

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES
COMPUESTOS ELABORADOS A PARTIR DE RESIDUOS INDUSTRIALES**

LUISA FERNANDA GARZÓN PÉREZ

MERCEDES MORALES ATEHORTÚA

**UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
PEREIRA**

2013

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES
COMPUESTOS ELABORADOS A PARTIR DE RESIDUOS INDUSTRIALES**

INVESTIGADOR PRINCIPAL

ING. M.SC MANUEL PINZÓN CANDELARIO

AUXILIARES DE INVESTIGACIÓN

LUISA FERNANDA GARZÓN PÉREZ

MERCEDES MORALES ATEHORTÚA

UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

PEREIRA

2013

DEDICATORIA

A mi familia y a todos los que con su amor, esfuerzo, confianza, acompañamiento y comprensión, estuvieron incondicionalmente a mi lado.

Mercedes

A mi familia gracias por la paciencia y apoyo incondicional durante el transcurso de mi vida y a todos los que de una u otra manera siempre confiaron en mi capacidad de alcanzar metas.

Luisa

AGRADECIMIENTOS

A todos los que aportaron, desde la Universidad Libre seccional Pereira, a nuestra formación como ingenieros civiles, especialmente a nuestro asesor, Magíster Manuel Pinzón Candelario y a su grupo de investigación CECEND, a todos los docentes que con su conocimiento y acompañamiento nos señalaron el camino que lleva al espacio del desempeño profesional; a ellos, infinitas gracias.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	14
1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS	17
3 MARCO TEÓRICO	18
3.1 MARCO CONCEPTUAL	20
3.2 MARCO LEGAL Y NORMATIVO	22
3.3 MARCO ESPACIAL	23
3.4 MARCO TEMPORAL	23
4 DISEÑO METODOLÓGICO	24
4.1 METODOLÓGIA	24
4.2 DISEÑO DE LAS MUESTRAS	27
4.2.1 PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS	29
4.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN	33
4.4 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA	35
5 DESARROLLO EXPERIMENTAL	37
5.1 DATOS BÁSICOS LODO PAPELERO	37
5.1.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN SOLO LODO	37
5.1.2 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA SOLO LODO	38
5.1.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN POSTERIOR AL ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA SOLO LODO	39
5.2 RESULTADOS PROPIEDADES MEZCLA YESO-LODO	40
5.2.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN MEZCLA YESO-LODO	41
5.2.2 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA MEZCLA YESO-LODO	43
5.2.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN POSTERIOR AL ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA MEZCLA YESO-LODO	46
5.3 RESULTADOS PROPIEDADES MEZCLA ARCILLA-LODO	49

5.3.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN MEZCLA ARCILLA-LODO	49
5.3.2 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA MEZCLA ARCILLA-LODO	52
5.3.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN POSTERIOR AL ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA MEZCLA ARCILLA-LODO	55
5.4 RESULTADOS PROPIEDADES MEZCLA CEMENTO-LODO	57
5.4.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN MEZCLA CEMENTO-LODO	57
5.4.2 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA MEZCLA CEMENTO-LODO	60
5.4.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN POSTERIOR AL ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA MEZCLA CEMENTO-LODO	63
6 CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS	66
6.1 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA	66
6.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ENSAYO ABSORCIÓN DE AGUA	68
6.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA POSTERIOR AL ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA	74
7 RELACIÓN BENEFICIO/COSTO	80
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
8.1 CONCLUSIONES	82
8.2 RECOMENDACIONES	83
9 BIBLIOGRAFÍA	84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Diseño de pruebas	28
Tabla 2. Ensayo de compresión para probetas de solo lodo con humedad del 55%	37
Tabla 3. Ensayo de compresión para probetas de solo lodo con humedad del 60%	37
Tabla 4. Ensayo de absorción de agua para probeta de solo lodo con humedad del 55%	38
Tabla 5. Ensayo de absorción de agua para probeta de solo lodo con humedad del 60%	39
Tabla 6. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de solo lodo con humedad del 55%	39
Tabla 7. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de solo lodo con humedad del 60%	40
Tabla 8. Ensayo de compresión para probetas de yeso-lodo con humedad del 55%	41
Tabla 9. Ensayo de compresión para probetas de yeso-lodo con humedad del 60%	42
Tabla 10. Ensayo de absorción de agua para probetas de yeso-lodo con humedad del 55%	43
Tabla 11. Ensayo de absorción de agua para probetas yeso-lodo con humedad del 60%	45
Tabla 12. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de yeso-lodo con humedad del 55%	46
Tabla 13. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de yeso-lodo con humedad del 60%	48
Tabla 14. Ensayo de compresión para probetas arcilla-lodo con humedad del	49

55%

Tabla 15. Ensayo de compresión para probetas de arcilla-lodo con humedad del 60% 50

Tabla 16. Ensayo de absorción de agua para probetas de arcilla-lodo con humedad del 55% 52

Tabla 17. Ensayo de absorción de agua para probetas de arcilla-lodo con humedad del 60% 53

Tabla 18. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de arcilla-lodo con humedad del 55% 55

Tabla 19. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de arcilla-lodo con humedad del 60% 56

Tabla 20. Ensayo de compresión para probetas de cemento-lodo con humedad del 55% 57

Tabla 21. Ensayo de compresión para probetas de probetas de cemento-lodo con humedad del 60% 59

Tabla 22. Ensayo de absorción de agua para probetas de cemento-lodo con humedad del 55% 60

Tabla 23. Ensayo de absorción de agua para probetas de cemento-lodo con humedad del 60% 62

Tabla 24. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de cemento-lodo con humedad del 55% 63

Tabla 25. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de cemento-lodo con humedad del 60% 64

Tabla 26. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión con humedad de 55% 66

Tabla 27. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión con humedad de 60% 67

Tabla 28. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 24 h con humedad de 55% 68

Tabla 29. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 5 h de ebullición con humedad de 55%	68
Tabla 30. Resultado de la variación del coeficiente de saturación con humedad de 55%	70
Tabla 31. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 24 h con humedad de 60%	71
Tabla 32. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 5 h de ebullición con humedad de 60%	72
Tabla 33. Resultado de la variación del coeficiente de saturación con humedad de 60%	73
Tabla 34. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua con humedad de 55%	74
Tabla 35. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua con humedad de 60%	76
Tabla 36. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua con humedad de 60%	80

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión con humedad de 55%	66
Gráfica 2. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión con humedad de 60%	67
Gráfica 3. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 24 h con humedad de 55%	68
Gráfica 4. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 5 h de ebullición con humedad de 55%	70
Gráfica 5. Resultado de la variación del coeficiente de saturación con humedad de 55%	71
Gráfica 6. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 24 h con humedad de 60%	72
Gráfica 7. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 5 h de ebullición con humedad de 60%	73
Gráfica 8. Resultado de la variación del coeficiente de saturación con humedad de 55%	74
Gráfica 9. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua con humedad de 55%	75
Gráfica 10. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua con humedad de 60%	76
Gráfica 11. . Análisis de los resultados de compresión con la norma NTC 4205/00	77
Gráfica 12 Análisis de los resultados de absorción de agua con la norma NTC 4205/00	78
Gráfica 13. Análisis de los resultados de compresión posterior al ensayo de	78

absorción de agua con la norma NTC 4205/00

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Carta de plasticidad para clasificación de suelos	26
Figura 2. Identificación de la probeta y la maquina incluidora	32
Figura 3. Almacenamiento de las muestras	32
Figura 4. Maquina de ensayos de compresión	33
Figura 5. Medición de la masa	34
Figura 6. Ensayo de compresión	34
Figura 7. Peso seco (masa 1)	35
Figura 8. Calentamiento de probetas	36

RESUMEN

El presente estudio se circunscribe a determinar las propiedades mecánicas de materiales compuestos elaborados a partir de residuos industriales de la industria papelera, buscando experimentar las condiciones de mezclas predeterminadas, de manera tal que, en perspectiva, se pueda lograr introducir al medio constructor un nuevo material no estructural.

La investigación consiste en ensayar probetas elaboradas a base de lodo paplero, adicionando en diferentes porcentajes yeso, cemento y arcilla; comparando los resultados obtenidos en pruebas de compresión y absorción de agua, bajo distintas condiciones de humedad y tiempo de curado de 28 días.

Palabras claves: lodo paplero, probeta, carga, mezcla, compresión.

1 INTRODUCCIÓN

En Colombia una cifra significativa de los materiales empleados en la industria papeleras son arrojados a los vertederos o sus residuos sólidos son agregados al suelo; la falta de espacio para enterrar los residuos y las restricciones en las normas ambientales hacen que este método de eliminación sea más costoso y menos deseable, además del impacto producido en el paisaje, su modificación topográfica, pérdida de suelo y afectación de las propiedades, la inestabilidad que genera en zonas de laderas cuando se deposita y en el caso de aguas subterráneas la contaminación a causa de los lixiviados, así como la contaminación atmosférica.

La utilización de residuos de fábricas de papel en los productos de construcción ha demostrado que es útil y factible; seis nuevos productos fueron desarrollados en anteriores investigaciones: softboard, MDF híbrido, la placa de cemento con lodos, baldosas, bloques de cemento de baja densidad y de madera prensada.

Los resultados de un estudio para el uso de lodos de fábricas de papel para la producción de partículas; mostraron cuatro niveles de relaciones de mezcla de pulpa de papel en partículas de madera (0:100, 15:85, 30:70 y 45:55), en donde se utilizaron porcentajes de 3% y 4% de metileno y el 10% y 12% de urea-formaldehído y se investigaron las propiedades de flexión, cortante y la absorción de agua y el espesor de las placas.¹

Es necesario desarrollar nuevas tecnologías que contribuyan a disminuir los costos de los materiales de construcción y minimizar el impacto ambiental en su uso o producción.

¹ Escuela de Ingeniería de Antioquia. [en línea] [recuperado el 25 de Marzo de 2013] Disponible en: http://www.scielo.unal.edu.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200002&lng=es&nrm=iso.

Es de gran importancia obtener materiales de construcción de resistencia estable, de durabilidad óptima y que permitan, si es del caso, aislamiento del ruido en el caso de llegar a ser un elemento separador en edificaciones; además, con el fin de mitigar impactos negativos que el desperdicio genera en la atmósfera y darle un uso más racional, no solo en el mundo medioambiental sino también en el ámbito constructivo, en lugar de enterrarlos, quemarlos o acumularlos en basureros al aire libre, se pueden aplicar procedimientos de elaboración o fabricación no contaminantes, generando soluciones a la problemática actual de los desechos residuales de las fábricas productoras de papel.

Durante el desarrollo investigativo en el que se ha venido avanzando, en evaluar las propiedades mecánicas del lodo papelerero, se encuentra que procesos como ensayos de compresión y absorción de agua han sido de gran utilidad en el diseño de nuevos materiales en el mundo constructivo. Como es sabido, la industria de la construcción se ha apoyado en el material base como una nueva alternativa para desarrollar investigaciones sobre la mejora que se presenta en las propiedades mecánicas y físicas, que entre otras, son los principales motivos de estudio para estas áreas.

El estudio busca informar los efectos que sufre el suelo implementando un uso del residuo industrial papelerero para así disminuir la afectación y sus repercusiones por el depósito inadecuado del lodo papelerero en el ambiente; además, dejar precedentes de investigación en la universidad Libre Pereira de las propiedades mecánicas de residuos de la industria del papel complementado con materiales (yeso, cemento y arcilla), caracterizando las propiedades mecánicas de estos elementos e indicando el menor costo frente a los sistemas o alternativas tradicionales, en el entendido que para lograr una construcción sostenible es necesario romper con los malos hábitos adquiridos y aplicar criterios que permitan reducción de su impacto ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Evaluar las propiedades mecánicas de las probetas realizadas a base de residuos industriales con diferentes mezclas de cemento, yeso y arcilla.

2.2 Objetivos específicos

- Elaborar probetas a base de residuos industriales con diferentes mezclas de cemento, yeso y arcilla.
- Determinar las propiedades mecánicas de compresión y absorción de agua de las diferentes mezclas elaboradas.
- Analizar la relación costo - beneficio con base en la caracterización.

3 MARCO TEÓRICO

El estudio de las propiedades de los materiales es de gran importancia para determinar las propiedades físicas y mecánicas; de manera general. “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”².

- **Ensayos**

De particular interés, para el presente proyecto, es lo relacionado con los tipos de ensayos en el material propuesto para determinar su comportamiento; la relación entre varios procedimientos de ensayo puede evidenciarse con la manera en que la carga es inducida, con la condición del material o probeta misma en el momento del ensayo y con la condición de los alrededores (condición ambiente) durante el progreso del ensayo, como en los estudios de exposición atmosférica.

Expertos de la sede de la Universidad Nacional Sede Palmira señalan al respecto que el método de aplicación de la carga es la base más común para designar o clasificar los ensayos mecánicos.

“Hay tres factores involucrados en la definición de la manera en que la carga es aplicada: la clase de esfuerzo inducido, la velocidad a la cual la carga se aplica y el número de veces que la carga es aplicada.

² Determinación de las características mecánicas del metal depositado. [en línea] [recuperado el 19 de julio de 2013] disponible en: https://docs.google.com/document/edit?id=1jmc5szfnhdno19g3_uze4ksin1ldobp7jwgb8kz0mxe&hl=es&pli=1

En el ensayo mecánico de probetas preparadas hay cinco tipos primarios de cargas; según lo dictado por la condición de esfuerzo a inducir: tensión, compresión, corte directo, torsión y flexión.

Con respecto al ritmo según el cual se aplica, los ensayos pueden clasificarse en tres grupos. Si la carga es aplicada durante un periodo de tiempo relativamente corto, pero con lentitud suficiente para que pueda considerarse que la rapidez del ensayo tenga un efecto prácticamente despreciable sobre los resultados, el ensayo se denomina estático. Si la carga es aplicada muy rápidamente de modo que el efecto de la inercia y el factor tiempo queden involucrados, los ensayos se llaman dinámicos. Si la carga es sostenida durante un largo periodo, el ensayo se denomina de larga duración, donde los ensayos de creep constituyen un caso especial.

Con respecto al número de veces que la carga es aplicada, los ensayos pueden clasificarse en dos grupos: en el primer grupo, el cual incluye el mayor número de ensayos realizado, una sola aplicación de carga constituye el ensayo. En el segundo grupo, la carga se repite muchas veces, millones si es necesario”³.

