



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“La norma ASTM D 6276 como instrumento de estabilización de suelos para fines patrimoniales”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:
AMADO FLORES RENTERÍA

ASESOR:
**DRA. ELIA MERCEDES ALONSO
GUZMÁN**

MORELIA, MICH, DICIEMBRE DE 2010

ÍNDICE

Contenido	pág.
I. INTRODUCCIÓN. -----	1
I.1. Antecedentes del adobe en la construcción. -----	5
I.2. Características del adobe. -----	6
II. SUELOS (ORIGEN Y FORMACIÓN). -----	7
II.1. El planeta tierra. -----	7
II.2. Composición y estructura de la tierra. -----	8
II.2.1. La geosfera. -----	8
II.2.2. La hidrosfera. -----	13
II.2.3. La atmósfera. -----	14
II.2.4. La biosfera. -----	14
II.3. Suelos. -----	15
II.4. Formación de los suelos. -----	15
II.4.1. El intemperismo mecánico. -----	15
II.4.2. El intemperismo químico. -----	16
II.5. Clasificación de los suelos de acuerdo a su origen. -----	18
II.6. Clasificación del suelo de acuerdo a su tamaño de partícula. -----	21
II.6.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). -----	22
II.7. Las arcillas. -----	26
II.7.1. Silicatos. -----	27
II.7.2. Estructura cristalina de las arcillas. -----	31

II.7.3. Clasificación de los minerales de arcilla. -----	32
II.7.4. clasificación de la arcilla de acuerdo a su estructura reticular. -----	34
II.7.5. Propiedades fisicoquímicas de las arcillas. -----	37
III. MATERIALES Y MÉTODOS DE PRUEBA. -----	41
III.1. Materiales. -----	41
III.1.1. Cal. -----	42
III.1. 2. Cemento. -----	46
III.1.2.1. Historia. -----	47
III.1.2.2. Tipos de cemento. -----	47
III.1.3. Yeso. -----	48
III.1.3.1. Historia de la utilización del yeso. -----	50
III.1.3.2. Usos. -----	51
III.1.4. Hidróxido de sodio. -----	51
III.1.5. Múcilago de nopal. -----	57
III.1.6. Agua. -----	57
III.2. Métodos de prueba. -----	61
III.2.1. Determinación del potencial de hidrogeno (PH) (ASTM D 6276). -----	61
III.2.2. Determinación de los estados de consistencia. (Atterberg) [5]. -----	62
III.2.2.1. Determinación del límite líquido. -----	64
III.2.2.2. Determinación del límite plástico e índice plástico. -----	66

III.2.2.3.Determinación del límite de contracción. (LC y CL).-----	68
III.2.3. Prueba de granulometría. -----	73
III.2.4. Densidad de sólidos. -----	75
III.2.5. Prueba de fluidez. -----	78
III.2.6. Compresión simple. (ASTM C109/C109M-07). -----	80
III.2.7.Tensión en briquetas (ASTM C190-59-2000). -----	81
III.2.8. Determinación de la resistencia a la flexión en vigas de arcilla ASTM C293 (cargada en el punto medio). -----	82
III.2.9. Módulo de elasticidad dinámico en especímenes prismáticos por medio de la frecuencia resonante (método de prueba no destructivo). -----	84
III.3. Estadística e ingeniería. -----	85
III.3.1. Antecedentes. -----	85
III.3.2. Población y muestra. -----	86
III.3.3. Tipos de muestra. -----	86
III.3.4. Presentación de datos. -----	87
III.3.5. Definiciones. -----	88
III.3.6. Cálculo de los parámetros estadísticos de una muestra. -----	89
IV. Resultados. -----	92
IV.1. Medición del pH (potencial de Hidrogeno). -----	92
IV.2. Clasificación del material analizado. -----	95
IV.2.1. Límites de consistencia. -----	96
IV.3. Granulometría. -----	101
IV.4. Densidad de sólidos. -----	102
IV.5.Pruebas de fluidez. -----	103

IV.6. Pruebas de compresión. -----	111
IV. 7. Prueba a flexión en vigas. -----	121
IV. 8. Prueba de tensión en briquetas. -----	128
IV.9. Pruebas de pulso ultrasónico. -----	133
IV.10.Resultados estadísticos. -----	134
IV.11. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a compresión. -----	138
V. CONCLUSIONES Y ANALISIS DE RESULTADOS -----	141
Referencias bibliográficas. -----	143

OBJETIVO

La presente investigación se hace con motivo de la gran importancia con que cuentan las estructuras elaboradas de tierra cruda y lo que representan para la sociedad, ya que en nuestra región y en particular nuestro estado nuestras culturas antiguas como son los purépechas la tierra cruda era su principal material de construcción, por ello tratando de aportar elementos que puedan ser utilizados para la reconstrucción de obras que son patrimonio o para la elaboración de nuevos proyectos que tomen en cuenta el suelo como materia prima debido a las ventajas de carácter económico, social, y sobre todo ecológico. Pudiendo ser una alternativa viable de construcción y reconstrucción o mantenimiento y así obtener proyectos sustentables y tener un equilibrio con el medio ambiente.

Por lo mencionado anteriormente se pretende encontrar con la adición de algunos elementos como son: hidróxido de sodio, mucilago de nopal, cal, yeso y cemento gris, la proporción adecuada en la cual mejoren las propiedades mecánicas y volumétricas de la arcilla en estudio (arcilla material obtenida del banco de las tabiquerías de Santiago Undameo).

RESUMEN

El estado de Michoacán, México fue la cuna de la etnia conocida como Purhépecha, grupo fuerte y guerrero que cobraba tributo por permitir el paso de o hacia la capital del Imperio Azteca. También fue cuna de los virreyes, aquí tuvo una vivienda el primer Virrey de la Nueva España, con Don Antonio de Mendoza y Pacheco, quien según algunos historiadores habría nacido en Valladolid, España y en honor a su ciudad natal, llamó así a la actual Morelia. Eligieron Michoacán, antes Mechuacán, por su clima, abundancia de agua, vegetación, flora, fauna, cercanía con la capital.

La localización geográfica de Michoacán, México, ha propiciado importantes y numerosos eventos volcánicos, produciendo rocas ígneas que se han metamorfizado en arcillas montmorilloníticas.

