y 10 μm
Intensidad	Aumenta con el pH	No varía con el pH
Comportamiento Químico	Se comportan preferentemente como sustancias disueltas	Se comportan únicamente como suspensiones coloidales

Un aspecto importante a tomar en cuenta son los constituyentes del lodo que dependerán de las características o componentes que tenga la fuente de abastecimiento. Así, por ejemplo, si la fuente se trata de un embalse, la posibilidad de tener material orgánico celular es mayor a que si se tratase de ríos o pozos, debido a la poca velocidad con la que circula el agua en el área del embalse, además de la capacidad que éste posee, por su geometría, de retener cualquier tipo de material, incluyendo restos orgánicos. Adicionalmente, las aguas provenientes de pozos requieren de menor tratamiento que las aguas superficiales.

² ARBOLEDA, Jorge. (2000). **“Teoría y Práctica de la Purificación del Agua”** (3ra ed.). Bogotá: McGraw Hill.

2.1.2.- SUSTANCIAS QUÍMICAS.^{3 4}

Los coagulantes pueden ser clasificados en dos grupos: los polielectrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos. Ambos grupos actúan básicamente como polímeros.

a) Coagulantes y floculantes (Polielectrolitos).

Son polímeros de alto peso molecular con un gran número de sitios activos. Casi siempre se utilizan más como ayudantes a la coagulación que como coagulantes únicos.

Los polielectrolitos usados en unión con coagulantes metálicos comunes, producen flóculos que sedimentan rápidamente, siendo especialmente efectivo con las algas.

A su vez los polielectrolitos se dividen en polímeros naturales y sintéticos. Los primeros han mostrado buenos resultados, particularmente los derivados de la tuna y los almidones. Tiene la ventaja de producir un lodo de muy baja toxicidad. Los polímeros sintéticos son compuestos producidos por medio de la transformación química de derivados de carbón y del petróleo.

b) Coagulantes metálicos.

Los coagulantes metálicos más utilizados 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 “Alumbre”, que tiene como características principales su bajo costo relativo y la formación de flóculos ligeramente pesados.

³ ARBOLEDA, Jorge. (2000). “Teoría y Práctica de la Purificación del Agua” (3ra ed.). Bogotá: McGraw Hill.

⁴ BLANCO, Henry y NAJUL, María Virginia. (2003). “Manejo Eficiente de Plantas de Tratamiento para Potabilización de Aguas”. Instituto Tecnológico, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

✓ **Coagulación con sales de aluminio.**

Los más conocidos de estos coagulantes son el sulfato de aluminio (en presentaciones sólida y líquida), y el cloruro de polialuminio. Actualmente en Venezuela se promueve el uso del sulfato de aluminio líquido que 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.

Desde hace algunos años se comenzó a introducir en el mercado de las sustancias para potabilización el cloruro de polialuminio, en algunos casos denominado como policloruro de aluminio (PACl). Tiene como ventaja una mejor formación de los flóculos, un más amplio de pH, menor generación de lodo y poca o ninguna necesidad de usar conjuntamente polielectrolitos.

✓ **Coagulación con 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 a mayor velocidad que el sulfato de aluminio, además de que pueden trabajar en un rango de pH más amplio. Sin embargo, los lodos provenientes de la coagulación con hierro 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.

2.1.3.- TRATAMIENTO DE LODOS.

Debido a la necesidad de disminuir el problema ambiental que representan los lodos, se ha desarrollado un proceso de tratamiento de los mismos que busca darle mejores condiciones para su disposición o reutilización. Sin embargo, son pocos los países que cuentan con plantas de potabilización de agua con unidades de

acondicionamiento del lodo, siendo una de las principales razones los altos costos de su puesta en funcionamiento.⁵

Este proceso de tratamiento de lodos tiene como principal finalidad aumentar lo más posible las concentraciones de material seco dentro de la masa de lodo. De este modo sería más conveniente su disposición en rellenos sanitarios en lugar de cuerpos de agua.⁵

El proceso de tratamiento de lodos está conformado por las siguientes etapas:

- a) **Mezcla:** busca homogeneizar las concentraciones de los lodos (expresadas en % de materia seca) provenientes de la purga de sedimentadores y el lavado de filtros.

- b) **Espesamiento:** se trata de un proceso similar a la coagulación – floculación de la potabilización de agua, que busca aumentar la concentración de materia seca con a fin de disminuir el volumen de material a tratar.

- c) **Deshidratación:** al igual que el espesamiento, este proceso tiene como finalidad incrementar la concentración de material seco en el lodo, pero con mayor intensidad. Puede ser llevado a cabo a través de filtración o centrifugación.

El destino final de este tipo de lodos suele ser a vertedero controlado, como relleno de terrenos y canteras ya explotadas en determinadas zonas. No están caracterizados como residuo tóxico o peligroso, por lo que generalmente pueden considerarse como vertido inerte de cara a su destino final.

⁵ **“Fangos Producidos en el Tratamiento del Agua Potable”** (en línea). (2005). El Agua Potable, Tratamiento de Lodos. http://www.fortunecity.es/felices/andorra/51/tratamiento_de_lodos.htm (Consulta: octubre, 2005).

2.2.- CARACTERÍSTICAS DEL LODO GENERADO EN LAS PLANTAS DE POTABILIZACIÓN.

El lodo es el subproducto del desecho de los procesos de tratamiento de aguas⁶, retenido en los sedimentadores y filtros durante el proceso de potabilización. Contiene óxidos hidratados de aluminio junto con materias de naturaleza orgánica e inorgánica, arrastradas por el agua cruda, siendo en la mayoría de los casos estables y sin tendencia a la descomposición. Éstos se van extrayendo periódica e intermitentemente del fondo de los sedimentadores y de los filtros.

Las sustancias contenidas en el agua cruda son generalmente inertes como arcillas, arenas finas y limos, y otras tanto en suspensión como disueltas, de origen orgánico e inorgánico, asimismo el plancton y otros microorganismos se encuentran también en la materia prima (agua cruda). De allí que las características de los lodos varíen en función de la calidad del agua cruda y del tratamiento de potabilización aplicado a ésta.

El análisis de la materia de estos lodos, generalmente llamados lodos hidróxidos, pone de manifiesto la presencia de muchos de los compuestos que recubren la corteza terrestre, variando las proporciones según la naturaleza del terreno atravesado por el agua cruda (descartando por supuesto que en su transcurso haya recibido aportes contaminantes importantes).

Considerando que la mayor parte de las sustancias disueltas en el agua cruda no quedan retenidas en el proceso de tratamiento, a excepción de aquellas que al

⁶ **“Diccionario del Agua”** (En línea). Productos y Servicios para la Industria del Agua. Santiago de Chile, Chile. http://www.aguamarket.com/Diccionario/indice_letras.asp?letra=F&offset=20 (Consulta: junio, 2005).

oxidarse pasan a insolubles (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, y que en el agua tratada no hay materia en suspensión alguna, los lodos procedentes del proceso de potabilización del agua están formados, fundamentalmente, por la materia en suspensión del agua cruda, los hidróxidos de aluminio generados al incorporar el coagulante (generalmente sulfato de aluminio), por alguna otra sustancia insoluble empleada en el tratamiento, como por ejemplo carbón activado y por los posibles óxidos e hidróxidos insolubles de hierro y manganeso que pudieran formarse.

Diferentes procesos de tratamiento generan variados 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.⁷

El análisis químico de un lodo totalmente seco procedente de un agua cruda, estimada como de calidad buena-media (Turbiedad < 5 NTU, Color < 25 U Pt/Co, Materia Orgánica (oxidabilidad al MnO_4K en medio ácido) < 5 mg O_2/l), se encuentra detallado en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Análisis Químico de un Lodo Seco.⁸

Compuesto	%
Sílice + residuo insoluble al ácido (HCl)	25
Alúmina (Al_2O_3)	24
Óxido férrico (Fe_2O_3)	2
Óxido de calcio (CaO) + Óxido de magnesio (MgO)	9
Materia Orgánica	40

⁷ CASTAÑEDA SARABIA, Onia. **Determinación de la Toxicidad de los Lodos Generados por una Planta Potabilizadora, Utilizando Bioensayos** (en línea). Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). <http://potablewater.iespana.es/toxicidad%20de%20lodos.pdf>. (Consulta: octubre, 2005).

⁸ **Fangos Producidos en el Tratamiento del Agua Potable** (en línea). (1998). El Agua Potable, Tratamiento de Lodos. http://www.fortunecity.es/felices/andorra/51/tratamiento_de_lodos.htm (Consulta: octubre, 2005).

El contenido en metales pesados de la materia seca anterior, puede variar generalmente entre los siguientes valores, como se puede observar en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Contenido de Metales de un Lodo Seco.⁷

Metal	mg/(kg de lodo seco)
Cadmio	< 1
Cobre	30 - 200
Cromo	5 - 35
Mercurio	< 0,1 - 0,2
Níquel	5 - 25
Plomo	10 - 40
Zinc	40 - 500

Los lodos del proceso de potabilización de agua contienen también un importante contenido de materia biológica en forma de microorganismos, localizada originalmente en el agua cruda.

Los microorganismos son especies vivientes de tamaños diminutos. No se consideran como plantas ni como animales, sino más bien se los califica en un tercer reino denominado protista. Poseen un tamaño promedio igual a $1 \mu\text{m}$ (10^{-6} m) y un peso promedio de 10^{-12} g. Varían en tamaño, forma, habilidad para usar diferentes sustancias como fuentes de alimentos, métodos de reproducción y complejidad.

En el agua cruda se pueden encontrar cuatro grupos de microorganismos: bacterias, virus, algas y protozoos. Estos microorganismos contenidos, primero en el agua cruda y posteriormente en lodo, pueden ser considerados como contaminantes biológicos y, por ende, generan una serie de efectos que se traducen, primordialmente, en enfermedades. Los contaminantes biológicos del agua cruda y sus efectos se dan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Contaminantes biológicos del agua cruda y sus efectos.⁹

Microorganismo	Nombre	Enfermedad
Bacteria	Salmonella tphi	Tifus
Bacteria	Vibrio cholerae	Cólera
Bacteria	Shigellas	Disentería
Bacteria	Grupo de salmonella	Gastroenteritis
Virus	-	Hepatitis
Ameba	Entamoeba hystolica	Disentería Amébrica
Lombriz	Taenia saginata	Triquinosis

En resumen, se puede decir que el lodo es una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas, la cual se encuentra compuesta de:

- ✓ Sólidos presentes en el agua cruda los cuales pueden ser: arcillas constituyentes de turbiedad y compuestos no minerales introducidos por hojas, plancton y desagües industriales o domésticos.
- ✓ Sólidos agregados durante el tratamiento, principalmente: hidróxidos de aluminio y/o hierro, hidróxido de calcio, carbón activado en polvo y otros compuestos químicos que se agregan durante la purificación.

La calidad y cantidad de los lodos varía de una planta de potabilización a otra, todo depende de los coagulantes empleados, así como también del tipo de sólidos presentes en el agua y el proceso que se utilice para su extracción, bien sea, el decantado o el lavado de filtros.

2.3.- MANEJO DEL LODO.

El lodo proveniente del proceso de potabilización de agua tiene, de forma general, dos destinos: la disposición y la reutilización. La primera es la alternativa

⁹ **“Potabilización de Agua”** (en línea). Equipos de Purificación AQUA PURIFICACION SYSTEMS. http://mx.geocities.com/agua_cosmos/agua-municipal.htm. (Consulta: marzo, 2005).

más utilizada y más desarrollada, mientras que la segunda se encuentra, en gran parte, en fase de investigación, de la cual forma parte este Trabajo Especial de Grado.

2.3.1.- DISPOSICIÓN.

Los métodos más utilizados para la disposición final de los lodos producidos en las plantas de potabilización de aguas son descritos a continuación.

a) Descarga a un cuerpo de agua natural.

Aunque la descarga a cuerpos de agua naturales, ha sido la forma más utilizada en lo que respecta al manejo de los residuos provenientes del tratamiento de aguas, una de las preocupaciones primordiales ha sido la introducción de contaminantes en el ambiente acuático; siendo el de mayor impacto la toxicidad del aluminio proveniente de la coagulación con alumbre sobre la biota acuática. También existe inquietud debido al impacto sobre la fauna y el ambiente debido a los altos niveles de sólidos (en suspensión y disueltos), pH, 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 proceso de potabilización de aguas y los tratamientos de aguas residuales logran diluir los lodos orgánicos e inorgánicos y los sólidos, lo cual facilita su disposición.

c) Descarga a una laguna.

Si existe suficiente terreno disponible, los lodos diluidos podrán ser dispuestos directamente a lagunas donde los sólidos provenientes del proceso de coagulación - floculación se concentran hasta 10%. Los lodos provenientes del proceso de ablandamiento, se pueden concentrar hasta 30% y podrán alcanzar concentraciones de hasta 50% en períodos de años.

La presente opción puede ser atractiva para pequeñas plantas de tratamiento, sin embargo es poco práctica para muchas de las 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 en forma de tortas o semisólido. Cuando se haya eliminado el contenido de agua en los mismos, se podrán disponer de ellos a través de una de estas técnicas. Por otro lado, el lodo también podrá ser dispuesto con otro tipo de desechos.

2.3.2.- REUTILIZACIÓN.

El estudio de posibles usos de los lodos provenientes del proceso de potabilización de agua ha sido poco desarrollado y, además, no ha conseguido resultados totalmente positivos. El método de reutilización de este material que ha resultado más exitoso ha sido desarrollado en el campo de la agricultura. Sin embargo, este éxito ha sido parcial, ya que ha favorecido a algunos pocos cultivos y ha resultado ser contraproducente para otros.¹⁰

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 tienden a tapar 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.

También se han promovido los lodos que contienen cal como aditivo para suelos que contienen arcillas ya que son capaces de estabilizar el suelo (por

¹⁰ PANDIT, Murad y DAS, Siddharth (1998). **“Sludge Disposal”** (en línea). <http://www.fortunecity.es/felices/andorra/51/WT%20-%20Sludge%20Disposal.htm>. (Consulta: marzo, 2005).

recogimiento o expansión) e incrementar el pH de los suelos ácidos, además de llevar los niveles de sal soluble a rangos deseados.¹¹

Algunos lodos, después de haber sido tratados y dado su elevado contenido en arcilla, pueden emplearse en la fabricación de determinados productos cerámicos, tales como ladrillos, bases para baldosas y azulejos, etc., siempre que el contenido en materia orgánica sea bajo.¹²

2.3.3.- PROBLEMAS EN EL MANEJO DEL LODO.

Bien sea como disposición o reutilización, el manejo de los lodos representa un problema, aunque históricamente estos residuos han tenido un significado ambiental pequeño y por ello se ha dudado en controlar estas descargas.

El aluminio contenido en el lodo se moviliza en lagos y ríos y se ha demostrado que es tóxico para la vida acuática. Sin embargo, es extremadamente difícil evaluar el riesgo del aluminio en la integridad ecológica debido a la variada toxicidad de cada una de las especies y a su concentración.¹³

Por otra parte, los residuos de las plantas de potabilización de agua descargados en corrientes naturales de agua van formando depósitos o bancos de lodos en los tramos lentos del cauce, a la vez que aumentan la turbiedad y el color de

¹¹ BIO-MINERAL TIMES (1999). **“What is alum sludge? Can it be considered a resource? What is it good for?”** (en línea). <http://www.nviro.com/research%20reports/bmt/alum.htm>. (Consulta: abril, 2005).

¹² ARBOLEDA, Jorge. (2000). **“Teoría y Práctica de la Purificación del Agua”** (3ra ed.). Bogotá: McGraw Hill.

¹³ CASTAÑEDA SARABIA, Onia. **Determinación de la Toxicidad de los Lodos Generados por una Planta Potabilizadora, Utilizando Bioensayos”** (En línea). Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). <http://potablewater.iespana.es/toxicidad%20de%20lodos.pdf>. (Consulta: octubre, 2005).

las aguas receptoras, más aún si se está empleando carbón, disminuyendo la actividad fotosintética de las plantas acuáticas.¹⁴

Un estudio realizado por el Centro de Prevención de Desastres de México, titulado Determinación de la toxicidad de los lodos generados por una planta potabilizadora, utilizando bioensayos, comprobó que los lodos provenientes de los sedimentadores de una planta de potabilización de agua generaron una baja toxicidad sobre el grupo de semillas y plantas empleado en dicho trabajo experimental. Específicamente, se detectó problemas en el proceso de agrandamiento y maduración de los individuos estudiados.

Con la utilización de los lodos producto de los procesos de potabilización de agua se pudieran reducir notoriamente los niveles de contaminación que produce el aluminio contenido en este material, no sólo en los cuerpos de agua sino también en los suelos, ya que una de las formas de disposición del lodo se lleva a cabo a través de rellenos sanitarios. Además, se reduciría la gran cantidad de material biológico (representado por microorganismos) que es reinsertado en el medio natural (con la diferencia de que contienen una mayor concentración) generando el riesgo de proliferación de las enfermedades que dicho material biológico produce en las comunidades cercanas a los lugares de disposición de lodo.

2.3.4.- CANTIDADES PRODUCIDAS.

Los lodos líquidos que involucran el lodo de arrastre pueden producir en los sedimentadores entre el 2% y el 4 % del caudal que se procesa y en los filtros entre el 1% y el 2 % del mismo. En total la producción de lodo de una planta de

¹⁴ **“Fangos Producidos en el Tratamiento del Agua Potable”** (en línea). (1998). El Agua Potable, Tratamiento de Lodos. http://www.fortunecity.es/felices/andorra/51/tratamiento_de_lodos.htm (Consulta: octubre, 2005).

potabilización de agua no debe ser, en promedio, mayor del 5 % del caudal procesado.¹⁵

Aún cuando pudiera parecer un porcentaje bajo, su continuidad y presencia hace pensar que se debe evaluar la conveniencia e importancia de su correcta disposición o reutilización. Esta última como vía de aprovechamiento del material de desecho. En esta posibilidad de reutilización pareciera atractivo evaluar las características del mismo como posible material de construcción.

2.4.- EXPERIENCIAS Y CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

A través de la historia de la humanidad, el hombre ha utilizado muchísimos materiales para las construcciones que ha requerido. Primitivamente se usaron productos que ofrecía la naturaleza como la madera o las rocas, ya en la actualidad se siguen utilizando. Con el pasar del tiempo y el desarrollo tecnológico, el abanico de posibilidades en este ramo fue creciendo, dando paso a nuevos materiales elaborados por el hombre. Un grupo importante de estos materiales son los elaborados a base de mezclas de distintos productos.

Los materiales elaborados a base de mezclas son los más utilizados en la industria de la construcción debido a su capacidad de adaptarse a cualquier forma que la obra requiera, gracias a su característica fluida en estado fresco, y por la capacidad resistente que ofrece una vez que ha fraguado. Adicionalmente, estos materiales son económicos y de manejo sencillo.

¹⁵ ARBOLEDA, Jorge. (2000). **“Teoría y Práctica de la Purificación del Agua”** (3ra ed.). Bogotá: McGraw Hill.

2.4.1.- COMPONENTES DE UNA MEZCLA DE UN MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.

2.4.1.1.- CONGLOMERANTE.

El conglomerante más utilizado en la elaboración de los materiales de construcción es el cemento. Cuando se habla del cemento, implícitamente se alude al cemento Pórtland o cemento sobre la base de Pórtland, ya que son los productos aglomerantes que se usan casi exclusivamente con fines estructurales. Para otros conglomerantes distintos, también empleados en la construcción, se suele añadir a la palabra cemento alguna otra que los especifique (cemento de escoria, cemento puzolánico, cemento supersulfatado, etc.).¹⁶

El cemento, que es el componente activo de la mezcla, influye en todas las características de este material. Sin embargo, el cemento constituye aproximadamente solo un 10% a un 20% del peso de la mezcla (en el caso del concreto) siendo un 80% a 90% de materiales restantes el que condiciona la posibilidad de que se desarrollen las propiedades del cemento. En la práctica, son decisivas la calidad de los agregados y las proporciones entre los componentes.¹⁷

El cemento es una especie de cal hidráulica perfeccionada. Es un polvo seco hecho de sílice, alúmina, cal, óxido de hierro y óxido de magnesio (en muy bajas proporciones), que se endurece cuando se mezcla con agua.

Entre las características del cemento se pueden mencionar las siguientes: es uniforme, fino, hidráulico, moldeable, durable, resistente, adhesivo, impermeable y

¹⁶ PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J. y VELAZCO, G. (2004). “**Manual del Concreto Estructural**”. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.

¹⁷ “**Introducción General al Concreto**” (en línea). Curso – taller de concreto, Fundación ICA. Marzo, 2000. <http://www.monografias.com/trabajos4/concreto/concreto.shtml>. (Consulta: marzo, 2005).

aislante, cualidades que permiten una ilimitada variedad de usos diarios que dan forma al mundo de la construcción.

2.4.1.2.- AGREGADOS.

Los agregados, también denominados áridos o inertes, son fragmentos o granos, usualmente pétreos, cuyas finalidades son abaratar los costos de la mezcla y dotarla de ciertas características favorables, entre las cuales destaca la disminución de retracción de fraguado o retracción plástica.

Los agregados constituyen la mayor parte de la masa del concreto, ya que alcanzan a representar entre el 70% y el 85% de su peso, razón por la cual las propiedades de los inertes resultan tan importantes para la calidad final de la mezcla.¹⁸

Las características de los agregados empleados deberán ser aquellas que beneficien el desarrollo de ciertas propiedades en la mezcla, como lo son la trabajabilidad y el desarrollo de resistencias mecánicas.

Los agregados más utilizados en la construcción pueden dividirse en:

✓ Agregados Finos:

Según la Norma Venezolana COVENIN 221-2001: El agregado fino es el que pasa como mínimo el 95% por el cedazo COVENIN 4,76 mm (# 4) y queda retenido en el cedazo COVENIN 74 μ m (# 200). A menos que se indique otra cosa, el agregado fino suele ser arena, el producto de la desintegración y abrasión natural de las rocas.

¹⁸ PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J. y VELAZCO, G. (2004). “**Manual del Concreto Estructural**”. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.

✓ **Agregados Gruesos:**

El agregado grueso es el que queda retenido como mínimo el 95% en el cedazo COVENIN 4,76 mm (#4). (Norma COVENIN 221-2001: El agr). El agregado grueso comúnmente utilizado consta de piedra picada o canto rodado.

2.4.1.2.1.- PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN A UN AGREGADO.

a) Granulometría:

Se entiende por granulometría la composición del material en cuanto a la distribución del tamaño de los granos que lo integran, siendo esta característica determinante en la calidad del material para formar parte de una mezcla.

El tamaño de los granos se mide de forma indirecta mediante 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, a través de esta serie sus granos se distribuyen según sus tamaños.

La granulometría se puede expresar de varias formas: retenidos parciales en cada cedazo, expresados en peso o en porcentaje, o retenidos acumulados, o pasantes, principalmente en porcentaje. La forma usual y conveniente es la que expresa al pasante total por cada cedazo como porcentaje en peso.

Las granulometrías aptas para su uso en una mezcla mantienen una secuencia sucesiva de tamaños, desde el grano más grueso hasta el más fino, que viene a ser

contiguo con las partículas más gruesas del cemento. Este tipo de granulometría, donde todos los cedazos tienen fracciones retenidas, con más el 1% del peso del material, son llamadas granulometrías continuas, preferidas porque suelen producir mezclas más trabajables y con buenas resistencias mecánicas. Las granulometrías que no tienen retenidos en uno o varios cedazos son llamadas discontinuas y tienen el riesgo de producir segregación y dificultar la trabajabilidad.

b) Tamaño Máximo:

Se denomina tamaño máximo de un agregado al tamaño de sus partículas más gruesas, medido como abertura del cedazo de menor tamaño que deje pasar el 95% o más del material. Manteniendo la calidad intrínseca de los agregados, al emplear mayor tamaño máximo disminuye la superficie específica a ser lubricada en la mezcla por lo que se conseguirán los siguientes efectos:

- ✓ Mayor fluidez, pues ha disminuido la superficie total a lubricar.
- ✓ Mayor segregación.
- ✓ Menor resistencia mecánica de la mezcla, ya que el incremento del tamaño máximo incrementa también el mecanismo de fractura.

c) Impurezas:

A los agregados los pueden acompañar algunas impurezas perjudiciales, la mayoría de origen natural y acompañando, normalmente, a las arenas, cuya presencia es inconveniente por los efectos adversos que producen en la mezcla. Entre dichos materiales, los más comunes son los finos indeseables (limo y arcilla), la materia orgánica, sales naturales, entre otros.

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.

✓ **Limo y Arcilla:**

El limo es el material granular fino, sin propiedades plásticas, cuyas partículas tienen tamaños normalmente comprendidos entre dos (2) y sesenta (60) micras aproximadamente, en tanto que la arcilla corresponde al material más fino, integrado por partículas que son menores de dos (2) micras y que sí posee propiedades plásticas.

✓ **Materia Orgánica:**

Las partículas de materia orgánica que a veces acompañan los agregados interfieren en la fase de hidratación¹⁹; 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 pudiera ser incluso impedido.

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.