- **Pasta de papel**

La estructura básica es un entramado de fibras de celulosa unidas mediante enlaces de hidrógeno. Una vez separadas del resto de componentes no celulósicos, mediante el proceso de elaboración de la pasta de papel, estas fibras tienen alta resistencia a la tracción, absorben los aditivos empleados para transformar la pasta en papel y cartón, y son flexibles, químicamente estables y blancas. Esos componentes no celulósicos son, en el caso de la madera,

³ Resistencia de materiales. Introducción al comportamiento mecánico de los materiales. [en línea] [recuperado el 27 de enero de 2013] Disponible en: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000155/lecciones/lec2/2_4.htm#

principalmente hemicelulosas (con 15 a 90 unidades iguales de sacarosa), ligninas (altamente polimerizadas y complejas, fundamentalmente monómeros de fenilpropano; actúan como aglutinante de las fibras), extractos (grasas, ceras, alcoholes, fenoles, ácidos aromáticos, aceites esenciales, oleorresinas, esteroides, alcaloides y pigmentos colorantes), y minerales y otros compuestos inorgánicos.⁴

3.1 MARCO CONCEPTUAL

Se esclarecen los conceptos que le dan contexto a la investigación y que aportan para su ejecución.

En cuanto a lo referente a materiales, se tiene:

- Lodo papelerero: Material formado por aproximadamente un 30% de celulosa, de origen vegetal altamente poroso, y sustancias de relleno, como el caolín y la calcita, más un pequeño resto de compuestos orgánicos y metales pesados (que le da el color y que lo inutiliza para la fabricación del papel prensa). Este lodo destintado es un material hidrófilo, contiene un 40% de agua, siendo este un material para desechar por su hoja tan corta y sus fibras no se prestan para procesarlas.
- Arcilla CH: Clasificación del suelo utilizado en el proyecto; material de grano fino con al menos un 50% en contenido de limos, de característica moldeable al ser combinado con agua.
- Yeso: Mineral blando, compuesto de sulfato cálcico cristalizado con dos moléculas de agua y generalmente de color blanco, teniendo la propiedad que

⁴ Industria del papel y de la pasta de papel. En: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/Textos Online/ Enciclopedia OIT/tomo3/72.pdf>

mezclado con agua es aglomerante formando una pasta que endurece rápido usándose en la construcción para revestimientos interiores.

- Cemento tipo I: Material formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas en un proceso de actividad industrial, que tiene la propiedad de endurecer al contacto con el agua además de utilizar como adherente en la construcción y de uso general por ello su tipología I.

Referente a las propiedades, se consideran:

- Elasticidad: propiedad de la cual un cuerpo se deforma de manera proporcional a la carga aplicada y recupera su forma original una vez ha cesado la acción de la carga, ósea no experimenta deformaciones permanentes, recuperando su forma inicial.
- Plasticidad: aptitud de algunos materiales sólidos de adquirir deformaciones permanentes óseas irreversibles la forma no se recupera, bajo la acción de una presión o fuerza exterior pero sin que se produzca rotura.

Las anteriores propiedades mecánicas se valoran con exactitud mediante ensayos mecánicos:

- Prueba de compresión simple: consiste en someter una probeta a la capacidad de soportar la mayor cantidad de carga posible en kilogramos por unidad de centímetro cuadrado, para así determinar la carga soportada y la deformación presentada, propiedades decisivas para determinar la calidad de las probetas con los materiales mezclados.
- Absorción de agua: este ensayo es el incremento en la masa de un material seco, cuando es sumergido en agua durante un tiempo determinado a temperatura ambiente; este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas, el ensayo se realiza de la siguiente manera.

3.2 MARCO LEGAL Y NORMATIVO

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) es el organismo nacional de normalización de Colombia, encargado de crear las normas técnicas y la certificación de actividades profesionales; en caso tal de cumplir con los comportamientos mecánicos de las muestras, se sugiere basarse en estas normas.⁵

- NTC 2446 (1988/10/19) Ingeniería civil y arquitectura. Paneles prefabricados. Clasificación y requisitos. Esta norma tiene por objeto establecer la clasificación de los requisitos físicos y mecánicos que deben cumplir los paneles prefabricados.
- NTC 5069 (2002/07/17) Paneles prefabricados de fibrocemento. Ensayo de compresión. Establece el método de ensayo para comprobar la resistencia a la compresión de los paneles prefabricados de fibrocemento.
- NTC 5123 (2002/10/30) Paneles prefabricados de fibrocemento. Ensayo de carga concentrada. Establece el método de ensayo para comprobar la resistencia a la penetración de los paneles prefabricados de fibrocemento.
- NTC 1085 (1976/03/10) Esta norma establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben someterse las baldosas de cemento, destinadas principalmente al recubrimiento de pisos.
- NTC 3829 (2004/07/28) Esta norma se refiere a adoquines (ladrillos) utilizados como material para adoquinado (pavimento articulados), destinados a soportar tránsito peatonal y vehicular liviano.

⁵ En: Instituto Colombiano de Normas Técnicas. [en línea] [recuperado el 27 de septiembre de 2012] Disponible en: www.icontec.org.co

- NTC 4205 (2000/10/25) Unidades de mampostería de arcilla cocida- Ladrillos y bloques cerámicos
- NTC 1486 (2008/07/23) presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación.

3.3 MARCO ESPACIAL

La investigación se circunscribe al lugar donde desarrolla su actividad la empresa papelera y el laboratorio donde se llevan a cabo los ensayos; es aquí donde se obtienen los datos y la información necesaria y pertinente para los estudios propuestos.

3.4 MARCO TEMPORAL

Los datos, la información, los cálculos, los resultados obtenidos y el análisis para los diferentes ensayos en las muestras propuestas, corresponden al segundo semestre de 2012 y pueden continuar siendo válidos siempre que continúen las composiciones de los materiales estudiados.

4 DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 METODOLÓGIA

En este capítulo se explican todos los detalles sobre el proceso de fabricación de las probetas de lodo papelerero en función con sus porcentajes en pesos de materiales como arcilla, yeso y cemento y su comportamiento al someterlos a ensayos de compresión y de absorción de agua después de 28 días de curado para así determinar sus propiedades mecánicas, no antes conocer sus propiedades mecánicas básicas siendo estas su humedad natural.

- **Humedad natural**

La humedad natural es la relación que existente entre el peso del agua y el peso de los sólidos en un volumen dado de suelo. Esta humedad se calcula con la siguiente formula.⁶

$$W = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}} \times 100 \quad (1)$$

$$W = \frac{25,7 \text{ gr} - 12,6 \text{ gr}}{25,7} \times 100$$

$$W = 50,9 \%$$

- **Masa unitaria húmeda⁷**

$$\gamma_h = \frac{\text{Peso húmedo}}{\text{Volumen}} \quad (2)$$

⁶ Relaciones volumétricas y gravimétricas. [recuperado el 27 de Abril de 2013] Disponible en: <http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/t%20p%201%20relac%20vol%20y%20grav%20resuelto%20008.pdf>

⁷

$$\gamma_h = \frac{138,7 \text{ gr}}{119,67 \text{ cm}^3}$$

$$\gamma_h = 1,15 \text{ gr/ cm}^3$$

- **Masa unitaria seca**

Consiste en determinar la masa unitaria seca máxima que puede alcanzar el material que se compacta la con energía de compactación.⁸

$$\gamma_d = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Volumen}} \quad (3)$$

$$\gamma_d = \frac{54,9 \text{ gr}}{119,67 \text{ cm}^3}$$

$$\gamma_d = 0,45 \text{ gr/ cm}^3$$

- **Gravedad especifica**

Es la relación entre la masa de un cierto volumen de solido a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas, a la misma temperatura.⁹

$$G_s = \frac{W_s \times K}{W_s + W_a - W_b} \quad (4)$$

$$G_s = \frac{17,5 \text{ gr} \times 0,9858}{17,5 \text{ gr} + 329,9 \text{ gr} - 338,7 \text{ gr}}$$

⁸

⁹ Relaciones volumétricas y gravimétricas. [recuperado el 27 de Abril de 2013] Disponible en: <http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/T%20P%201%20Relac%20Vol%20y%20Grav%20resuelto%202008.pdf>

$$G_s = 1,9829$$

Donde:

Ws: Peso seco

K: constante

Wa: Peso picnometro + agua

Wb: Peso picnometro + agua + lodo

- **Clasificación del suelo**

Se utiliza el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para la clasificación del suelo utilizado para la elaboración de muestras el cual clasifica de una manera cualitativa de los suelos con fines ingenieriles, a partir de ensayos de laboratorio que determinan sus propiedades granulométricas y de plasticidad. Dicho sistema no clasifica cuantitativamente a los suelos, razón por la cual, no debe ser utilizado para la determinación de propiedades ingenieriles como su resistencia al corte, ni para la estimación del comportamiento carga vs. deformación del suelo¹⁰

Limite Liquido (LL)

$$LL = 50$$

Índice Plástico (IP)

$$IP = 0,73 \times (LL - 20) \quad (5)$$

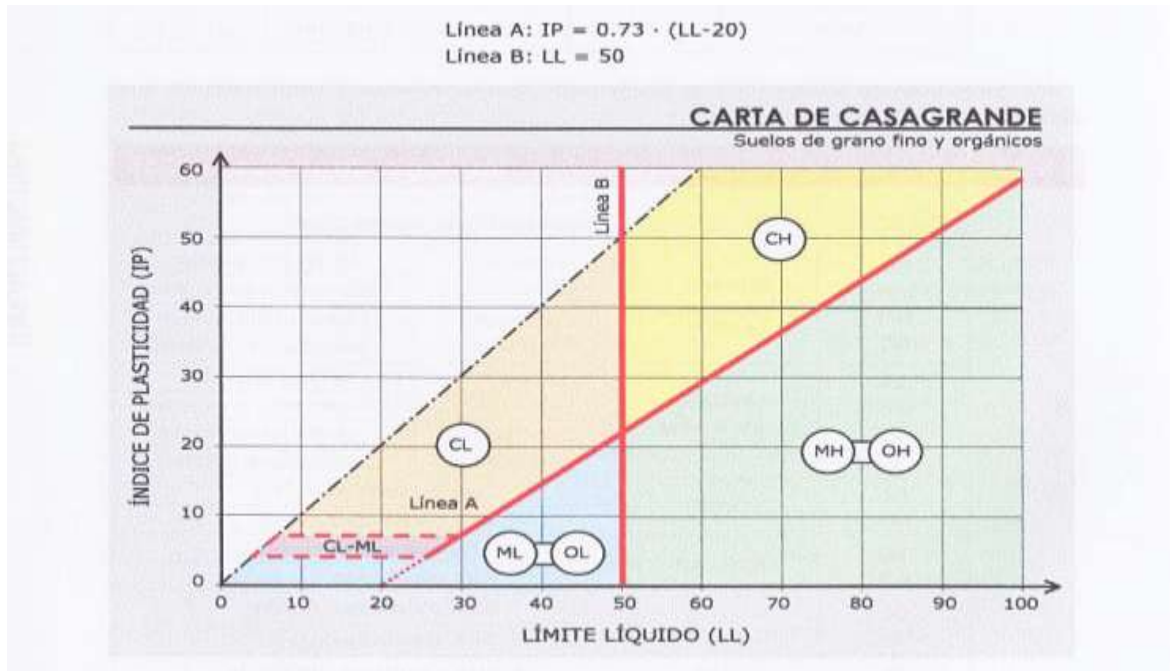
$$IP = 0,73 \times (50 - 20)$$

$$IP = 21.9$$

En base a lo anterior, los suelos quedarán clasificados bajo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos de acuerdo con la figura 1

Figura 1. Carta de plasticidad para clasificación de suelos

¹⁰ Descripción de suelos y rocas. [recuperado el 27 de Abril de 2013] Disponible en: <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/401/reglamento/reglamentocap8.pdf>



ARCILLA CH

ALTA PLASTICIDAD $LL > 50$

C: Arcilla H: Alta plasticidad

CH: Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas limosas se encuentra sobre la línea A y sobre línea B con $LL = 50$

4.2 DISEÑO DE LAS MUESTRAS

Como se observa en la tabla 1 se consideró realizar tres probetas por cada composición para asegurar la confiabilidad de los resultados. Se decidió aumentar diferentes porcentajes de humedad para ver su variación. Se utilizaron tres materiales de refuerzo: yeso, cemento y arcilla. En total se realizaron 54 series para ensayos de compresión y 54 series para ensayos de absorción de agua, para un total de 108 probetas.

Tabla 1. Diseño de pruebas

MATERIAL ADICIONAL	PORCENTAJE	HUMEDAD	PRUEBAS	
			COMPRESION	ABSORCION DE AGUA
YESO	1 11,08%	1 55%	1	1
			2	2
			3	3
		2 60%	1	1
			2	2
			3	3
	2 25%	1 55%	1	1
			2	2
			3	3
		2 60%	1	1
			2	2
			3	3
3 42,85%	1 55%	1	1	
		2	2	
		3	3	
	2 60%	1	1	
		2	2	
		3	3	
CEMENTO	1 11,08%	1 55%	1	1
			2	2
			3	3
		2 60%	1	1
			2	2
			3	3
	2 25%	1 55%	1	1
			2	2
			3	3
		2 60%	1	1
			2	2
			3	3
3 42,85%	1 55%	1	1	
		2	2	
		3	3	
	2 60%	1	1	
		2	2	
		3	3	

Tabla 1. (Continuación)

ARCILLA	1 11,08%	1 55%	1	1
			2	2
			3	3
		2 60%	1	1
			2	2
			3	3
	2 25%	1 55%	1	1
			2	2
			3	3
		2 60%	1	1
			2	2
			3	3
3 42,85%	1 55%	1	1	
		2	2	
		3	3	
	2 60%	1	1	
		2	2	
		3	3	
			54	54
TOTAL PRUEBAS			108	108

Fuente: Elaboración propia

El diseño permite disminuir el error de los ensayos y elevar el porcentaje de replicabilidad en el laboratorio.

4.2.1 Preparación de las mezclas

Inicialmente se asignó al lodo paplero una humedad adicional de 55% y 60% debido a que en el momento de realizar las mezclas las partículas no se agrupaban, por lo cual se procedió a aumentar la humedad natural del material base utilizando regla de tres simple.

Peso total de la probeta solo lodo 120 gr

$M_1 = 60$ gr de solo lodo

$M_2 = 60$ gr de agua

- **Humedad de 55%**

$$\begin{array}{lcl} 60 \text{ gr agua} & \longrightarrow & 50\% \\ X & \longrightarrow & 55\% \end{array}$$

$$X = \frac{60 \text{ gr} \times 55\%}{50\%}$$

$$X = 66 \text{ gr}$$

$$X = 66 \text{ gr} - 60 \text{ gr}$$

$$X = 6 \text{ gr de agua}$$

- **Humedad de 60%**

$$\begin{array}{lcl} 60 \text{ gr agua} & \longrightarrow & 50\% \\ X & \longrightarrow & 60\% \end{array}$$

$$X = \frac{60 \text{ gr} \times 60\%}{50\%}$$

$$X = 72 \text{ gr}$$

$$X = 72 \text{ gr} - 60 \text{ gr}$$

$$X = 12 \text{ gr de agua}$$

Después de proponer sus porcentajes de material adicional y humedades como lo indica la tabla 1, se asignaron proporciones reales de material adicional (yeso cemento y arcilla) del 11,08%, 25% y 42,85% para probetas con humedad del 55% y del 60%, los cuales se calcularon de la siguiente manera.