Los grupos étnicos que se establecieron en el Reino Purhépecha solían realizar sus construcciones con adobes y para protegerlos de agentes medioambientales los aplanaron también con mezclas de suelos. Los adobes eran económicos por la abundancia de la materia prima, su realización es relativamente fácil y no requieren procesos químicos o cocimiento, son también materiales ecológicos, aislantes térmicos y acústicos, amigables con el entorno, reciclables. Los adobes regionales han sido estabilizados con fibras, también con adiciones orgánicas y con productos minerales.

Los materiales de tierra cruda tienen una vida útil limitada debida a múltiples factores medioambientales, la inestabilidad volumétrica propia de las arcillas, la higroscopía, y su supervivencia se debió a ancestrales procedimientos de mantenimiento periódico que usualmente desarrollaban las mujeres o quienes permanecían en las viviendas mientras se cazaba y recolectaba.

Este trabajo informa sobre la percepción estética y las propiedades mecánicas de los adobes estabilizados con yeso, con cal, hidróxido de sodio, mucílago de nopal, cemento gris y un material testigo sin estabilizante. Se estudiaron proporciones diferentes del estabilizante y las arcillas que provienen de bancos de la región donde actualmente se explotan para su uso como material cerámico.

Las pruebas mecánicas se realizaron según los estándares de la American Society for Testing and Materials, ASTM; el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS.

I. INTRODUCCIÓN

Los minerales arcillosos del tipo montmorillonita, son comunes en suelos y sedimentos, y debido a su abundancia, las arcillas son materiales que se puede disponer de ellos en casi todas las regiones del planeta y debido a su disponibilidad, desde la antigüedad ha sido la materia prima de muchas culturas en la construcción de sus viviendas y centro ceremoniales.

La presente investigación se hace con motivo de la gran importancia con que cuentan las estructuras elaboradas a base de tierra cruda y lo que representan para la sociedad, ya que en nuestra región y en general en nuestro estado existen innumerables construcciones con gran valor cultural, siendo algunas denominadas patrimonio de la humanidad, por ello tratando de aportar elementos para mejorar las características mecánicas de estos suelos mediante el proporcionamiento adecuado con algunos minerales y así ser utilizados en la elaboración de adobes, para la reconstrucción de obras que son patrimonio o para la elaboración de nuevos proyectos que tomen en cuenta el suelo como materia prima debido a las ventajas de carácter económico, social, y sobre todo ecológico. Pudiendo ser una alternativa viable de construcción y reconstrucción o mantenimiento y así obtener proyectos sustentables y tener un equilibrio con el medio ambiente. Se busca el contenido óptimo de estabilizante mineral en la presente investigación con 5 productos en distintas proporciones. Tratando implementar mejoras en la tierra natural con las mezclas propuestas se busca mejorar las propiedades mecánicas así como los cambios volumétricos tan característicos en este tipo de material en presencia del agua. En lugares donde el clima es extremo los materiales arcillosos tienden a presentar aumento en su volumen expansión debido a la presencia del frío y la humedad en el ambiente y en caso contrario en lugares donde el clima es muy cálido o seco se tiende a presentar contracciones en la arcilla, estos cambios de volumen son una problemática en cualquier ámbito de la construcción de elementos a base de tierra cruda (arcilla), así como en el terreno natural se presentan grietas.

El estado de Michoacán se sitúa hacia la porción centro - oeste de la República Mexicana, entre las coordenadas 20°23'27" y 17°53'50" de la latitud norte y entre 100°03'32" y 103°44'49" longitud oeste del meridiano de Greenwich, se encuentra en colindancia de las Placas Tectónicas (Holmes, 1966): de Cocos, Cinturón de Fuego, Pacífico, Norteamérica; así como en la intersección geométrica del Eje Volcánico Mexicano, la Sierra Madre Occidental. Es una zona relativamente joven que se encuentra sujeta a continuas eyecciones magmáticas que son las promotoras de las rocas ígneas extrusivas. Las rocas ígneas extrusivas son ricas en sílice, y cuando violentamente son eyectadas a la superficie con temperaturas que rondan los 1000°C, sufren choques térmicos que impiden que se cristalicen, dando lugar a estas rocas a que nos referimos cuya descripción corresponde a matrices vítreas con fenocristales embebidos en ellas. La parte vítrea, sílica, en tiempos geológicos tenderá a cristalizarse. Cuando el vidrio o el material criptocristalino de sílice se cristaliza es debido a un proceso de metamorfismo o metasomatismo, estas condiciones ambientales son agravadas por la acción orgánica de flora y fauna, convirtiéndose en hojuelas de aluminosilicatos hidratados, $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$, esta morfología laminar es la típica de las arcillas. [1]

El SUCS clasifica a las arcillas como de alta y de baja compresibilidad; la expansión también es un índice para la clasificación que hacen los mineralogistas: el grupo de las Esmectitas (Mitchel, 1993) es al que pertenecen las arcillas jóvenes que presentan los mayores índices de expansión/contracción. Una clasificación general es la que incluye montmorillonitas, illitas, caolinitas, vermiculitas y cloritas (Dana y Ford, 1986). Las arcillas montmorillonitas su estructura está compuesta por una capa de aluminio hidratado o una de magnesio hidratada, mas de dos sílices, es la menos resistentes de las arcillas, ya que tiene gran cantidad de vacios, por lo tanto alta humedad y mucha plasticidad, la ligación entre las distintas capas es débil, por lo que el agua que entra se inserta con facilidad entre ellas produciendo hinchamiento o expansión y lo contrario al secarse se produce retracción considerable con el consiguiente agrietamiento. [1]

Los métodos empleados en la antigüedad para utilizar la tierra cruda en la construcción eran empíricos y, como las demás actividades artesanas, se transmitían de generación en generación. Los conocimientos en la actualidad sobre este campo se basan

principalmente en estudios sistemáticos con fundamento científico corroborado mediante la experimentación. Los constructores trataron de controlar el problema de los agrietamientos con temperatura y horneado; las arcillas amasadas, se secaban al sol para eliminar la humedad superficial y disminuir el gasto de combustible y posteriormente se horneaban para convertirlos en materiales cerámicos, estables volumétricamente pero frágiles. Los adobes presentan aislamiento térmico, óptico y acústico, no solo por su densidad sino por las dimensiones de su geometría, los adobes son piezas macizas que tienen (10 x 24 x 34) cm aprox.(4" x 10" x 14"); requieren por tanto terrenos amplios para su empleo, las casas de los Purépechas presentan una distribución específica, las construcciones de adobe son amigables con el entorno, más sin embargo presentan cambios volumétricos en presencia de humedad y son de una vida útil menor que los materiales de construcción de hoy en día como lo son el tabique, tabicón, etc.