El ensayo utilizado para determinar el contenido de materia orgánica de un agregado es conocido como ensayo colorimétrico y es regido por la norma venezolana COVENIN 256-77: “Método de ensayo para la determinación cualitativa de impurezas orgánicas en arenas para concreto (ensayo colorimétrico)”. En este ensayo se compara el color del agua sobrenadante de la muestra con una escala de

¹⁹ NEVILLE, Adam (1988). **“Tecnología del Concreto”**. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Editorial Limusa, México.

colores conocida como escala de Gardner. Dicha escala está formada por cinco colores numerados, donde el más claro es el número uno y el más oscuro es el número cinco, siendo esta última lectura la que representa mayor presencia de materia orgánica. El uso de una arena para concreto se rechaza en caso de ésta supere el número tres de la escala de Gardner.

✓ **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 efluentes industriales, que pueden tener composición muy variada. El ión cloruro de la sal produce la corrosión de las armaduras de acero y el ión sulfato ataca al cemento.

d) Peso por Unidad de Volumen:

El uso principal de las relaciones peso/volumen es para la selección y manejo de los agregados, por lo que se relaciona, en cierta forma, con su calidad. Desde un punto de vista normativo, las más importantes se pueden encontrar en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Algunas Características Físicas de los Agregados.²⁰

Ensayo	Aplicación
Peso unitario COVENIN 263	Peso/volumen, en pilas. Dosificación en volumen. Diseños de mezcla por volumen. Vacíos.
Peso específico COVENIN 268 y 269	Diseños de mezcla por peso.
Humedad superficial COVENIN 272	Control de dosificación en sitio. Ajustes de precio en compras de agregados.

²⁰ PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J.; VELAZCO, G. (2004). “**Manual del Concreto Estructural**”. Siderur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.

✓ **Peso Unitario:**

Se denomina peso volumétrico o peso unitario del agregado, ya sea suelto o compactado, el peso que alcanza un determinado volumen unitario. Generalmente se expresa en kilos por metro cúbico de material. Este valor es requerido cuando se trata de agregados ligeros o pesados y en el caso de dosificarse la mezcla por volumen.

El peso unitario suelto se determina llenando un recipiente de volumen conocido y estable, con el agregado, dejándolo caer libremente desde cierta altura. Después se pesa y se establece la relación peso/volumen. Este dato es importante porque permite convertir peso en volúmenes y viceversa cuando se trabaja con agregados. La regularidad del peso unitario, en una obra, sirve también para descubrir posibles cambios bruscos de la granulometría o en la forma del agregado. El peso unitario compacto se obtiene de la misma manera que el peso unitario suelto pero compactando el material dentro del molde.

✓ **Peso Específico:**

El peso específico de los agregados, adquiere importancia en la construcción cuando se requiere que la mezcla tenga un peso límite. Además, el peso específico es un indicador de la calidad, en cuanto los valores elevados corresponden a materiales de buen comportamiento, mientras que un peso bajo generalmente corresponde a agregados absorbentes y débiles, caso en que es recomendable efectuar otras pruebas adicionales.

Aplicado a agregados, el concepto de peso específico se refiere a la densidad de las partículas individuales y no a la masa del agregado como un todo.

El peso específico de masa de la mayoría de los agregados comunes empleados está comprendido dentro de los límites de 2,6 a 3,0.²¹

²¹ PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J.; VELAZCO, G. (2004). “**Manual del Concreto Estructural**”. Siderur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.

La Tabla 2.6 contiene los valores usuales de peso unitario y peso específico para mezclas que contienen los agregados empleados habitualmente en la construcción.

Tabla 2.6. Valores Usuales de las Relaciones Peso/Volumen de los Agregados no Livianos.²²

Propiedad	Gruesos	Finos
Peso unitario suelto (kgf/litro)	1,4 a 1,5	1,5 a 1,6
Peso unitario compacto (kgf/litro)	1,5 a 1,7	1,6 a 1,9
Peso específico	2,5 a 2,7	2,5 a 2,7

e) Humedad:

Los agregados suelen retener algunas cantidades de agua en forma de humedad. El contenido de humedad se considera como la diferencia en peso entre el material húmedo y el mismo secado al horno a una temperatura de 105 °C durante veinticuatro (24) horas. Se suele expresar como porcentaje en peso referido al material seco.

Los agregados presentan poros internos, los cuales se conocen como abiertos cuando son accesibles al agua o humedad exterior sin requisito de presión, diferenciándose de la porosidad cerrada, en el interior del agregado, sin canales de comunicación con la superficie a la que alcanza mediante flujos de baja presión. La humedad se encuentra en el agregado rellenando los poros internos y en forma de 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 sí pasa a formar parte de la mezcla, alterando las proporciones.

²² PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J.; VELAZCO, G. (2004). “Manual del Concreto Estructural”. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.

El punto de equilibrio entre el grano seco y el húmedo se conoce como el estado de agregado saturado con superficie seca. Para llevar a cabo el diseño de mezcla, se considera que los agregados están bajo esta condición, es decir, el material no aporta ni absorbe agua de la mezcla.

2.4.1.2.2.- PROPIEDADES DE UN SUELO.²³

Para el caso de los suelos utilizados para mezclas de suelo-cemento, se toman en cuenta no sólo las propiedades mencionadas anteriormente, sino que cuentan con otras propias de este tipo de material que pueden ser determinadas también para el lodo proveniente del proceso de potabilización de agua.

✓ **Pruebas de Campo.**

Las pruebas de campo son aquellas que permiten conocer algunas características elementales como por ejemplo las organolépticas. No requieren de la utilización de equipos y procedimientos especializados, y pueden ser realizadas directamente en el sitio de muestreo.

Ya que no existen normas que rijan estas pruebas, a continuación se describen los criterios que las gobiernan a estas pruebas.

- a) **Prueba del olor:** un lodo húmedo que contiene materia orgánica despide un olor característico a moho, que tiende a intensificarse con el calor. Si es un material inorgánico, en estado seco no posee ningún olor y en estado húmedo tiene un olor terroso.

²³ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- b) **Prueba del tacto:** permite diferenciar los granos gruesos (gravas y arena) de acuerdo a la siguiente descripción: angular, sub-angular, redondeada o sub-redondeada.
- c) **Prueba de la vista:** la prueba permite tener una idea del tamaño de las partículas, pudiendo distinguir gruesos de finos. Debido a su tamaño, los gruesos se diferencian a simple vista, pero los finos, como las arcillas y limos, no son visibles.
- d) **Prueba de lavado de manos:** 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. Si contiene limos, el enjuague no presenta dificultad.
- e) **Prueba del brillo:** 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 una arcilla de baja plasticidad.
- f) **Prueba de la sacudida o reacción al agitado:** Las sacudidas permiten que el agua contenida en la muestra salga y que la superficie se vuelva brillante o lustrosa según sea el caso. En seguida la muestra se estrecha y desaparecen el agua y el brillo. La rapidez con que aparece o desaparece el agua en la superficie al sacudir y apretar, determina la clase de finos que componen el material.
- **Reacción rápida:** el agua aparece aproximadamente entre los 5 y 10 golpes y desaparece rápidamente. Si se presiona con mayor fuerza la muestra se pulveriza. Se trata de una arena muy fina o de limos gruesos sin materia orgánica.

- **Reacción lenta:** el agua aparece aproximadamente entre los 20 y 30 golpes y desaparece lentamente y, si se presiona con mayor fuerza se aplasta como una esfera de plastilina sin pulverizarse, se trata de un limo ligeramente plástico o una arcilla limosa.
 - **Ausencia de reacción:** cuando el agua no aparece o lo hace muy lentamente, y al presionar la muestra la superficie permanece brillante, se esta en presencia de arcilla.
- g) **Prueba del cordón:** esta prueba es un complemento de la prueba de la sacudida y permite apreciar la cohesión. La cohesividad del lodo se mide según el esfuerzo requerido para romper esta esfera apretándola entre los dedos pulgar e índice.
- **Cordón duro:** si el contenido de arcilla es elevado, la esfera se aplasta con dificultad y no se fragmenta al amasarla. La cohesividad es elevada y para ser utilizado en construcción debe ser mezclado con otros materiales.
 - **Cordón semi-duro o blando:** se hace poco esfuerzo para romper la esfera, la cohesividad es media, el material es limo-arcilloso.
 - **Cordón frágil:** al amasar la esfera, ésta se rompe y fragmenta con facilidad, la cohesión es baja y su contenido es básicamente arena y algunos limos.
- h) **Prueba de la cinta:** este ensayo sirve para estimar la plasticidad del material.

- **Cinta larga:** la cinta llega a romperse cuando la longitud que cuelga alcanza más de 15cm. El material posee un alto contenido de arcilla y para ser utilizado se necesita una mezcla estabilizante.
- **Cinta media:** la cinta que cuelga alcanza con dificultad de 5 a 15 cm. Sin romperse. Se trata de un material areno-arcilloso.
- **Cinta corta:** la cinta se rompe antes de que sobresalga los 5 cm. Se trata de un material arenoso.
- **No hay cinta:** no se logra formar la cinta. Estos suelos son aptos para la construcción con adobes.

✓ **Límites de Atterberg.**

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. La arcilla, por ejemplo al agregarle agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido.

El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades, para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse.

- **Límite Líquido (WL).**

El límite líquido de un suelo es la frontera entre los estados líquido y plástico o bien, la cantidad de humedad necesaria para que éste comience a fluir cuando se le

golpea ligeramente con un dispositivo adecuado denominado Máquina de Casagrande.

- **Límite Plástico (Wp).**

El límite plástico se define como el contenido de humedad que tiene un suelo en el momento de pasar del estado plástico a semi-sólido.

- **Índices Derivados.**

Los índices derivados son aquellos que se calculan a partir de los límites líquido, plástico y el contenido de humedad que presenta el suelo.

- **Índice de Plasticidad (Ip).**

El índice de plasticidad de un suelo es una medida de su capacidad de desarrollar cohesión y se determina como la diferencia numérica entre su límite líquido (WL) y su límite plástico (WP), con la Fórmula 2.1.

$$Ip = Wl - Wp$$

Fórmula 2.1. Índice de Plasticidad.

De acuerdo a los valores que esta tome, la plasticidad del suelo podrá ubicarse en los rangos contenidos en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Rangos de Plasticidad del Suelo.²⁴

Plasticidad	Ip
Baja	5 a 10
Media	10 a 20
Alta	20 a 30

²⁴ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

➤ **Índice de Consistencia (Ic).**

Se define como la consistencia de un suelo en su estado natural, y es función de su contenido de humedad natural (w), de su límite líquido (WL) y su límite plástico (WP). Se calcula a través de la Fórmula 2.2.

$$Ic = \frac{Wl - \omega}{Ip}$$

Fórmula 2.2. Índice de Consistencia.

De acuerdo a los valores que tome este índice, la consistencia del suelo se podrá definir dentro de los rangos especificados en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Rango de Consistencia del Suelo.²⁵

Consistencia	Ic
Líquida	< 0,00
Plástica muy blanda	0,00 a 0,05
Plástica blanda	0,05 a 0,75
Plástica tiesa	0,75 a 1,00
Semi-dura	> 1,00
Dura	$\omega < Wp$

✓ **Clasificación de un suelo.**²⁶

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) deriva de un sistema desarrollado por A. Casagrande para identificar y agrupar suelos en forma rápida en obras militares durante la guerra.

²⁵ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

²⁶ **“Laboratorio de Mecánica de Suelos”** (en línea). Departamento de Construcción Civil. Facultad de Arquitectura, Construcción e Ingeniería Civil. Universidad Católica del Norte. Chile. Disponible en: <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/uscsM2.htm>. (Consulta: octubre, 2005).

Este sistema divide los suelos primero en dos grandes grupos, de granos gruesos y de granos finos. Los primeros tienen más del 50 por ciento en peso de granos mayores que 0,08 mm; se representan por el símbolo G si más de la mitad, en peso, de las partículas gruesas son retenidas en tamiz 5 mm, y por el símbolo S si más de la mitad pasa por tamiz 5 mm.

A la G o a la S se les agrega una segunda letra que describe la graduación: W, buena graduación con poco o ningún fino; P, graduación pobre, uniforme o discontinua con poco o ningún fino; M, que contiene limo o limo y arena; C, que contiene arcilla o arena y arcilla.

Los suelos finos, con más del 50 por ciento bajo tamiz 0,08 mm, se dividen en tres grupos, las arcillas (C), los limos (M) y limos o arcillas orgánicos (O).

Estos símbolos están seguidos por una segunda letra que depende de la magnitud del límite líquido e indica la compresibilidad relativa: L, si el límite líquido es menor a 50 y H, si es mayor.

Para obtener gráficamente la clasificación del suelo se utiliza la carta de plasticidad de Casagrande (Figura 2.3), graficando el límite líquido contra el índice de plasticidad.

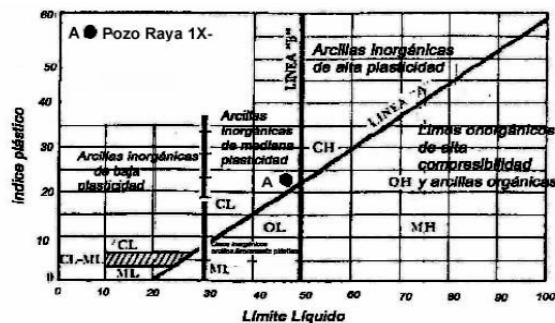


Figura 2.3. Carta de Plasticidad de Casagrande.²⁷

²⁷ REPSOL EXPLORACION PERU (2005). “Capítulo 3. Línea Base Ambiental” (en línea). <http://www.minem.gob.pe/archivos/dgaee/publicaciones/resumen/raja/Capitulo3.pdf>. (Consulta: septiembre, 2005).

Tabla 2.9. Sistema unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).²⁸

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)					
DIVISIÓN PRINCIPAL	SÍMBOLO	CRITERIOS DECLASIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN	
		% QUE PASA EL TAMIZ 200:	REQUISITOS SUPLEMENTARIOS		
GRANO GRUESO: Más del 50% en peso mayor que el tamiz 200 (0,074mm).	SUELOS GRAVOSOS: Más del 50% de la fracción gruesa > tamiz No. 4 (4.76 mm)	GW	0 - 5%*	$D_{60}/D_{10} > 4$ $D_{30}^2 / (D_{60} * D_{10}) = 1-3$	Grava bien graduada, Grava arenosa.
		GP		Cuando no se cumplen las condiciones para GW.	Gravas mal graduadas o discontinuas, gravas arenosas.
	GM	≥ 12*	IP < 4 o Bajo la línea A	Gravas limosas o limo arenosas	
	GC		IP > 7 y Sobre la línea A	Gravas arcillosas o arcillo - arenosas.	

Tabla 2.10. Sistema unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) cont.²⁸

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)				
DIVISIÓN PRINCIPAL	SÍMBOLO	CRITERIOS DECLASIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN
		% QUE PASA EL TAMIZ 200:	REQUISITOS SUPLEMENTARIOS	
Más del 50% en peso mayor que el tamiz 200 (0,074mm). SUELOS ARENOSOS: Más del 50% de la fracción gruesa < tamiz No. 4.	SW	0 - 5*	$D_{60}/D_{10} > 4$ $D_{30}^2 / (D_{60} * D_{10}) = 1-3$	Arenas bien graduadas, Arenas gravosas.
	SP		Cuando no se cumplen las condiciones para SW.	Arenas uniformes o con graduación discontinua, Arenas gravosas
	SM	≥ 12*	IP < 4 o Bajo la línea A	Arenas limosas, Arenas limosas - gravosas.
	SC		IP > 7 y Sobre la línea A	Arenas arcillosas, Arenas arcillosas - gravosas.

²⁸ ASTRAIN, Pedro y MARRERO, Martha. **“Transformación de la Clasificación de los Suelos de Uso en la Agricultura al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Sucs)”** (en línea). <http://espejos.unesco.org.uy/simplac2002/Ponencias/Geom%20E1tica%202002/GE152.doc>. (Consulta: septiembre, 2005).

Tabla 2.11. Sistema unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) cont..²⁹

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)				
División Principal.	Símbolo.	Criterios de Clasificación	Descripción	
		Requisitos Suplementarios		
GRANO FINO: Más del 50% en peso menor que el tamiz 200 (0,074mm).	BAJA COMPRESIBILIDAD: L.L. < 50	ML	Bajo la línea A. L.L. < 50	Limos , arenas muy finas, arenas finas limosas o arcillosas, Limos micáceos.
		CL	Sobre la línea A. L.L. < 50	Arcillas de baja plasticidad, arcillas Arenosas o Limosas.
		OL	Bajo la línea A. L.L. < 50. Olor o color a sustancia orgánica.	Limos orgánicos y arcillas de baja plasticidad.

Tabla 2.12. Sistema unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) cont..²⁹

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)				
DIVISIÓN PRINCIPAL.	SÍMBOLO	CRITERIOS DECLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	
		REQUISITOS SUPLEMENTARIOS		
GRANO FINO: Más del 50% en peso menor que el tamiz 200 (0,074mm).	ALTA COMPRESIBILIDAD: L.L. > 50	MH	Bajo la línea A. L.L. > 50.	Limos micáceos. Limos de diatomeas. Cenizas volcánicas.
		CH	Sobre la línea A. L.L. > 50.	Arcillas muy plásticas. Arcillas arenosas.
		OH	Bajo la línea A. L.L. > 50. Olor o color a sustancia orgánica.	Limos orgánicos. Arcillas de alta plasticidad.
SUELOS CON MATERIA ORGÁNICA FIBROSA	Pt	Materia orgánica fibrosa; se carboniza, quema o se pone incandescente	Turba. Turbas arenosas. Turbas arcillosas.	

²⁹ ASTRAIN, Pedro y MARRERO, Martha. **“Transformación de la Clasificación de los Suelos de Uso en la Agricultura al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Sucs)”** (en línea). <http://espejos.unesco.org.uy/simplac2002/Ponencias/Geom%Etica%202002/GE152.doc>. (Consulta: septiembre, 2005).

2.4.1.3.- AGUA.³⁰

Puede decirse que el agua a utilizar en la mezcla reacciona químicamente con el material cementante para lograr por un lado la formación del gel (cuando la pasta aún no ha endurecido) y permitir que el conjunto de la masa adquiera las propiedades que en estado fresco faciliten una adecuada manipulación y colocación de la misma; y en estado endurecido la conviertan en un producto de las propiedades y características deseadas.

No todas las aguas inadecuadas para beber son descartadas para preparar una mezcla de concreto. Por consiguiente, el agua de mezclado deberá estar libre de sustancias colorantes, aceites, azúcares, sales, sulfatos y materia orgánica. En general, el agua empleada no deberá contener sustancias que puedan producir efectos sobre el fraguado, la resistencia o durabilidad, apariencia del concreto, o sobre los elementos metálicos embebidos en éste, ya que sus propiedades afectan retardando o inutilizando dicho proceso.

El agua de amasado cumple dos roles fundamentales dentro de la mezcla de concreto:

1. Hidratar al cemento para formar una pasta que pueda fraguar y posteriormente endurecer, convirtiéndose en el cementante requerido para unir las partículas de áridos. La cantidad de agua necesaria para activar químicamente al cemento es aproximadamente un 28% de su peso. Sin embargo, si se utiliza esta cantidad de agua, la mezcla resultaría extremadamente seca y no manejable en obra. El agua utilizada en la mezcla además de influir directamente en la resistencia mecánica a través de la relación agua/cemento (**a/C**), afecta otras características como

³⁰ **“Importancia del Agua de Amasado en la Calidad de Hormigones y Morteros”** (en línea): Melon, WebTips, WebTip N° 8, s/f. Disponible en: www.melon.cl/html_construc_prof/webtipn8.htm. (Consulta: marzo 2005).

potencialidad de fisuración plástica, retracción a largo plazo, densidad, permeabilidad y la durabilidad.

2. Otorgar trabajabilidad o fluidez a la mezcla para que pueda ser utilizado en obra. La cantidad de agua necesaria para esta función es adicional a la requerida para combinarse químicamente con el cemento. El contenido de agua debe ser tal que logre hidratar el cemento y a su vez le de 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 del mismo.

2.4.2.- DISEÑO DE MEZCLA.³¹

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 después, 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.

En algunos casos puede ser importante el color, peso unitario, textura superficial y otros. Las cantidades de los componentes sólidos, agregados y cemento, suelen expresarse en kilogramos por metro cúbico de mezcla. El agua puede

³¹ PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J.; VELAZCO, G. (2004). “**Manual del Concreto Estructural**”. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.

expresarse en litros o kilogramos entendiendo que un kilogramo en agua equivale a un litro.

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.

2.4.3.- PROPIEDADES DE UN MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.

Las propiedades mecánicas y de durabilidad definen la respuesta de los materiales cuando se les somete a la acción de fuerzas externas. Para poder analizar esta respuesta se deben definir previamente dos parámetros fundamentales:³²

✓ **Tensión:** Es la fuerza por unidad de área. En general en cuerpos sometidos a la acción de cargas, se calcula la tensión promedio asumiendo una distribución uniforme de la carga sobre el área en la que actúa.

✓ **Deformación:** Cambio que sufre en sus dimensiones originales un material cuando es sometido a la acción de una carga.

³² LUIS, Alesmar y RENDÓN Nalia (2005). “Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Las propiedades mecánicas describen la forma en que un material soporta fuerzas aplicadas, incluyendo fuerzas de tensión, compresión, impacto, cíclicas o de fatiga, o fuerzas a altas temperaturas. Entre ellas se encuentran:

✓ **Tenacidad:** Es la propiedad que tienen ciertos materiales de soportar, sin deformarse ni romperse, las tensiones bruscas que se les apliquen.

✓ **Elasticidad:** Consiste en la capacidad de algunos materiales para recobrar su forma y dimensiones primitivas cuando cesa la tensión que había determinado su deformación.

✓ **Dureza:** Es la resistencia que un material opone a la penetración.

✓ **Fragilidad:** Un material es frágil cuando se rompe fácilmente por la acción de un choque.

✓ **Plasticidad:** Aptitud de algunos materiales sólidos de adquirir deformaciones permanentes, bajo la acción de una presión o fuerza exterior, sin que se produzca rotura.

✓ **Ductilidad:** Considerada una variante de la plasticidad, es la propiedad que poseen ciertos metales para poder estirarse en forma de hilos finos.

Las propiedades de durabilidad son aquellas que determinan la respuestas que tiene el material endurecido al acción que sobre él ejercen agentes externos típicos cuyo efecto prologando pueda ocasionar fallas significativas, tales como la presencia de agua (por humedad o en forma de lluvia) o cambios de temperatura. Dentro de estas propiedades, destacan particularmente dos: la erosión y la absorción.

La erosión mide la pérdida de material. Su estudio se puede hacer de dos formas: erosión por rociado, simulando el efecto lluvia o humedad, y erosión por cepillado, simulando el efecto de contacto físico.

La absorción se define como la diferencia de peso entre el material totalmente seco y el mismo material saturado, referido al peso seco. Esta propiedad ofrece una referencia de la capacidad de impermeabilidad del material.

2.4.4.- MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS CONVENCIONALES.

2.4.4.1.- CONCRETO.

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregado y pasta. La pasta, une a los agregados (arena y piedra) para formar una masa semejante a una roca pues endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua.³³

La pasta está compuesta de cemento Pórtland, agua y aire atrapado (o incluido intencionalmente). Ordinariamente, la pasta constituye del 25% al 40 % del volumen total del concreto. El volumen absoluto del cemento está comprendido usualmente entre el 7% y el 15 % y el agua entre el 14% y el 21 %. El contenido de aire y concretos con aire incluido puede llegar hasta el 8% del volumen del concreto, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso.³³

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75 % del volumen total del concreto, su selección es importante. Los agregados deben consistir en partículas con resistencia adecuada así como resistencias a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudieran causar

³³ Construaaprende.com Ingeniería civil y Arquitectura. Prácticas. **“Trabajo: Características del Concreto: Resistencia”** (en línea). <http://www.construaaprende.com/Trabajos/T2/T2Pag8.html>. (Consulta: noviembre, 2005).

deterioro del concreto. Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas.³⁴

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

Para cualquier conjunto específico de materiales y de condiciones de curado, la cantidad de concreto endurecido esta determinada por la cantidad de agua utilizada en la relación con la cantidad de cemento. A continuación se presentan algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- ✓ Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
- ✓ Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- ✓ Se incrementa la resistencia al intemperismo.
- ✓ Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto y el esfuerzo.
- ✓ Se reducen las tendencias de agrietamiento por contracción.

Entre menos agua se utilice, se tendrá una mejor calidad de concreto (a condición de que se pueda consolidar adecuadamente). Menores cantidades de agua de mezclado resultan en mezclas más rígidas, sin embargo, con vibración, aún las mezclas con esta característica pueden ser empleadas. Para una calidad dada de concreto, las mezclas más rígidas son las más económicas. Por lo tanto, la consolidación del concreto por vibrado permite una mejora en la calidad del material y en la economía.

³⁴ Construaaprende.com Ingeniería civil y Arquitectura. Prácticas. **“Trabajo: Características del Concreto: Resistencia”** (en línea). <http://www.construaaprende.com/Trabajos/T2/T2Pag8.html>. (Consulta: noviembre, 2005).

Las propiedades del concreto en estado fresco (plástico) y endurecido, se pueden modificar agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida, durante su dosificación. Los 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.

Existen varios métodos para calcular el diseño de mezcla del concreto, que toman en cuenta diferentes cantidades y tipos de variables. El más utilizado por contemplar menor número de variables y por estar respaldado por una gran cantidad de ensayos de laboratorio es el que vincula dos leyes básicas: la Ley de Abrams y la Relación Triangular, y toma en cuenta como variables a la dosis de cemento, la trabajabilidad, la relación agua/cemento y la resistencia.