- **Determinación del porcentaje del material adicional en una probeta para el 11,08%**

120 gr de lodo	→	100%
13,3 gr	→	X

$$X = \frac{13,3 \text{ gr} \times 100\%}{120 \text{ gr}}$$

X= 11,08 %

- **Determinación del porcentaje del material adicional en una probeta para el 25%**

120 gr de lodo	→	100%
30 gr	→	X

$$X = \frac{30 \text{ gr} \times 100\%}{120 \text{ gr}}$$

X= 25 %

- **Determinación del peso del material adicional en una probeta para el 42,85%**

120 gr de lodo	→	100%
51,42 gr	→	X

$$X = \frac{51,42 \text{ gr} \times 100\%}{120 \text{ gr}}$$

X= 42,85 %

Teniendo estos puntos analizados y definidos, se determinaron las dimensiones de las muestras, siendo necesario la elaboración de ellas con su correspondiente porcentaje de material indicado anteriormente. Se agregó el material en la máquina incluidora para la conformación de la probeta mediante compactación.

Figura 2. Identificación de la probeta y la máquina incluidora



Fuente: Los autores

- **Almacenamiento de las muestras en el proceso de curado de 28 días**

A continuación se cubrieron las muestras con cartón protegiéndolas del sol directo para no acelerar su curado y asegurar que se mantuvieran a una temperatura ambiente entre 15°C y 25°C, para garantizar el tiempo de curado.

Figura 3. Almacenamiento de las muestras



Fuente: Los autores

4.3 ENSAYO DE COMPRESION

Después del tiempo de curado de 28 días se procedió a realizar el ensayo de compresión, el cual que consiste en someter una probeta a una carga de compresión hasta lograr su rotura. Se utiliza para conocer la resistencia de un material a la carga de compresión; en esta prueba se determina el esfuerzo que el material puede soportar en unidades de fuerza sobre área. Para realizar este ensayo se contó con la máquina de compresión digital.

Figura 4. Máquina de ensayos de compresión



Fuente: Los autores

El esfuerzo que puede soportar la probeta se calcula mediante la formula¹¹

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Dónde:

σ = Esfuerzo o resistencia a la compresión (o Kgf/cm²)

F = Carga máxima de rotura en (Kgf)

A = Promedio área brutas de las superficies superior e inferior del espécimen en cm²

¹¹Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos para mampostería. [recuperado el 7 de Abril de 2013] Disponible en:
http://www.umng.edu.co/documents/10162/1073246/Articulo_3.pdf

Inicialmente se tomó la masa de las muestras secas mediante una balanza, la medición del diámetro y la altura se realizó por medio de un pie de rey o calibrador.

Figura 5. Medición de la masa



Fuente: Los autores

Después se procedió a realizar el ensayo de compresión en la máquina digital, hasta lograr su rotura.

Figura 6. Ensayo de compresión



Fuente: Toma propia

Se utilizaron conocimientos teórico-prácticos, para plantear hipótesis demostrables en el laboratorio, por lo que es una investigación formativa y aplicada. Los ensayos se realizaron con el fin de conocer y describir, cualitativa y cuantitativamente, el comportamiento de cada muestra para así determinar el

mejor rendimiento del residuo industrial con su mejor adición de material siendo esta una variable dentro del estudio, serán objeto de la evaluación para encontrar resultados referentes a sus propiedades mecánicas.

4.4 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA

Una vez secas las muestras por el cumplimiento de su proceso de curado de 28 días, en el laboratorio se realizó los ensayos presupuestados de absorción de agua en probetas mezclas de yeso-lodo, cemento-lodo, arcilla-lodo y solo lodo, las primeras con porcentajes adicionales de lodo papelerero y con humedades del 55% y 60%, determinándose cuantitativamente la ebullición y el coeficiente de saturación para tres cambios de la masa en el tiempo.

Inicialmente se determinó la masa seca de la muestra (masa 1)

Figura 7. Peso seco (masa 1)



Fuente: Los autores

Se sumergieron las muestras secas en agua por un tiempo de 24 horas, en un proceso a temperatura ambiente del agua.

A continuación, se sacaron las muestras del agua y se determinó el peso de la muestra (masa 2).

Se calentó el agua de tal manera que, alcanzara el punto de ebullición en un tiempo de una hora.

Figura 8. Calentamiento de probetas



Fuente: Los autores

Luego se dejaron hervir por un periodo de 5 horas, al cabo de las cuales se dejaron enfriar por pérdida natural de calor, por un periodo no menor de 16 ni mayor a 18 horas. Se sacaron las muestras del agua y se determinaron los pesos de las muestras (masa 3). Para determinar el coeficiente de absorción se aplica las siguientes formulas:¹²

$$\% \text{ de absorción luego de 24 h} = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100 \quad (7)$$

$$\% \text{ de absorción luego de 5 h de ebullición} = \frac{(m_3 - m_1)}{m_1} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{Coeficiente de saturación} = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_3 - m_1)} \quad (9)$$

¹² Laboratorios de hormigones. [en línea] [recuperado el 7 de Abril de 2013] Disponible en: <http://laboratoriosdehormigones.blogspot.com/2010/06/absorcion-de-ladrillos-compresion-de.html>

5 DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1 DATOS BÁSICOS LODO PAPELERO

Determinado el número de ensayos, el porcentaje de las mezclas y la humedad, se realizaron las pruebas sobre las probetas, determinándose la compresión por carga y el esfuerzo en unidades de pascal, así como la absorción de agua y el correspondiente coeficiente de saturación.

5.1.1 Ensayo de compresión solo lodo

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de solo lodo con una humedad del 55%. El promedio de esfuerzo fue 65,76 Kg/cm².

Tabla 2. Ensayo de compresión para probetas de solo lodo con humedad del 55%

ENSAYO DE COMPRESION PROBETAS SOLO LODO CON HUMEDAD DE 55%								
Número	Peso solo lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	109,65	6,99	3,98	12,44	8,74	890,93	71,61	7,03
2	108,90	7,16	4,08	13,07	7,99	814,48	62,30	6,11
3	108,71	6,90	4,17	13,66	8,49	865,44	63,37	6,22
PROMEDIO TOTAL PARA PROBETAS SOLO LODO CON HUMEDAD DE 55%							65,76	6,45

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de solo lodo con una humedad del 60%. El promedio de esfuerzo fue 72,30 Kg/cm².

Tabla 3. Ensayo de compresión para probetas de solo lodo con humedad del 60%

ENSAYO DE COMPRESION PROBETAS SOLO LODO CON HUMEDAD DE 60%								
Número	Peso solo lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	110,11	7,38	4,13	13,40	9,3	948,01	70,77	6,94
2	109,40	7,28	4,13	13,40	9,59	977,57	72,97	7,16
3	110,29	7,41	4,12	13,33	9,57	975,54	73,17	7,18
PROMEDIO TOTAL PARA PROBETAS SOLO LODO CON HUMEDAD DE 60%							72,30	7,09

5.1.2 Ensayo de absorción de agua solo lodo

Se presenta a continuación la tabla de probetas de solo lodo con humedad del 55%. El promedio de absorción luego de 24 horas es 42,42%, el porcentaje de absorción luego de 5 horas de ebullición fue 54,55% y el coeficiente de saturación menor fue 0,78.

Tabla 4. Ensayo de absorción de agua para probeta de solo lodo con humedad del 55%

Número	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)	
1	110	160	170	
2	110	155	170	
3	110	155	170	
Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1	Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
45,45		54,55	0,833	
40,91		54,55	0,750	
40,91		54,55	0,750	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coeficiente de saturación
Promedio para probeta de solo lodo con humedad de 55%		42,42	54,55	0,78

Se presenta a continuación la tabla de probetas de solo lodo con humedad del 55%. El promedio de absorción luego de 24 horas es 42,42%, el porcentaje de absorción luego de 5 horas de ebullición fue 51,52% y el coeficiente de saturación menor fue 0,83.

Tabla 5. Ensayo de absorción de agua para probeta de solo lodo con humedad del 60%

Número	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
1	110	160	165
2	110	155	170
3	110	155	165
Porcentaje de absorción luego de 24 h $(m2-m1)/m1$		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición $(m3-m1)/m1$	Coeficiente de saturación $(m2-m1)/(m3-m1)$
45,45		50,00	0,91
40,91		54,55	0,75
40,91		50,00	0,82
		Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición
Promedio para probeta de solo lodo con humedad de 60%		42,42	51,52
			Coeficiente de saturación
			0,83

5.1.3 Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua solo lodo

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de solo lodo con una humedad del 55%. El mayor esfuerzo fue 50,43 Kg/cm².

Tabla 6. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de solo lodo con humedad del 55%

ENSAYO DE COMPRESION PROBETAS SOLO LODO CON HUMEDAD DE 55%								
Número	Peso solo lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm²)	Esfuerzo (MPa)
1	110,56	7,06	4,03	12,76	7,26	740,06	58,02	5,69
2	108,89	6,97	3,98	12,44	6,39	651,38	52,36	5,14
3	111,3	7,04	4,07	13,01	5,22	532,11	40,90	4,01
PROMEDIO TOTAL PARA PROBETAS SOLO LODO CON HUMEDAD DE 55%							50,43	4,95

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de solo lodo con una humedad del 60%. El promedio de esfuerzo fue 52,65 Kg/cm².

Tabla 7. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de solo lodo con humedad del 60%

ENSAYO DE COMPRESION PROBETAS SOLO LODO CON HUMEDAD DE 60%								
Número	Peso solo lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm²)	Esfuerzo (MPa)
1	110,6	7,52	4,16	13,59	7,1	723,75	53,25	5,22
2	110,56	7,41	4,24	14,12	7,28	742,10	52,56	5,16
3	110,28	7,47	4,18	13,72	7,02	715,60	52,15	5,12
PROMEDIO TOTAL PARA PROBETAS SOLO LODO CON HUMEDAD DE 60%							52,65	5,17

5.2 RESULTADOS PROPIEDADES MEZCLA YESO-LODO

En el laboratorio se realizaron los ensayos de compresión y absorción de agua en probetas de lodo paplero con humedades del 55% y 60%, con porcentajes adicionales de yeso, bajo parámetros y variables especificadas, determinándose cuantitativamente el esfuerzo sobre el área expuesta.

5.2.1 Ensayo de compresión mezcla yeso-lodo

Se presenta a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de yeso-lodo con una humedad del 55%. Los valores más altos de esfuerzo fueron 35,50 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de yeso de 11,08%.

Tabla 8. Ensayo de compresión para probetas de yeso-lodo con humedad del 55%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso lodo-yeso (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	110,46	8,097	4,49
	2	120	13,3	111,07	8,296	4,28
	3	120	13,3	109,98	8,118	4,41
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	15,83	3,27	333,333	21,05	2,07	
	14,39	5,01	510,703	35,50	3,48	
	15,28	4,76	485,219	31,77	3,12	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%				33,63	3,30	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso lodo-yeso (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	129,92	8,94	4,72
	5	120	30	131,00	9,26	4,78
	6	120	30	129,6	8,98	4,68
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25,0%	17,50	2,4	244,648	13,98	1,37	
	17,95	2,6	265,036	14,77	1,45	
	17,20	2,3	234,455	13,63	1,36	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%				14,127	1,39	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso lodo-yeso (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	155,06	9,56	4,86
	8	120	51,42	154,78	9,71	4,89
	9	120	51,42	154,62	9,951	4,89

Tabla 8. (continuación)

Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
42,85%	18,55	2,79	284,404	15,33	1,50
	18,78	2,87	292,559	15,58	1,53
	18,78	2,92	297,655	15,85	1,58
			$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%			15,586	1,54	

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de yeso-lodo con una humedad del 60%. Los valores más altos de esfuerzo fueron 67,83 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de yeso de 11,08%.

Tabla 9. Ensayo de compresión para probetas de yeso-lodo con humedad del 60%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso lodo-yeso (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	118,24	7,2	4,143
	2	120	13,3	119,67	7,9	4,169
	3	120	13,3	119,91	7,9	4,118
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	13,48	8,97	914,373	67,83	6,65	
	13,65	7,65	779,817	57,13	5,60	
	13,32	5,84	595,311	44,70	4,38	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%				56,55	5,5	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso lodo-yeso (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	138,98	9,05	4,915
	5	120	30	141,52	9,21	4,86
	6	120	30	141,15	9,106	4,82

Tabla 9. (Continuación)

Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25,%	18,97	3,59	365,953	19,29	1,89	
	18,55	1,79	182,467	9,84	0,96	
	18,25	3,36	342,508	18,77	1,84	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%				19,02	1,86	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso lodo-yeso (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	162,20	9,78	4,95
	8	120	51,42	165,85	9,80	5,08
	9	120	51,42	165,85	9,93	4,95
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
42,85%	19,21	4,35	443,425	23,09	2,26	
	20,23	3,99	406,728	20,11	1,97	
	19,21	4,21	429,154	22,35	2,19	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%				15,58	1,54	

5.2.2 Ensayo de absorción de agua mezcla yeso-lodo

Se presenta a continuación la tabla de ensayo de absorción de agua para probetas de yeso-lodo con humedad del 55%, las probetas que muestran mejor resultados son las que tienen un porcentaje adicional de yeso de 42,85%

Tabla 10. Ensayo de absorción de agua para probetas de yeso-lodo con humedad del 55%.

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
11,08%	1	120	13,30	110	180	190
	2	120	13,30	110	175	185
	3	120	13,30	110	175	185

Tabla 10. (Continuación)

Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
11,08%	63,64		72,73		0,87	
	59,09		68,18		0,86	
	59,09		68,18		0,86	
			Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coeficiente de saturación	
Promedio para porcentaje adicional de 11,08%			60,61	69,70	0,87	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
25%	4	120	30	130	215	230
	5	120	30	130	220	235
	6	120	30	130	230	240
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
25%	65,38		76,92		0,850	
	69,23		80,77		0,857	
	76,92		84,62		0,909	
			Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coeficiente de saturación	
Promedio para porcentaje adicional de 25%			70,51	80,77	0,87	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
42,85%	7	120	51,42	155	240	260
	8	120	51,42	155	245	260
	9	120	51,42	150	245	265
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
42,85%	54,84		67,74		0,810	
	58,06		67,74		0,857	
	63,33		76,67		0,826	
			Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coeficiente de saturación	
Promedio para porcentaje adicional de 42,85%			58,75	70,72	0,83	

Tabla 10. (Continuación)

	Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coefficiente de saturación
Promedio total para probeta de yeso-lodo con humedad 55%	63,29	73,73	0,86

Se presenta a continuación la tabla de ensayo de absorción de agua para probetas de yeso-lodo con humedad del 60%, las probetas que muestran mejor resultados son las que tienen un porcentaje adicional de yeso de 11,08%.