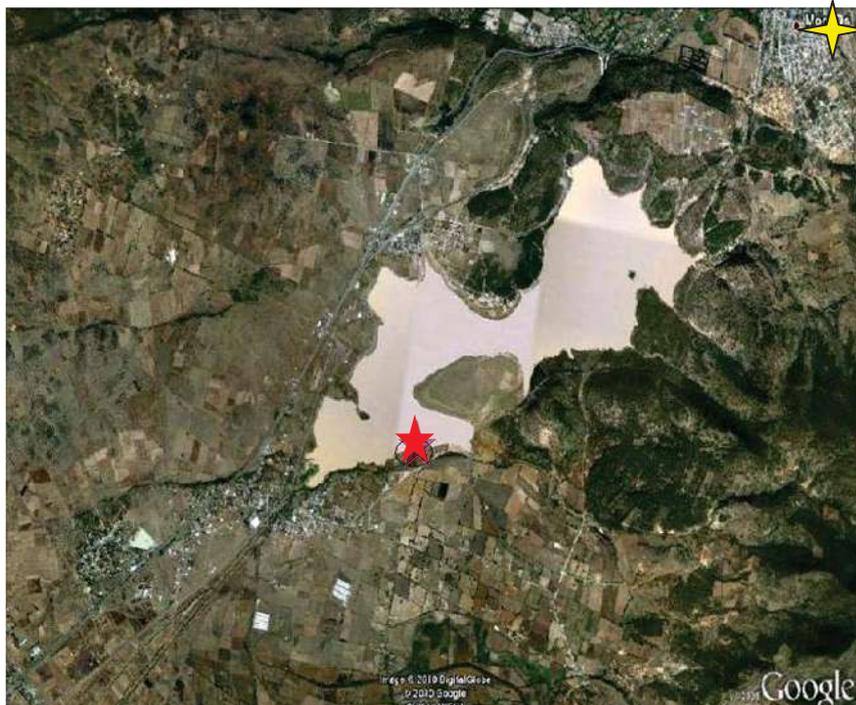
Michoacán está localizado en una zona de alta sismicidad, la energía liberada por los movimientos tectónicos debe ser absorbida por los materiales constructivos que conforman las estructuras, entonces el sentido común de los grupos étnicos que habitaban la zona, se observó que para elaborar materiales cerámicos se requería más “tecnología” como hornos, temperatura, combustible y muchas piezas se obtenían dañadas, además de ser frágiles; entonces la experiencia les dictó continuar usando al antecesor de los materiales cerámicos que es el adobe [1].

Las piezas de adobe son más elásticas que los materiales cerámicos de arcilla recocida. Por su geometría tienen mejor respuesta bajo sollicitaciones horizontales, los muros de adobe no suelen ser esbeltos, ni formar parte de estructuras muy altas, pueden ser reparados fácil y económicamente, la materia prima abunda en la región, y el conocimiento empírico de los grupos étnicos que los empleaban, les enseñó a agregar diferentes aditivos orgánicos y minerales para estabilizar las arcillas [1].

En la actualidad se ha venido dando durante el transcurso de varias décadas una serie de métodos y de materiales para la estabilización de las arcillas con un gran potencial de expansión y contracción. Estos son algunos de los materiales que se han venido utilizando: [2].

Cal, ácidos orgánicos, Resinas y polímeros, Cemento, sales (cloruro de sodio, cloruro de potasio, cloruro de magnesio, cloruro de bario, cloruro de calcio, nitrato de sodio, carbonato de sodio entre otros), productos asfálticos y yeso.

Algunos de estos productos utilizados en la presente investigación son la cal, el cemento y el yeso además de mucilago de nopal e hidróxido de sodio.



- ★ Santiago Undameo.
- ★ Morelia.

Figura.1. Localización Santiago Undameo Michoacán (Consulta septiembre 2010).

I.1. Antecedentes del adobe en la construcción.

Para la construcción de su hábitat, el hombre siempre ha buscado como primera fuente los materiales más cercanos a su entorno, empleándolos y transformándolos según las necesidades ocupacionales. En este caso la tierra como principal material de construcción de los adobes. Ya que se tiene el dato de una tradición histórica que remota desde una edad aproximada de 6000 años. Por lo que una numerosa cantidad de culturas la utilizaron en esos tiempos y las han seguido utilizando.[3]

Desde hace 9000 años se conocen técnicas de construir con adobe en muchas partes del mundo. En Turkestan (Rusia) se encontraron casas de adobe del periodo de 8000-6000 a. C. Parte del templo de la muerte de Ramsés II en Egipto fue construido con tabiques de adobe, hace 3200 años. La pirámide del Sol en Teotihuacan tiene un núcleo de 2 millones de toneladas de adobe. La ciudad Shibam en Yemen, llamada el “Manhattan” del desierto, desafía a cualquier prejuicio que existe en contra de construcciones de adobe, con sus casas de hasta 8 pisos, que llegan a una altura de casi 30 metros. [3]

En Perú existe la ciudadela de Chan Chan, la ciudad de barro más grande de América, perteneciente a la Cultura Chimú, (1200-1480). Chan Chan se ubica en el valle de Moche, frente al mar, a mitad de camino entre el balneario de Huanchaco y la ciudad de Trujillo, capital del departamento de La Libertad en la costa norte del Perú. El sitio arqueológico cubre un área aproximada de veinte kilómetros cuadrados. La zona central está formada por un conjunto de diez recintos amurallados (llamados "ciudadelas") y otras pirámides solitarias. Este conjunto central, cubre un área de seis kilómetros cuadrados, aproximadamente. El resto, está formado por una multitud de pequeñas estructuras mal conservadas, veredas, canales, murallas y cementerios.[3]

En España, es característico, entre otras, de las regiones secas de Castilla y León donde se añade paja al barro. Las construcciones de adobe se suelen remozar con una capa del mismo barro con lo que dan ese aspecto tan curioso de las casas típicas de Tierra de Campos. También es usual en regiones semi-desérticas de África, América Central y América del Sur (rancho.)[3]

En México, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Argentina y en el sur y norte de Chile las casas de adobe son aun patrimonio de muchas familias humildes, que conservan esta tradición desde tiempos inmemoriales. Mezclar pasto seco con el barro permite una correcta aglutinación, gran resistencia a la intemperie y evita que los bloques una vez solidificados tiendan a agrietarse. Posteriormente los bloques se adhieren entre sí con barro para levantar muros.[3]

I.2. Características del adobe.