2.4.4.1.1.- LEY DE ABRAMS.³⁵

Se trata de una ley experimental según la cual la resistencia de una mezcla consistente como el concreto, viene determinada por la proporción de la cantidad de agua y de cemento que se añade a dicha mezcla, conocida como relación agua/cemento (a/C), que resulta ser inversamente proporcional. Esta relación se expresa mediante la Fórmula 2.3.

$$\alpha = a/C$$

Fórmula 2.3. Relación agua/Cemento.

³⁵ PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J.; VELAZCO, G. (2004). “**Manual del Concreto Estructural**”. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.

Donde:

- ✓ **a** representa la cantidad de agua en litros o en kilogramos fuerza.
- ✓ **C** representa la dosis de cemento en kilogramos fuerza.

Una forma de expresar la Ley de Abrams es a través de la Fórmula 2.4.

$$\bar{R} = M / N^\alpha$$

Fórmula 2.4. Ley de Abrams.

Donde:

- ✓ \bar{R} representa la resistencia media esperada.
- ✓ **M** y **N** son constantes que dependen de las características de los materiales que componen la mezcla de la edad del ensayo, así como de la forma de ejecutarlo.

La investigación y la experiencia han demostrado que el factor de mayor importancia en la resistencia del concreto es la relación agua/cemento. La Figura 2.4 describe la relación entre la resistencia del concreto y a/C.

Además, se ha determinado que la resistencia del concreto sigue dependiendo principalmente de la relación agua/Cemento incluso ante variaciones en sus componentes (proporción de agregados, dosis de cemento o agua), siempre que los agregados sean de calidad, la mezcla sea plástica, trabajable y no presente segregación.

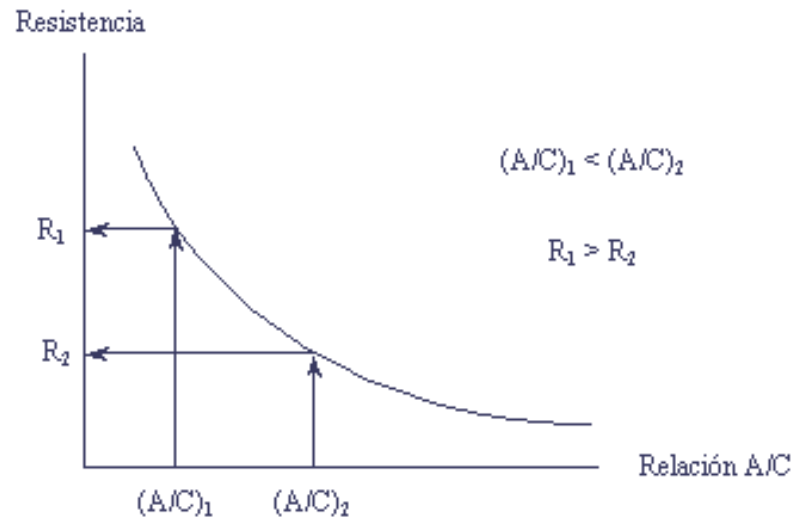


Figura 2.4. Resistencia versus relación a/C.³⁶

2.4.4.1.2.- RELACIÓN TRIANGULAR.³⁷

Esta es una expresión que relaciona la trabajabilidad (**T**) medida como asentamiento en el Cono de Abrams (y que puede considerarse como la propiedad de mayor representatividad del concreto en estado fresco) con dos parámetros claves del diseño de mezclas, como son: la relación agua/Cemento (**a/C**) y la dosis de cemento (**C**).

La relación triangular se expresa a través de la Fórmula 2.5.

$$C = k \cdot T^n / \alpha^m$$

Fórmula 2.5. Relación Triangular.

³⁶ “**Importancia del Agua de Amasado en la Calidad de Hormigones y Morteros**” (en línea): Melon, WebTips, WebTip N° 8, s/f. Disponible en: www.melon.cl/html_construc_prof/webtipn8.htm. (Consulta: marzo 2005).

³⁷ PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J.; VELAZCO, G. (2004). “**Manual del Concreto Estructural**”. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.

Donde:

- ✓ **C** representa la dosis de cemento en kgf/m^3 .
- ✓ **α** representa a la relación agua/cemento (a/C) en peso.
- ✓ **T** representa al asentamiento en el Cono de Abrams en cm.
- ✓ **k, m y n** son constantes que dependen de las características de los materiales componentes de la mezcla y de las condiciones en que se elaboran.

Después de un diseño de mezcla adecuado, así como, dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado y curado, el concreto endurecido se transforma en un material de construcción resistente, no combustible, durable, resistencia al desgaste y prácticamente impermeable que requiere poco o nulo mantenimiento. El concreto también es un excelente material de construcción porque puede moldearse en una gran variedad de formas, colores y texturizados para ser usado en un número ilimitado de aplicaciones. Algunas ventajas y desventajas del uso del concreto se mencionan en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Ventajas y Desventajas del Uso del Concreto como Material de Construcción.

Ventajas	Desventajas
Capacidad de ser moldeado. Económico. Durable. Resistente al fuego. Fabricación "in situ". Propiedades estéticas.	Resistencia a bajas tensiones. Baja Ductilidad. Inestabilidad volumétrica. Baja relación entre resistencia y peso.

2.4.4.2.- SUELO-CEMENTO.³⁸

El Suelo-cemento es la mezcla íntima y homogénea de suelo, cemento Pórtland 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.

Es mucho lo que se ha hecho empleando el Suelo-cemento, pero hasta ahora no existe un criterio específico y confiable para diseñar las mezclas en lo referente al contenido de cemento y agua. Así que los criterios quedan fuertemente ligados a la experiencia e interpretación del ingeniero, combinado con los criterios de tipo económico, que sin duda, y más en nuestro país constituyen un elemento importante en la decisión final.

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

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.³⁸

³⁸ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

2.4.5.- MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS NO CONVENCIONALES.

Existen diversos estudios cuyo principal objetivo es el desarrollo de innovadores materiales de construcción que, al igual que el Lodo-Cemento, buscan darle uso a un material que, después de haber sido desechado, no tiene utilidad alguna y cuya disposición representa problemas económicos, sociales y ecológicos, creando de esta forma materiales no convencionales para la construcción. A continuación se describen algunos de estos trabajos.

2.4.5.1.- RIPIO DE CANTERA.³⁹

El material de desecho proveniente de los procesos de obtención de los agregados para la industria de la construcción es conocido como ripio. Por consiguiente, el ripio de cantera es considerado como el material descartado durante la obtención de piedra picada, para el caso de canteras de piedra, y durante el lavado de arena, en el caso de canteras o saques de arena.

En la elaboración de un bloque de ripio se utilizan tres materiales: cemento, agua y el propio ripio, el cual es el principal componente de la mezcla.

Los ensayos a compresión realizados a estos bloques de ripio han arrojado resultados que indican que son lo suficientemente resistentes para construcciones pequeñas. Sin embargo, estos valores de resistencia a compresión son 95% menores a los que se pueden obtener con los tradicionales bloques de concreto y 50% menores a los resultados obtenidos en bloques de adobe artesanales.

³⁹ KORODY, María 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.

2.4.5.2.- PET-CEMENTO.⁴⁰

El Polietilen Tereftalato (PET) es el material plástico con el cual se elaboran los envases de bebidas gaseosas y aguas minerales, entre otras. Éste, ha resultado ser 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 ya que 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.

Es por ello que se he estado desarrollando 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.

Se destaca el trabajo llevado a cabo en Argentina en el Centro Experimental de Vivienda Económica (CEVE), donde se desarrolla un proyecto denominado Apropiación de tecnologías ambientales para el hábitat por parte de jóvenes desocupados en Argentina, financiado por Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GATE-GTZ), que propone el desarrollo de ladrillos utilizando en su composición desechos de envoltorios plásticos usados como envoltorios de golosinas y/o PET.

También fue desarrollado en el la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Central de Venezuela un Trabajo Especial de Grado donde se proponen diversos diseños de mezcla de PET-Cemento, los cuales arrojaron resultados positivos de cara al uso de este material.

2.4.5.3.- LODOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.^{41 42}

⁴⁰ LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

⁴¹ CABEZAS, C.; BOLAÑOS, G. y SALAZAR, A. (2001). **“Materiales de Construcción a partir de Lodos de Plantas de Tratamiento de Agua, Mediante Infiltración con Dióxido de Carbono**

Otro material que ha sido objeto de estudio con la finalidad de evaluar su posible uso como material de construcción es el lodo proveniente de las plantas de tratamiento de aguas residuales, siendo este tipo de mezcla el que más se asemeja a las mezclas de Lodo-Cemento, objeto del presente Trabajo Especial de Grado.

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

Inicialmente los lodos fueron sometidos a una quema a 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 los ladrillos de 10x20x5 cm. Después de ser infiltrados con dióxido de carbono supercrítico, los ladrillos se sometieron a pruebas de resistencia a compresión.

Se evaluó el efecto de la composición del ladrillo (expresada como porcentaje de cal), la presión y tiempo de infiltración sobre las características y propiedades de los materiales resultantes. Los resultados obtenidos permitieron establecer que materiales cuya composición de cal sea superior al 20% y sean infiltrados por veinte (20) minutos a una presión de 70 kgf/cm² pueden lograr resistencias a la compresión

Supercrítico” (en línea). XXI Congreso Colombiano de Ingeniería Química, Bogotá. <http://supercriticos.univalle.edu.co/Reprints%20PDF/Cesar.pdf>. (Consulta: octubre, 2005).

⁴² ALBAREDA, Francesc (2003) “**Durabilidad de Hormigones con Adición de Lodos Secos de Depuradora de Aguas Residuales**” (en línea). http://biblioteca.upc.es/pfc/mostrar_dades_PFC.asp?id=408_62. Trabajo Especial de Grado. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.

superiores 80 kg/cm^2 , valor corresponde a la mínima resistencia establecida en la norma colombiana NTC-922 para materiales de mampostería.

El trabajo titulado “Durabilidad de Hormigones con Adición de Lodos Secos de Depuradora de Aguas Residuales”, desarrollado por la doctora Susana Valls de la Universidad Politécnica de Barcelona en España, explica cuáles son los efectos de la adición de lodo seco proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales en el concreto. Este estudio muestra la posibilidad de la estabilización y la solidificación de estos lodos en una matriz con material cementante, como el cemento Pórtland. Así como las posibilidades de obtención de materiales aplicables a la construcción.

Este trabajo concluye 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%.

Sin embargo, no recomienda el uso de adiciones de lodos en el concreto estructural debido a las fuertes retracciones y al aumento de la velocidad de penetración del frente de carbonatación. No obstante sí se podría utilizar en otros campos como materiales de relleno y algún tipo de suelo. También se podrían realizar piezas o elementos prefabricados que no estén destinados a soportar cargas excesivas.

2.5.- ENSAYOS PARA CUANTIFICAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.

2.5.1.- ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.⁴³

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de un material a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²) a una edad de veintiocho (28) días y se le designa el símbolo **f_c**. Esta propiedad es regida por la norma venezolana COVENIN 338-2002: Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto.

La resistencia a compresión se puede calcular con el uso de la Fórmula 2.6.

$$Rc = P/A$$

Fórmula 2.6. Resistencia a la compresión.

Donde:

- ✓ **Rc** representa a la resistencia a compresión, expresada en kgf/cm².
- ✓ **P** representa a la carga máxima aplicada, expresada en kgf.
- ✓ **A** representa el área de aplicación de la carga, expresada en cm².

⁴³ Norma Venezolana COVENIN 338:2002: **“Concreto. Método de Elaboración, Curado y Ensayo de Probetas Cilíndricas de Concreto”**. (2da Revisión).

2.5.2.- ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA SOBRE PROBETAS CILÍNDRICAS.^{44 45}

La resistencia a flexión es una medida de la resistencia a tracción del material la cual se enuncia como Módulo de Rotura y, al igual que la resistencia a compresión, se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²). Es regida por la norma venezolana COVENIN 341-79: Método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción indirecta del concreto utilizando probetas cilíndricas. Este ensayo también es conocido como Ensayo Brasileño.

Para el concreto, el valor del módulo de rotura se encuentra entre el 10% y el 20% del correspondiente a la resistencia a compresión en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado. Sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de mezcla.

La resistencia a flexión se puede calcular a través de la Fórmula 2.7.

$$obr = \frac{2P}{\pi Ld}$$

Fórmula 2.7. Módulo de rotura.

Donde:

- ✓ **obr** representa el módulo de rotura, expresado en kg/cm².
- ✓ **P** representa la carga máxima aplicada, expresada en kg.
- ✓ **L** representa la longitud de la probeta, expresada en cm.
- ✓ **d** representa el diámetro de la probeta, expresado en cm.

⁴⁴ Construaaprende.com Ingeniería civil y Arquitectura. Prácticas. **“Trabajo: Características del Concreto: Resistencia”** (en línea). <http://www.construaaprende.com/Trabajos/T2/T2Pag8.html>. (Consulta: noviembre, 2005).

⁴⁵ Norma Venezolana COVENIN 341:1979: **“Método de Ensayo para Determinar la Resistencia a la Tracción Indirecta del Concreto Usando Probetas Cilíndricas”**.

**Capítulo III:
MÉTODO**

Para el logro de los objetivos planteados en este Trabajo Especial de Grado se realizaron diversos ensayos básicos de laboratorio, previamente planificados, tanto a la muestra de lodo como a las probetas obtenidas de la realización de distintas mezclas de lodo-cemento.

En este capítulo se mencionan los materiales y equipos utilizados en el desarrollo del trabajo experimental así como las etapas del mismo.

El desarrollo del trabajo experimental se llevó a cabo a través de siete etapas, donde las primeras cinco tuvieron como finalidad el estudio y procesamiento de un lodo proveniente de una planta de potabilización, desde la toma de la muestra, pasando por su caracterización y terminando en la obtención de tres lotes de material a ser utilizados en las últimas dos etapas, en las cuales se fabricaron y ensayaron las probetas de lodo-cemento.

3.1.- MATERIALES Y EQUIPOS.

En la ejecución de la parte experimental se utilizó lodo, además de cemento, piedra, arena, suelo y agua, así como también los equipos necesarios para realizar los ensayos pertinentes a los distintos materiales y a las diferentes mezclas evaluadas.

Los laboratorios en los cuales se realizaron las pruebas y ensayos para el desarrollo de este trabajo especial de grado fueron los pertenecientes a la Planta Experimental de Tratamiento de Agua (PETA) y al Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), de la Universidad Central de Venezuela.

En las instalaciones de la PETA se realizaron las pruebas de caracterización del lodo en estado natural, mientras que en los espacios correspondientes al IMME se

llevaron a cabo las pruebas de caracterización del lodo en estado seco y se hicieron las mezclas, probetas y ensayos de las mismas.

Entre los instrumentos utilizados se tienen los siguientes:

En la PETA:

- ✓ Beakers.
- ✓ Cilindros graduados.
- ✓ Cápsulas de aluminio.
- ✓ Desecador.
- ✓ Horno.
- ✓ Balanza analítica.
- ✓ Mortero y martillo de porcelana.
- ✓ Embudo.
- ✓ Poncheras.

En el IMME:

- ✓ Mezcladora.
- ✓ Prensa Hidráulica con Manómetro (universal), cap. 200 ton, marca Baldwin.
- ✓ Moldes cilíndricos normativos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.
- ✓ Moldes cilíndricos normativos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.
- ✓ Cápsulas metálicas.
- ✓ Tubos de PVC de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura.
- ✓ Moldes cúbicos de 10x10x10 cm.
- ✓ Horno.
- ✓ Tobos (cuñetes) de 19 litros.
- ✓ Cepillo de cerdas de acero.
- ✓ Barras para compactación normadas.
- ✓ Rastrillo.

- ✓ Pala.
- ✓ Cucharas.
- ✓ Báscula
- ✓ Balanza analítica.
- ✓ Balanza.
- ✓ Manguera.



a.-



b.-



c.-



d.-



e.-



f.-

Foto 3.1. Instrumentos y Herramientas de Laboratorio.

- a.- Báscula. b.- Mesa. c.- Mezcladora. d.- Rastrillo, pala y escoba.
e.- Conjunto de Herramientas. f.- Batea.

3.2.- ETAPAS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.

3.2.1.- RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA DE LODO.

3.2.1.1.- SELECCIÓN DEL SITIO.

Se eligió la Planta de Potabilización de Agua La Mariposa (Foto 3.2) por ser la planta más accesible por su ubicación, lo que facilita la recolección y el transporte

de la muestra hasta el lugar donde se realizaron las pruebas y los ensayos. Se solicitó previamente el permiso de los operadores de la planta, quienes se comprometieron a notificar los días en los que se realizarían los vaciados de los sedimentadores.

Para la recolección de la muestra se tomaron en cuenta varios factores limitantes para ello, entre los cuales se encuentran:

- ✓ Los sedimentadores de la planta de potabilización La Mariposa son vaciados con poca regularidad, por lo que la captación de la muestra dependió de la rutina de mantenimiento de la planta.
- ✓ La complejidad de la extracción de la muestra de los sedimentadores de la planta, ya que estos no cuentan con un sistema de extracción del lodo diferente al que se utiliza en la disposición de dicho material, y fue necesario extraer el material contenido en el fondo (a una profundidad de unos 5 metros, aproximadamente) desde la parte alta del sistema.
- ✓ El transporte de la muestra, ya que sólo pudieron ser transportadas cantidades limitadas.



Foto 3.2. Planta de Tratamiento la Mariposa.

3.2.1.2.- PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA LA MARIPOSA.

La planta de potabilización La Mariposa está ubicada en la carretera nacional Las Mayas, en el municipio Los Salias del estado Miranda, a ocho kilómetros de Caracas. Tiene como finalidad surtir de agua potable a sectores del oeste de esta ciudad tratando el agua cruda proveniente del embalse La Mariposa.

El embalse La Mariposa fue construido entre 1946 y 1949 por la empresa Diques y Canales C.A. Posee una capacidad máxima de almacenamiento de 8 millones de metros cúbicos de agua y tiene una superficie total de 54 hectáreas. La Foto 3.3 muestra una vista aérea se este embalse.

La planta de potabilización de agua La Mariposa recibe el agua proveniente del sistema Tuy I, y tiene una producción máxima de 4.900 litros por segundo. En la foto 3.4 se puede observar una toma aérea de esta planta donde destacan los sedimentadores que la componen.



Foto 3.3. Embalse La Mariposa.⁹¹

⁹¹ HIDROCAPITAL (2005). **“Nuestros Embalses”**. (en línea). http://www.hidrocapital.com.ve/index.asp?spg_id=17. (Consulta: agosto, 2005).



Foto 3.4. Planta de potabilización de agua La Mariposa.⁹²

3.2.1.3.- TOMA DE MUESTRAS.

La toma de muestra se realizó una vez que el personal de la planta de potabilización de agua manifestó que existía la disponibilidad para obtenerla durante el vaciado de un sedimentador. Dicha toma se llevó a cabo de la siguiente forma:

- a) Se introdujo un cuñete de 19 litros (sostenido con una cuerda) dentro del sedimentador para que, en la zona de lodos, fuese llenado de dicho material con la ayuda de un empleado de la planta que allí se encontraba.
- b) Una vez llenado el cuñete con lodo, se extrajo el mismo del sedimentador para vaciar su contenido en un envase plástico de sesenta (60) litros de capacidad.
- c) Se repitieron los pasos anteriores hasta llenar el envase en su totalidad.

⁹² HIDROCAPITAL (2005). “Nuestras Plantas de Tratamiento”. (en línea). http://www.hidrocapital.com.ve/index.asp?spg_id=18. (Consulta: agosto, 2005).

Para el desarrollo de este trabajo experimental se realizó una única toma de muestra repartida en catorce (14) envases como el descrito anteriormente. Esta toma se llevó a cabo en el mes de septiembre de 2005.



a.-



b.-

Foto 3.5. Toma de la muestra de lodo.

a.- Llenado del cuñete. b.- Llenado del envase plástico de 60 litros



Foto 3.6. Vaciado del sedimentador.

3.2.1.4.- TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE LA MUESTRA.

La muestra de lodo se transportó en los envases mencionados en la etapa anterior (Foto 3.7) hacia la Planta Experimental de Tratamiento de Agua (PETA) y se guardó en un lugar fresco bajo techo, con lo que se buscó que los factores ambientales y climáticos alteraran lo menos posible el material contenido en los envases.



Foto 3.7. Envases plásticos de 60 litros utilizados para transportar y almacenar el lodo.

3.2.2.- CARACTERÍSTICAS DE LODO EN ESTADO NATURAL.

3.2.2.1.- PRUEBAS DE CAMPO.

Estas pruebas fueron realizadas para obtener la caracterización del lodo utilizado en las mezclas de lodo-cemento. Si bien estas pruebas corresponden al estudio de suelos destinados a formar parte de mezclas de suelo-cemento, sus criterios son adaptables para determinar las características de los lodos provenientes de las plantas de potabilización de agua.⁹³

Para llevar a cabo cada una de estas pruebas se analizaron siete (7) muestras provenientes de siete (7) envases diferentes seleccionados al azar, pertenecientes al grupo de catorce (14) disponibles.

3.2.2.1.1.- PRUEBA DEL OLOR.

Para realizar esta prueba se tomó cada una de las muestras de lodo y se determinó el tipo de olor que expelían a través de simple olfateo.⁴⁸

⁹³ **“Suelo-Cemento Aplicado a la Vivienda de Interés Social. Selección de Tierras. Ensayos de Campo”**. Asociación Venezolana de Productores de Cemento – Consejo Nacional de la Vivienda – Facultad de Arquitectura Universidad de Los Andes. Caracas. Venezuela. 1991.

3.2.2.1.2.- PRUEBA DEL TACTO.

En esta prueba se frotaron cada una de las muestras entre los dedos y la palma de la mano a fin de determinar, a través de tacto, la forma y el tamaño de las partículas componentes del lodo.⁹⁴

3.2.2.1.3.- PRUEBA DE LA VISTA.

En el momento de realizar esta prueba se observó cuidadosamente cada una de las muestras con la finalidad de identificar los parámetros correspondientes a ésta.⁴⁹

3.2.2.2.- ENSAYOS DE LABORATORIO.

3.2.2.2.1.- PESO ESPECÍFICO.

Este ensayo se llevó a cabo a través del siguiente procedimiento:⁹⁵

- a) Se colocó en un matraz, una muestra de agua destilada de 250 ml y se pesó cuidadosamente, midiendo a su vez la temperatura del agua.
- b) Se vació el matraz y se procedió a secarlo al horno a una temperatura de 105 °C durante una hora.
- c) Se extrajo el matraz del horno y se dejó enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador durante media hora.

⁹⁴ **“Suelo-Cemento Aplicado a la Vivienda de Interés Social. Selección de Tierras. Ensayos de Campo”**. Asociación Venezolana de Productores de Cemento – Consejo Nacional de la Vivienda – Facultad de Arquitectura Universidad de Los Andes. Caracas. Venezuela. 1991.

⁹⁵ ARBOLEDA, J. (2000). **“Teoría y Práctica de la Purificación del Agua”**. (3ra ed.). Bogotá: McGraw Hill.

- d) En el matraz se colocó una muestra de 250 ml de lodo, conservando la temperatura de ésta igual a la del agua destilada.
- e) La muestra de lodo se pesó con el uso de una balanza analítica.
- f) La muestra fue llevada a un peso constante secándola en el horno a una temperatura de 105 °C durante 24 horas.
- g) Se extrajo la muestra seca del horno y se dejó enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador durante media hora.
- h) Se pesó la muestra seca de lodo con el uso de una balanza analítica.

Partiendo de la diferencia de peso entre el matraz con agua destilada y el matraz con agua y lodo, el peso específico se puede calcular con la fórmula 3.1.

$$S_s = \frac{P_L}{V_L} = \frac{P_L}{\frac{P_a}{\gamma_a} - \frac{P_b - P_L}{\gamma_a'}}$$

Fórmula 3.1. Peso Específico.⁹⁶

En donde:

- ✓ S_s representa el peso específico del lodo.
- ✓ P_L representa el peso del lodo seco, expresado en g.
- ✓ V_L representa el volumen del lodo seco, expresado en ml.
- ✓ P_a representa el peso del matraz con agua destilada, expresado en g.
- ✓ P_b representa el peso del matraz con lodo, expresado en g..

⁹⁶ ARBOLEDA, J. (2000). “Teoría y Práctica de la Purificación del Agua” (3ra ed.). Bogotá: McGraw Hill.

- ✓ γ_a representa el peso específico del agua destilada.
- ✓ γ'_a representa el peso específico de la muestra de lodo.

Sin embargo, al ser la temperatura del agua destilada igual al de la muestra de lodo, $\gamma_a = \gamma'_a$, por lo que el peso específico se calculó según la Fórmula 3.2, simplificando así la Fórmula 3.1.

$$S_s = \frac{P_L}{P_a - P_b + P_L} = \frac{P_L}{P_L - (P_b - P_a)}$$

Fórmula 3.2. Peso Específico.⁹⁷

3.2.2.2.2.- PESO UNITARIO COMPACTO.

Este ensayo se llevó a cabo en dos etapas: en la primera se determinó el volumen del molde que posteriormente sería utilizado en la segunda etapa, donde se obtuvo propiamente el peso unitario compacto del lodo.⁹⁸

1. Para determinar el volumen del molde (o recipiente) se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- a) Se determinó el peso del recipiente vacío.
- b) Se determinó el peso del vidrio utilizado para tapar el recipiente.