Tabla 11. Ensayo de absorción de agua para probetas yeso-lodo con humedad del 60%.

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
11,08%	1	120	13,30	110	170	190
	2	120	13,30	120	185	200
	3	120	13,30	120	185	195
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h $(m2-m1)/m1$		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición $(m3-m1)/m1$		Coefficiente de saturación $(m2-m1)/(m3-m1)$	
11,08%	54,55		72,73		0,750	
	54,17		66,67		0,813	
	54,17		62,50		0,867	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coefficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 11,08%		54,29		67,30		0,810
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
25%	4	120	30	140	225	245
	5	120	30	140	220	235
	6	120	30	140	225	245
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h $(m2-m1)/m1$		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición $(m3-m1)/m1$		Coefficiente de saturación $(m2-m1)/(m3-m1)$	
25%	60,71		75,00		0,810	
	57,14		67,86		0,842	
	60,71		75,00		0,810	

Tabla 11. (Continuación)

		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coefficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 25%		59,52		72,62		0,82
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
42,85%	7	120	51,42	165	255	275
	8	120	51,42	165	260	275
	9	120	51,42	165	255	275
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coefficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
42,85%	54,55		66,67		0,81	
	57,58		66,67		0,86	
	54,55		66,67		0,81	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coefficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 42,85%		55,56		66,67		0,83
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coefficiente de saturación
Promedio total para probeta de yeso-lodo con humedad 60%		56,46		68,86		0,82

5.2.3 Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua mezcla yeso-lodo

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de yeso-lodo con una humedad del 55%. Los valores más altos de esfuerzo fueron 45,60 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de yeso de 11,08%.

Tabla 12. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de yeso-lodo con humedad del 55%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso yeso-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	106,59	8,18	4,23
	2	120	13,3	106,84	7,9	4,28
	3	120	13,3	106,22	8,11	4,01
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	14,05	4,04	411,82	29,30	2,87	
	14,39	4,99	508,66	35,36	3,47	
	12,63	5,65	575,94	45,60	4,47	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%				36,75	3,61	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso yeso-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	127,09	9,21	4,73
	5	120	30	127,42	9,12	4,72
	6	120	30	126,82	9,36	4,84
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25%	17,57	3,02	307,85	17,52	1,72	
	17,50	2,62	267,07	15,26	1,50	
	18,40	1,57	160,04	8,70	0,85	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%				13,83	1,36	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso yeso-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	151,68	9,47	4,79
	8	120	51,42	144,82	9,63	4,87
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
42,85%	18,02	1,91	194,70	10,80	1,06	
	18,63	2,6	265,04	14,23	1,40	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%				12,52	1,23	

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de yeso-lodo con una humedad del 60%. Los valores más altos de esfuerzo fueron 28,21 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de yeso de 11,08%.

Tabla 13. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de yeso-lodo con humedad del 60%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso yeso-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	106,77	8,18	4,13
	2	120	13,3	115,53	8,54	4,33
	3	120	13,3	120	8,12	4,29
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	13,48	2,61	266,06	19,74	1,94	
	14,73	3,11	317,02	21,53	2,11	
	14,45	4,0	407,75	28,21	2,77	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%				23,16	2,27	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso yeso-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	139,44	9,48	4,72
	5	120	30	139,62	9,4	4,57
	6	120	30	139,59	9,25	4,75
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25%	17,50	1,53	155,96	8,91	0,87	
	16,40	2,85	290,52	17,71	1,74	
	17,72	2,4	244,65	13,81	1,35	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%				13,48	1,32	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso yeso-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	163,98	10	4,86
	8	120	51,42	161,81	10,03	4,91
	9	120	51,42	161,82	10	4,92

Tabla 13. (Continuación)

Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
42,85%	18,55	1,69	172,27	9,29	0,91
	18,93	2,59	264,02	13,94	1,37
	19,01	2,17	221,20	11,64	1,14
			$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%			11,62	1,14	

5.3 RESULTADO PROPIEDADES MEZCLA ARCILLA-LODO

En el laboratorio se realizaron los ensayos de compresión y absorción de agua para probetas de mezcla arcilla-lodo con humedades del 55% y 60%, bajo parámetros y variables especificadas, determinándose cuantitativamente el esfuerzo sobre el área expuesta.

5.3.1 Ensayo de compresión mezcla arcilla-lodo

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de arcilla-lodo con una humedad del 60%. Los valores más altos de esfuerzo fueron 89,37 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de arcilla de 25%.

Tabla 14. Ensayo de compresión para probetas arcilla-lodo con humedad del 55%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	118,35	7,176	4,051
	2	120	13,3	119,71	7,237	4,123
	3	120	13,3	119,52	7,135	4,36
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	12,89	10,57	1077,472	83,60	8,20	
	13,35	9,55	973,496	72,91	7,15	
	14,93	10,74	1094,801	73,33	7,19	

					$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%					76,61	7,52
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	132,54	7,71	4,22
	5	120	30	132,12	7,59	4,16
	6	120	30	133,75	7,77	4,24
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25,%	14,01	10,07	1026,50	73,29	7,19	
	13,59	11,91	1214,07	89,37	8,77	
	14,13	7,38	752,29	53,25	5,22	
					$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%					71,97	7,06
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	149,82	8,20	4,30
	8	120	51,42	148,38	8,16	4,19
	9	120	51,42	150,63	8,29	4,19
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
42,85%	14,55	6,38	650,36	44,70	4,39	
	13,76	7,57	771,66	56,07	5,50	
	13,76	9,43	961,26	69,85	6,85	
					$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%					56,87	5,58

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de arcilla-lodo con una humedad del 60%. Los valores más altos de esfuerzo fueron 103,24 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de arcilla de 11,08%.

Tabla 15. Ensayo de compresión para probetas de arcilla-lodo con humedad del 60%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	113,91	7,89	4,07
	2	120	13,3	113,01	7,74	4,01
	3	120	13,3	111,43	7,47	4,12
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	13,01	7,1	723,75	55,63	5,46	
	12,64	10,57	1077,47	85,27	8,37	
	13,30	13,47	1373,09	103,24	10,13	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%				81,38	7,98	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	126,93	8,10	4,05
	5	120	30	124,15	7,87	4,14
	6	120	30	138,63	8,41	4,25
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25%	12,88	10,04	1023,45	79,48	7,80	
	13,44	12,67	1291,54	96,13	9,43	
	14,21	9,45	963,30	67,78	6,65	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%				81,13	7,96	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	126,93	8,12	4,22
	8	120	51,42	142,58	8,56	4,23
	9	120	51,42	143,03	8,80	4,34
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
42,85%	13,96	10,11	1030,58	73,82	7,24	
	14,05	10,08	1027,52	73,12	7,17	
	14,77	6,98	711,52	48,16	4,72	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%				65,03	6,38	

5.3.2 Ensayo de absorción de agua mezcla arcilla-lodo

Se presenta a continuación la tabla de ensayo de absorción de agua para probetas de arcilla-lodo con humedad del 55%, las probetas que muestran mejor resultados son las que tienen un porcentaje adicional de arcilla de 42,85%

Tabla 16. Ensayo de absorción de agua para probetas de arcilla-lodo con humedad del 55%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
11,08%	1	120	13,30	120	170	185
	2	120	13,30	120	170	185
	3	120	13,30	125	175	185
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
11,08%	41,67		54,17		0,769	
	41,67		54,17		0,769	
	40,00		48,00		0,833	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coeficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 11,08%		41,11		52,11		0,791
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
25%	4	120	30	135	190	205
	5	120	30	135	190	195
	6	120	30	135	190	205
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
25%	40,74		51,85		0,786	
	40,74		44,44		0,917	
	40,74		51,85		0,786	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coeficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 25%		40,74		49,38		0,83

Tabla 16. (Continuación)

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
42,85%	7	120	51,42	155	215	230
	8	120	51,42	150	210	225
	9	120	51,42	155	210	225
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
42,85%	38,71		48,39		0,80	
	40,00		50,00		0,80	
	35,48		45,16		0,79	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coeficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 42,85%		38,06		47,85		0,80
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coeficiente de saturación
Promedio total para probeta de arcilla-lodo con humedad 55%		39,97		49,78		0,81

Se presenta a continuación la tabla de ensayo de absorción de agua para probetas de arcilla-lodo con humedad del 60%, las probetas que muestran mejor resultados son las que tienen un porcentaje adicional de arcilla de 42,85%

Tabla 17. Ensayo de absorción de agua para probetas de arcilla-lodo con humedad del 60%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
11,08%	1	120	13,30	115	175	190
	2	120	13,30	115	180	195
	3	120	13,30	115	175	190
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
11,08%	52,17		65,22		0,80	
	56,52		69,57		0,81	
	52,17		65,22		0,80	

Tabla 17. (Continuación)

		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coefficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 11,08%		53,62		66,67		0,80
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
25%	4	120	30	130	195	210
	5	120	30	130	200	205
	6	120	30	130	200	205
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coefficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
25%	50,00		61,54		0,81	
	53,85		57,69		0,93	
	53,85		57,69		0,93	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coefficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 25%		52,56		58,97		0,89
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
42,85%	7	120	51,42	150	220	235
	8	120	51,42	150	220	235
	9	120	51,42	150	200	225
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coefficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
42,85%	46,67		56,67		0,82	
	46,67		56,67		0,82	
	33,33		50,00		0,67	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coefficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 42,85%		40,00		54,44		0,77
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coefficiente de saturación
Promedio total para probeta de arcilla-lodo con humedad 60%		49,47		60,03		0,82

5.3.3 Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua mezcla arcilla-lodo

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de arcilla-lodo con una humedad del 55%. Los valores más altos de esfuerzo fueron 63,31 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de arcilla de 11,08%.

Tabla 18. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de arcilla-lodo con humedad del 55%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	120,04	7,53	4,04
	2	120	13,3	120,81	7,31	4,13
	3	120	13,3	120,86	7,29	4,09
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	12,82	7,72	786,95	61,39	6,02	
	13,40	6,9	703,36	52,50	5,15	
	13,14	8,16	831,80	63,31	6,21	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%				59,07	5,79	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	135,89	7,97	4,28
	5	120	30	135,68	7,93	4,1
	6	120	30	134,95	7,9	4,18
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25%	14,39	6	611,62	42,51	4,17	
	13,20	6,2	632,01	47,87	4,70	
	13,72	5,52	562,69	41,00	4,02	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%				43,80	4,30	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	152,91	8,44	4,1
	8	120	51,42	152,55	8,56	4,08

Tabla 18. (Continuación)

Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
42,85%	13,20	7,89	804,28	60,92	5,98
	13,07	7,92	807,34	61,75	6,06
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%				61,33	6,02

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de arcilla-lodo con una humedad del 60%. Los valores más altos de esfuerzo fueron 65,88 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de arcilla de 25%.

Tabla 19. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de arcilla-lodo con humedad del 60%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	116,82	7,93	4,04
	2	120	13,3	117,65	8,36	4,25
	3	120	13,3	116,61	8,36	3,95
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	12,82	5,04	513,76	40,08	3,93	
	14,19	2,26	230,38	16,24	1,59	
	12,25	5,69	580,02	47,33	4,64	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%				34,55	3,39	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	130,48	8,73	3,98
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25%	12,44	8,04	819,57	65,88	6,46	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%				65,88	6,46	

Tabla 19. (Continuación)

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso arcilla (g)	Peso arcilla-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	149,09	9,08	3,94
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
42,85%	12,19	7,53	767,58	62,96	6,18	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%				62,96	6,18	

5.4 RESULTADO PROPIEDADES MEZCLA CEMENTO-LODO

En el laboratorio se realizan los ensayos de compresión y absorción de agua para probetas de mezcla cemento-lodo con humedades del 55% y 60%, bajo parámetros y variables especificadas, determinándose cuantitativamente el esfuerzo sobre el área expuesta.

5.4.1 Ensayo de compresión mezcla cemento-lodo

Se presenta a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de cemento-lodo con una humedad del 55%, se concluye en la tabla que los valores más altos de esfuerzo fueron 22,92 Kg/cm² y se produjeron con un porcentaje adicional de cemento de 11,08%.

Tabla 20. Ensayo de compresión para probetas de cemento-lodo con humedad del 55%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	113,75	7,81	4,70
	2	120	13,3	114,05	8,27	4,45
	3	120	13,3	116,42	8,51	4,31

Tabla 20. (Continuación)

Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	17,36	3,81	388,38	22,37	2,19	
	15,52	2,66	271,15	17,47	1,71	
	14,59	3,28	334,35	22,92	2,25	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%				22,64	2,22	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	135,75	8,60	4,94
	5	120	30	130,76	9,10	4,95
	6	120	30	135,21	9,07	5,02
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25%	19,17	2,07	211,01	11,01	1,08	
	19,24	2,05	208,97	10,86	1,07	
	19,79	2,05	208,97	10,56	1,04	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%				10,81	1,06	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	160,33	9,15	5,10
	8	120	51,42	166,03	9,65	5,09
	9	120	51,42	165,58	9,96	5,03
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
42,85%	20,42	2,19	223,24	10,93	1,07	
	20,35	1,8	183,49	9,02	0,88	
	19,87	2,82	287,46	14,47	1,42	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%				12,70	1,25	

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de cemento-lodo con una humedad del 60%. Los valores más altos de esfuerzo

fueron 34,76 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de cemento de 11,08%.

Tabla 21. Ensayo de compresión para probetas de probetas de cemento-lodo con humedad del 60%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	105,12	8,09	4,33
	2	120	13,3	116,03	8,42	4,57
	3	120	13,3	115,95	8,23	4,41
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	14,69	5,01	510,70	34,76	3,41	
	16,39	4,74	483,18	29,48	2,89	
	15,29	3,84	391,44	25,60	2,51	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%				29,95	2,94	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	137,90	9,28	4,90
	5	120	30	124,65	9,55	4,93
	6	120	30	135,22	9,10	4,99
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25%	18,84	1,14	116,21	6,17	0,61	
	19,10	0,94	95,82	5,02	0,49	
	19,53	1,01	102,96	5,27	0,52	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%				5,49	0,54	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	165,79	10,66	4,93
	8	120	51,42	161,18	9,70	5,13
	9	120	51,42	162,94	9,94	5,06

Tabla 21. (Continuación)

Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
42,85%	19,10	2,68	273,19	14,03	1,40
	20,72	1,78	181,45	8,59	0,86
	20,12	1,93	196,74	9,59	0,96
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%				10,74	1,07

5.4.2 Ensayo de absorción de agua mezcla cemento-lodo

Se presenta a continuación la tabla de ensayo de absorción de agua para probetas de cemento-lodo con humedad del 55%, las probetas que mostraron mejor el resultado fueron las que tenían un porcentaje adicional de cemento de 42,85%.