El adobe es un material de arcilla, arena, agua y algún aditivo estabilizador. Difundido y utilizado en todo el mundo desde hace miles de años. Su colado se hace en moldes de madera o de lámina de metal con dimensiones (10 x 24 x 34) cm aprox. (4” x 10” x 14”) con un peso promedio de unos 14 kilos. Tales que sean de fácil manejo para la persona que lo va a trabajar (albañil). Es secado al sol y al aire libre y es caracterizado como un material que se emplea sin cocción previa.[3]

Puede deshacerse con la lluvia por lo que, generalmente, requiere un mantenimiento sostenido, que debe hacerse con capas de barro (revoques de barro). No es correcto hacerlo con mortero de cemento, puesto que la capa resultante es poco permeable al vapor de agua y conserva la humedad interior, por lo que se desharía el adobe desde dentro. Lo mejor para las paredes externas es la utilización de enlucido con base en la cal apagada en pasta, arcilla y arena, para la primera capa, en la segunda, solamente pasta de cal y arena. Para las internas se puede hacer una mezcla de arcilla, arena y agua.[3]

En países de mano de obra barata es muy económico; permite fabricar uno mismo los materiales para construir su propia casa. Antiguamente, en los días que los labradores no tenían faenas que hacer en el campo, fabricaban adobes, que luego vendían al que quisiera hacerse una casa. Es un material que a lo largo de los siglos ha demostrado ser el mejor remedio natural contra las extremas condiciones climáticas. Tiene una gran inercia térmica, por lo que sirve de regulador de la temperatura interna; en verano conserva el frescor, y durante el invierno el calor. [3]

CAPÍTULO II: SUELOS (ORIGEN Y FORMACIÓN)

II.1. El planeta tierra

La **Tierra** es el tercer planeta desde el Sol, el quinto más grande de todos los planetas del Sistema Solar y el más denso de todos, respecto a su tamaño. Se desplaza en una trayectoria apenas elíptica alrededor del Sol a una distancia de unos 150 millones de kilómetros. El volumen de la Tierra es más de un millón de veces menor que el del Sol, mientras la masa terrestre es 81 veces mayor que la de su satélite, la Luna. Es un planeta rocoso geológicamente activo que está compuesto principalmente de roca derretida en constante movimiento en su interior, cuya actividad genera a su vez un fuerte campo magnético. Sobre ese ardiente líquido flota roca solidificada o corteza terrestre, sobre la cual están los océanos y la tierra firme. Las propiedades físicas de la Tierra, combinadas con su órbita e historia geológica, son las que han permitido que perdure la vida hasta nuestros días. Es el único planeta del universo en el que hasta ahora el ser humano conoce la existencia de vida; millones de especies moran en él. La Tierra se formó al mismo tiempo que el Sol y el resto del Sistema Solar, hace 4,567 millones de años, y la vida hizo su aparición en su superficie luego de unos 1,000 millones de años. Desde entonces, la vida ha alterado de manera significativa al planeta. [4]

La tierra posee grandes océanos que ocupan mucha más superficie que la tierra superficial. En estos inmensos cuerpos de agua habitan considerable cantidad de organismos y es en donde se originó toda la vida; parte de la cual migró a la tierra firme posteriormente. En los océanos se formó parte de la tierra firme y submarina. El 71% de la superficie de la Tierra está cubierta por agua. Es el único planeta del sistema solar donde un líquido (agua) puede permanecer en estado sólido, líquido o gaseoso en la superficie. El agua ha sido esencial para la vida. [4]

La Tierra es el único de los cuerpos del Sistema Solar que presenta una tectónica de placas activa; Marte y Venus quizás tuvieron una tectónica de placas en otros tiempos pero, en todo caso, se ha detenido. Esto, unido a la erosión y la actividad biológica que cambia el paisaje, ha hecho que la superficie de la Tierra cambie o se renueve constantemente,

eliminando por ejemplo, casi todos los restos de cráteres que podemos encontrar en otros cuerpos rocosos del sistema solar, como en la Luna. [4]

La Tierra posee un único satélite natural, la Luna. El sistema Tierra-Luna es bastante singular, debido al gran tamaño relativo del satélite respecto al planeta que orbita.

II.2. Composición y estructura de la tierra.

La Tierra tiene una estructura compuesta por cuatro grandes zonas o capas: la geosfera, la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera. Estas capas poseen diferentes composiciones químicas y comportamiento geológico. Su naturaleza puede estudiarse a partir de la propagación de ondas sísmicas en el interior terrestre y a través de las medidas de los diferentes momentos gravitacionales de las distintas capas obtenidas por diferentes satélites orbitales.

II.2.1. La geosfera.

Los geólogos han diseñado dos modelos geológicos que establecen una división de la estructura terrestre, el modelo geostático y el modelo geodinámico. [5]

Modelo geostático

Según este modelo la Tierra está subdividida en las siguientes capas:

- **Corteza.** Es la capa más superficial de todas las que forman la Tierra; se extiende a partir de la discontinuidad de Mohorovici y es variable; por ejemplo, en los fondos oceánicos sólo alcanza 10 km mientras que por debajo de los continentes llega a tener de 35 a 40 km.

Esta capa se formó por enfriamiento y representa el 1% de la masa de la Tierra. Está compuesta por materiales sólidos, en general, pero en su interior existen grandes cantidades de agua, gases y materiales magnéticos. [5]

Según los estudios más recientes se ha llegado a la conclusión de que esta capa comprende las tres subcapas siguientes:

- a) Capa basáltica o SiMa,
- b) Capa granítica o SiAl
- c) Capa sedimentaria.