⁹⁷ ARBOLEDA, J. (2000). **“Teoría y Práctica de la Purificación del Agua”** (3ra ed.). Bogotá: McGraw Hill.

⁹⁸ LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- c) Se llenó de agua el recipiente y se enrasó con el vidrio procurando que no quedara ninguna burbuja de aire atrapada entre la superficie del agua y el mismo.
- d) Se determinó el peso del conjunto recipiente, vidrio y agua.
- e) Al peso del conjunto de recipiente, vidrio y agua se le restaron los pesos del recipiente vacío y del vidrio para obtener el peso de agua, como lo indica la Fórmula 3.3.

$$P_{agua} = P_{recipiente + vidrio + agua} - P_{recipiente} - P_{vidrio}$$

Fórmula 3.3. Peso de Agua.⁹⁹

- f) Tomando la densidad del agua igual a 1 g/cm³, se calculó el volumen de agua que, a su vez, es igual al volumen del molde, como lo expresa la Fórmula 3.4.

$$V_{agua} = \frac{P_{agua}}{\rho_{agua}}$$

Fórmula 3.4. Volumen de Agua.⁵⁴

Una vez calculado el volumen del molde, se procedió a determinar el peso unitario compacto del lodo, a través del siguiente procedimiento:

- a) Se llenó el molde en tres capas, compactando cada una de ellas dándole 10 golpes con la barra de compactación.

⁹⁹ LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- b) Se retiró el exceso de lodo con la barra de compactación, de modo que el molde quedó perfectamente lleno y enrasado.
- c) Se procedió a pesar el molde con la mezcla bien enrasada para así obtener el peso de la misma.
- d) A continuación se procedió a calcular el peso unitario compacto de la mezcla mediante el uso de la Fórmula 3.5.

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

Fórmula 3.5. Peso Unitario Compacto.¹⁰⁰

3.2.2.2.3.- CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA.

Para determinar el contenido de materia orgánica presente en el lodo utilizado en las mezclas se llevó a cabo el siguiente procedimiento:¹⁰¹

- a) Se colocó una muestra de lodo en un cilindro graduado, hasta llegar a una medida entre los 200 ml y los 300 ml y se le agregó una solución al 3% de hidróxido de sodio hasta que se cubrió por completo la muestra.
- b) Se agitó el cilindro, hasta que su contenido se homogeneizó y se dejó reposar durante veinticuatro (24) horas.

¹⁰⁰ LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). “**Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento**”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹⁰¹ Norma Venezolana COVENIN 256:1977: “**Método de Ensayo para la Determinación Cualitativa de Impurezas Orgánicas en Arenas para Concreto (Ensayo Colorimétrico)**”.

- c) Se comparó el color del líquido presente en el cilindro con la escala de referencia, conocida como escala de Gardner, y se tomó nota del número correspondiente al color de la muestra.

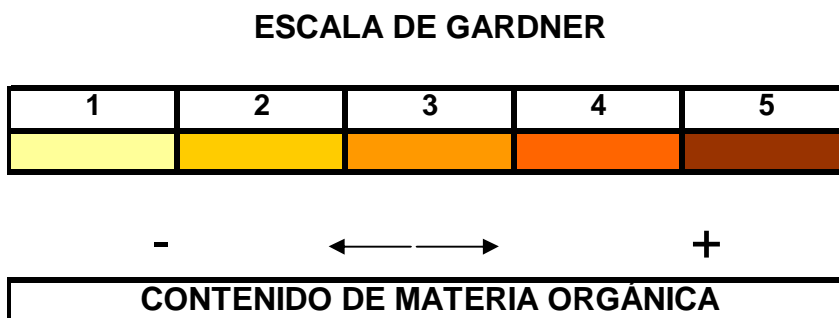


Figura 3.1. Esquema de la escala de Gardner.

3.2.2.2.4.- CONTENIDO DE HUMEDAD.

Para determinar el contenido de humedad del lodo se realizó el siguiente procedimiento:

- a) Se llevaron las cápsulas utilizadas en esta prueba a peso constante a través de secado al horno a una temperatura de 105 °C durante doce (12) horas.
- b) Se extrajeron las cápsulas del horno y se dejaron enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador durante media hora.
- c) Se pesaron las cápsulas con el uso de una balanza analítica.
- d) Se colocaron las muestras de lodo en las cápsulas y se secaron al horno a una temperatura de 105 °C durante veinticuatro (24) horas.

- e) Una vez retiradas las muestras del horno y enfriadas a temperatura ambiente, se procedió a pesarlas con el uso de una balanza analítica.

A partir de la diferencia de peso entre la muestra húmeda y de la muestra seca se calculó el contenido de humedad utilizando la Fórmula 3.6.

$$\omega(\%) = \frac{P_H - P_S}{P_H} \times 100$$

Fórmula 3.6. Contenido de humedad.

En donde:

- ✓ ω representa el contenido de humedad del lodo, expresado en porcentaje.
- ✓ P_H representa el peso de la muestra de lodo húmeda, expresado en g.
- ✓ P_S representa el peso de la muestra de lodo seca, expresado en g.

Para llevar a cabo esta prueba se analizaron siete (7) muestras provenientes de siete (7) envases diferentes seleccionados al azar.

3.2.3.- DISMINUCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL LODO.

Este proceso de secado tuvo por finalidad obtener tres (3) lotes de lodo con diferentes contenidos de humedad, buscando un aspecto terroso en los mismos, semejante al de los agregados utilizados en mezclas de materiales de construcción convencionales como el concreto o el suelo-cemento. De esta forma, se buscó que el material (que posteriormente formó parte de las mezclas de lodo-cemento) fuera más fácil de trabajar y permitió controlar la cantidad de agua contenida en el mismo.

Para reducir el contenido de humedad presente en el lodo se realizaron dos procedimientos:

El primero de ellos consistió en vaciar tres (3) de los envases utilizados para almacenar el lodo en una superficie extensa y lisa expuesta a la intemperie durante un período de cuatro (4) días. Esto se realizó con la finalidad de que el agua contenida en el lodo se evaporara por efecto de los rayos solares. En la Foto 3.8 se puede observar el lodo aún en estado natural vaciado en una piscina plástica, mientras que la Foto 3.9 contiene imágenes del lodo después de pasar el proceso de secado.



Foto 3.8. Disminución del contenido de humedad del lodo a la intemperie



Foto 3.9. Lodo cuyo contenido de humedad fue disminuido a la intemperie.

En el segundo procedimiento se hizo uso de medios artificiales capaces de conseguir, en el sitio de secado, temperaturas suficientemente elevadas para evaporar

el agua contenida en el lodo. Dicho procedimiento se llevó a cabo de la siguiente manera:

- a) Se extendieron sobre dos planchas metálicas (apoyadas directamente en el suelo) las masas de lodo.
- b) Se colocaron sobre las muestras de lodo dos estufas a gas capaces de conseguir temperaturas de hasta de 80 °C y se encendieron.
- c) Periódicamente, y con el uso de una pala, se mezcló el lodo buscando que se homogeneizara, de modo que se unieran las partes más secas con las más húmedas y el proceso de secado fuese uniforme.
- d) Una vez conseguida una consistencia terrosa del lodo se procedió a triturarlo hasta obtener un material de textura fina, similar a una arena.
- e) Se recogió y guardó el lodo en los mismos envases en donde se movilizaron originalmente.

El proceso de disminución del contenido de humedad del lodo se realizó en tres (3) partes, donde se secó el contenido de tres (3) envases en cada una de ellas. Las Fotos 3.10 y 3.11 contienen imágenes del proceso de secado con estufas y en la Foto 3.12 se puede observar un producto del proceso.



Foto 3.10. Disminución del contenido de humedad del lodo por medio del uso de estufas.



Foto 3.11. Disminución del contenido de humedad del lodo por medio del uso de estufas.



Foto 3.12. Lodo cuyo contenido de humedad fue disminuido con el uso de estufas.

3.2.4.- CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS CUYO CONTENIDO DE HUMEDAD FUE DISMINUIDO.

Se realizaron ensayos para las nuevas muestras de lodo, ya que éstas fueron posteriormente utilizadas en la elaboración de las mezclas. Se le aplicaron las mismas pruebas realizadas al lodo en estado natural, junto con algunas adicionales.

3.2.4.1.- PRUEBAS INICIALES.¹⁰²

Estas pruebas pertenecen al mismo grupo de pruebas de suelos destinados a ser utilizados en mezclas de suelo-cemento, previamente descrito en la sección 3.2.2.1, por lo que se repitieron dichas pruebas a los lotes de lodo con contenido de

¹⁰² **“Suelo-Cemento Aplicado a la Vivienda de Interés Social. Selección de Tierras. Ensayos de Campo”**. Asociación Venezolana de Productores de Cemento – Consejo Nacional de la Vivienda – Facultad de Arquitectura Universidad de Los Andes. Caracas. Venezuela. 1991.

humedad disminuido. Se tomó una muestra por cada lote de lodo para llevar a cabo estos ensayos. Adicionalmente, se realizaron las siguientes pruebas:

3.2.4.1.1.- PRUEBA DE LAVADO DE MANOS.

Esta prueba se realizó a través del siguiente procedimiento:

- a) Se tomó la muestra de lodo y se lavaron las manos con las mismas, utilizando el material como si se tratara de jabón.
- b) Se enjuagaron las manos prestando particular atención a la forma como se removía la muestra de lodo.

3.2.4.1.2.- PRUEBA DEL BRILLO.

Esta prueba se llevó a cabo utilizando el siguiente procedimiento:

- a) Se tomó una pequeña esfera de lodo ligeramente húmedo y se cortó por la mitad con una espátula.
- b) Se observó la superficie interna de las dos mitades de la muestra a fin de definir cómo era el brillo de dicha superficie.



Foto 3.13. Muestra de lodo examinada con la prueba del brillo.

3.2.4.1.3.- PRUEBA DE LA SACUDIDA O REACCIÓN AL AGITADO.

Esta prueba también es conocida como prueba de la dilatancia y para llevarla a cabo se siguieron los pasos que se muestran a continuación:

- a) Se tomó una muestra de lodo y se formó con ella una esfera de 2 ó 3 cm de diámetro.
- b) Se aplastó la esfera en la palma de la mano hasta formar una pastilla del material.
- c) Se golpeó vigorosamente el costado de la mano donde se encontraba la muestra con la otra mano.
- d) Observando la superficie de la muestra se contaron el número de golpes necesarios para que apareciera y desapareciera el agua contenida en el material de dicha superficie.



Foto 3.14. Muestra de lodo examinada con la prueba de la sacudida.

3.2.4.1.4.- PRUEBA DEL CORDÓN.

Para realizar la prueba del cordón se realizó el siguiente procedimiento:

- a) Se tomó una pequeña porción de lodo pulverizado y se humedeció con agua con la finalidad de moldearlo hasta obtener una esfera, evitando que se adhiriera a los dedos.
- b) Se hizo rodar la esfera de lodo por una superficie plástica, plana y limpia, hasta formar un cilindro.
- c) Se siguió amasando el cilindro de lodo, haciéndolo cada vez más delgado, hasta que se rompió en pequeños trozos, prestando particular atención a la consistencia de la masa de material durante el amasado.
- d) Los trozos se amasaron nuevamente sin agregar más agua, para rehacer la esfera.
- e) Se apretó la nueva esfera con los dedos índice y pulgar hasta romperla, midiendo el esfuerzo necesario para ello.

3.2.4.1.5.- PRUEBA DE LA CINTA.

Esta prueba se llevó a cabo a través del siguiente procedimiento:

- a) Se tomó una muestra de lodo bien molido y se amasó con agua.
- b) Con el material humedecido se formó un cilindro de 12 mm de diámetro y 20 cm de largo, aproximadamente.

- c) Se colocó el cilindro en la palma de la mano y, comenzando por un extremo, se empezó a aplastar por presión del pulgar y el índice hasta obtener una cinta de 3 a 6 mm de espesor.
- d) Se midió la longitud a la cual la cinta se rompió.

3.2.4.2.- ENSAYOS DE LABORATORIO.

Se realizaron los mismos ensayos descritos en la sección 3.2.2.2. Adicionalmente se llevaron a cabo las siguientes pruebas:

3.2.4.2.1.- GRANULOMETRÍA.^{103 104}

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 y 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 el siguiente procedimiento:

- 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, se le agregó 5 g de un agente defloculante y se dejó en remojo durante un día.

¹⁰³ Norma Venezolana COVENIN 255:1998: **“Agregados. Determinación de la Composición Granulométrica”**. (1era Revisión).

¹⁰⁴ UGAS, Celso (1985). **“Ensayos de Laboratorio en Mecánica de Suelos. Discusión, Evaluación, Procedimiento”**. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Tercera Edición, Primera Impresión.

- c) Luego del período de inmersión se revolvió el contenido del vaso con un agitador por espacio de 15 minutos.
- d) 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.
- e) Se agitó la solución durante un minuto invirtiendo el cilindro varias veces y tapando la boca del mismo con la palma de la mano.
- f) Inmediatamente se colocó el cilindro sobre una superficie horizontal, se sumergió el hidrómetro y se tomaron las lecturas a los 0, 5, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos y a las 1, 2, 4 y 24 horas. Después de cada lectura se colocó el hidrómetro en agua limpia y se midió la temperatura de la suspensión.



a.-



b.-



c.-

Foto 3.15. Equipo utilizado para determinar la granulometría del lodo.

a.- Hidrómetro. b.- Tamices. c.- Cilindros utilizados en el ensayo del hidrómetro.

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”.

Una vez obtenida la curva granulométrica correspondiente al lodo se comparó ésta con la perteneciente a un suelo utilizado en mezclas de suelo-cemento. Para ello se escogió el material estudiado en el Trabajo Especial de Grado titulado “Diseños de mezcla para su uso en la fabricación de bloques aligerados de suelo-cemento”.¹⁰⁵

3.2.4.2.2.- LÍMITES DE ATTERBERG.

Los valores correspondientes a los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) y los de los índices derivados de éstos (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”.

Una vez obtenidos los resultados de los límites de Atterberg correspondientes al lodo se procedió a comparar éstos con los valores pertenecientes a un suelo utilizado en mezclas de suelo-cemento. Para ello se escogió el material estudiado en el Trabajo Especial de Grado titulado “Diseños de mezcla para su uso en la fabricación de bloques aligerados de suelo-cemento”.⁴⁰

¹⁰⁵ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). “**Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento**”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.



a.-



b.-



c.-



d.-

Foto 3.16. Determinación de los límites de Atterberg del lodo.

a.- Cilindros de lodo para determinar el límite plástico. b.- Cilindros de lodo secados al horno. c.- Aparato de Casagrande utilizado para determinar el límite líquido. d.- Balanza

3.2.4.2.3.- PESO UNITARIO COMPACTO.

Para determinar el peso unitario compacto del lodo con contenido de humedad disminuido se siguió el procedimiento descrito en la sección 3.2.2.2.2.

Se llevó a cabo una comparación entre los pesos unitarios de los lotes de lodo con contenido de humedad disminuido con los valores pertenecientes al lodo en

estado natural y a materiales convencionales utilizados en mezclas para construcción (arena, piedra¹⁰⁶ y suelo¹⁰⁷).

3.2.5.- ELABORACIÓN DE PROBETAS DE LODO-CEMENTO.

3.2.5.1.- ELABORACIÓN DE DISEÑOS DE MEZCLA DE LODO-CEMENTO.

Los diseños de mezcla elaborados en este trabajo experimental no siguieron los procedimientos de algún método de diseño en particular, sino que obedecieron a un método empírico basado en experiencias de mezclas de concreto y suelo-cemento. Para todas las mezclas la dosis de cemento, medida en peso, fue equivalente al 15% del peso de la dosis de lodo, ya que es la cantidad máxima admitida en mezclas de suelo-cemento⁴⁰. La dosis de lodo fue calculada una vez conocido su peso unitario y el volumen necesario de mezcla.

Se diseñaron tres (3) mezclas de lodo-cemento, siendo el parámetro que las diferenció el contenido de humedad del lodo.

Adicionalmente, y aunque no es el objeto de estudio de este trabajo especial de grado, se elaboraron cuatro (4) diseños de mezcla de lodo-cemento mejorado con agregados tradicionalmente utilizados en la elaboración de materiales de construcción como lo son la arena, la piedra y el suelo.

La Tabla 3.1 contiene la dosificación de cada una de las siete (7) mezclas elaboradas para el desarrollo de esta investigación.

¹⁰⁶ PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J.; VELAZCO, G. (2004). “**Manual del Concreto Estructural**”. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.

¹⁰⁷ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). “**Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento**”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Tabla 3.1. Diseños de Mezcla.

	Mezcla						
	LC1	LC2	LCA1	LC3	LCA2	LCP	LCS
Lodo (kg)	30	30	15	30	7	7	7
Cemento (kg)	4,5	4,5	4,5	4,5	2,1	1,8	2,1
Arena (kg)	0	0	15	0	7	0	0
Suelo (kg)	0	0	0	0	0	0	7
Piedra (kg)	0	0	0	0	0	5	0
Agua (kg)	0	0	0	9	7	7	8
Lote de Lodo	1	2	2	3	3	3	3
ω (%)	75	50	50	0	0	0	0

En donde:

- ✓ **LC:** mezcla de lodo-cemento.
- ✓ **LCA:** mezcla de lodo-cemento con arena.
- ✓ **LCP:** mezcla de lodo-cemento con piedra.
- ✓ **LCS:** mezcla de lodo-cemento con suelo.

Adicionalmente, a las mezclas LCA2, LCP y LCS se les fue agregado 0,5 kg de cal, a fin de investigar cuál es su influencia en el fraguado del material, lo que se traduce en efectos sobre la materia orgánica.

3.2.5.2.- ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS Y CÚBICAS.^{108 109}

Para la ejecución de las probetas a ensayar se siguieron una serie de pasos que son explicados a continuación:

Antes de la elaboración del cilindro se verificó:

- ✓ Que el sitio de elaboración de los cilindros no estaba expuesto a condiciones severas de sol, lluvia o viento.
- ✓ Que los moldes metálicos cumplieran con las dimensiones correctas y no contengan residuos de concreto adheridos en las paredes internas.
- ✓ Que la varilla de compactación tenía aproximadamente sesenta (60) cm de longitud y dieciséis (16) mm de diámetro, de acero liso y de extremo redondeado.
- ✓ Que la superficie sobre la cual estaba por realizarse el ensayo fuera plana y libre de vibraciones.
- ✓ Que el sitio de elaboración de los cilindros estaba lo más cerca posible del sitio donde se almacenarían durante las primeras veinticuatro (24) horas.
- ✓ Se tuvieron preparados todos los materiales a utilizar para la realización de la mezcla, es decir, se habían pesado todos los materiales para tener la

¹⁰⁸ Norma Venezolana COVENIN 338:2002: **“Concreto. Método de Elaboración, Curado y Ensayo de Probetas Cilíndricas de Concreto”**, (2da Revisión).

¹⁰⁹ LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

dosificación específica y así no perder tiempo entre la colocación de un material y otro en la mezcladora.

La elaboración se llevó a cabo a través del siguiente procedimiento:

- a) Los materiales fueron colocados con sumo cuidado, uno por uno, manteniendo la mezcladora encendida.
- b) Primero se colocó el agregado grueso, después el agregado fino seguido del cemento y por último el agua de forma cuidadosa.
- c) 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 de Abrams” (Foto 3.17).
- d) Se determinó el peso unitario compacto de la mezcla a través del procedimiento explicado en la sección 3.2.2.2.2.
- e) Se remezcló para asegurar la uniformidad del material.
- f) Los cilindros se elaboraron llenando los moldes con tres (3) capas de igual volumen, con una altura aproximada de un tercio de la altura del molde por cada capa.
- g) A cada capa se le dieron el número de golpes requerido (Tabla 3.2) con la varilla de compactación, procurando no penetrar demasiado en la capa inmediatamente anterior ni tampoco golpear el molde.

Tabla 3.2. Número de golpes para compactación.

Ensayo	Número de Golpes
Cilindro 30x15 cm	25
Cilindro 20x10 cm	15
Cilindro 10x5 cm	10
Cubio 10x10x10 cm	10

- h) Una vez retirada la varilla compactadora se le dieron golpes suaves a las paredes del molde para cerrar los huecos.
- i) Se enrasó la parte superior del cilindro con la misma barra compactadora, desde el centro de la probeta hacia los extremos, para garantizar una superficie lisa y uniforme.
- j) Se transportaron las probetas del sitio de elaboración al sitio de almacenamiento, cerciorándose de que no fueran golpeadas, inclinadas o alteradas en su superficie.
- k) Se identificaron las probetas con el uso de un marcador.



Foto 3.17. Medición del asentamiento de la mezcla con el cono de Abrams.



a.-



b.-

Foto 3.18. Fabricación de una probeta cilíndrica de lodo-cemento.

a.- Compactación de la mezcla. b.- Enrase de la parte superior del cilindro.

La Tabla 3.3 contiene la cantidad y tipo de probetas fabricadas por cada mezcla y los ensayos para los cuales fueron destinadas.

Tabla 3.3. Probetas fabricadas y ensayos.

Ensayo	Tipo de Probeta	Mezcla						
		LC-1	LC-2	LCA-1	LC-3	LCA-2	LCP	LCS
Resistencia a la compresión	Cilindro 20x15 cm	5	5	5	5	5	5	5
Tracción indirecta	Cilindro 30x15 cm	2	2	2	2	2	2	2
Absorción	Cilindro 10x5 cm	5	5	5	5	5	5	5
Erosión	Cubo 10x10x10 cm	2	2	2	2	2	2	2

3.2.5.3.- ALMACENAMIENTO Y CURADO DE LAS PROBETAS.

Las probetas de lodo-cemento fueron almacenadas en un lugar fresco bajo techo. Luego de haber transcurridos setenta y dos (72) horas del vaciado, fueron desencofradas las probetas se procedió a hacer un curado intermitente que consistía

en sumergir durante unos pocos segundos cada una de las muestras en agua. Esto se llevó a cabo tres (3) veces al día durante un lapso de siete (7) días.



Foto 3.19. Almacenamiento de las probetas de lodo-cemento.

Las probetas fueron almacenadas en el laboratorio de agregados del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad Central de Venezuela (Foto 3.20).



Foto 3.20. Laboratorio de Agregados del IMME.

3.2.6.- ENSAYO DE LAS PROBETAS.

3.2.6.1.- ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Este ensayo se llevó a cabo siguiendo las especificaciones de la norma venezolana COVENIN 338-2002: “Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto”.

Se llevó a cabo una comparación de los resultados de resistencia a la compresión obtenidos con las probetas de lodo-cemento con los correspondientes a ripio-cemento¹¹⁰, PET-cemento¹¹¹ y suelo-cemento¹¹².



Foto 3.21. Ensayo de resistencia a la compresión.

¹¹⁰ KORODY, María 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.

¹¹¹ LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹¹² RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

3.2.6.2.- 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 resistencia a la tracción indirecta del concreto usando probetas cilíndricas”.

Se compararon los resultados obtenidos en este ensayo con los pertenecientes a dos mezclas de suelo-cemento que, para efectos del desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, fueron denominadas suelo-cemento 1¹¹³ y suelo-cemento 2¹¹⁴.



Foto 3.22. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta.

3.2.6.3.- ENSAYO DE ABSORCIÓN.

El procedimiento del ensayo de absorción es el siguiente:¹¹⁵

- a) Se secaron las probetas al horno a una temperatura de 105 °C durante veinticuatro (24) horas.

¹¹³ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). “Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹¹⁴ SANCHEZ, J.; MORENO, R. (2002). “Fabricación y Caracterización de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹¹⁵ LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). “Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- b) Se extrajeron las probetas del horno y se dejaron enfriar a temperatura ambiente.
- c) Se sumergieron las probetas completamente en agua durante veinticuatro (24) horas a una temperatura aproximada 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 o en los primeros cinco (5) minutos luego de retiradas del agua.

La absorción de agua de las probetas de lodo-cemento se calculó para cada una de las muestras con el uso de la Fórmula 3.7.

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

Fórmula 3.7. Absorción.¹¹⁶

Donde:

- ✓ **Ab** representa la absorción de agua en la muestra, expresada en porcentaje.
- ✓ **P₁** representa el peso seco de la muestra, expresado en g.
- ✓ **P₂** representa el peso de la muestra después de haber sido sumergida en agua, expresado en g.

¹¹⁶ LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). “Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Los resultados obtenidos del ensayo de absorción correspondientes al lodocemento fueron comparados con los valores pertenecientes a mezclas de ripiocemento¹¹⁷, PET-cemento¹¹⁸ y suelo-cemento¹¹⁹.



Foto 3.23. Ensayo de absorción.

3.2.6.4.- ENSAYO DE EROSIÓN.

Este ensayo se llevó a cabo a través de la técnica de cepillado. Los pasos a seguir para la ejecución de este ensayo son los siguientes:^{50 51}

- a) Se secaron las probetas al horno a una temperatura de 105 °C, durante veinticuatro (24) horas.
- b) Se sumergieron cada una de las probetas en la cámara húmeda durante veinticuatro (24) horas cerciorándose de que la probeta se encontrara parada y cubierta totalmente por el agua.

¹¹⁷ KORODY, María 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.