Tabla 22. Ensayo de absorción de agua para probetas de cemento-lodo con humedad del 55%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
11,08%	1	120	13,30	125	205	215
	2	120	13,30	120	195	200
	3	120	13,30	125	205	215
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
11,08%	64,00		72,00		0,89	
	62,50		66,67		0,94	
	64,00		72,00		0,89	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coeficiente de saturación		
Promedio para porcentaje adicional de 11,08%		63,50	70,22	0,91		

Tabla 22. (Continuación)

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
25%	4	120	30	145	230	245
	5	120	30	145	240	245
	6	120	30	140	240	255
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
25%	58,62		68,97		0,85	
	65,52		68,97		0,95	
	71,43		82,14		0,87	
			Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coeficiente de saturación	
Promedio para porcentaje adicional de 25%			65,19	73,36	0,89	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
42,85%	7	120	51,42	155	255	275
	8	120	51,42	170	270	275
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
42,85%	64,52		77,42		0,83	
	58,82		61,76		0,95	
			Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coeficiente de saturación	
Promedio para porcentaje adicional de 42,85%			61,67	69,59	0,89	
			Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coeficiente de saturación	
Promedio total para probeta de cemento-lodo con humedad 55%			63,45	71,06	0,90	

Se presenta a continuación la tabla de ensayo de absorción de agua para probetas de cemento-lodo con humedad del 60%, las probetas que mostraron mejor el resultado, fueron las que tenían un porcentaje adicional de cemento de 42,85%

Tabla 23. Ensayo de absorción de agua para probetas de cemento-lodo con humedad del 60%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
11,08%	1	120	13,30	115	185	195
	2	120	13,30	110	200	205
	3	120	13,30	120	210	220
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
11,08%	60,87		69,57		0,88	
	81,82		86,36		0,95	
	75,00		83,33		0,90	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coeficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 11,08%		72,56		79,75		0,91
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
25%	4	120	30	145	250	255
	5	120	30	140	240	245
	6	120	30	140	240	255
Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1		Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
25%	72,41		75,86		0,95	
	71,43		75,00		0,95	
	71,43		82,14		0,87	
		Porcentaje de absorción luego de 24 h		Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición		Coeficiente de saturación
Promedio para porcentaje adicional de 25%		71,76		77,67		0,93
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso yeso (g)	Peso seco (m1) (g)	Peso 24 h en agua (m2) (g)	Peso luego de 24 h más 5 h de ebullición (m3) (g)
42,85%	7	120	51,42	160	255	265
	8	120	51,42	170	265	275
	9	120	51,42	160	250	265

Tabla 23. (Continuación)

Porcentaje adicional	Porcentaje de absorción luego de 24 h (m2-m1)/m1	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición (m3-m1)/m1	Coeficiente de saturación (m2-m1)/(m3-m1)	
42,85%	59,38	65,63	0,90	
	55,88	61,76	0,90	
	56,25	65,63	0,86	
	Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coeficiente de saturación	
Promedio para porcentaje adicional de 42,85%	57,17	64,34	0,89	
	Porcentaje de absorción luego de 24 h	Porcentaje de absorción luego de 5 h de ebullición	Coeficiente de saturación	
Promedio total para probeta de cemento-lodo con humedad 60%	67,16	73,92	0,91	

5.4.3 Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua mezcla cemento-lodo

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de cemento-lodo con una humedad del 55%. Los valores más altos de esfuerzo fueron 12,60 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de cemento de 11,08%.

Tabla 24. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de cemento-lodo con humedad del 55%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	123,92	9,18	4,55
	3	120	13,3	125,54	9,11	4,57
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma = F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	16,26	2,01	204,89	12,60	1,24	
	16,40	1,54	156,98	9,57	0,94	

Tabla 24. (Continuación)

					$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%					11,09	1,09
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	148,1	9,65	4,98
	5	120	30	148,16	9,66	4,96
	6	120	30	143,64	10,37	4,67
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25%	19,48	1,35	137,61	7,07	0,69	
	19,32	1,57	160,04	8,28	0,81	
	17,13	1,39	141,69	8,27	0,81	
					$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%					7,87	0,77
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	152,8	10,17	5,1
	8	120	51,42	163,28	11,13	5,08
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
42,85%	20,43	1,08	110,09	5,39	0,53	
	20,27	1,43	145,77	7,19	0,71	
					$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%					6,29	0,62

Se muestra a continuación la tabla de ensayo de compresión para probetas de cemento-lodo con una humedad del 60%. Los valores más altos de esfuerzo fueron 25,27 Kg/cm² se produjeron con un porcentaje adicional de cemento de 11,08%.

Tabla 25. Ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua para probetas de cemento-lodo con humedad del 60%

Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
11,08%	1	120	13,3	114,26	8,48	4,24
	2	120	13,3	112,31	9,24	4,57
	3	120	13,3	118,96	9,56	4,48
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
11,08%	14,12	3,5	356,78	25,27	2,48	
	16,40	1,49	151,89	9,26	0,91	
	15,76	0,99	100,92	6,40	0,63	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 11,08%				13,64	1,34	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
25%	4	120	30	146,13	10,7	4,93
	5	120	30	143,31	10	4,77
	6	120	30	146,48	10,29	4,89
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
25%	19,09	1,04	106,01	5,55	0,54	
	17,87	2,01	204,89	11,47	1,12	
	18,78	1,85	188,58	10,04	0,99	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 25%				9,02	0,88	
Porcentaje adicional	Número	Peso solo lodo (g)	Peso cemento (g)	Peso cemento-lodo (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
42,85%	7	120	51,42	162,33	10,6	4,92
	8	120	51,42	178,36	10,23	4,84
	9	120	51,42	165	10,97	5,0
Porcentaje adicional	Área (cm ²)	Carga (kN)	Carga (Kg)	$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
42,85%	19,01	0,66	67,28	3,54	0,35	
	18,40	2,81	286,44	15,57	1,53	
	19,64	0,6	61,16	3,11	0,31	
				$\sigma=F/A$ (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	
PROMEDIO PARA PORCENTAJE ADICIONAL DE 42,85%				7,41	0,73	

6 CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS

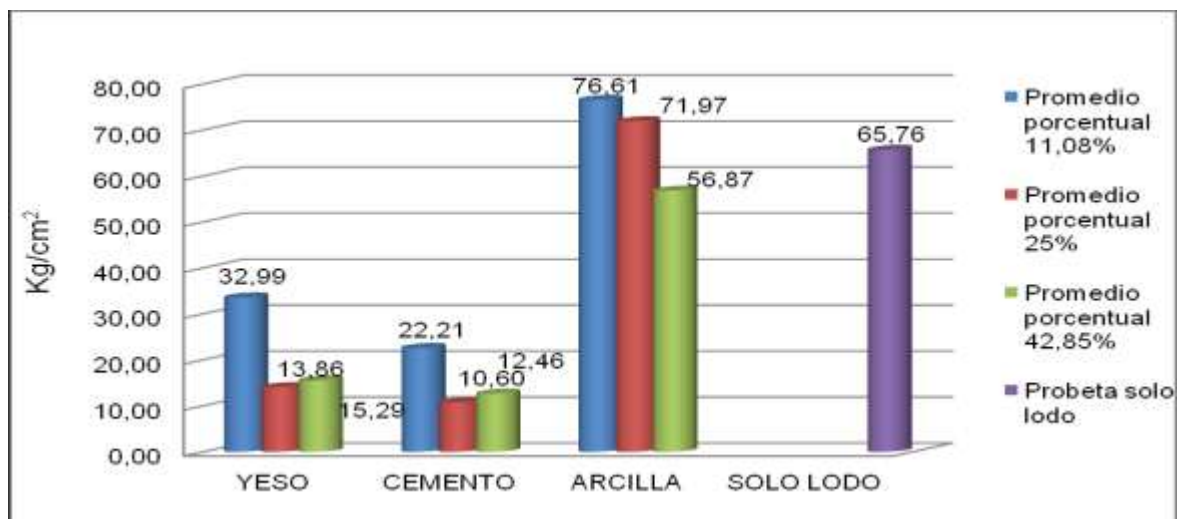
6.1 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA

En la tabla 26 se indica como fue la variación del promedio del esfuerzo, en las diferentes probetas, cuando varía el porcentaje adicional de la mezcla, con una humedad del 55%, las probetas que contienen mezcla de arcilla-lodo presentaron las más altas condiciones de esfuerzo y los valores más bajos de compresión se presentaron en las probetas de mezcla cemento-lodo

Tabla 26. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión con humedad de 55%

PROMEDIO PORCENTUAL ADICIONAL	HUMEDAD DEL 55%							
	YESO - LODO		CEMENTO - LODO		ARCILLA - LODO		SOLO LODO	
Promedio porcentual adicional 11,08%	33,63	3,30	22,64	2,22	76,61	7,52	65,76	6,45
Promedio porcentual adicional 25%	14,13	1,39	10,81	1,06	71,97	7,06		
Promedio porcentual adicional 42,85%	15,59	1,54	12,70	1,25	56,87	5,58		
	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa

Gráfica 1. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión con humedad de 55%.



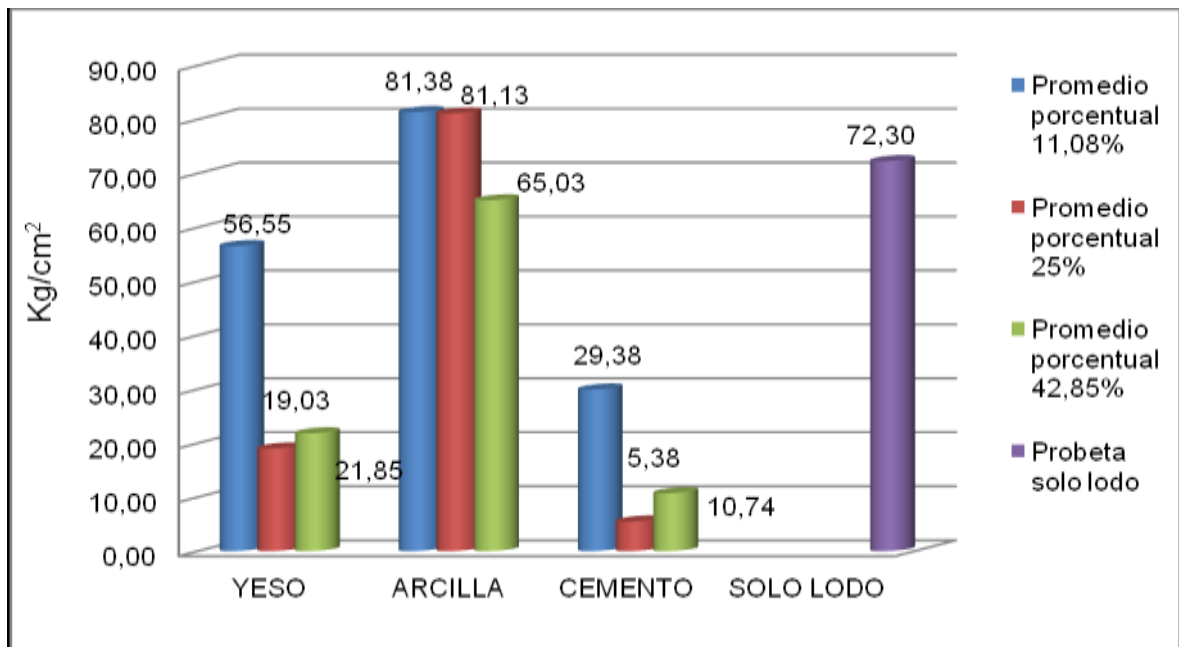
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 27 se indica como fue la variación del promedio del esfuerzo, en las diferentes probetas, cuando varía el porcentaje adicional de la mezcla, con una humedad del 60%, las probetas que contienen mezcla de arcilla-lodo presentan las más altas condiciones de esfuerzo.

Tabla 27. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión con humedad de 60%

PROMEDIO PORCENTUAL ADICIONAL	HUMEDAD DEL 60%							
	YESO - LODO		ARCILLA - LODO		CEMENTO - LODO		SOLO LODO	
Promedio porcentual adicional 11,08%	56,55	5,55	81,38	7,98	29,95	2,94	72,30	7,09
Promedio porcentual adicional 25%	19,03	1,87	81,13	7,96	5,49	0,54		
Promedio porcentual adicional 42,85%	21,85	2,14	65,03	6,38	10,74	1,07		
	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa

Gráfica 2. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión con humedad de 60%.



Fuente: Elaboración propia

En las tablas 26 y 27 se concluye que los valores más altos de esfuerzo se produjeron con humedades de 60%, las probetas con menor porcentaje de material adicional presentaron el mejor comportamiento para las diferentes mezclas.

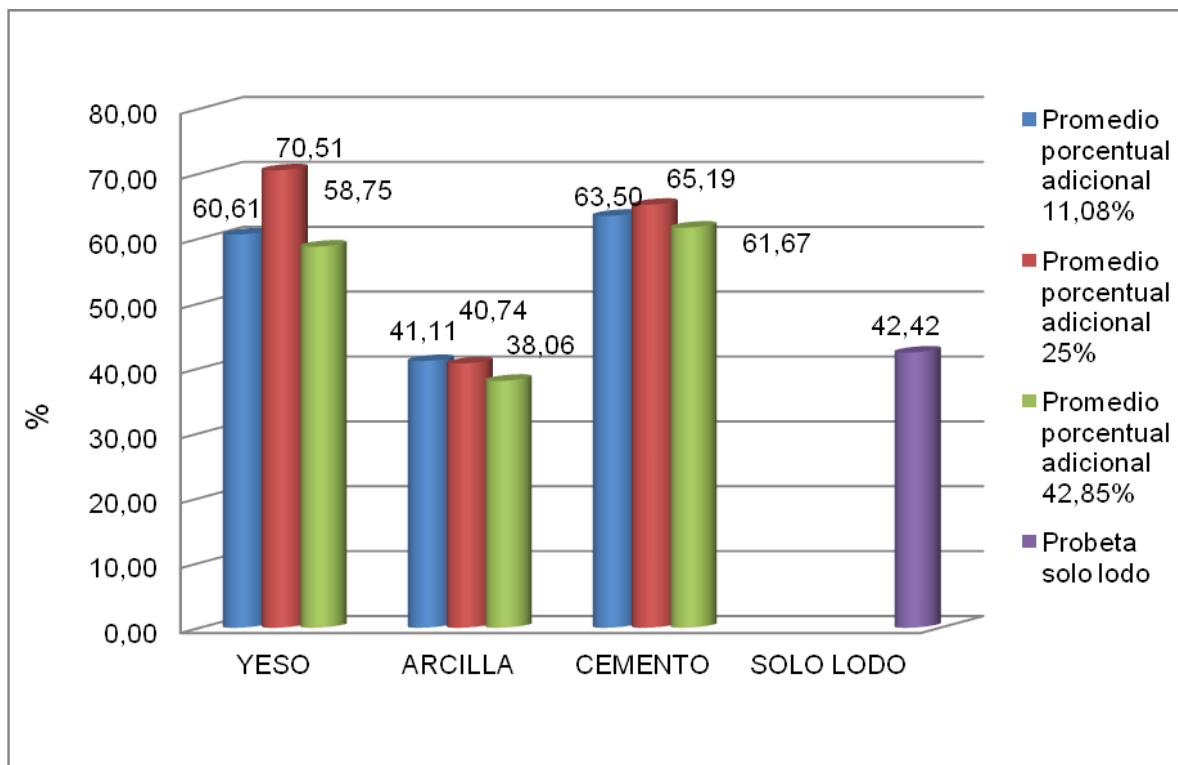
6.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ENSAYO ABSORCIÓN DE AGUA

En la tabla 28 se indica cómo fue la variación del porcentaje por absorción de agua luego de 24 horas, en las diferentes probetas, cuando varía el porcentaje adicional de la mezcla, con una humedad del 55%, las probetas que contienen mezcla arcilla-lodo presentan los menores porcentajes de absorción de agua.