Capa basáltica o SiMa: Está formada por roca basáltica rica en silicatos de magnesio, principalmente, así como de hierro y calcio; es la parte más cercana al manto y su espesor es de 10 km en los fondos oceánicos. También se le conoce con el nombre de corteza oceánica ya que sobre ella están los océanos. [5]

Capa granítica o SiAl: Está formada por rocas graníticas, ricas en silicatos de aluminio, principalmente, además de hierro y calcio; es la capa intermedia y su espesor varía entre 35 y 40 km en los continentales. Ésta capa es rica en sílice (SiO_2) y aluminio, es de tipo ácido y con una densidad media de 2.7. [5]

Se le conoce también como corteza continental por ser la base de los bloques continentales.

Capa sedimentaria: Como su nombre lo indica, está formada por rocas sedimentarias; su espesor varía entre 500 y 1,000 m en los fondos oceánicos y de varios miles de metros en los continentes. Esta capa es discontinua. [5]

- **Manto.** Es una capa intermedia entre la corteza y el núcleo que llega hasta una profundidad de 2,900 km. El manto está compuesto por peridotita. El cambio de la corteza al manto está determinado por la discontinuidad de Mohorovicic. El manto se divide a su vez en manto superior y manto inferior. Entre ellos existe una separación determinada por las ondas sísmicas, llamada discontinuidad de Repetti (700 km). [5]
- **Núcleo.** Es la capa más profunda del planeta; tiene un espesor de 3,475 km y alcanza temperaturas de hasta 6,700 °C. El cambio del manto al núcleo está

determinado por la discontinuidad de Gutenberg (2,900 km). El núcleo está compuesto de una aleación de hierro y níquel. A su vez está subdividido en el núcleo interno, sólido, y el núcleo externo, es líquido, donde se genera el campo magnético terrestre. Esta división se produce en la discontinuidad de Wiechert-Lehmann-Jeffreys (5,150 km). [5]

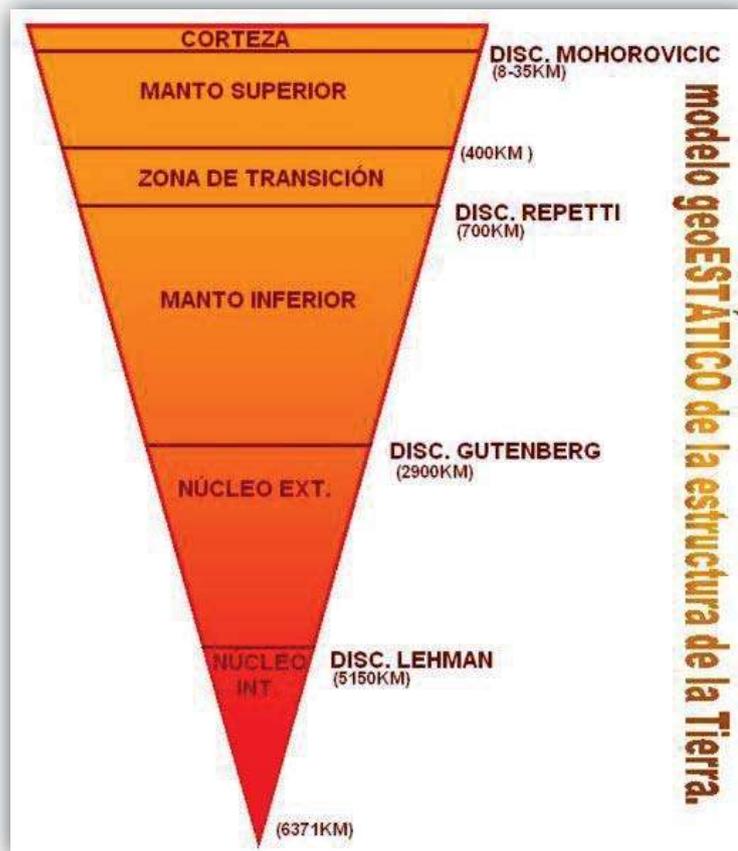


Figura. 2. Modelo geostático del interior terrestre

<http://es.wikipedia.org/wiki/Tierra>. (consulta Febrero de 2010)

Modelo geodinámico

Según este modelo la Tierra está subdividida en las siguientes capas:

- **Litosfera.** Es la parte más superficial que se comporta de manera elástica. Tiene un espesor de 250 km y abarca la corteza y la porción superior del manto.
- **Astenosfera.** Es la porción del manto que se comporta de manera fluida. En esta capa las ondas sísmicas disminuyen su velocidad.
- **Mesosfera.** También llamada manto inferior. Comienza a los 700 km de profundidad, donde los minerales se vuelven más densos sin cambiar su composición química. Está formada por rocas calientes y sólidas, pero con cierta plasticidad.
- **Capa D.** Se trata de una zona de transición entre la mesosfera y la endosfera. Aquí las rocas pueden calentarse mucho y subir a la litosfera, pudiendo desembocar en un volcán.
- **Endosfera.** Corresponde al núcleo del modelo geoestático. Formada por una capa externa muy fundida donde se producen corrientes o flujos y otra interna, sólida y muy densa. [5]