¹¹⁸ LUIS, Alesmar y RENDON, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹¹⁹ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- c) Con un movimiento suave se cepilló la probeta dentro de la cámara húmeda con un cepillo de cerdas duras, noventa (90) veces hacia abajo y noventa (90) veces hacia arriba, siempre por el lado mayor de la probeta cuidando de no llegar a las orillas para no romperlas.
- d) Se sacaron las probetas del recipiente y se dejó reposar el agua durante un periodo de diez (10) minutos.
- e) Se extrajo el agua del envase cuidando que quede en el fondo el material desprendido.
- f) Se lavó nuevamente ese material asentado y se dejó reposar nuevamente por diez minutos.
- g) Se secó al horno el sedimento y se pesó.

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de erosión por cepillado correspondientes a las probetas de lodo-cemento, éstos fueron comparados con los de PET-cemento¹²⁰ y dos mezclas de suelo-cemento que, al igual que en la sección 3.2.6.2, fueron identificados como suelo-cemento 1¹²¹ y suelo-cemento 2¹²².

¹²⁰ LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). “**Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento**”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹²¹ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). “**Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento**”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹²² SANCHEZ, J.; MORENO, R. (2002). “**Fabricación y Caracterización de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento**”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.



Foto 3.24. Ensayo de erosión por cepillado.

Capítulo IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados arrojados por los distintos ensayos realizados durante la ejecución de la etapa experimental de este Trabajo Especial de Grado se utilizaron con la finalidad de calcular las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas de lodo-cemento, y así poder determinar la capacidad del uso de dicho material en la construcción, en caso de que sus propiedades se encuentren dentro de los valores propios de materiales comúnmente utilizados.

El análisis de los resultados se pueden desglosar en tres grandes etapas del proceso: en la primera etapa se explican los análisis realizados a la muestra de lodo en su estado natural; la segunda etapa corresponde los ensayos realizados a las muestras con lodo cuyo contenido de humedad fue disminuido. Por último, se procedió a realizar los ensayos de resistencia y de durabilidad de las mezclas de lodo-cemento.

A continuación se presentan los resultados obtenidos (y sus respectivos análisis) de las pruebas y ensayos llevados a cabo durante la etapa experimental en forma gráfica. En los anexos se encuentran contenidas todas las tablas de los resultados de forma numérica.

A.1.- ANÁLISIS DEL LODO EN ESTADO NATURAL.

A.1.1.- PRUEBAS DE CAMPO.

A.1.1.1.- PRUEBA DEL OLOR.

El olor expelido por el material analizado en esta prueba fue mohoso y un poco fétido, característico de los materiales que contienen materia orgánica en descomposición, sin que hubiera variaciones entre las muestras. Además, dicho olor se hacía más tenue a medida que el lodo perdía humedad.

A.1.1.2.- PRUEBA DEL TACTO.

Mediante la prueba del tacto se pudo palpar que el material tenía una consistencia gelatinosa, era suave y sumamente pegajoso, sin formaciones grumosas. No se distinguió la presencia de granos gruesos.

A.1.1.3.- PRUEBA DE LA VISTA.

A través de la prueba de la vista se pudo determinar que el material es homogéneo. Además se observó que el lodo en estado natural se encontraba en dos fases: una acuosa y otra coloidal, siendo la segunda de mayor proporción. (en un 80% aproximadamente).

El material presentó dos colores bien diferenciados: un color ocre en la superficie exterior y un color verde oliva en el interior. Sin embargo, este color de la masa interior, una vez descubierta al aire y al pasar unos pocos minutos, se tornaba ocre. Se puede mencionar, que tanto en el exterior como en el interior de la masa de lodo se pudo observar la presencia de pequeñas manchas negras, aisladas entre sí. No se distinguieron granos gruesos.

A.1.2.- ENSAYOS DE LABORATORIO.

A.1.2.1.- PESO ESPECÍFICO.

El lodo estudiado en este ensayo posee un peso específico igual a $2,34 \text{ kg/m}^3$, valor que se encuentra por debajo de los rangos de la Tabla 2.5 del capítulo II, por lo que puede considerársele un liviano.

A.1.2.2.- PESO UNITARIO COMPACTO.

El lodo estudiado en este ensayo posee un peso unitario compacto igual a 1105 kg/m³, valor que no entra en los rangos contenidos en la Tabla 2.5 del capítulo II, por lo que puede ser considerado como agregado liviano para una mezcla.

A.1.2.3.- CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA.

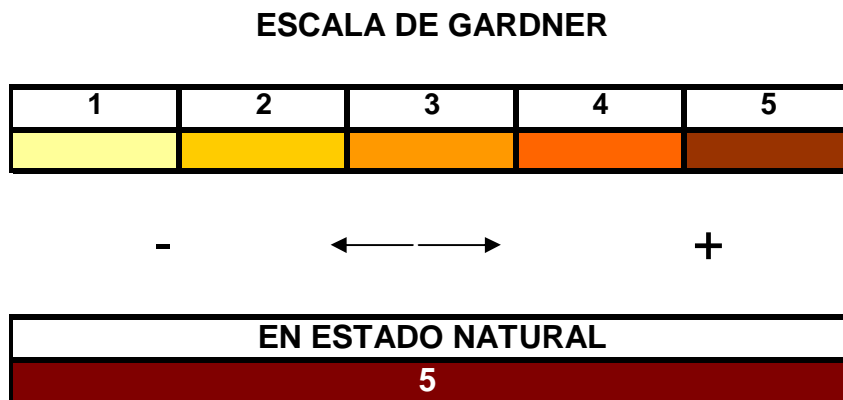


Figura 4.1. Contenido de materia orgánica del lodo.

El color obtenido con el ensayo colorimétrico en la muestra de lodo correspondió al número 5 en la escala de Gardner, característico de un material con alto contenido de materia orgánica.

A.1.2.4.- CONTENIDO DE HUMEDAD.

El contenido de humedad del lodo en estado natural fue calculado a fin de conocer la cantidad de agua contenida en el material y, por ende, la cantidad de agua que es capaz de aportar a la mezcla.

ω Promedio (%)	84,1
-----------------------	------

El contenido de humedad del lodo natural obtenido en este ensayo indica que éste posee una elevada cantidad de agua, la cual puede ser aportada a la mezcla de lodo-cemento. Este es un factor a tomar en consideración ya que las características que presenta una mezcla para la construcción dependen en gran medida de la cantidad de agua que contiene.

A.2.- PRUEBA PRELIMINAR DEL LODO-CEMENTO.

La mezcla de lodo-cemento realizada para este ensayo preliminar no fraguó hasta los siete (7) días después de su elaboración, aunque ello no significó endurecimiento de la mezcla, ya que no ofrecía ningún tipo de resistencia al momento de aplicársele pequeñas tensiones con los dedos (era moldeable).

Tomando en cuenta este resultado, se procedió a disminuir el contenido de humedad del lodo y, con ello, la cantidad de agua que el material aporta a la mezcla, a fin de evitar que las probetas de lodo-cemento presenten los inconvenientes mencionados anteriormente.

A.3.- ANÁLISIS DEL LODO CUYO CONTENIDO DE HUMEDAD FUE DISMINUIDO.

La disminución del contenido de humedad del lodo en estado natural se llevó a cabo en tres partes, obteniéndose tres Lotes de lodo, siguiendo los dos procedimientos descritos en la sección 3.2.4.

Al Lote 1 se le disminuyó el contenido de humedad por medio del primer procedimiento, el cual consistió en exposición del lodo a la intemperie, durante un período de 72 horas, mientras que los Lotes 2 y 3 fueron tratados a través del segundo

procedimiento, utilizando para ello estufas a gas. El Lote 2 fue expuesto al calor por espacio de 12 horas y el Lote 3 por 36 horas.



a.-



b.-

Foto 4.1. Disminución del contenido de humedad del lodo.

a.- Aspecto del lodo en estado natural. b.- Aspecto del lodo totalmente seco.

A.3.1.- PRUEBAS INICIALES.

Las características presentadas por los Lotes 1 y 2 son similares en cuanto a lo que pruebas iniciales se refiere. Sin embargo, el lodo perteneciente al tercer Lote sí es significativamente diferente a los dos primeros en sus características organolépticas (color, olor y vista). La Tabla 4.1 contiene de forma resumida los resultados de estas pruebas en los tres Lotes.

Tabla 4.1. Pruebas Iniciales.

Lote	PRUEBA							
	Olor	Tacto	Vista	Lavado de Manos	Brillo	Sacudida	Cordón	Cinta
1	Mohoso	Redondeados	Muy fino	Enjuague difícil	No es posible realizar el ensayo	Aparece un poco de agua a los 33 golpes	No es posible realizar el ensayo	No se formó cinta
2	Mohoso	Redondeados	Fino	Enjuague difícil	Mate	Aparece un poco de agua a los 41 golpes	Cordón duro	No se formó cinta
3	Terroso	Angulares	Terrones	Enjuague fácil	Mate	Aparece un poco de agua a los 54 golpes	Cordón duro	No se formó cinta

A.3.1.1.- PRUEBA DEL OLOR.

Los Lotes 1 y 2 presentaron un olor mohoso siendo más tenue el del segundo, aunque en ninguno de los casos se consiguió un olor tan fuerte ni fétido como el del lodo en estado natural.

El Lote 3 presentó un olor terroso pronunciado, muy diferente tanto a los dos primeros Lotes como al lodo en estado natural.

A.3.1.2.- PRUEBA DEL TACTO.

El Lote 1 se presentó como una masa pastosa bastante húmeda y pegajosa, formada por granos finos redondeados. No había presencia de granos gruesos.

El Lote 2 estaba conformado por grumos, notoriamente menos húmedos que en el primer Lote aunque no eran del todo secos ni tampoco eran pegajosos, y podían ser moldeados con la mano.

El lodo del tercer Lote se presentó en forma de terrones endurecidos secos al tacto, los cuales tenían formas angulares. Estos terrones, a diferencia de los dos primeros Lotes, no eran moldeables, sin embargo eran quebradizos si se les aplicaba el suficiente esfuerzo.

A.3.1.3.- PRUEBA DE LA VISTA.

El lodo del Lote 1 presentó un color marrón oscuro y era brillante en su superficie. Por otra parte, No se diferenció un tamaño particular de grano, aunque sí se notaron algunas manchas similares al del lodo en estado natural. Sin embargo, no presentó un aspecto tan húmedo como el del lodo natural.

En el material perteneciente al segundo Lote se observó gran cantidad de grumos de un color marrón un poco más claro que el del Lote 1. El aspecto presentado por este lodo era semejante al de un suelo húmedo.

El tercer Lote presentó un color ocre distinto al de los dos primeros grupos. Se diferenciaron terrones de distintos tamaños.

A.3.1.4.- PRUEBA DEL LAVADO DE MANOS.

Al realizar esta prueba se observó que el lavado fue difícil en los dos primeros Lotes, ya que el material se adhería fuertemente a la palma de las manos, siendo más difícil en el caso del Lote 1, donde incluso fue necesario aplicar más cantidad de agua para lograr el enjuague total. Para el lodo del Lote 3, el lavado de manos se hizo muy fácilmente, utilizando poca cantidad de agua.

A.3.1.5.- PRUEBA DEL BRILLO.

Para el primer Lote no se pudo llevar a cabo esta prueba ya que no se pudo conformar la esfera, pero sí se pudo obtener en los Lotes 2 y 3, dando como resultado un brillo mate (muy similares en ambos casos) típico de materiales limosos o de arcillas de baja plasticidad.

A.3.1.6.- PRUEBA DE LA SACUDIDA O REACCIÓN AL AGITADO.

En los tres casos se presentó una pequeña reacción al agitado con la presencia de agua después de realizados un considerable número de golpes, siendo ésta la diferencia fundamental entre los Lotes. En el caso del primer Lote, siempre existió una capa brillante en la muestra que sólo cambió para hacerse un poco más húmeda cuando se llegó a los 33 golpes, a diferencia de las muestras correspondientes a los

Lotes 2 y 3, cuyas superficies siempre fueron opacas hasta que se obtuvo la pequeña presencia de agua. Estas reacciones al agitado corresponden a un material arcilloso.

A.3.1.7.- PRUEBA DEL CORDÓN.

Para el primer Lote no fue posible realizar el ensayo por las mismas razones que impidieron hacerle la prueba del brillo. Sí se pudo llevar a cabo esta prueba para los lodos 2 y 3, dando en ambos casos un cordón duro, característico de un material arcilloso. El cordón correspondiente al Lote 3 fue más duro que el correspondiente al segundo Lote.

A.3.1.8.- PRUEBA DE LA CINTA.

No se lograron formar cintas para ninguno de los tres Lotes de lodo ya que la masa de materia se deshacía fácilmente. Sin embargo, el resultado de esta prueba, propio de un material con granos gruesos, no se corresponde con el resto del grupo de pruebas.

A.3.2.- ENSAYOS DE LABORATORIO.

A continuación se analizan los resultados obtenidos en diferentes ensayos de laboratorio a los cuales fueron sometidas muestras de los tres Lotes de lodo con contenido de humedad disminuido, comparando a su vez estos resultados con los obtenidos para el lodo en estado natural y con valores típicos de agregados utilizados en mezclas para la construcción: arena, piedra y suelo.

A.3.2.1.- PESO UNITARIO COMPACTO.

Este ensayo está conformado por dos etapas. En la primera etapa se determinó el volumen del molde utilizado en el procedimiento y en la segunda etapa se calculó propiamente el peso unitario compacto del lodo en estado natural.

Utilizando el peso unitario compacto del lodo en estado natural como referencia, se obtuvieron los siguientes resultados:

- ✓ Los pesos unitarios obtenidos en los tres Lotes de lodo con contenido de humedad disminuido son menores que el peso unitario compacto del lodo en estado natural.
- ✓ El peso unitario de los Lotes de lodo se hacen menores a medida que se disminuye el contenido de humedad del material. Esto se puede deber a que a medida que disminuye el contenido de humedad aumenta a su vez el volumen de aire atrapado dentro del lodo.
- ✓ El mayor de los pesos unitarios compactos de los lodos con contenido de humedad disminuido corresponde al del Lote 1.

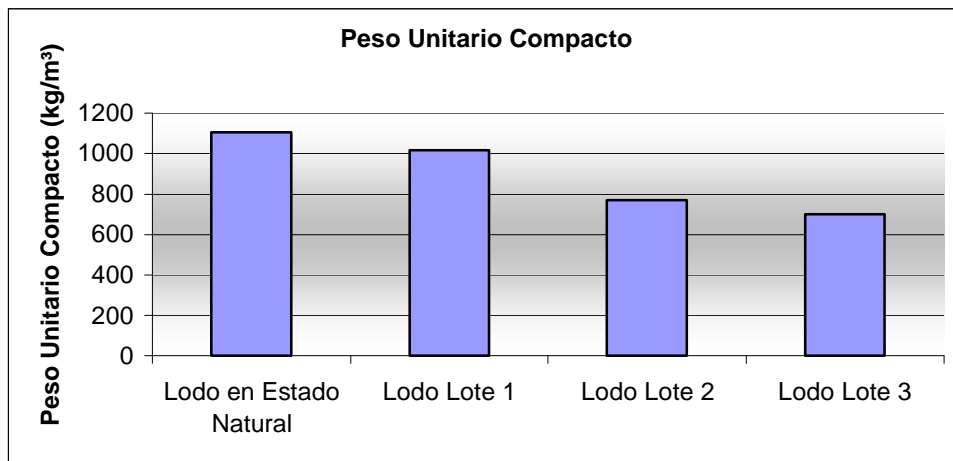


Gráfico 4.1. Peso unitario compacto.

La Tabla 4.2 contiene valores típicos de peso unitario compacto de algunos agregados convencionales de la construcción, los cuales fueron utilizados para comparar éstos materiales con el lodo estudiado en este Trabajo Especial de Grado.

Tabla 4.2. Peso unitario de agregados convencionales.^{155 156}

Material	g (kg/m ³)
Arena	1450
Suelo	1780
Piedra	1350

Comparación de Pesos Unitarios Compactos

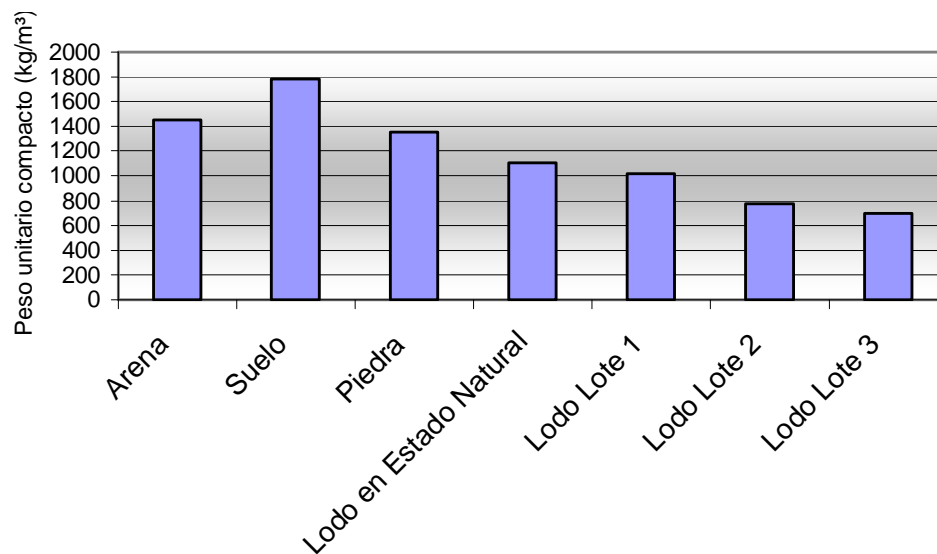


Gráfico 4.2. Comparación de pesos unitarios compactos.^{55 56}

Una vez comparados los pesos unitarios de las muestras de lodo con las de agregados convencionales se obtuvieron los siguientes resultados:

¹⁵⁵ PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J.; VELAZCO, G. (2004). “Manual del Concreto Estructural”. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.

¹⁵⁶ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). “Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- ✓ El peso unitario del lodo es menor que el de todos los agregados convencionales.
- ✓ El material con mayor peso unitario compacto es el suelo.

Considerando los resultados expuestos anteriormente, puede considerarse al lodo estudiado en este Trabajo Especial de Grado (en todas sus presentaciones) un material notoriamente liviano en comparación con los agregados convencionales de mezclas para construcción.

A.3.2.2.- CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA.

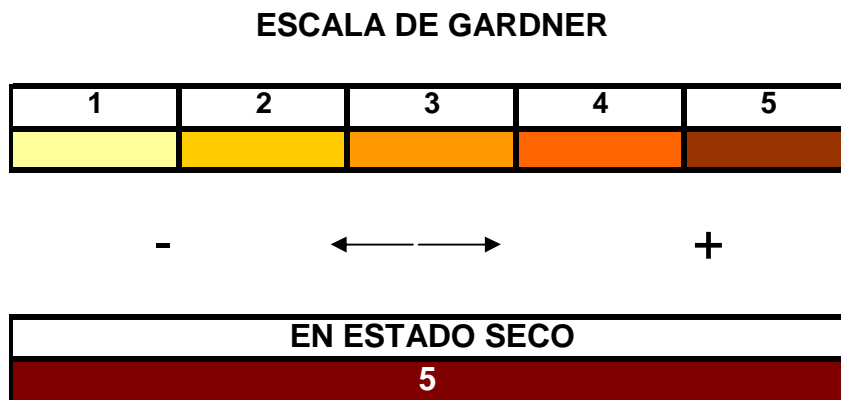


Figura 4.2. Contenido de materia orgánica de los Lotes de lodo con contenido de humedad disminuido.

Una vez realizado el ensayo colorimétrico a los tres Lotes de lodo con contenido de humedad disminuido, y utilizando el resultado del mismo ensayo al lodo en estado natural como base, se obtuvieron los siguientes resultados:

- ✓ Los contenidos de materia orgánica obtenidos en los tres Lotes de lodo a través del ensayo colorimétrico dieron como resultado colores superiores al

número 5 en la escala de Gardner (aunque no iguales entre sí), lo cual corresponde a un alto contenido de materia orgánica.

- ✓ Los colores correspondientes a los tres Lotes de lodo con contenido de humedad disminuido son más oscuros que el color correspondiente al lodo en estado natural.
- ✓ El color más oscuro corresponde al Lote 3, seguido del Lote 2 y por último se encontró el Lote 1.

El color resultado del ensayo colorimétrico se hace más oscuro a medida que se reduce el contenido de humedad. Sin embargo, no puede decirse que esto se deba a que el material aumente (de algún modo) su contenido de materia orgánica, sino que se debe a un aumento de la concentración de la misma.

A.3.2.3.- CONTENIDO DE HUMEDAD.

Una vez realizado el ensayo de contenido de humedad y utilizando el valor respectivo al lodo en estado natural como referencia, se obtuvieron los siguientes resultados:

- ✓ Los tres Lotes de lodo contienen menor contenido de humedad que el lodo en estado natural.
- ✓ Del grupo de Lotes de lodo con contenido de humedad disminuido el que posee el mayor contenido de humedad es el Lote 1, seguido por el Lote 2 y, por último, el Lote 3.

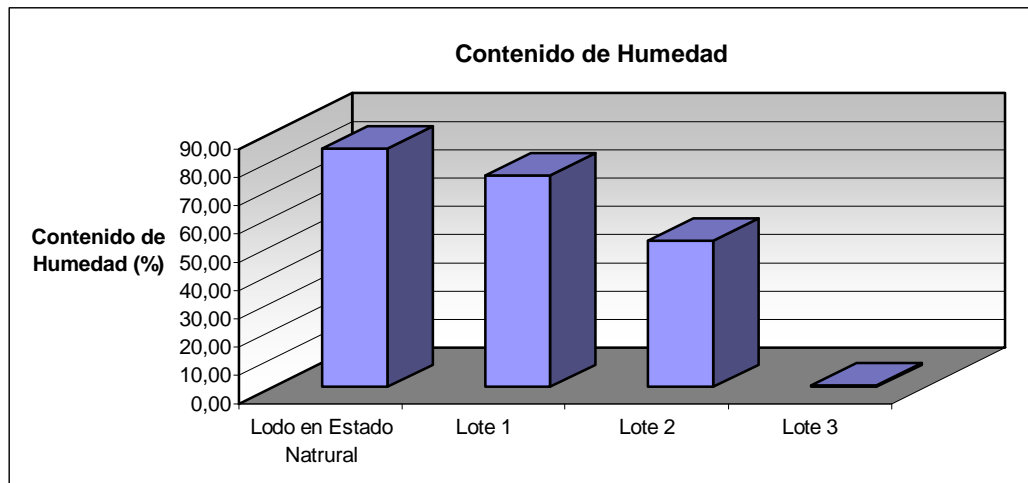


Gráfico 4.3. Contenido de humedad.

A.3.2.4.- GRANULOMETRÍA.

Con los resultados obtenidos del tamizado y el ensayo del hidrómetro del lodo, se dibujó la curva granulométrica contenida en el Gráfico 4.4.

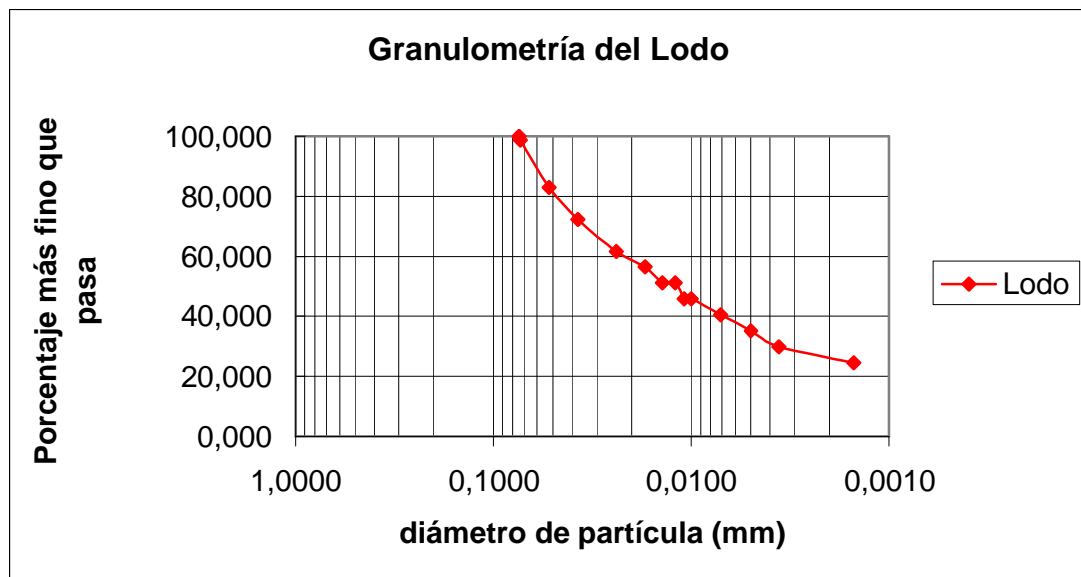


Gráfico 4.4. Curva granulométrica del lodo.

Considerando los resultados obtenidos en los ensayos para determinar la curva granulométrica del lodo, se puede mencionar que:

- ✓ Se trata de un material constituido por partículas muy finas ya que prácticamente sus totalidad es pasante del tamiz 200.

- ✓ Es un material bien gradado.

Los datos granulométricos del suelo a comparar con el lodo están contenidos en la Tabla 4.3 y su curva granulométrica en el Gráfico 4.5.