Tabla 28. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 24 h con humedad de 55%

PROMEDIO PORCENTUAL ADICIONAL	HUMEDAD DEL 55%			
	YESO – LODO (%)	ARCILLA – LODO (%)	CEMENTO – LODO (%)	SOLO LODO (%)
Promedio porcentual adicional 11,08%	60,61	41,11	63,50	42,42
Promedio porcentual adicional 25%	70,51	40,74	65,19	
Promedio porcentual adicional 42,85%	58,75	38,06	61,67	

Gráfica 3. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 24 horas con humedad de 55%



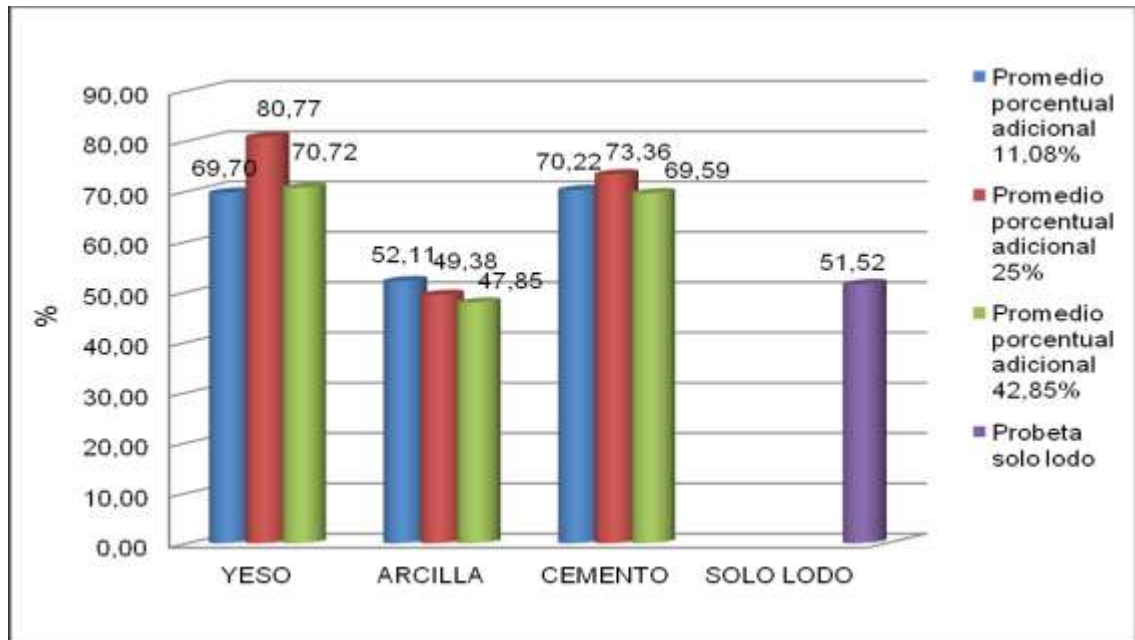
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 29 se indica como se modificó el porcentaje por absorción de agua luego de 5 horas de ebullición, en las diferentes probetas, cuando varía el porcentaje adicional de la mezcla, con una humedad del 55%, las probetas que contienen mezcla arcilla-lodo presentan los menores porcentajes de absorción de agua luego de 5 h de ebullición.

Tabla 29. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 5 horas de ebullición con humedad de 55%

PROMEDIO PORCENTUAL ADICIONAL	HUMEDAD DEL 55%			
	YESO – LODO (%)	ARCILLA – LODO (%)	CEMENTO – LODO (%)	SOLO LODO (%)
Promedio porcentual adicional 11,08%	69,70	52,11	70,22	54,55
Promedio porcentual adicional 25%	80,77	49,38	73,36	
Promedio porcentual adicional 42,85%	70,72	47,85	69,59	

Gráfica 4. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 5 horas de ebullición con humedad de 55%



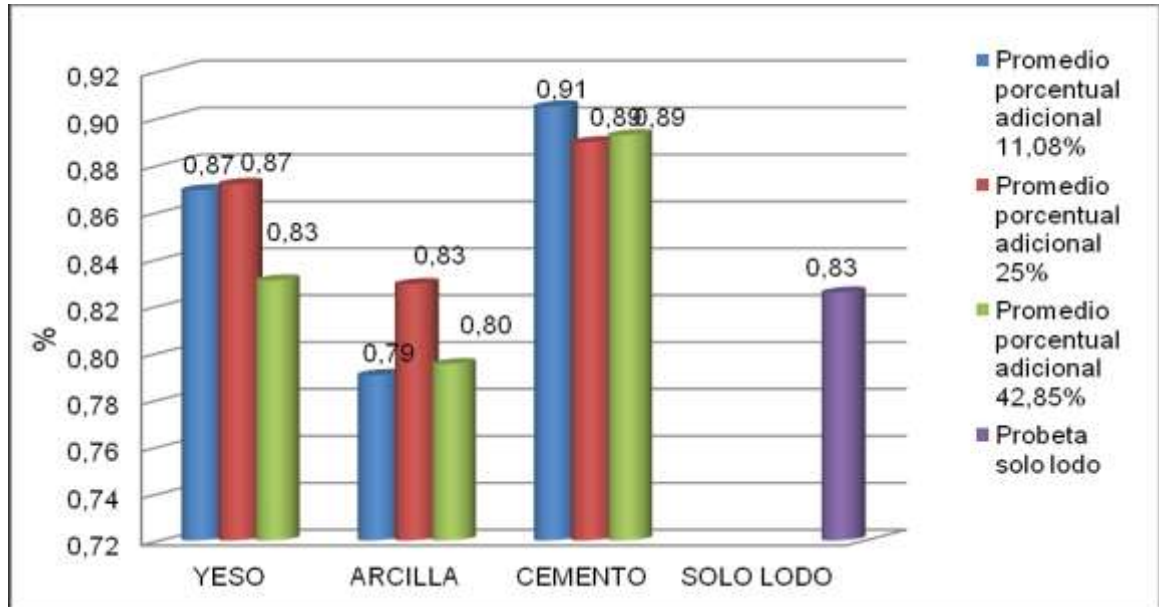
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 30 se indica como se modificó el coeficiente de saturación, en las diferentes probetas, cuando varía el porcentaje adicional de la mezcla, con una humedad del 55%, las probetas que contienen mezcla arcilla-lodo presentan los menores porcentajes de saturación.

Tabla 30. Resultado de la variación del coeficiente de saturación con humedad de 55%

PROMEDIO PORCENTUAL ADICIONAL	HUMEDAD DEL 55%			
	YESO – LODO (%)	ARCILLA – LODO (%)	CEMENTO – LODO (%)	SOLO LODO (%)
Promedio porcentual adicional 11,08%	0,87	0,79	0,91	0,83
Promedio porcentual adicional 25%	0,87	0,83	0,89	
Promedio porcentual adicional 42,85%	0,83	0,80	0,89	

Gráfica 5. Resultado de la variación del coeficiente de saturación con humedad de 55%



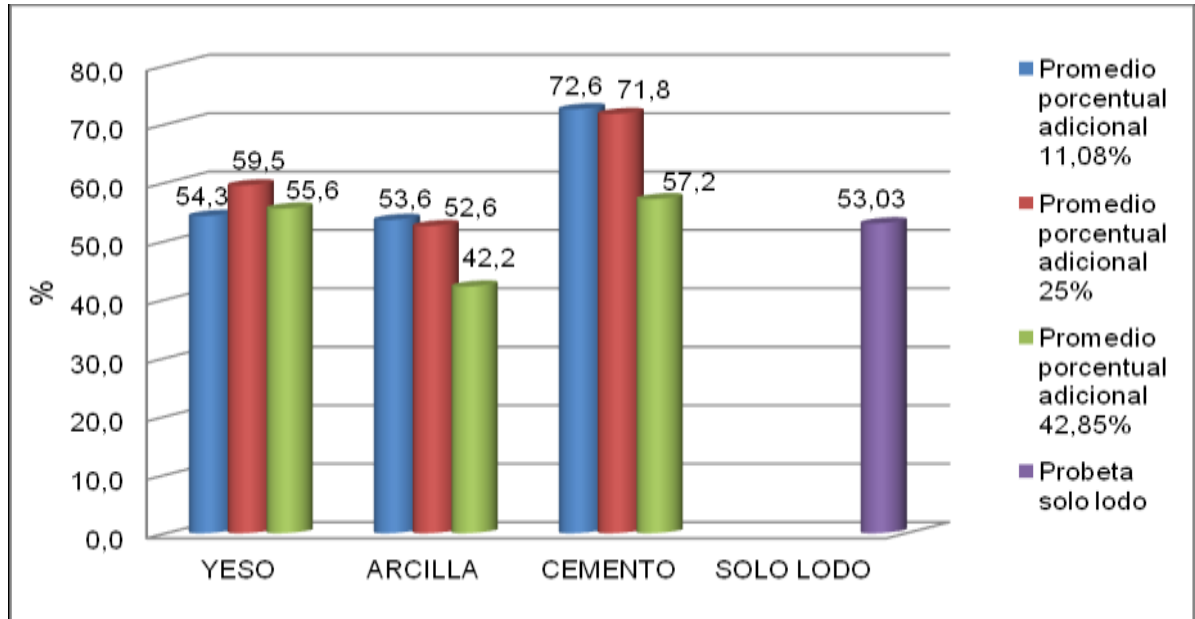
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 31 se indica cómo vario el porcentaje por absorción de agua luego de 24 horas, en las diferentes probetas, cuando varía el porcentaje adicional de la mezcla, con una humedad del 60%, las probetas que contienen mezcla arcilla-lodo presentan los menores porcentajes de absorción de agua y las de mezcla cemento-lodo tienen el peor comportamiento.

Tabla 31. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 24 horas con humedad de 60%

PROMEDIO PORCENTUAL ADICIONAL	HUMEDAD DEL 60%			
	YESO – LODO (%)	ARCILLA – LODO (%)	CEMENTO – LODO (%)	SOLO LODO (%)
Promedio porcentual adicional 11,08%	54,3	53,6	72,6	53,03
Promedio porcentual adicional 25%	59,5	52,6	71,8	
Promedio porcentual adicional 42,85%	55,6	42,2	57,2	

Gráfica 6. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 24 horas con humedad de 60%.



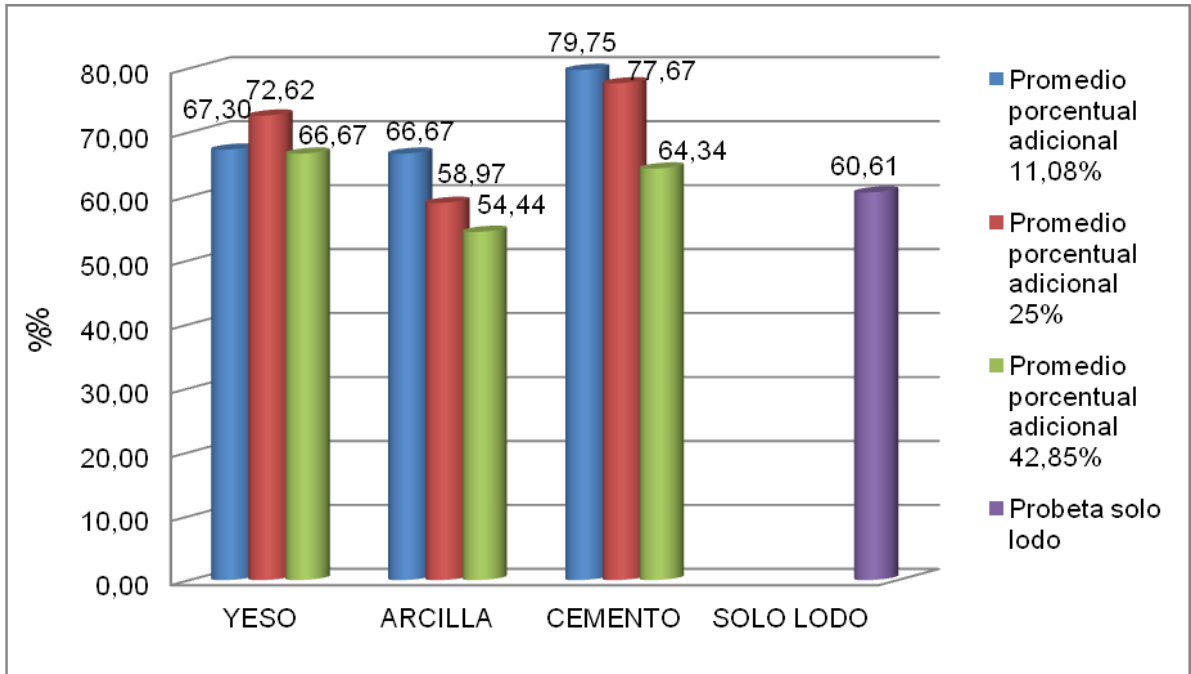
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 32 se indica como se modificó el porcentaje por absorción de agua luego de 5 horas de ebullición, en las diferentes probetas, cuando varía el porcentaje adicional de la mezcla, con una humedad del 60%, las probetas que contienen mezcla arcilla-lodo presentan los mejores resultados y las de mezcla cemento-lodo tienen el peor comportamiento.