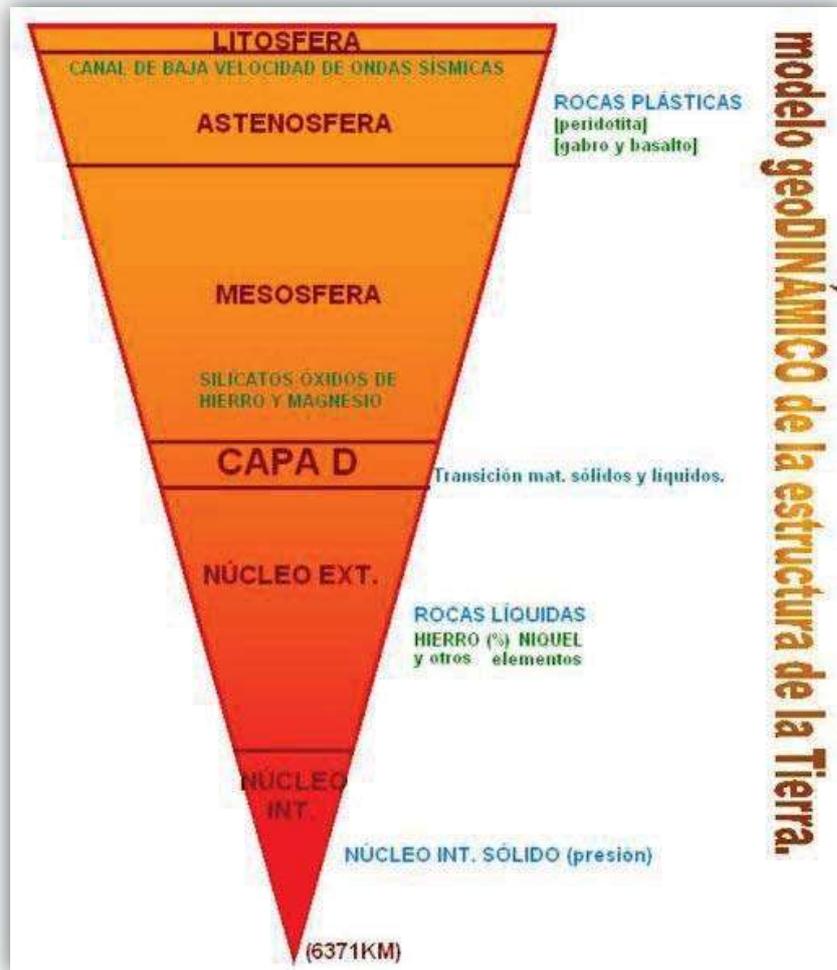


Figura. 3. Modelo geodinámico del interior terrestre

<http://es.wikipedia.org/wiki/Tierra>. (consulta Febrero de 2010)

Suprayaciendo a la corteza terrestre propiamente dicha, existe una pequeña capa, formada por la disgregación y descomposición de sus últimos niveles; esta pequeña pátina del Planeta, es el suelo, del cual se es tema importante en este trabajo ya que de ahí se desprende el material sobre el cual se hace análisis en el proyecto. [5]

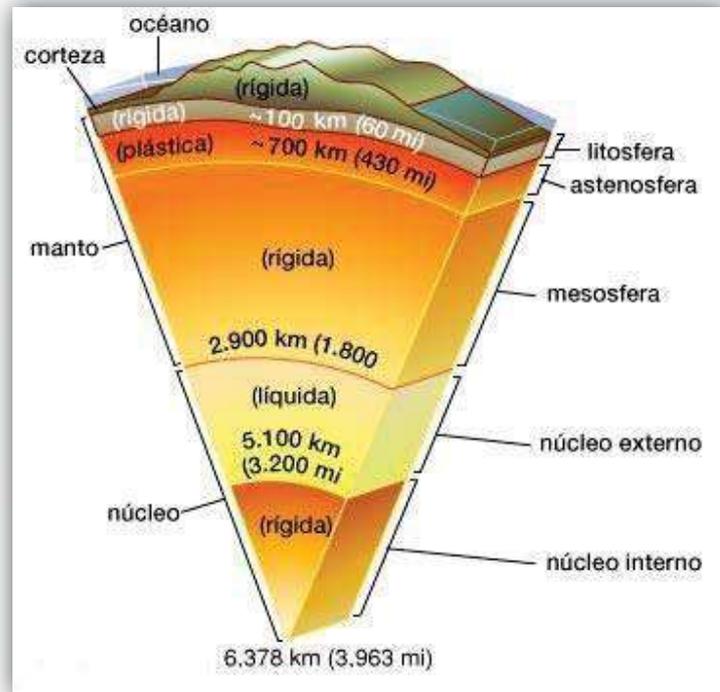


Figura 4. Estructura interna de la tierra

<http://es.wikipedia.org/wiki/Tierra>. (consulta febrero de 2010)

II.2.2. La hidrosfera.

La Tierra es el único planeta en nuestro sistema solar que tiene una superficie líquida. El agua cubre un 71% de la superficie de la Tierra (97% de ella es agua de mar y 3% agua dulce), formando cinco océanos y seis continentes. [5]

La Tierra está realmente a la distancia del Sol adecuada para tener agua líquida en su superficie. No obstante, sin el efecto invernadero, el agua en la Tierra se congelaría. Al inicio de la existencia del Sistema Solar el Sol emitía menos radiación que en la actualidad, pero los océanos no se congelaron porque la atmósfera de primera generación de la Tierra poseía mucho más CO₂, y por tanto el efecto invernadero era mayor. [5]

En otros planetas, como Venus, el agua desapareció debido a que la radiación solar ultravioleta rompe la molécula de agua y el ion hidrógeno, que es ligero, escapa de la

atmósfera. Este efecto es lento, pero inexorable. Ésta es una hipótesis que explica por qué Venus no tiene agua. En la atmósfera de la Tierra, una tenue capa de ozono en la estratosfera absorbe la mayoría de esta radiación ultravioleta, reduciendo el efecto. El ozono protege a la biosfera del pernicioso efecto de la radiación ultravioleta. La magnetosfera también actúa como un escudo que protege al planeta del viento solar. [5]

La masa total de la hidrosfera es aproximadamente 1.4×10^{21} kg.

II.2.3. La atmósfera.

La Tierra tiene una espesa atmósfera compuesta en un 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno molecular y 1% de argón, más trazas de otros gases como anhídrido carbónico y vapor de agua. La atmósfera actúa como una manta que deja entrar la radiación solar pero atrapa parte de la radiación terrestre (efecto invernadero). Gracias a ella la temperatura media de La Tierra es de unos 17 °C. La composición atmosférica de la Tierra es inestable y se mantiene por la biosfera. Así, la gran cantidad de oxígeno libre se obtiene por la fotosíntesis de las plantas, que por la acción de la energía solar transforma CO₂ en O₂. El oxígeno libre en la atmósfera es una consecuencia de la presencia de vida (de vegetación) y no al revés. [5]

Las capas de la atmósfera son: la troposfera, la estratosfera, la mesosfera, la termosfera, y la exosfera. Sus alturas varían con los cambios estacionales.

La masa total de la atmósfera es aproximadamente 5.1×10^{18} kg.

II.2.4. La biosfera.

Hasta el 2010, la Tierra es el único lugar del universo que se conoce con vida. Las formas de vida del planeta Tierra forman la biosfera. La biosfera comenzó a evolucionar hace aproximadamente 3500 millones de años (3.5×10^9). La hipótesis Gaia es un modelo científico de la biosfera terrestre formulado por el biólogo James Lovelock que sugiere que la vida sobre la Tierra organiza las condiciones climáticas para favorecer su propio desarrollo. [5]

II.3. Suelo.