Tabla 4.3. Granulometría del suelo.¹⁵⁷

Tamiz	d (mm)	% Pasante
3/8"	9,5200	98,100
# 4	4,7600	82,700
# 10	2,0000	67,400
# 20	0,8400	59,100
# 40	0,4200	52,100
# 100	0,1490	42,1000
# 200	0,0750	36,5000
	0,0512	35,0800
	0,0366	34,3700
	0,0261	33,6500
	0,0169	31,9400
	0,0124	29,0700
	0,0104	26,9300
	0,0092	24,7800
	0,0084	23,3500
	0,0077	21,9200
	0,0056	19,7700
	0,0040	18,3400
	0,0029	16,2000
	0,0012	12,6200

¹⁵⁷ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

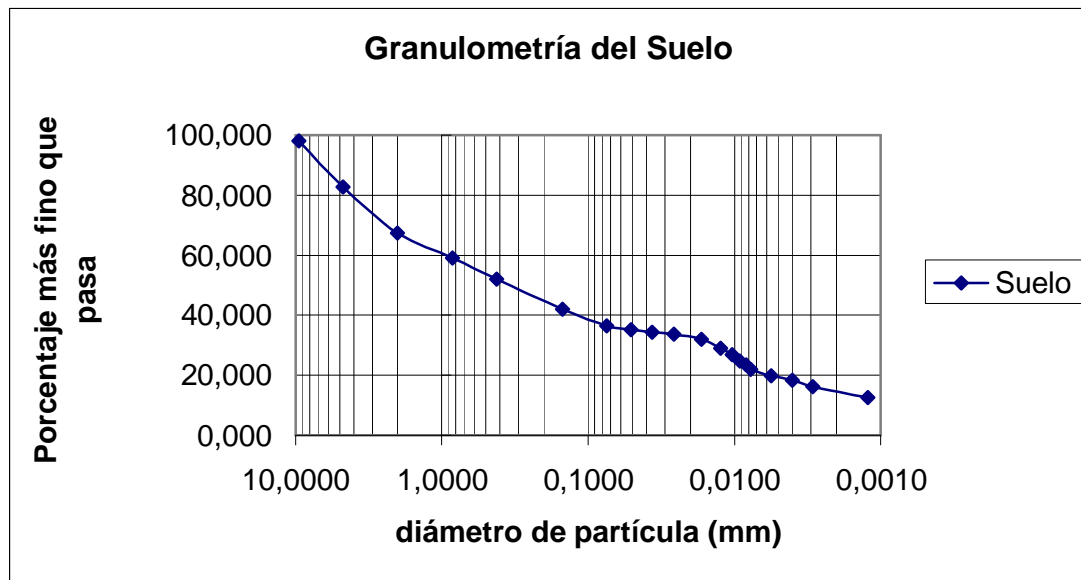


Gráfico 4.5. Curva granulométrica del suelo.⁵⁷

El Gráfico 4.6 contiene las curvas granulométricas del lodo y del suelo.

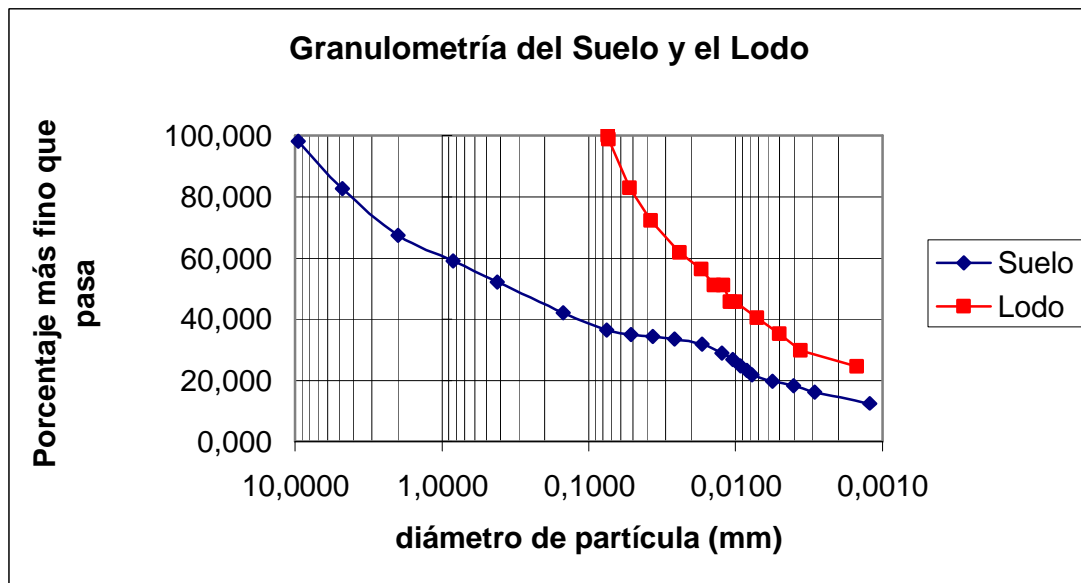


Gráfico 4.6. Comparación de las curvas granulométricas del lodo y el suelo.

Analizando las granulometrías del lodo y el suelo, se puede mencionar que:

- ✓ El suelo es un material de partículas más gruesas que el lodo.
- ✓ El tamaño máximo del lodo equivale al 0,78% del correspondiente al suelo.
- ✓ El contenido de finos pasantes del tamiz 200 del suelo equivale al 36,5% del correspondiente al lodo.

A.3.2.5.- LÍMITES DE ATTERBERG.

La determinación de las características del lodo comprendió también el cálculo de los límites de Atterberg. Específicamente se calcularon el límite líquido (Wl) y el límite plástico (Wp) junto con dos índices derivados: el índice de plasticidad y el índice de consistencia.

A.3.2.5.1.-LÍMITE LÍQUIDO.

El Gráfico 4.7, contiene la mejor recta que se adapta a los tres puntos conseguidos con el ensayo (número de golpes vs. contenido de humedad) y con la cual se calculó el límite líquido.

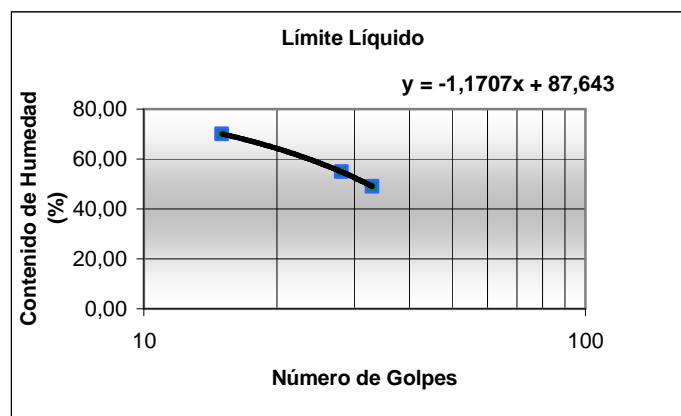


Gráfico 4.7. Límite Líquido.

A.3.2.5.2.-LÍMITE PLÁSTICO.

El Lote objeto de estudio en esta sección fue el número3.

Wp (%)	26,960
---------------	--------

A.3.2.5.3.-ÍNDICES DERIVADOS.

Determinados los valores correspondientes al límite líquido y al límite plástico, se calcularon los índices derivados: índice de plasticidad e índice de consistencia, cuyos valores están contenidos en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Índices Derivados.

Lote	Ip (%)	Ic
1	28,416	-0,574
2		0,237
3		2,036

Una vez calculados los límites de Atterberg y los índices derivados, se obtuvieron los siguientes resultados:

- ✓ El límite líquido del lodo estudiado posee un límite líquido igual a 58,38%.
- ✓ El límite plástico del lodo estudiado en tiene un límite plástico igual a 26,96%.
- ✓ El valor del índice de plasticidad de este lodo es igual a 28,42% el cual, según la Tabla 2.6, corresponde a un material de alta plasticidad.

- ✓ El valor del índice de consistencia para el lodo perteneciente al Lote 1 es igual a -0,58 el cual, según la Tabla 2.7, es propio de un material de consistencia líquida.
- ✓ El índice de consistencia determinado para el lodo del Lote 2 es igual a 0,24, propio de un material de consistencia plástica blanda, según la Tabla 2.7.
- ✓ El índice de consistencia correspondiente al lodo del Lote3 es igual a 2,04, característico de los materiales de consistencia dura, según la Tabla 2.7 del capítulo II.

A.3.2.5.4.- COMPARACIÓN DE LOS LÍMITES DE ATTERBERG DEL LODO CON UN SUELO UTILIZADO EN MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO.

Los límites de Atterberg e índices derivados del lodo fueron comparados con los valores pertenecientes al mismo suelo utilizado en la sección 4.3.2.4, los cuales se encuentran contenidos en las Tablas 4.5 y 4.6.

Tabla 4.5. Límite Líquido de un suelo.¹⁵⁸

Número de Golpes	ω (%)
16	28,3
23	27,1
30	25,6

WI (%)	26,61
--------	-------

¹⁵⁸ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). “Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Tabla 4.6. Límite plástico e índices derivados de un suelo.¹⁵⁹

Wp (%)	19,15
Ip (%)	7,46
Ic	0,65

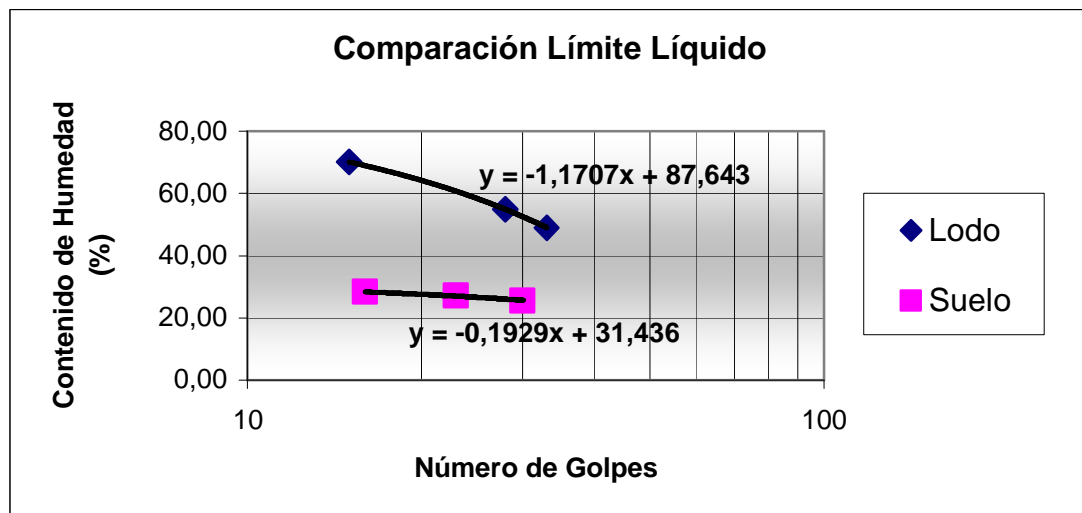


Gráfico 4.8. Comparación de los límites líquidos del lodo y un suelo.

Una vez comparados los límites de Atterberg e índices derivados del lodo y el suelo se obtuvieron los siguientes resultados:

- ✓ El límite líquido del suelo es inferior al valor correspondiente al lodo.
- ✓ El límite plástico del suelo es inferior al del lodo.
- ✓ El índice de plasticidad del suelo propio, según la Tabla 2.6, de un material de baja plasticidad.

¹⁵⁹ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). “Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- ✓ El valor correspondiente al índice de plasticidad del lodo es superior al del suelo.
- ✓ El índice de consistencia del suelo es característico de un material de consistencia plástica tiesa.
- ✓ El Lote de lodo que más se asemeja al suelo, en cuanto a consistencia, es el número 2.

La Tabla 4.7 contiene un resumen de las características de los diferentes lotes lodo.

Tabla 4.7. Características de los diferentes lotes de lodo.

Parámetro		Lodo en estado natural	Lodo Lote 1	Lodo Lote 2	Lodo Lote 3
Pruebas Iniciales	Prueba del Olor	Mohoso	Mohoso	Mohoso	Terroso
	Prueba del Tacto	Redondeado	Redondeados	Redondeados	Angulares
	Prueba de la Vista	Muy fino	Muy fino	Fino	Terrones
	Prueba del Lavado de Manos	No se realizó el ensayo	Enjague difícil	Enjague difícil	Enjuague fácil
	Prueba del Brillo	No se realizó el ensayo	No se realizó el ensayo	Mate	Mate
	Prueba de la Sacudida	No se realizó el ensayo	Aparece un poco de agua a los 33 golpes	Aparece un poco de agua a los 41 golpes	Aparece un poco de agua a los 54 golpes
	Prueba del Cordón	No se realizó el ensayo	No se realizó el ensayo	Cordón duro	Cordón duro
	Prueba de la Cinta	No se realizó el ensayo	No se formó cinta	No se formó cinta	No se formó cinta
Ensayos de Laboratorio	Peso Unitario Compacto γ (kg/m ³)	1105	1018	772	702
	Contenido de Materia Orgánica	5	5	5	5
	Contenido de Humedad ω (%)	84,1	74,7	51,6	0,5
	Consistencia	Líquida	Líquida	Plástica blanda	Dura

A.4.- ANÁLISIS DE LAS MEZCLAS DE LODO-CEMENTO.

A.4.1.- PESO UNITARIO COMPACTO Y ASENTAMIENTO.

Una vez mezclados los componentes, las primeras características que se determinaron fueron el peso unitario compacto y el asentamiento medido con el cono de Abrams.

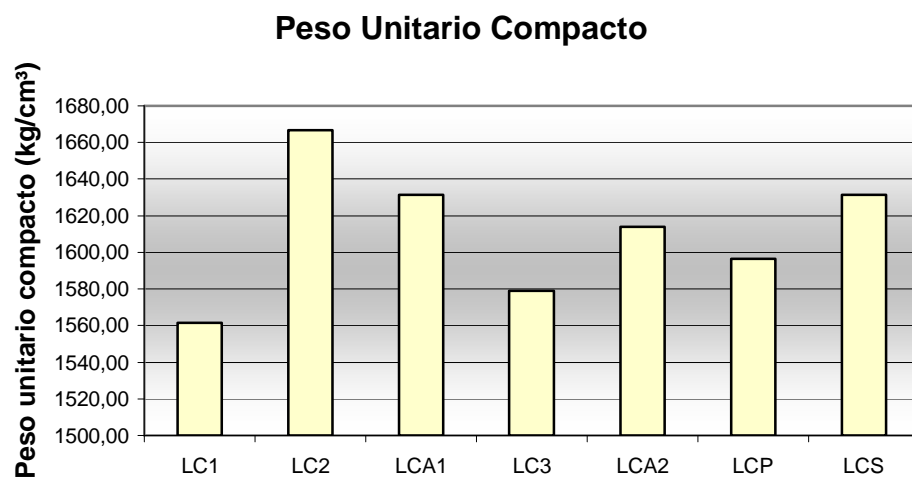


Gráfico 4.9. Peso unitario compacto de las mezclas.

Considerando los datos y gráficos presentados anteriormente se obtuvieron los siguientes resultados:

- ✓ La mezcla más liviana fue LCA2, mientras que la mezcla LC2 se presentó como la más pesada.
- ✓ Las mezclas de tipo lodo-cemento (LC) presentaron mayores pesos unitarios compactos que las de las mezclas que contenían agregados convencionales.

- ✓ Los diferentes contenidos de humedad de los tres Lotes de lodo utilizados para hacer las mezclas no influyeron en los pesos unitarios de las mismas, ya que éstos se mantuvieron estables.

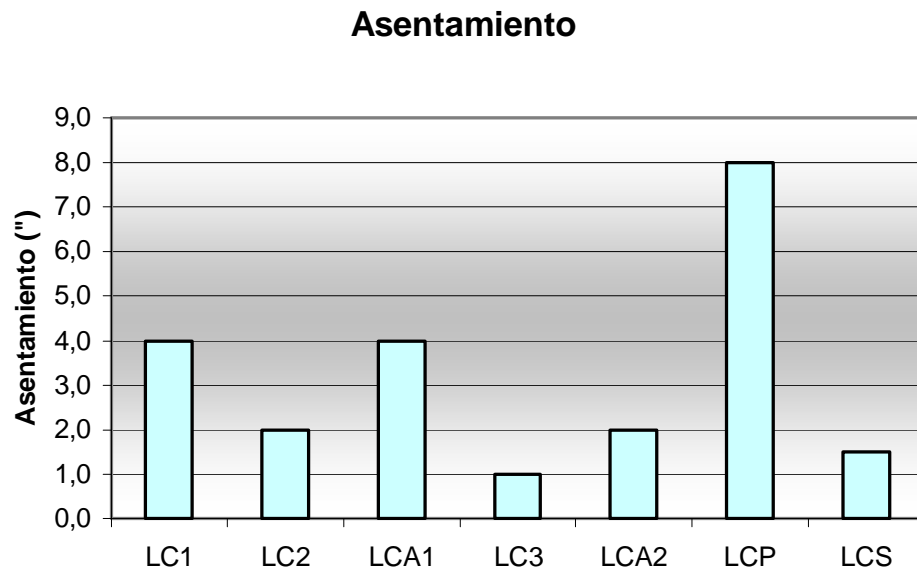


Gráfico 4.10. Asentamiento de las mezclas.

- ✓ La mezcla más fluida fue LCP, ya que presentó el mayor asentamiento medido con el cono de Abrams.
- ✓ La mezcla menos fluida es la mezcla LC3, ya que presentó el menor asentamiento.
- ✓ En general, las mezclas de lodo-cemento con un agregado convencional se comportaron más fluidamente que aquellas compuestas sólo por lodo y cemento.

- ✓ Las mezclas de lodo-cemento no consiguieron asentamientos elevados, y los mismos fueron disminuyendo a medida que se disminuía el contenido de humedad del lodo utilizado en la mezcla.

A.4.2.- PROCESO DE FRAGUADO.

Tras llevar un seguimiento minucioso del comportamiento de las mezclas durante y después del proceso de mezclado se obtuvieron algunas observaciones que son necesarias mencionar:

- ✓ Los cilindros de 30x15 cm y de 20x10 cm fabricados con las mezclas LC1, LC2 y LCA1 no fraguaron a los 28 días de edad, motivo por el cual no fueron ensayados.
- ✓ Los cilindros de 10x5 cm y los cubos de 10x10x10 cm fabricados con las mezclas LC1 y LC2 fraguaron a los 21 días aproximadamente.
- ✓ Los cilindros de 30x15 cm y de 20x10 cm pertenecientes a la mezcla LC3 fraguaron aproximadamente a los 21 días de edad, mientras que los cilindros de 10x5 cm y los cubos de 10x10x10 cm de esta misma mezcla fraguaron a los 14 días aproximadamente.
- ✓ Las probetas fabricadas con las mezclas de lodo-cemento junto con un agregado fueron las que presentaron un fraguado más rápido (a excepción de LCA1), siendo su tiempo de fraguado de 5 días aproximadamente.
- ✓ Todas las probetas vieron disminuido su tamaño, siendo más este suceso más notable en las fabricadas con la mezcla LC1.

- ✓ En general, las probetas de lodo-cemento (LC) redujeron más su tamaño que las de lodo-cemento más un agregado.
- ✓ Las mezclas que tuvieron como componente cal fraguaron en menor tiempo.

La Foto 4.2 contiene imágenes donde se puede apreciar la retracción sufrida por las probetas de lodo-cemento al compararla con el tamaño de los moldes que originalmente ocupaban.



Foto 4.2. Proceso de fraguado del lodo-cemento.

A.4.3.- PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD.

En esta sección se analizaron los resultados de cuatro ensayos llevados a cabo para determinar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas de lodo-cemento: resistencia a la compresión, tracción indirecta (ensayo brasileño), absorción y erosión.

El análisis incluye comparaciones de los parámetros anteriormente mencionados del lodo-cemento con valores correspondientes a otros materiales de construcción que han formado parte de distintas investigaciones. Para ello se utilizó el ripio-cemento

A.4.3.1.- ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.

Del grupo de mezclas de lodo-cemento (LC) sólo fueron ensayadas las probetas pertenecientes a la mezcla LC3, a la edad de 28 días.

Rc Promedio (kgf/cm²)
2,46

A partir de los resultados obtenidos se menciona que:

- ✓ La falla generalizada fue horizontal (perpendicular a la dirección de la carga), desprendiéndose material de la parte central del cilindro.
- ✓ Una característica que presentaron todas las probetas fue la tendencia al desmoronamiento, incluso con la aplicación de tensiones bajas.

Las probetas fabricadas con las mezclas de lodo-cemento con agregado fueron ensayadas en su totalidad (a excepción de las correspondientes a la mezcla LCA1) a una edad de 7 días.

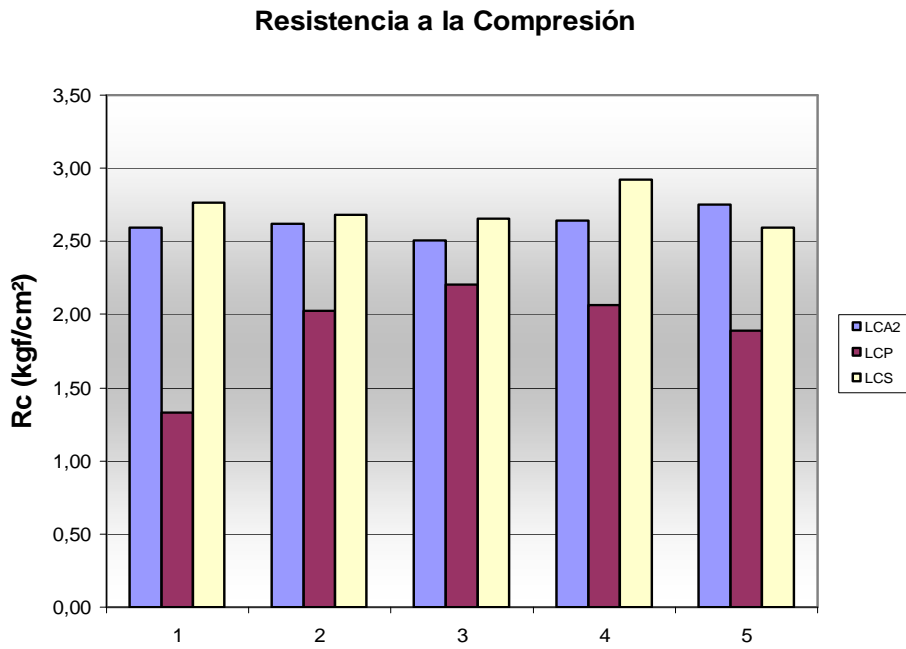


Gráfico 4.11. Resistencia a la compresión de mezclas de lodo-cemento con agregado.

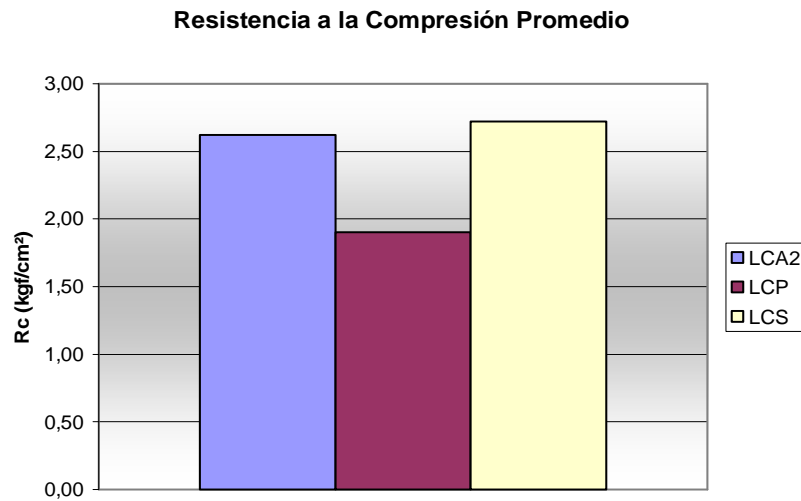


Gráfico 4.12. Resistencias a la compresión promedio de mezclas de lodo-cemento con agregado.

Considerando los valores de resistencia obtenidos se puede mencionar que:

- ✓ La mezcla que presentó mayor resistencia a la compresión fue LCS, seguida de LCA2 y por último LCP.
- ✓ La falla generalizada, al igual que en la mezcla LC3, fue horizontal. Sin embargo no hubo una tendencia tan marcada al desmoronamiento como en LC3.
- ✓ A pesar de ser probetas ensayadas a 7 días, los valores de resistencia a compresión arrojados por las mezclas LCA2 y LCS fueron superiores a los correspondientes a la mezcla de lodo-cemento LC3.

La Tabla 4.8 contiene valores de resistencia a compresión de diferentes materiales de construcción, tanto a 7 días como a 28 días.

Tabla 4.8. Resistencia a la compresión de distintos materiales.^{160 161 162}

¡Error! No se pueden crear objetos modificando códigos de campo.

¹⁶⁰ KORODY, María 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.