Tabla 32. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 5 horas de ebullición con humedad de 60%

PROMEDIO PORCENTUAL ADICIONAL	HUMEDAD DEL 60%			
	YESO – LODO (%)	ARCILLA – LODO (%)	CEMENTO – LODO (%)	SOLO LODO (%)
Promedio porcentual adicional 11,08%	67,30	66,67	79,75	60,61
Promedio porcentual adicional 25%	72,62	58,97	77,67	
Promedio porcentual adicional 42,85%	66,67	54,44	64,34	

Gráfica 7. Resultado del comportamiento de las mezclas por absorción de agua luego de 5 horas de ebullición con humedad de 60%



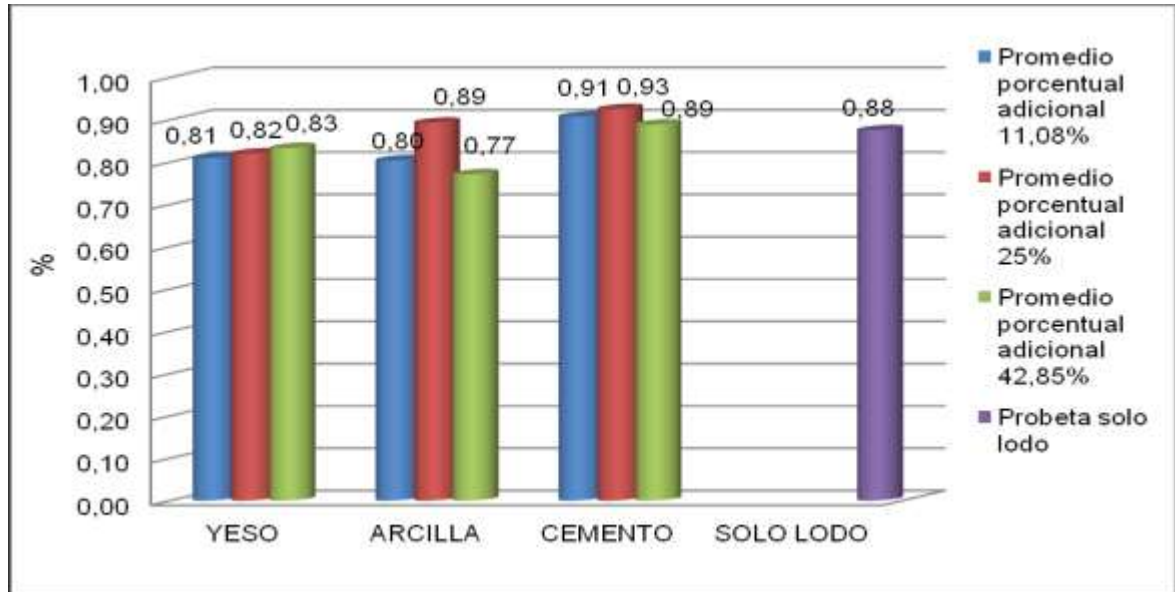
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 33 se indica como se modificó el coeficiente de saturación, en las diferentes probetas, cuando varía el porcentaje adicional de la mezcla, con una humedad del 60%, las probetas que contienen mezcla arcilla-lodo presentan los menores porcentajes de saturación y las de mezcla cemento-lodo tienen el peor comportamiento.

Tabla 33. Resultado de la variación del coeficiente de saturación con humedad de 60%

PROMEDIO PORCENTUAL ADICIONAL	HUMEDAD DEL 60%			
	YESO – LODO (%)	ARCILLA – LODO (%)	CEMENTO – LODO (%)	SOLO LODO (%)
Promedio porcentual adicional 11,08%	0,81	0,80	0,91	0,88
Promedio porcentual adicional 25%	0,82	0,89	0,93	
Promedio porcentual adicional 42,85%	0,83	0,77	0,89	

Gráfica 8. Resultado de la variación del coeficiente de saturación con humedad de 55%



Fuente: Elaboración propia

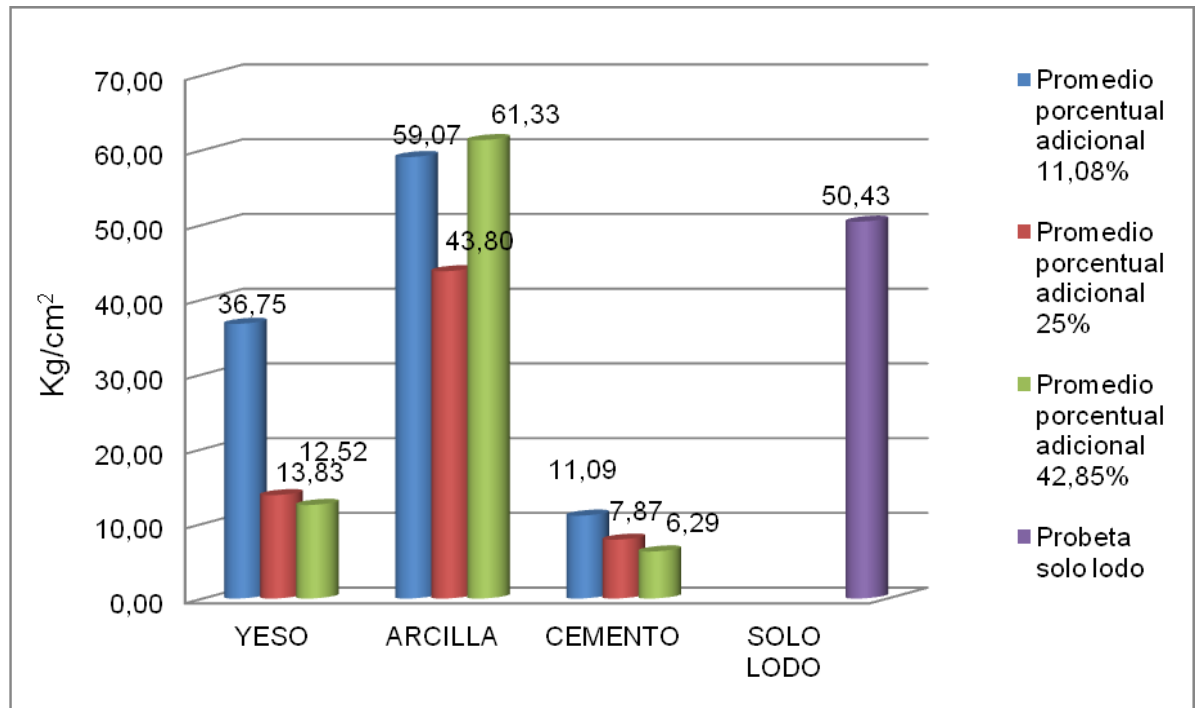
6.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA POSTERIOR AL ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA

En la tabla 34 se indica como fue la variación del promedio del esfuerzo de las probetas posterior al ensayo de absorción de agua, cuando varía el porcentaje adicional de la mezcla, con una humedad del 55%, las probetas que contienen mezcla de arcilla-lodo presentan las más altas condiciones de esfuerzo y los valores más bajos de compresión se presentan en las probetas de mezcla cemento-lodo.

Tabla 34. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua con humedad de 55%

PROMEDIO PORCENTUAL ADICIONAL	HUMEDAD DEL 55%							
	YESO - LODO		ARCILLA - LODO		CEMENTO - LODO		SOLO LODO	
	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa
Promedio porcentual adicional 11,08%	36,75	3,61	59,07	5,79	11,09	1,09	50,43	4,95
Promedio porcentual adicional 25%	13,83	1,36	43,80	4,30	7,87	0,77		
Promedio porcentual adicional 42,85%	12,52	1,23	61,33	6,02	6,29	0,62		

Gráfica 9. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua con humedad de 55%



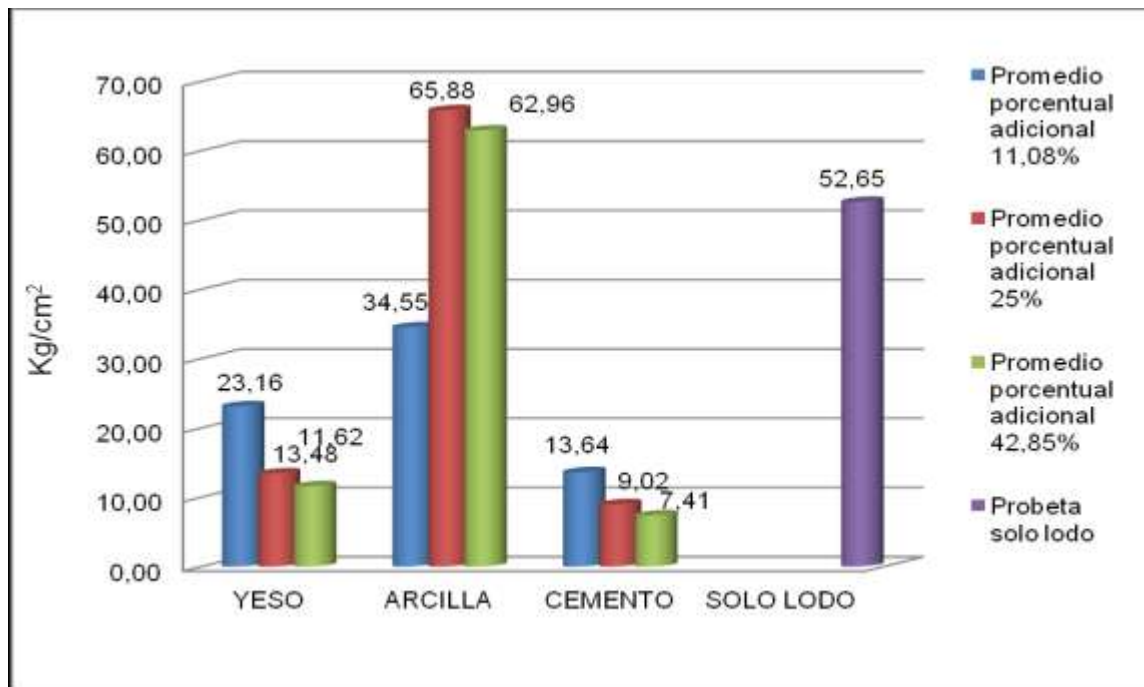
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 35 se indica cómo fue la variación del promedio del esfuerzo de las probetas posterior al ensayo de absorción de agua, cuando varía el porcentaje adicional de la mezcla, con una humedad del 60%, las probetas que contienen mezcla de arcilla-lodo presentan las más altas condiciones de esfuerzo y los valores más bajos de compresión se presentan en las probetas de mezcla cemento-lodo.

Tabla 35. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua con humedad de 60%

PROMEDIO PORCENTUAL ADICIONAL	HUMEDAD DEL 60%							
	YESO - LODO		ARCILLA - LODO		CEMENTO - LODO		SOLO LODO	
Promedio porcentual adicional 11,08%	23,16	2,27	34,55	3,39	13,64	1,34	52,65	5,17
Promedio porcentual adicional 25%	13,48	1,32	65,88	6,46	9,02	0,88		
Promedio porcentual adicional 42,85%	11,62	1,14	62,96	6,18	7,41	0,73		
	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa

Gráfica 10. Resultado del comportamiento de las mezclas para el ensayo de compresión posterior al ensayo de absorción de agua con humedad de 60%



Fuente: Elaboración propia

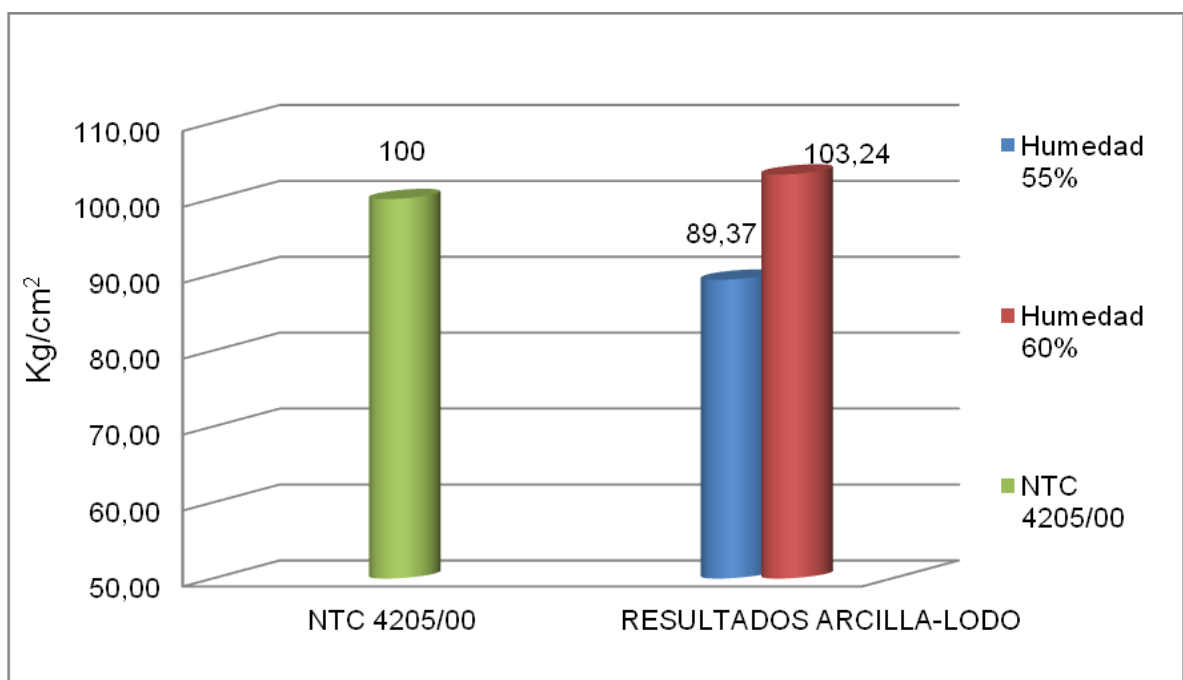
En el laboratorio se realizaron los ensayos de compresión y absorción de agua en probetas de mezcla yeso-lodo, cemento-lodo, arcilla-lodo y solo lodo, con

humedades del 55% y 60%, determinándose el mejor comportamiento de esfuerzo y absorción de agua en las probetas de mezcla arcilla-lodo.

Analizando los resultados obtenidos, se concluyo que las probetas que tuvieron mejor comportamiento fueron las de mezcla arcilla-lodo, las cuales obtuvieron un esfuerzo máximo de 103,24 kgf/cm² con humedad de 60% (tabla 15).

En la grafica 11 se muestra el análisis de los resultados aplicando la norma NTC 4205/00¹³ la cual exige que la resistencia mínima a la compresión debe cumplir con 100 kgf/cm² cada probeta.