Es común creencia la de que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización. Pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían "vectorialmente". En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y éste es un hecho del que se hace abundante aplicación. [6]

"Suelo" es un término del que hacen uso diferentes profesionistas. La interpretación varía de acuerdo con sus respectivos intereses. Para el Agrónomo, por ejemplo, la palabra se aplica a la parte superficial de la corteza capaz de sustentar vida vegetal, siendo esta interpretación demasiado restringida para el Ingeniero. Para el Geólogo es todo material intemperizado en el lugar en que ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie; esta definición peca de parcial en Ingeniería, al no tomar en cuenta los materiales transportados no intemperizados posteriormente a su transporte. El agua contenida en el suelo juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico del suelo, que debe considerarse como parte integral del mismo. [6]

El intemperismo, proceso por medio del cual las rocas experimentan un cambio físico o químico, es uno de los importantes procesos geológicos. Provee el intemperismo mucho del material que llega a componer las rocas sedimentarias, y es responsable de la formación de suelos.

II.4. Formación de suelos.

El suelo es producido por el intemperismo, es decir por la fractura y el rompimiento de varios tipos de rocas en piezas más pequeñas mediante procesos mecánicos y químicos.

II.4.1. El intemperismo mecánico.

El término desintegración mecánica se refiere a la intemperización de las rocas por agentes físicos, tales como cambios periódicos de temperatura, acción de la congelación del agua en las juntas y grietas de las rocas, efectos de organismos, plantas, etc. Por estos

fenómenos las rocas llegan a formar arenas o, cuando mucho, limos y sólo en casos especiales arcillas. [7]

Acción del congelamiento. Cuando se congela el agua en las grietas, fracturas, o poros, de las rocas, se dilata. Este proceso de expansión puede ser de 2 tipos: Acuñaamiento y levantamiento por congelación. Ambos tipos de ejercen suficiente presión para romper la roca, estas presiones se dirigen lateralmente en el acuñaamiento. [7]

Alteración por cambios de temperatura. En algunas áreas de la tierra, particularmente en ciertas regiones montañosas y en zonas desérticas, las rocas están expuestas a cambios drásticos de temperatura casi cada día, las rocas de éstas regiones se expanden cuando se calienta en el transcurso del día y se contraen cuando se enfrentan a las temperaturas congelantes de la noche. Este proceso, repitiéndose sobre los largos periodos de tiempo, causará que las pequeñas grietas y hendiduras permitan la acción de otros agentes del intemperismo, tales como el acuñaamiento o la disolución. El calor emanante de los incendios de bosques o de llanuras puede también acelerar la descomposición de las rocas. [7]

Efectos de organismos. Las actividades de las plantas y de los animales también promueve la desintegración de las rocas. Las raíces de los arboles, que con frecuencia crecen en las grietas de las rocas, pueden ejercer suficiente presión para separar los fragmentos. Además, algunos animales excavadores como los roedores, los gusanos y las hormigas traen a la superficie las partículas rocosas que están así expuestas a la acción del intemperismo. También incluidas aquí están muchas de las actividades humanas. La desintegración extensiva de la roca comúnmente acompaña a operaciones tales como la construcción de caminos, la minería, el cultivo entre otras actividades más. [7]

II.4.2. El intemperismo químico.

El intemperismo químico, o descomposición, produce un rompimiento de la roca, que puede destruir los minerales originales y formar nuevos. El intemperismo físico produce solamente fragmentos más pequeños de la roca madre; el intemperismo químico

ocasiona la formación de materiales de roca difieren básicamente de la roca original. Aunque los cambios químicos ocurran en una variedad de maneras, los procesos de descomposición más comunes son la oxidación, la hidratación la carbonatación y la disolución. [7]

Oxidación. La oxidación se realiza cuando el oxígeno, asistido de aire húmedo, se combina con minerales para formar los óxidos. Las rocas y los minerales que contienen compuestos de hierro son especialmente susceptibles a este tipo de descomposición. La oxidación de los compuestos de hierro, que produce el derrumbe, es también responsable del color de muchas rocas y suelos rojos, amarillos, y cafés. Además ciertos compuestos (por ejemplo la pirita) forman ácidos cuando se oxidan. Estos ácidos atacan a la roca y aceleran por lo tanto el proceso de la descomposición. [7]

Hidratación. La unión química del agua con otra sustancia se llama hidratación. Las rocas y los minerales sujetos a este proceso producen frecuentemente nuevos compuestos, especialmente silicatos y óxidos hidratados. Algunos ejemplos son: la conversión de anhidrita a yeso, y la reacción entre la hematita y el agua que resulta en limonita. La hidratación es también el proceso por el cual los feldespatos son convertidos a minerales de arcilla. [7]

Además del efecto químico de la hidratación, ocurre una expansión física de los minerales durante este proceso. Zonas de debilidad se crean así dentro de la roca, lo cual acelera su destrucción física.

Carbonatación. El bióxido de carbono (CO_2), que está generalmente presente en el aire, en el agua y en los suelos, se une químicamente de modo regular a ciertos minerales de roca, alterando ampliamente la composición de aquellos. Las sustancias así compuestas (los carbonatos y los bicarbonatos) son relativamente solubles y por lo tanto, fácilmente arrancados y llevados a otro sitio. Además la unión del anhídrido carbónico y del agua resulta en formación del ácido carbónico, (H_2CO_3), que es un agente eficaz en la agresión química de minerales tales como la calcita y la dolomía. [7]

Disolución. La disolución proceso por el cual los minerales y las rocas se disuelven en agua, juega un papel importante en el intemperismo químico. Aunque tenga el agua efecto de solvente en todos los minerales, la disolución se acelera enormemente con la adición de ácido carbónico o de ácidos derivados de la descomposición de desperdicios corporales de los organismos. La mayor parte de este trabajo se lleva a cabo por las aguas subterráneas, que remueven los minerales de la roca y del suelo, infiltrándose hacia abajo. El intemperismo por disolución, conocido también como la lixiviación, puede también disolver los agentes de cementación en las rocas sedimentarias y lograr su descomposición. [7]

No debe creerse, sin embargo, que las reglas anteriores sean inmutables; la naturaleza suele actuar como una complejidad que desafía cualquier regulación. Por ejemplo, en países fríos o secos pueden existir formaciones arcillosas de importancia, cuando el aporte de corrientes de agua quede en condiciones favorables para constituir un depósito. [7]

Los suelos deben, pues, su origen a una tal variedad de causas que excede todo poder de descripción detallada. El resultado de ese concurso de causas, es una inmensa diversidad de tipos de suelos resultantes. También debe notarse que su formación ha ocurrido a través de las Eras Geológicas, tal como sigue ocurriendo hoy. [7]

II.5. Clasificación de los suelos de acuerdo a su origen.