¹⁶¹ LUIS, Alesmar y RENDON, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹⁶² RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

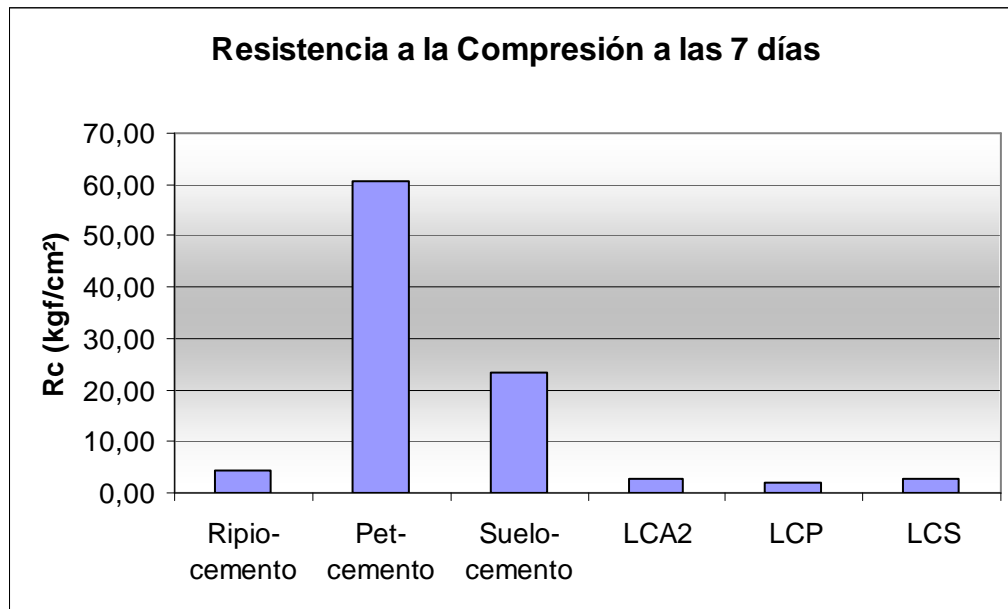


Gráfico 4.13. Comparación de resistencias a la compresión a los 7 días.^{59 60 61}

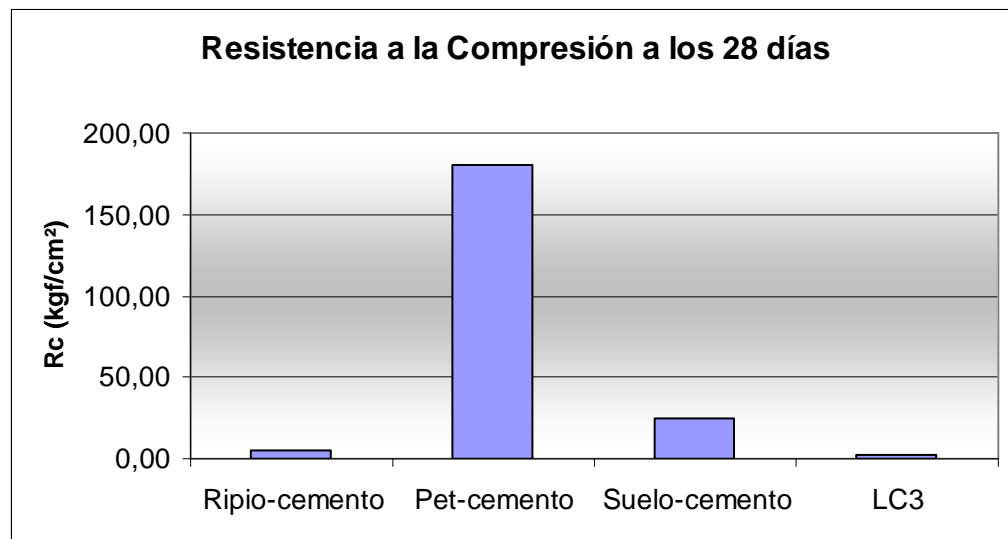


Gráfico 4.14. Comparación de resistencias a la compresión a los 28 días.^{163 164 165}

¹⁶³ KORODY, María 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.

¹⁶⁴ LUIS, Alesmar y RENDON, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹⁶⁵ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Considerando los resultados de resistencia a la compresión de las mezclas de lodo-cemento y los valores correspondientes a otros materiales de construcción contenidos en la Tabla 4.6 y las Gráficas 4.13 y 4.14 se distingue que:

- ✓ El material que presentó mayor resistencia a la compresión fue el PET-cemento, tanto a 7 días como a 28 días.
- ✓ En general, las resistencias a la compresión presentada las mezclas de lodo-cemento fueron menores que las del resto de materiales de construcción.

A.4.3.2.- ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA.

Del grupo de mezclas LC, sólo fueron ensayadas a tracción indirecta las probetas pertenecientes a la mezcla LC3.

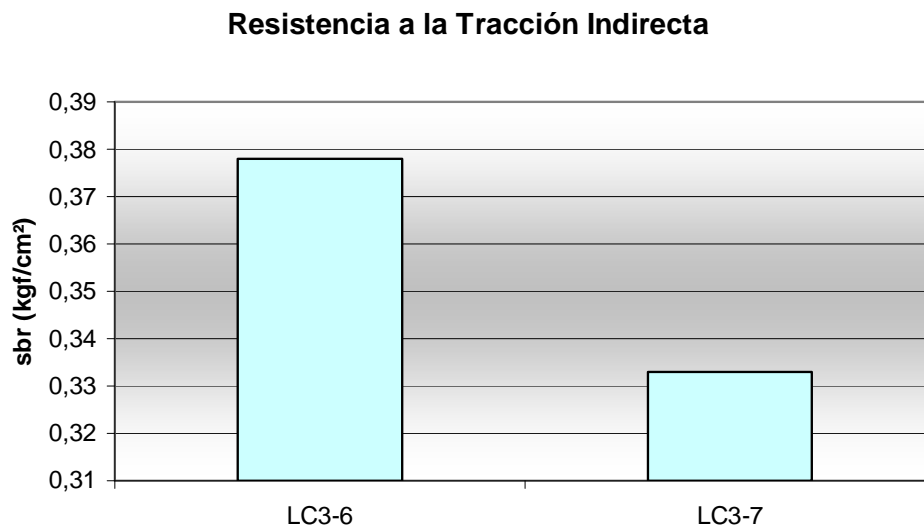


Gráfico 4.15. Resistencia a la tracción indirecta de las probetas de lodo-cemento.

Analizando los resultados obtenidos de resistencia a la tracción indirecta de las probetas de lodo-cemento, se puede mencionar que:

- ✓ La resistencia a la tracción indirecta de la mezcla LC3 equivale al 14,63% de su resistencia a la compresión.
- ✓ Las probetas se comportaron de forma similar. La falla presentada fue longitudinal y también hubo tendencia al desmoronamiento.

Las probetas fabricadas con las mezclas de lodo-cemento con agregado fueron ensayadas en su totalidad (a excepción de las pertenecientes a la mezcla LCA1) a la edad de 7 días.

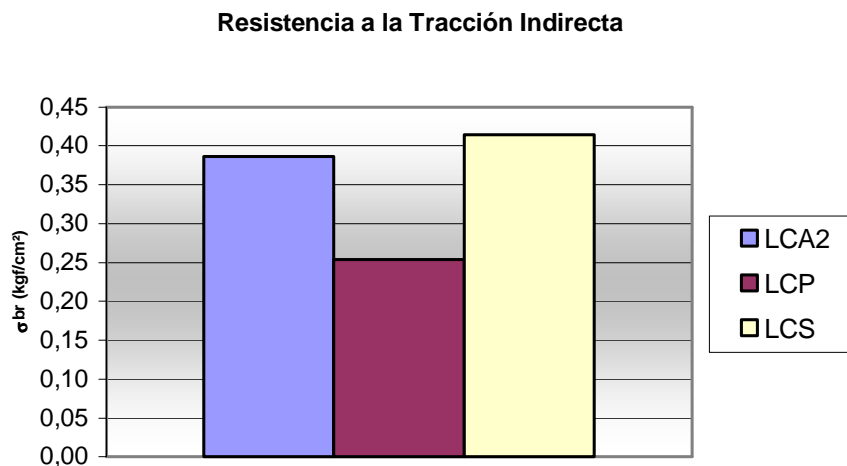


Gráfico 4.16. Resistencia a la tracción indirecta.

Analizando los resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta sobre las probetas fabricadas con las mezclas se puede mencionar que:

- ✓ La mezcla que presentó mayor resistencia a la tracción fue la mezcla LCS, seguida de LCA2 y por último LCP.
- ✓ La resistencia a la tracción de la mezcla LCA2 es equivalente en un 14,89% a su resistencia a la compresión.

- ✓ El valor de la resistencia a tracción de la mezcla LCP equivale al 13,16% de su resistencia a la compresión.
- ✓ La resistencia a la tracción de la mezcla LCS equivale al 15,07% del valor correspondiente a su resistencia a la compresión.
- ✓ La falla generalizada fue de tipo longitudinal, coincidiendo con la dirección de la carga.
- ✓ A pesar de presentar valores obtenidos de probetas ensayadas a 7 días, las mezclas LCA2 y LCS ofrecieron mayor resistencia a la tracción que la mezcla LC3.

La Tabla 4.9 contiene valores de resistencia a la tracción de suelo-cemento, correspondiente a probetas ensayadas a 7 días.

Tabla 4.9. Resistencia a la tracción de mezclas de suelo-cemento.^{166 167}

Material	σ_{br} (kgf/cm ²)
Suelo-cemento 1	23,1
Suelo-cemento 2	23,5

¹⁶⁶ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹⁶⁷ SANCHEZ, J.; MORENO, R. (2002). **“Fabricación y Caracterización de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Resistencia a la Tracción

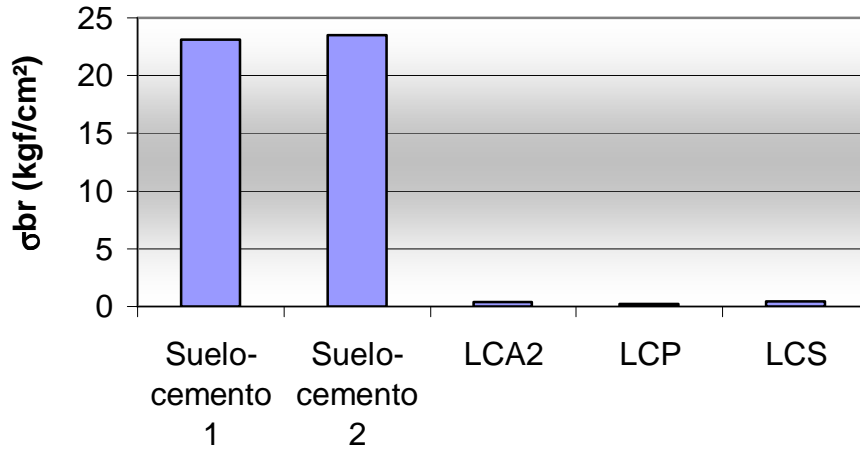


Gráfico 4.17. Comparación de resistencias a la tracción.

A.4.3.3.- ENSAYO DE ABSORCIÓN.

Absorción

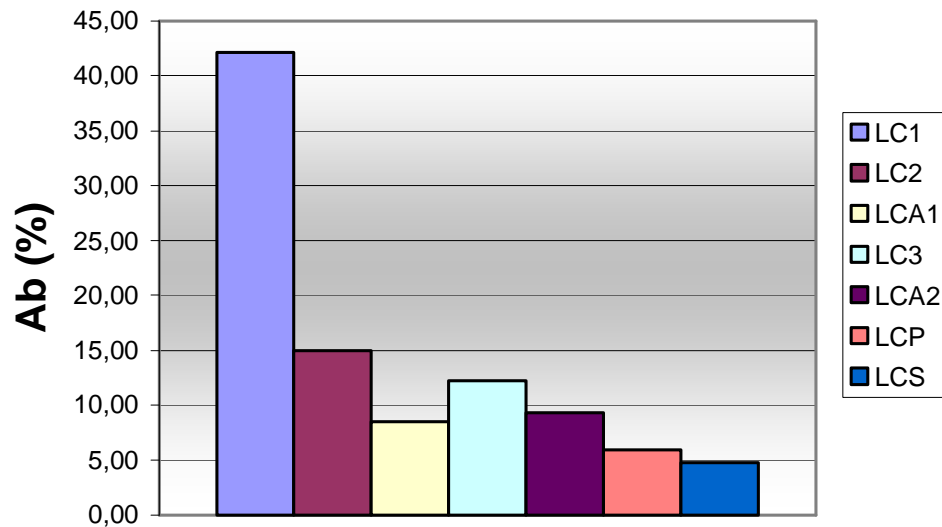


Gráfico 4.18. Absorción de las mezclas de lodo-cemento.

Analizando los resultados del ensayo de absorción al cual fueron sometidas las probetas fabricadas con las distintas mezclas de lodo-cemento, se puede mencionar que:

- ✓ La mezcla con mayor capacidad de absorción es LC1, mientras que la presentó menor capacidad de absorción fue LCS.
- ✓ En general, las mezclas de lodo-cemento con agregado (LCA, LCP y LCS) presentaron menos absorción que el grupo de mezclas LC.
- ✓ A medida que disminuyó el contenido de humedad del lodo utilizado en la mezcla también se redujo la absorción.
- ✓ Todas las probetas utilizadas en este ensayo presentaron problemas de desmoronamiento de su superficie transcurridas las 24 horas sumergidas en agua, por lo que el manejo de estos elementos tuvo que ser sumamente delicado.

La Tabla 4.10 contiene los valores de absorción pertenecientes a distintos materiales de construcción.

Tabla 4.10. Absorción de diferentes materiales de construcción.^{168 169 170}

Material	Absorción (%)
Ripio-cemento	22,68
PET-cemento	11,38
Suelo-cemento	19,12

¹⁶⁸ KORODY, María 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.

¹⁶⁹ LUIS, Alesmar y RENDON, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹⁷⁰ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

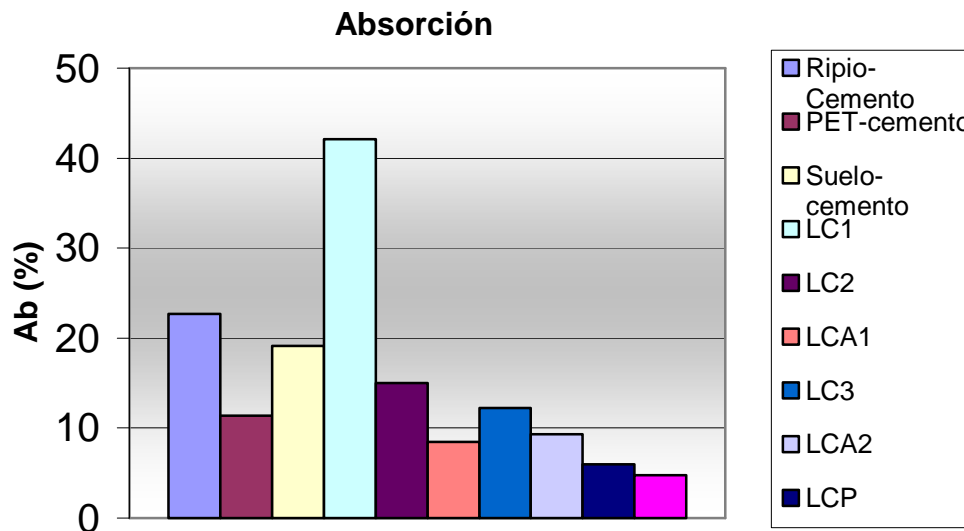


Gráfico 4.19. Comparación de absorción entre el lodo-cemento y diferentes materiales de construcción.^{171 172 173}

Considerando los resultados obtenidos en el ensayo de absorción y los valores correspondientes a este mismo parámetro de otros materiales, se puede mencionar que:

- ✓ Exceptuando la mezcla LC1, las mezclas de lodo-cemento presentaron menor absorción que el ripio-cemento y el suelo-cemento.
- ✓ Las mezclas del tipo lodo-cemento con agregado presentaron menor absorción que el PET-cemento.

¹⁷¹ KORODY, María 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.

¹⁷² LUIS, Alesmar y RENDON, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietileno Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹⁷³ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

A.4.3.4.- ENSAYO DE EROSIÓN.

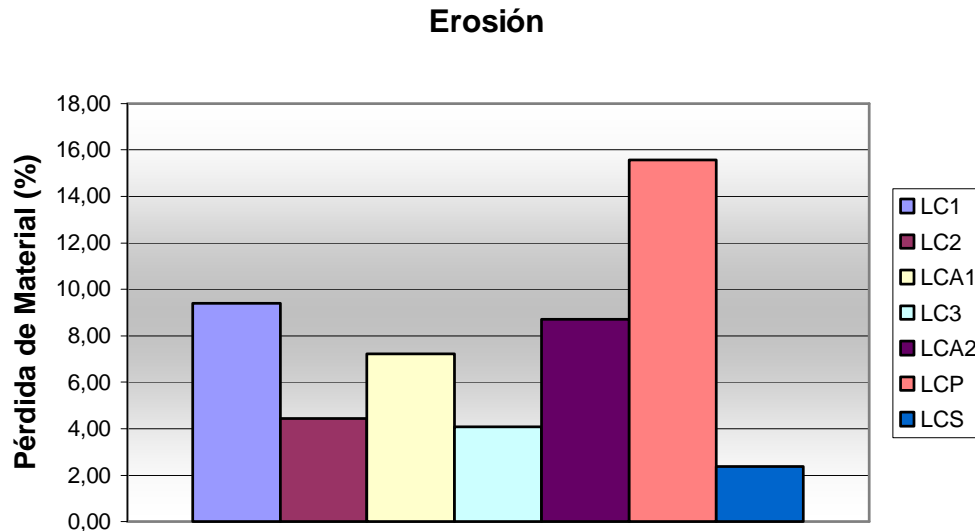


Gráfico 4.20. Erosión de las mezclas de lodo-cemento.

Analizando los resultados del ensayo de erosión por cepillado de las mezclas de lodo-cemento se puede mencionar que:

- ✓ La mezcla que presentó mayor pérdida de material por erosión fue LCP.
- ✓ La mezcla que presentó menor pérdida de material por erosión fue LCS.
- ✓ Para el grupo de mezclas LC, la pérdida de material por erosión disminuye a medida que también se reduce el contenido de humedad del lodo utilizado en la mezcla.
- ✓ Las mezclas LC2 y LC3 presentaron menor pérdida de material por erosión que las pertenecientes al grupo de lodo-cemento con agregado (a excepción de la mezcla LCS).

La Tabla 4.11 contiene los valores de pérdida de material por erosión pertenecientes al PET-cemento y a dos mezclas de suelo-cemento.

Tabla 4.11. Erosión de PET-cemento y suelo-cemento.^{174 175 176}

Material	Pérdida de Material (%)
PET-cemento	0,16
Suelo-cemento 1	0,31
Suelo-cemento 2	0,20

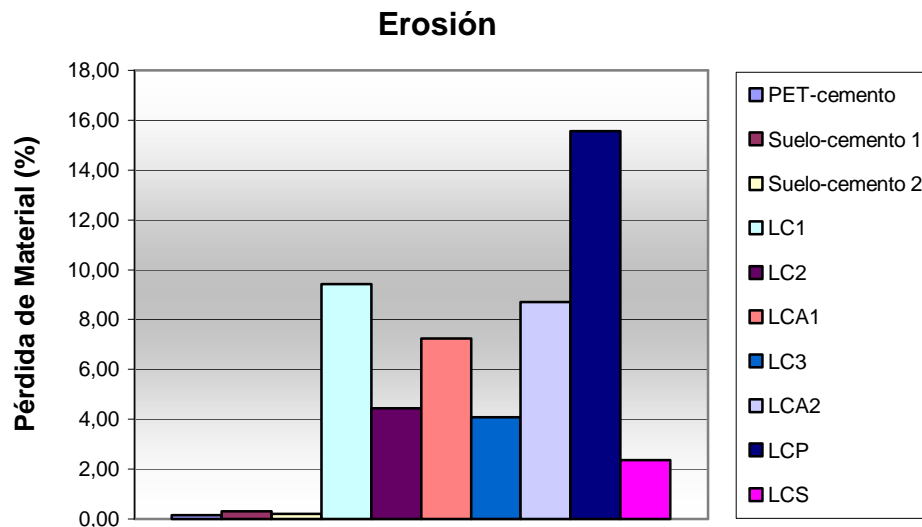


Gráfico 4.21. Comparación de pérdida por erosión de distintos materiales.

Considerando los resultados arrojados por los ensayos de erosión de las probetas de lodo-cemento y los valores de otros materiales correspondientes a este parámetro, se puede mencionar que:

¹⁷⁴ LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹⁷⁵ RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

¹⁷⁶ SANCHEZ, J.; MORENO, R. (2002). **“Fabricación y Caracterización de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- ✓ Los valores de pérdida por erosión arrojados por las mezclas de lodo-cemento superaron a los de PET-cemento y suelo-cemento.

CONCLUSIONES

Una vez obtenidos y analizados los resultados, se llegan a un conjunto de conclusiones sobre el trabajo experimental que son necesarias mencionar.

De las características físicas del lodo proveniente del sedimentador de la planta de potabilización de agua La Mariposa, estudiado en este Trabajo Especial de Grado, incluyendo su comparación con agregados utilizados en mezclas estabilizadas con cemento, se concluye que:

- ✓ El lodo es una arcilla con alto contenido de materia orgánica y de alta plasticidad.
- ✓ El contenido de material fino del lodo es muy elevado para ser utilizado en mezclas de materiales de construcción que utilicen cemento como conglomerante, ya que prácticamente su totalidad es pasante del tamiz 200.
- ✓ Para ser utilizado en mezclas de construcción estabilizadas con cemento, el contenido de materia orgánica del lodo igual a cinco en la escala de Gardner es muy elevado, ya que influye en su fraguado y resistencia final.
- ✓ El contenido de humedad de 84,1% del lodo es muy elevado. Esto se traduce en que gran cantidad de agua es aportada a la mezcla, afectando así su fraguado y su resistencia final.
- ✓ El lodo, en caso de que fuera considerado material de construcción y en comparación con otros materiales de este tipo, es liviano.
- ✓ El lodo correspondiente al lote tres fue el que más se asemejó a los agregados convencionales, ya que presentó mejores características para ser utilizado en mezclas de construcción.

- ✓ Los lotes de lodo con contenido de humedad disminuido presentaron mejores características para ser utilizados en mezclas de construcción que el lodo en estado natural.

Del comportamiento mecánico y físico de la mezcla lodo-cemento, después de analizados los resultados de los ensayos de laboratorio, se concluye que:

- ✓ El lodo-cemento, en caso de que fuera considerado un mezcla de construcción y en comparación con otras mezclas de este tipo, puede considerarse liviano.
- ✓ Los valores arrojados por los ensayos de resistencia a la compresión y resistencia a la tracción indirecta hacen del lodo-cemento un material poco resistente, no apto para solicitaciones tradicionales de diseño de estructuras.
- ✓ Los valores arrojados por los ensayos de absorción y de erosión hacen del lodo-cemento un material poco durable.
- ✓ El contenido de humedad del lodo influye en el proceso de fraguado del lodo-cemento, dado que al disminuir éste, el material endurece en menor tiempo.
- ✓ El contenido de humedad del lodo influye en las propiedades de durabilidad del lodo-cemento, dado ya que al reducirse este parámetro, se disminuyen también la capacidad absorción y la pérdida de material por erosión de los elementos fabricados con este material.
- ✓ El lodo-cemento mejora sus características como material de construcción si un agregado convencional (incluyendo suelo) forma parte de su mezcla.
- ✓ La mezcla que presentó mejores características como material de construcción fue LCS, conformada por lodo-cemento y suelo.

En general, del comportamiento del lodo y de la mezcla de lodo-cemento como material de construcción se concluye que:

- ✓ El lodo-cemento, tal como fue estudiado en este Trabajo Especial de Grado, no puede ser utilizado como mezcla para la construcción.
- ✓ El lodo proveniente del proceso de potabilización de agua utilizado en esta experiencia no debe formar parte de una mezcla para la construcción que utilice cemento como conglomerante, por su alto contenido de materia y su alto contenido de material fino.
- ✓ Es importante destacar la influencia que tienen tanto el contenido de materia orgánica como la granulometría fina en el proceso de fraguado de mezclas de materiales de construcción estabilizadas con cemento, lo cual quedó reflejado en el largo período de tiempo de fraguado y la retracción que presentaron las probetas fabricadas con lodo-cemento objeto de estudio de este Trabajo Especial de Grado. Sin embargo, y en este sentido, resulta más determinante la característica granulométrica del lodo ya que el problema de la materia orgánica puede ser resuelto a través de métodos factibles de llevar a cabo, como el uso de cal o el sometimiento del material a altas temperaturas.

RECOMENDACIONES

A fin de continuar con la línea de investigación establecida por este Trabajo Especial de Grado, se hacen las siguientes recomendaciones:

- ✓ Llevar a cabo una investigación que determine las características de los lodos provenientes del proceso de potabilización de agua de una forma más específica que la presentada por este Trabajo Especial de Grado. Dicha investigación debe incluir lodos de distintas plantas, de distintas épocas y sus características como material de construcción.
- ✓ Establecer un método para reducir (en lo posible) el contenido de materia orgánica presente en los lodos provenientes de las plantas de potabilización de agua, a fin de ser utilizados como material de construcción, y que incluya el estudio de la aplicación de cal y de altas temperaturas.
- ✓ Estudiar la influencia del lodo proveniente del proceso de potabilización de agua como adición a mezclas de materiales de construcción (como concreto o suelo-cemento) y no como materia prima.
- ✓ Desarrollar un trabajo de investigación que analice el comportamiento de mezclas de materiales de construcción que cuente entre sus componentes a lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.
- ✓ Llevar a cabo el estudio de estabilizaciones de suelos utilizando para ello el lodo proveniente del proceso de potabilización de agua.
- ✓ Investigar la capacidad del lodo proveniente del proceso de potabilización de ser utilizado como material cerámico.
- ✓ Desarrollar un método eficiente para disminuir el contenido de humedad de los lodos a ser utilizados como material de construcción.