Gráfica 11. Análisis de los resultados de compresión con la norma NTC 4205/00



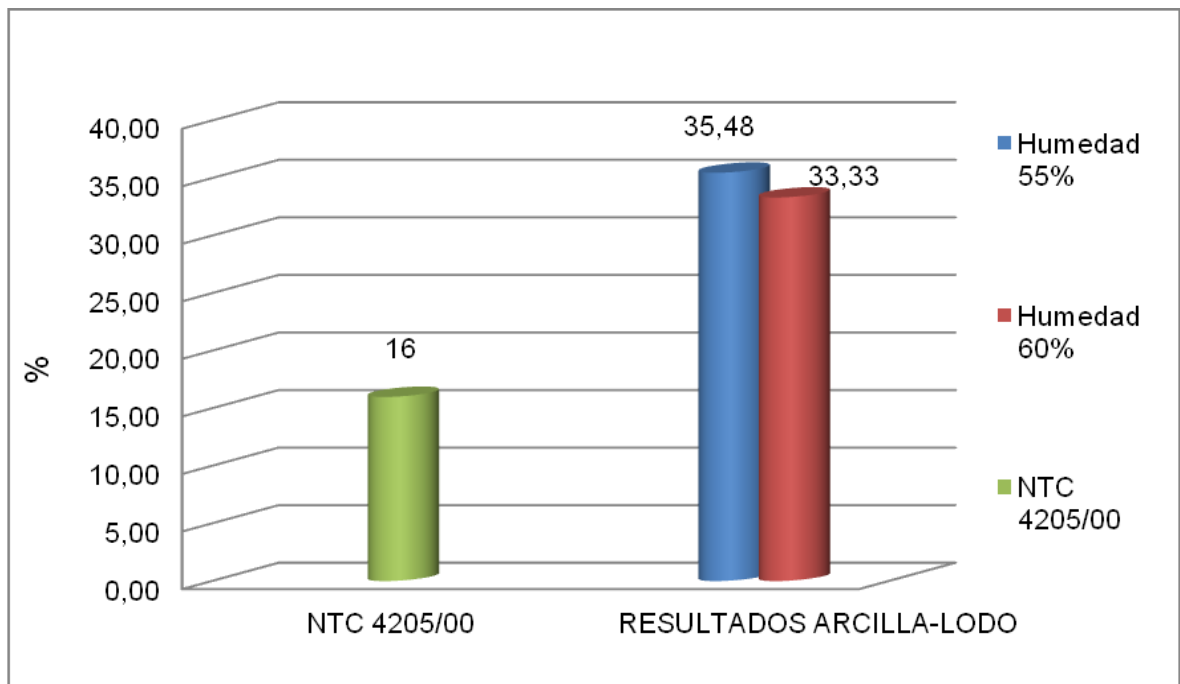
Fuente: Elaboración propia

Para el ensayo de absorción el porcentaje de absorción luego de 24 horas de agua debe cumplir con 16% de absorción cada muestra, las probetas que tuvieron

¹³ Norma técnica colombiana: [en línea] [recuperado el 18 de abril de 2013] Disponible en: <http://www.moore.com.co/icontec/4205.htm>

menor absorción de agua fueron las de mezcla arcilla-lodo con 35,48% con humedad de 55 (tabla 16) y 33,33% con humedad de 60% (tabla 17).

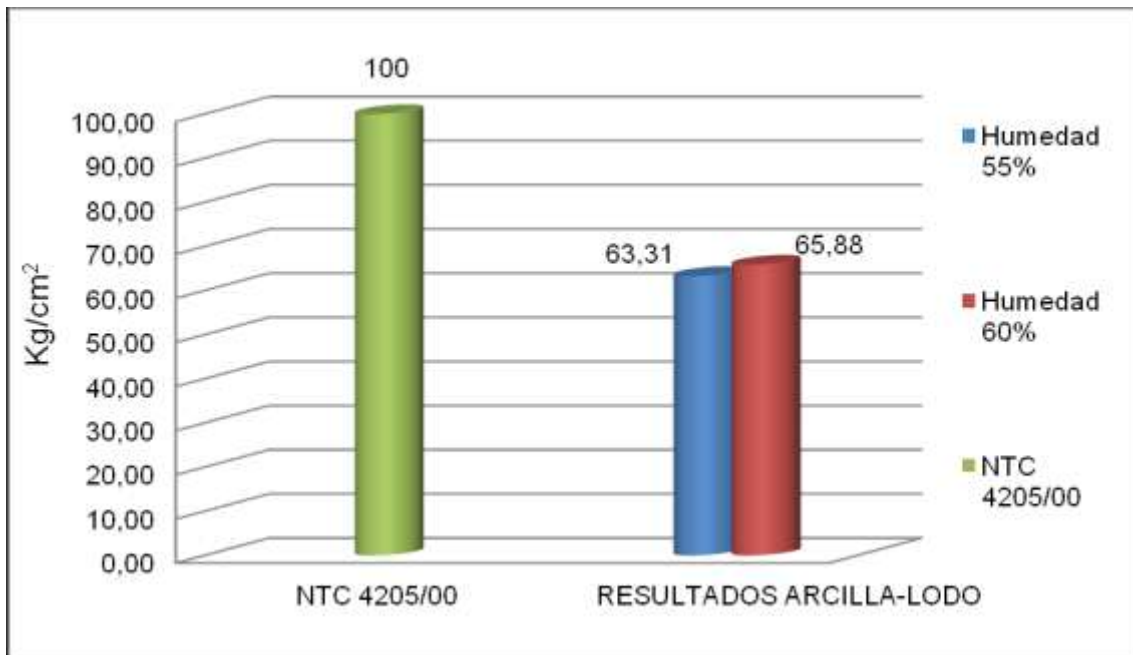
Gráfica 12. Análisis de los resultados de absorción de agua con la norma NTC 4205/00



Fuente: Elaboración propia

En el ensayo de resistencia mínima a la compresión realizado a las probetas posterior al ensayo de absorción de agua, las probetas que tuvieron mayor calidad fueron las de mezcla arcilla-lodo con 63,31 kgf/cm² con humedad de 55% (tabla 18) y 65,88 kgf/cm² con humedad de 60% (tabla 19), los valores obtenidos están por debajo de lo estipulado en la norma NTC 4205/00 por lo anterior no puede reemplazar un bloque de mampostería.

Gráfica 13. Análisis de los resultados de compresión posterior al ensayo de absorción de agua con la norma NTC 4205/00



Fuente: Elaboración propia

Según los parámetros estipulados en la norma NTC 4205/00 el ensayo de compresión para mezcla arcilla-lodo con humedad de 60% cumple con lo estipulado, cabe anotar que en el ensayo de absorción de agua no lo cumplió ninguna de las mezcla del ensayo.

7 RELACIÓN BENEFICIO/COSTO

El capítulo tiene como objetivo fundamental proporcionar la comparación entre el costo de un ladrillo macizo que se encuentra en el comercio¹⁴, con respecto a los costos de producción con mezclas de arcilla-lodo al 11,08%, 25% y 42,85% siendo la mezcla arcilla-lodo la de mejor comportamiento, comparando con la norma técnica colombiana NTC 4205/00. La norma exige que la resistencia mínima a la compresión debe cumplir con 100 kgf/cm² cada probeta y los resultados de las probetas que dieron mayor calidad fue las de mezcla arcilla-lodo con 89,37 kgf/cm² con humedad de 55% y 103,24 kgf/cm² con humedad de 60%, los resultados cumplen para probetas de humedad 60%, aclarando que con posibles refuerzos esta resistencia podría mejorar o superar la resistencia estipulada por la norma para las diferentes mezclas, además de las bondades que tiene el lodo papelero para el medio ambiente por el aprovechamiento racional y el evitar la quema como regularmente se emplea en el proceso de elaboración tradicional de un ladrillo.

No obstante es preciso proporcionar una medida de rentabilidad del proyecto con posibles refuerzos, mediante la comparación de los costos del ladrillo con lodo papelero.

Tabla 36. Costos de producción de un ladrillo mezcla arcilla-lodo

Costo de producción de ladrillo 28x12x6 con 11,08% de arcilla con humedad 55% y 60%	Unidad	Cantidad	Valor / unitario	Total
Agua	lt	1,50	\$ 6	\$ 9,00
Suelo arcilloso	Kg	0,444	\$10	\$ 4,44
Lodo papelero *				
COSTO TOTAL				\$ 13,4
MATERIAL DE REFUERZO				
gravilla de río	Kg	0,220	\$56,70	\$ 12,5
COSTO TOTAL CON REFUERZO				\$ 26

¹⁴ Materiales para construcción y acabados. [en línea] [recuperado el 24 de mayo de 2013] Disponible en: http://www.almacencanaima.com/producto-index-pagina-2.htm?nombre=ladrillos&id_categoria=2

Tabla 36. (continuación)

Costo de producción de ladrillo 28x12x6 con 25% de arcilla con humedad 55% y 60%	Unidad	Cantidad	Valor / unitario	Total
Agua	lt	1,50	\$ 6	\$ 9,00
Suelo arcilloso	kg	1,00	\$ 10	\$10,00
Lodo papelero *				
COSTO TOTAL				\$19
MATERIAL DE REFUERZO				
gravilla de río	kg	0,750	\$ 56,70	\$ 43
COSTO TOTAL CON REFUERZO				\$ 62
Costo de producción de ladrillo 28x12x6 con 42,85% de arcilla con humedad 55% y 60%	Unidad	Cantidad	Valor / unitario	Total
Agua	lt	1,50	\$ 6	\$ 9,00
Suelo arcilloso	Kg	1,71	\$ 10	\$ 17,14
Lodo papelero *				
COSTO TOTAL				\$ 26
MATERIAL DE REFUERZO				
gravilla de río	Kg	1,430	\$ 56,70	\$ 81
COSTO TOTAL CON REFUERZO				\$ 107

* se desprecia el valor del lodo teniendo en cuenta es donado

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- Los ensayos de compresión no cumplieron con lo estipulado en la norma NTC 4205/00 para mezcla de arcilla-lodo con humedad de 60% ya que solo cumple con una unidad, pero no con el promedio establecido en la norma .
- Para lograr que los ensayos que no cumplieron con la resistencia estipulada en la norma NTC 4205/00 cumplan, se debe explorar con nuevas mezclas y otros refuerzos como lo son las fibras de vidrio, cascarillas de arroz, guadua, polipropileno.
- Las probetas ensayadas con mezcla cemento-lodo, yeso-lodo y solo lodo no cumplen con la norma NTC 4205/00 donde especifica que la resistencia mínima a la compresión es de 100 kgf/cm².
- Los resultados obtenidos para el ensayo de absorción de agua luego de 24 horas no cumple en las diferentes mezclas ensayadas con lo que especifica la norma NTC 4205/00 de 16% de absorción cada muestra, las probetas que dieron menor resultado fue las mezcla arcilla-lodo con 38,06% con humedad de 55% y 42,2% con humedad de 60%.
- Las pruebas de resistencia realizadas a las probetas posterior al ensayo de absorción agua las que presentan mejor calidad son las de mezcla arcilla-lodo con 61,33 kgf/cm² con humedad de 55% y 65,88 kgf/cm² con humedad de 60%, estas probetas no cumplen con lo estipulado en la norma NTC 4205/00.
- El análisis de los resultados de las mezcla cemento-lodo presentan los comportamientos más bajos para los ensayos de compresión y absorción de

agua, esto considera que esta mezcla no es recomendable para el uso en la industria de la construcción.

8.2 RECOMENDACIONES

- El ensayo de compresión para las probetas que las mezclas no cumplieron con los estándares de resistencia mínima estipulados en la norma se podría explorar con nuevos refuerzos como son fibras de guadua, gravilla, cascarillas de arroz entre otras.
- La mezcla cemento-lodo presentan los comportamientos más bajos para los ensayos realizados, por lo anterior se considera que esta mezcla no es recomendable para el uso en la industria de la construcción, debido a su comportamiento.
- Se recomienda realizar ensayos futuros con la mezcla de arcilla-lodo adicionándole componentes de otras fibras para refuerzo o partículas, ya que mostro un comportamiento optimo y cumplió con la norma NTC 4205/00.
- Al momento de realizar el proceso de fabricación de las probetas el manejo de la máquina incluidora de probetas deben ser uniforme de modo que la compactación quede precisa.

9 BIBLIOGRAFÍA

ANINK, D., Boonstra, C., y MAK, J. *Handbook of Sustainable Building. An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment*. Londres, 1996. En: http://huespedes.cica.es/aliens/gimadus/17/03_materiales.html#2a

ARENAS CABELLO, Francisco J. *Los materiales de construcción y el medio ambiente. Estudios*. En: http://huespedes.cica.es/aliens/gimadus/17/03_materiales.html#2a

BORSANI, María Silvia. *Materiales ecológicos. Estrategia, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles*. UPC. En: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/13759/1/Borsani,%20Mar%C3%ADa%20Silvia.pdf>

Calidad técnica e industrial S.A de C.V. En <http://www.cyti.com.mx/compresion.asp>

Coefficiente de correlación calculadora. En: <http://es.ncalculators.com/statistics/correlation-coefficient-calculadora.htm>

DÍAZ, I. A., et al. *Aprovechamiento de residuos. Lodos papeleros para barreras hidráulicas*. En: <http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/367/07abr.pdf>

Dos jóvenes de Pereira hacen empresa reciclando lodo paplero. En: <http://www.cartagonoticias.com/noticias.php/2010050203/inicio/regional/dos-jovenes-de-pereira-hacen-empresa-reciclando-lodo-paplero/>

Escuela de Ingeniería de Antioquia. En: http://www.scielo.unal.edu.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200002&lng=es&nrm=iso.

Green Works Company. En: [http:// www.greenworksco.co/greenworksco/quienes-somos.html](http://www.greenworksco.co/greenworksco/quienes-somos.html)

Industria del papel y de la pasta de papel. En: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/ Textos Online/ Enciclopedia OIT/tomo3/72.pdf>

Introducción a la Ciencia de los materiales. En: <http://www.emagister.com/curso-introduccion-ciencia-materiales/propiedades-materiales-mecanicas>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas *NTC 5069.* En
<http://www.icontec.org.co>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas *NTC 1085.* En
<http://www.icontec.org.co>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas *NTC 3829.* En
<http://www.icontec.org.co>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas *NTC 5069.* En
<http://www.icontec.org.co>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas *NTC 2446.* En
<http://www.icontec.org.co>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas *NTC 5123.* En
<http://www.icontec.org.co>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas *NTC 4205.* En
<http://www.icontec.org.co>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas *NTC 1486.* En
<http://www.icontec.org.co>.

QUINCHÍA, Adriana María; VALENCIA, Marco; GIRALDO, Jorge Mario. *Uso de lodos provenientes de la industria papelera en la elaboración de paneles prefabricados para la construcción*. Revista EIA, ISSN 1794-1237 número 8, p. 9-19. Diciembre 2007. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia). En: <http://revista.eia.edu.co/articulos8/art.1.pdf>

Residuos de la industria papelera para acondicionar suelos. En: <http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias/noticia.asp?id=28292>.

Resistencia de materiales. Introducción al comportamiento mecánico de los materiales. En: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000155/lecciones/lec2/2_4.htm#