- ✓ Establecer métodos alternativos y adecuados para medir las propiedades de las mezclas y probetas.

- ✓ Investigar el uso del lodo en mezclas secas.

- ✓ Determinar el tipo de arcilla que es el lodo, incluyendo análisis químico, capacidad de expansión y usos o aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **“Diccionario del Agua”** (En línea). Productos y Servicios para la Industria del Agua. Santiago de Chile, Chile. http://www.aguamarket.com/Diccionario/indice_letras.asp?letra=F&offset=20 (Consulta: junio, 2005).
- [2] **“Fangos Producidos en el Tratamiento del Agua Potable”** (en línea). (1998). El Agua Potable, Tratamiento de Lodos. http://www.fortunecity.es/felices/andorra/51/tratamiento_de_lodos.htm (Consulta: octubre, 2005).
- [3] **“Glosario del Agua”**. (en línea). <http://www.jmcprl.net/CONSTRUCCION/G-L.htm>. (Consulta: marzo, 2005).
- [4] **“Importancia del Agua de Amasado en la Calidad de Hormigones y Morteros”** (en línea): Melon, WebTips, WebTip N° 8, s/f. Disponible en: www.melon.cl/html_construc_prof/webtipn8.htm. (Consulta: marzo 2005).
- [5] **“Introducción General al Concreto”** (en línea). Curso – taller de concreto, Fundación ICA. Marzo, 2000. <http://www.monografias.com/trabajos4/concreto/concreto.shtml>. (Consulta: marzo, 2005).
- [6] **“Laboratorio de Mecánica de Suelos”** (en línea). Departamento de Construcción Civil. Facultad de Arquitectura, Construcción e Ingeniería Civil. Universidad Católica del Norte. Chile. Disponible en: <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/uscsM2.htm>. (Consulta: octubre, 2005).
- [7] **“Potabilización de Agua”** (en línea). Equipos de Purificación AQUA PURIFICACION SYSTEMS. http://mx.geocities.com/agua_cosmos/agua-municipal.htm. (Consulta: marzo, 2005).
- [8] **“Potabilización, Captación, Conducción, Presedimentación, Agregado De Productos Químicos, Floculación, Sedimentación, Filtración, Desinfección”** (en línea). <http://www.osm.com.ar/html/Potabilizacion.htm#Potabilización>. (Consulta: febrero, 2005).
- [9] **“Suelo-Cemento”**. Don Sebas, Notas Técnicas para Construcción. Julio, 2003. N° 21. Cali, Colombia.
- [10] **“Suelo-Cemento Aplicado a la Vivienda de Interés Social. Selección de Tierras. Ensayos de Campo”**. Asociación Venezolana de Productores de Cemento – Consejo Nacional de la Vivienda – Facultad de Arquitectura Universidad de Los Andes. Caracas. Venezuela. 1991.

- [11] ALBAREDA, Francesc (2003) **“Durabilidad de Hormigones con Adición de Lodos Secos de Depuradora de Aguas Residuales”** (en línea). http://biblioteca.upc.es/pfc/mostrar_dades_PFC.asp?id=408_62. Trabajo Especial de Grado. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
- [12] AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (1999). **“Water Quality & Treatment, a Handbook of Community Water Supplies”**. (5ta ed.). Estados Unidos de América. McGraw-Hill.
- [13] ARBOLEDA, Jorge. (2000). **“Teoría y Práctica de la Purificación del Agua”** (3ra ed.). Bogotá: McGraw Hill.
- [14] ARRIETA, Javier y PEÑAHERRERA, Enrique (2000). **“Fabricación de Bloques de Concreto con una Mesa Vibradora”** (en línea). Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería CIVIL <http://www.cismid.uni.org/articulos/proy-03.pdf>. (Consulta: octubre, 2005).
- [15] ASTRAIN, Pedro y MARRERO, Martha. **“Transformación de la Clasificación de los Suelos de Uso en la Agricultura al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)”** (en línea). <http://espejos.unesco.org.uy/simplac2002/Ponencias/Geom%20E1tica%202002/GE152.doc>. (Consulta: septiembre, 2005).
- [16] BARAJAS, Oscar. **“Diseño e Implementación de Plantas Portátiles para Tratamiento de Agua”** (en línea). <http://www.oscarbarajas.com/potable.html>. (Consulta: febrero, 2005).
- [17] BIO-MINERAL TIMES (1999). **“What is alum sludge? Can it be considered a resource? What is it good for?”** (en línea). <http://www.nviro.com/research%20reports/bmt/alum.htm>. (Consulta: abril, 2005).
- [18] BLANCO, Henry y NAJUL, María Virginia. (2003). **“Manejo Eficiente de Plantas de Tratamiento para Potabilización de Aguas”**. Instituto Tecnológico, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
- [19] CABEZAS, C.; BOLAÑOS, G. y SALAZAR, A. (2001). **“Materiales de Construcción a partir de Lodos de Plantas de Tratamiento de Agua, Mediante Infiltración con Dióxido de Carbono Supercrítico”** (en línea). XXI Congreso Colombiano de Ingeniería Química, Bogotá. <http://supercriticos.univalle.edu.co/Reprints%20PDF/Cesar.pdf>. (Consulta: octubre, 2005).

- [20] CASTAÑEDA SARABIA, Onia. **Determinación de la Toxicidad de los Lodos Generados por una Planta Potabilizadora, Utilizando Bioensayos** (En línea). Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). <http://potablewater.iespana.es/toxicidad%20de%20lodos.pdf>. (Consulta: octubre, 2005).
- [21] Construaaprende.con Ingeniería civil y Arquitectura. Prácticas **“Práctica 16: Calorimetría y Materia Orgánica de los Agregados Finos”** (en línea). <http://www.construaaprende.com/Lab/16/Prac16.html>. (Consulta: noviembre, 2005).
- [22] Construaaprende.con Ingeniería civil y Arquitectura. Prácticas. **“Trabajo: Características del Concreto: Resistencia”** (en línea). <http://www.construaaprende.com/Trabajos/T2/T2Pag8.html>. (Consulta: noviembre, 2005).
- [23] HENRÍQUEZ, Eduardo. **“El Agua”** (en línea). <http://www.monografias.com/trabajos24/agua/agua.shtml>. (Consulta: septiembre, 2005).
- [24] HIDROCAPITAL (2005). **“Nuestras Plantas de Tratamiento”**. (en línea). http://www.hidrocapital.com.ve/index.asp?spg_id=18. (Consulta: agosto, 2005).
- [25] HIDROCAPITAL (2005). **“Nuestros Embalses”**. (en línea). http://www.hidrocapital.com.ve/index.asp?spg_id=17. (Consulta: agosto, 2005).
- [26] HIDROVEN. **“La Ruta del Agua”** (en línea). <http://www.hidroven.gov.ve/Publicaciones/rutagua.html#inicio>. (Consulta: febrero, 2005).
- [27] KORODY, María 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.
- [28] LUIS, Alesmar y RENDÓN, Nalia (2005). **“Diseños de Mezcla de Polietilen Tereftalato - Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [29] MELGAREJO, Jessica (2004). **“Manejo de Residuos Sólidos: Lodos Residuales”** (en línea). Instituto del Medio Ambiente, Universidad de La Frontera, Sistema de Información Ambiental de la IX Región de Chile. <http://www.ima.ufro.cl/siamb/p0903.html>. (Consulta: noviembre, 2005).

- [30] MERY, R. **“Determinación manual de la textura de suelos mediante la técnica del “Tacto”** (en línea). <http://textura1.tripod.com/>. (Consulta: noviembre, 2005).
- [31] National Ready Mixed Concrete Association (1998). **“¿Qué, Por Qué y Cómo? Resistencia a Flexión del Concreto, el Concreto en la Práctica”** (en línea). http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP_16_ES.pdf. (Consulta: septiembre, 2005).
- [32] NEVILLE, Adam (1988). **“Tecnología del Concreto”**. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Editorial Limusa, México.
- [33] Norma Venezolana COVENIN 221:2001: **“Materiales de Construcción. Terminología y Definiciones”**. (1era Revisión).
- [34] Norma Venezolana COVENIN 2385:2000: **“Concreto y Mortero. Agua de Mezclado. Requisitos”**.
- [35] Norma Venezolana COVENIN 255:1998: **“Agregados. Determinación de la Composición Granulométrica”**. (1era Revisión).
- [36] Norma Venezolana COVENIN 256:1977: **“Método de Ensayo para la Determinación Cualitativa de Impurezas Orgánicas en Arenas para Concreto (Ensayo Colorimétrico)”**.
- [37] Norma Venezolana COVENIN 263:1978: **“Agregados. Métodos de Ensayo para Determinar el Peso Unitario del Agregado”**.
- [38] Norma Venezolana COVENIN 338:2002: **“Concreto. Método de Elaboración, Curado y Ensayo de Probetas Cilíndricas de Concreto”**. (2da Revisión).
- [39] Norma Venezolana COVENIN 339:2003: **“Método para la Medición del Asentamiento con el Cono de Abrams”**. (2da Revisión).
- [40] Norma Venezolana COVENIN 341:1979: **“Método de Ensayo para Determinar la Resistencia a la Tracción Indirecta del Concreto Usando Probetas Cilíndricas”**.
- [41] Norma Venezolana COVENIN 349:1979: **“Método de Ensayo Gravimétrico para Determinar el Peso por Metro Cúbico, Rendimiento y Contenido de Aire en el Concreto”**.

- [42] Norma Venezolana COVENIN 354:2001: **“Concreto. Método para Mezclado en el Laboratorio”**. (1 era revisión).
- [43] PANDIT, Murad y DAS, Siddharth (1998). **“Sludge Disposal”** (en línea). <http://www.fortunecity.es/felices/andorra/51/WT%20-%20Sludge%20Disposal.htm>. (Consulta: marzo, 2005).
- [44] PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASES, J. y VELAZCO, G. (2004). **“Manual del Concreto Estructural”**. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas. Primera Edición.
- [45] Potabilización de Aguas Naturales. **“Actividad Diagnóstica”** (en línea). <http://www.uc.cl/quimica/agua/potabiliz.htm>. (Consulta: noviembre, 2005).
- [46] POVEDA VARGAS, Alvaro. **“Estructuras de Concreto I”** (en línea). <https://www.eic.ucr.ac.cr/cursos/ic080101/introduccion.pdf>. (Consulta: octubre, 2005).
- [47] REPSOL EXPLORACION PERU (2005). **“Capítulo 3. Línea Base Ambiental”** (en línea). <http://www.minem.gob.pe/archivos/dgae/publicaciones/resumen/raya/Capitulo3.pdf>. (Consulta: septiembre, 2005).
- [48] RODRÍGUEZ, L.; SIMONPIETRI, M. (2002). **“Diseños de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [49] SANCHEZ, J.; MORENO, R. (2002). **“Fabricación y Caracterización de Bloques Aligerados de Suelo – Cemento”**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [50] UGAS, Celso (1985). **“Ensayos de Laboratorio en Mecánica de Suelos. Discusión, Evaluación, Procedimiento”**. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Tercera Edición, Primera Impresión.
- [51] VACCA, Paola (2003). **“Los Ecomateriales: Una Alternativa Económica para la Construcción”** (en línea). Agencia Universitaria de Periodismo Científico y Cultural (AUPEC). Universidad de Valle. Cali, Colombia. Disponible en: <http://aupec.univalle.edu.co/informes/2003/febrero/ecomateriales.html>. (Consulta: febrero, 2005).

ANEXOS

A.5.- ANÁLISIS DEL LODO EN ESTADO NATURAL.

A.5.1.- ENSAYOS DE LABORATORIO.

A.5.1.1.- PESO ESPECÍFICO.

Peso específico del lodo.

Muestra	Pa (g)	Pb (g)	PL (g)	VL (ml)	SS
1	249,27	277,79	47,04	18,52	2,54
2	249,83	275,02	44,94	19,71	2,28
3	249,31	272,60	44,75	21,46	2,09
4	251,03	282,36	46,81	15,48	3,02
5	249,94	274,97	46,37	21,34	2,17
6	248,89	272,50	40,20	16,59	2,42
7	249,34	276,25	44,69	17,78	2,51

SS promedio	2,34
--------------------	------

A.5.1.2.- PESO UNITARIO COMPACTO.

Peso unitario compacto del lodo en estado natural.

Muestra	Peso Cilindro (g)	Peso Cilindro + Lodo (g)	Peso Lodo (g)	γ Lodo (kg/m ³)
1	390	2610	2220	1110
2	390	2590	2200	1100
3	390	2590	2200	1100
4	390	2650	2260	1130
5	390	2590	2200	1100
6	390	2570	2180	1090
7	390	2600	2210	1105

γ Lodo promedio (kg/m³)	1105
---	------

A.5.1.3.- CONTENIDO DE HUMEDAD.

Contenido de humedad del lodo en estado natural.

Cápsula	Peso Cápsula (g)	Peso Lodo Natural (g)	Peso Lodo Seco + Cápsula (g)	Peso Lodo Seco (g)	ω (%)
18	1,2053	9,5618	2,6159	1,4106	85,2
12	1,2076	9,4366	2,7988	1,5912	83,1
15	1,2049	9,4220	2,7669	1,5620	83,4
22	1,1996	8,5955	2,6550	1,4554	83,1
10	1,2048	11,2997	3,0596	1,8548	86,6
6	1,2633	13,3005	2,9296	1,6663	83,8
14	1,2051	8,2877	2,5592	1,3541	83,7

ω Promedio (%)	84,1
---	-------------

A.6.- ANÁLISIS DEL LODO CUYO CONTENIDO DE HUMEDAD FUE DISMINUIDO.**A.6.1.- ENSAYOS DE LABORATORIO.****A.6.1.1.- PESO UNITARIO COMPACTO.**

Determinación del volumen del molde.

Peso Molde (g)	Peso Molde + Vidrio (g)	Peso Molde + Vidrio+Agua (g)	Peso Agua (g)	Volumen Molde (ml)
2700	3650	6500	2850	2850

Tabla 4.6. Peso unitario compacto de los Lotes de lodo.

Lote	Peso Molde + Lodo (g)	Peso Lodo (g)	γ Lodo (kg/m ³)
1	5600	2900	1017,54
2	4900	2200	771,93
3	4700	2000	701,75

A.6.1.2.- CONTENIDO DE HUMEDAD.

Contenido de humedad.

Lote	Cápsula	Peso Cápsula (g)	Peso Muestra (g)	Peso Muestra Seca + Cápsula (g)	Peso Muestra Seca (g)	ω (%)	ω Promedio (%)
1	6	1,2633	13,6566	5,1820	3,9187	71,3	74,7
	14	1,2058	16,3297	5,2176	4,0118	75,4	
	22	1,1999	17,2829	5,1201	3,9202	77,3	
2	6	1,2633	8,5624	5,4983	4,2350	50,5	51,6
	14	1,2058	9,1205	5,6314	4,4256	51,5	
	22	1,1999	8,5614	5,2315	4,0316	52,9	
3	6	1,2633	9,2558	10,4773	9,2140	0,5	0,5
	14	1,2058	8,1149	9,2919	8,0861	0,4	
	22	1,1999	8,7465	9,8784	8,6785	0,8	

A.6.1.3.- GRANULOMETRÍA.

Granulometría por tamizado del lodo.

Número de Tamiz	Peso Cápsula (g)	Peso Retenido + Cápsula (g)	Peso Retenido (g)	Retenido (%)	Pasante (%)
10	29,439	29,439	0,000	0	100
20	29,439	29,458	0,019	0,008	99,992
40	29,439	29,454	0,015	0,007	99,985
100	29,439	29,458	0,019	0,008	99,977
200	29,439	29,492	0,053	0,023	99,953

Tabla 4.9. Ensayo del hidrómetro.

Tiempo (min)	Profundidad (cm)	Temperatura (°C)	r'	Z'=r	Zr	K	Diámetro de la partícula(mm)	% Pasante
0,5	18	25	18	18,64	13,244	0,01414	0,073	98,819
1	15	25	15	15,64	13,735	0,01414	0,052	82,914
2	13	25	13	13,64	14,062	0,01414	0,037	72,312
5	11	25	11	11,64	14,389	0,01414	0,024	61,709
10	10	25	10	10,64	14,552	0,01414	0,017	56,407
15	9	25	9	9,64	14,716	0,01414	0,014	51,106
20	9	25	9	9,64	14,716	0,01414	0,012	51,106
25	8	25	8	8,64	14,879	0,01414	0,011	45,804
30	8	25	8	8,64	14,879	0,01414	0,010	45,804
60	7	25	7	7,64	15,043	0,01414	0,007	40,503
120	6	25	6	6,64	15,206	0,01414	0,005	35,201
240	5	25	5	5,64	15,370	0,01414	0,004	29,900
1440	4	25	4	4,64	15,533	0,01414	0,001	24,599

A.6.1.4.- LÍMITES DE ATTERBERG.

A.6.1.4.1.-LÍMITE LÍQUIDO.

Límite Líquido.

# Cápsula	Número de Golpes	Peso Muestra Húmeda + Cápsula (g)	Peso Muestra Seca + Cápsula (g)	Peso Cápsula (g)
W1	15	23,289	17,052	14,388
W2	28	19,303	14,967	11,406
W3	33	13,851	12,051	10,176

# Cápsula	Peso Muestra Húmeda (g)	Peso Muestra Seca (g)	ω (%)
W1	8,901	2,664	70,071
W2	7,897	3,561	54,907
W3	3,675	1,875	48,980

Wl (%)	58,376
--------	--------

A.6.1.4.2.-LÍMITE PLÁSTICO.

Límite Plástico.

Cápsula	Peso Húmedo + Cápsula (g)	Peso seco + Cápsula (g)	Peso Cápsula (g)
16	13,190	12,498	10,519
9	21,405	20,593	18,413
W4	18,236	17,256	14,715

Cápsula	Peso húmedo (g)	Peso Seco (g)	ω (%)
16	2,671	1,979	25,908
9	2,992	2,180	27,139
W4	3,521	2,541	27,833

W_p (%)	26,960
--------------------------	--------

A.7.- ANÁLISIS DE LAS MEZCLAS DE LODO-CEMENTO.

A.7.1.- PESO UNITARIO COMPACTO Y ASENTAMIENTO.

Peso unitario compacto y asentamiento.

Mezcla	Peso Molde + Muestra (kg)	Peso Muestra (kg)	γ (kg/m ³)	T (pulgadas)
LC1	7,150	4,450	1561,40	4,0
LC2	7,450	4,750	1666,67	2,0
LCA1	7,350	4,650	1631,58	4,0
LC3	7,200	4,500	1578,95	1,0
LCA2	7,300	4,600	1614,04	2,0
LCP	7,250	4,550	1596,49	8,0
LCS	7,350	4,650	1631,58	1,5

Donde:

- ✓ LC: mezcla de lodo-cemento.
- ✓ LCA: mezcla de lodo-cemento con arena.

- ✓ LCP: mezcla de lodo-cemento con piedra.
- ✓ LCS: mezcla de lodo-cemento y suelo.

A.7.2.- PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD.

A.7.2.1.- ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.

Resistencia a la compresión de las probetas de lodo-cemento.

Cilindro	Peso (g)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	P (kgf)	Rc (kgf/cm ²)	Rc Promedio (kgf/cm ²)
LC3-1	1428	9,48	19,35	176	2,49	2,46
LC3-2	1417	9,57	19,31	174	2,42	
LC3-3	1434	9,57	19,23	178	2,47	
LC3-4	1436	9,48	19,45	184	2,61	
LC3-5	1426	9,43	19,42	161	2,31	
Cilindro	Tipo de Falla		Posible Causa de la Falla			
LC3-1	Horizontal		Falta de cohesión, desmoronamiento			
LC3-2	Horizontal					
LC3-3	Horizontal					
LC3-4	Horizontal					
LC3-5	Horizontal					

Tabla 4.18. Resistencia a la compresión de las probetas de lodo-cemento más un agregado.

Cilindro	Peso (g)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	P (Kgf)	Rc (kgf/cm ²)	Rc promedio (kgf/cm ²)
LCA2-1	2277	9,81	19,20	196,00	2,59	2,62
LCA2-2	2282	9,86	19,45	200,00	2,62	
LCA2-3	2264	9,80	19,84	189,00	2,51	
LCA2-4	2264	9,89	19,76	203,00	2,64	
LCA2-5	2294	9,91	19,91	212,00	2,75	
LCP-1	2370	9,79	19,95	100,00	1,33	1,90
LCP-2	2324	9,77	19,86	152,00	2,03	
LCP-3	2357	9,85	19,82	168,00	2,20	
LCP-4	2312	9,90	19,77	159,00	2,07	
LCP-5	2362	9,78	19,78	142,00	1,89	
LCS-1	2467	9,93	19,94	214,00	2,76	2,72
LCS-2	2452	9,89	19,9	206,00	2,68	
LCS-3	2464	9,87	19,88	203,00	2,65	
LCS-4	2478	9,79	19,74	220,00	2,92	
LCS-5	2439	9,86	19,69	198,00	2,59	

Cilindro	Tipo de Falla	Posible Causa de la Falla
LCA2-1	Horizontal	mezcla no fluida, poca cohesión contenido de humedad muy alto.
LCA2-2	Horizontal	
LCA2-3	Horizontal	
LCA2-4	Horizontal	
LCA2-5	Horizontal	
LCP-1	Horizontal	mezcla muy fluida, poca adherencia entre la pasta y la piedra, contenido de humedad muy alto.
LCP-2	Horizontal	
LCP-3	Horizontal	
LCP-4	Horizontal	
LCP-5	Horizontal	
LCS-1	Horizontal	mezcla no fluida, falta de consistencia, mucha cohesión, contenido de humedad muy alto.
LCS-2	Horizontal	
LCS-3	Horizontal	
LCS-4	Horizontal	
LCS-5	Horizontal	

A.7.2.2.- ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA.

Resistencia a la tracción indirecta de las probetas de lodo-cemento.

Cilindro	Peso (g)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	P (kgf)	σ_{br} (kgf/cm ²)	σ_{br} promedio(kgf/cm ²)
LC3-6	5723	14,38	29,28	250	0,38	0,36
LC3-7	5689	14,28	29,19	218	0,33	

Cilindro	Tipo de Falla	Posible Causa de la Falla
LC3-6	Longitudinal	Falta de consistencia, desmoronamiento
LC3-7	Longitudinal	

Resistencia a la tracción indirecta de las probetas de lodo-cemento con agregado.

Mezcla	Cilindro	Peso (g)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	P (kgf)	σ_{br} (kgf/cm ²)	σ_{br} promedio(kgf/cm ²)
LCA2	LCA2-6	8336	14,56	29,33	260	0,39	0,39
	LCA2-7	8168	14,87	29,81	268	0,38	
LCP	LCP-6	8352	14,61	29,44	168	0,25	0,25
	LCP-7	8269	14,73	29,78	179	0,26	
LCS	LCS-6	8512	14,58	29,56	288	0,43	0,41
	LCS-7	8461	14,49	29,48	271	0,40	

	Cilindro	Tipo de Falla	Posible Causa de la Falla
LCA2	LCA-6	Longitudinal	Falta de consistencia, desmoronamiento
	LCA-7	Longitudinal	
LCP	LCP-6	Longitudinal	Falta de adherencia entre la pasta y la piedra
	LCP-7	Longitudinal	
LCS	LCS-6	Longitudinal	Falta de consistencia, desmoronamiento
	LCS-7	Longitudinal	

A.7.2.3.- ENSAYO DE ABSORCIÓN.

Coefficiente de absorción.

Mezcla	Cilindro	Peso Seco (g)	Peso Húmedo (g)	Coefficiente de Absorción (%)	Promedio Ab (%)
LC1	LC1-1	80	110	39,38	42,10
	LC1-2	82	117	44,82	
LC2	LC2-1	128	146	14,77	15,01
	LC2-2	117	134	15,26	
LCA1	LCA1-1	205	222	8,71	8,45
	LCA1-2	205	221	8,20	
LC3	LC3-1	175	194	11,40	12,26
	LC3-2	192	216	13,13	
LCA2	LCA2-1	248	270	9,31	9,30
	LCA2-2	249	271	9,28	
LCP	LCP-1	268	281	5,09	5,97
	LCP-2	261	278	6,84	
LCS	LCS-1	263	274	4,39	4,75
	LCS-2	267	280	5,11	

A.7.2.4.- ENSAYO DE EROSIÓN.

Erosión.

Mezcla	Probeta	Peso Inicial(g)	Pérdida de Material (g)	Pérdida de Material (%)	Pérdida de Material Promedio (%)
LC1	LC1-1	719	61	8,48	9,42
	LC1-2	744	77	10,35	
LC2	LC2-1	833	30	3,60	4,45
	LC2-2	812	43	5,30	
LCA1	LCA1-1	1455	97	6,67	7,24
	LCA1-2	1394	109	7,82	
LC3	LC3-1	1352	61	4,51	4,09
	LC3-2	1334	49	3,67	
LCA2	LCA2-1	1568	128	8,16	8,70
	LCA2-2	1582	146	9,23	
LCP	LCP-1	1570	240	15,29	15,57
	LCP-2	1558	247	15,85	
LCS	LCS-1	1522	45	2,96	2,37
	LCS-2	1513	27	1,78	