Los productos del ataque de los agentes de intemperismo pueden quedar en el lugar, directamente sobre la roca de la cual se derivan, dando así origen a suelos llamados residuales. Pero esos productos pueden ser removidos del lugar de formación, por los mismos agentes geológicos y redepositados en otra zona. Así se generan suelos que sobreyacen sobre otros estratos sin relación directa con ellos; a estos suelos se les denomina transportados. [8]

Existen en la naturaleza numerosos agentes de transporte, de los cuales pueden citarse como principales los glaciares, el viento, los ríos y corrientes de agua superficial, los mares y las fuerzas de gravedad; estos factores actúan a menudo combinándose.

La combinación del escurrimiento de agua en las laderas de colinas y montes y de las fuerzas del campo gravitacional, forma los depósitos de talud, en las faldas de las elevaciones, estos depósitos suelen ser heterogéneos, sueltos y predominantemente formados por materiales gruesos. El escurrimiento de torrentes produce arrastre de materiales de gran tamaño (mayor a velocidades crecientes en el agua), que se depositan en forma graduada a lo largo de su curso, correspondiendo los materiales más finos a las zonas planas de las valles. [8]

Los ríos acarrear materiales de muy diversas graduaciones, depositándolos a la largo de su perfil, según varíe la velocidad de su curso; al ir disminuyendo ésta, la capacidad de acarreo de la corriente se hace menor, depositándose los materiales más gruesos. De esta manera el río transporta y deposita suelos según sus tamaños decrecientes, correspondiendo las partículas más finas (limos y arcillas) a depósitos próximos a su desembocadura.

Los depósitos lacustres son generalmente de grano muy fino, a causa de la pequeña velocidad con que las aguas fluyen en los lagos.

Los depósitos marinos (formados por el mar) suelen ser estratificados, reflejando muchas veces las características de las costas que los mares bañen.

Los depósitos glaciares están formados por suelos heterogéneos, que van desde grandes bloques, hasta materiales muy finamente granulados, a causa de las grandes presiones desarrolladas y de la abrasión producida por el movimiento de las masas de hielo.

Los vientos pueden arrastrar partículas cuyo tamaño puede variar desde el limo hasta el de las arenas gruesas; estos arrastres pueden hacer que las partículas se depositen a muchos kilómetros de su lugar de origen. Dos tipos principales de suelo deben su formación al arrastre del viento: el loess y los médanos. El loess puede definirse como un

depósito eólico, constituido por una mezcla uniforme de arenas finas cuarzosas, algo feldespáticas y limos, estructurado en forma abierta y algo cohesiva. Esta cohesión suele atribuirse a la presencia de carbonatos de calcio solubles, en los que se ha querido ver un elemento cementante; sin embargo, investigaciones recientes parecen indicar que tales carbonatos están contenidos en grumos aislados, que no pueden proporcionar cementación a la masa y, por lo tanto, parece que esta cementación debe atribuirse a la existencia de películas arcillosas envolviendo los granos depositados. [8]

Los médanos son aglomeraciones de arena suelta, que fue arrastrada por el viento a poca altura y que se vio detenida por algún obstáculo natural de la superficie del terreno. Suelen estar formados por arenas cuarzosas uniformes, con algo de mica.

En general un suelo transportado queda descrito por un perfil estratigráfico, que resalte la secuencia de colocación y el espesor de sus estratos.

En lo que respecta a los suelos residuales, existen dos conceptos que juegan un papel muy importante. Son estos el perfil de meteorización y el conjunto de estructuras heredadas. El primero es la secuencia de materiales con diferentes propiedades, que se ha formado en el lugar donde se le encuentra y que sobreyace a la roca no meteorizada. Se forma, tanto por ataque mecánico como por descomposición química, y puede variar considerablemente de un punto a otro, sobre todo por variaciones locales en el tipo y estructura de la roca, topografía, condiciones de erosión, régimen de aguas subterráneas y clima. [8]

Las estructuras heredadas consisten en diaclasas, exfoliaciones, juntas, grietas, fallas y otros defectos estructurales que muestra el suelo como herencia de los que tenía la roca original. Su influencia es tal que frecuentemente las propiedades mecánicas de una estructura intacta del material no pueden considerarse en absoluto representativas de las propiedades del conjunto. Un suelo residual queda definido por estos dos conceptos.

II.6. Clasificación de los suelos de acuerdo a su tamaño de partícula.

Independientemente del origen de los suelos, los tamaños de las partículas, en general, que conforman un suelo, varían en un amplio rango. Los suelos en general son llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas. Para describir los suelos por el tamaño de las partículas varias organizaciones desarrollaron límites de tamaños de suelo separado. Estas organizaciones son: el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), la Asociación Americana Funcionarios de Carreteras Estatales y del Transporte (AASHTO), el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos y la Oficina de Restauración de Estados Unidos, el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) en la actualidad el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es casi universalmente aceptado este sistema ha sido adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). [9]

Las *gravas* son fragmentos de rocas ocasionalmente con partículas de cuarzo, feldespato y otros minerales.

Las *partículas de arena* están formadas principalmente de cuarzo y feldespatos, aunque también están presentes, a veces, otros granos minerales.

Los *limos* son fracciones microscópicas de suelos que consisten en granos muy finos de cuarzo y algunas partículas en forma de escamas (hojuelas) que son fragmentos de minerales micáceos.

Las *arcillas* son principalmente partículas microscópicas en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales, las arcillas se definen como partículas menores a 0.002. En algunos casos, las partículas de tamaño entre 0.002 y 0.005 mm también se denominan arcillas. Las partículas se clasifican como arcilla con base en su tamaño y no contienen necesariamente materiales arcillosos. Las arcillas se definen como aquellas partículas que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua (la plasticidad es la propiedad tipo masilla de las arcillas cuando contienen cierta

cantidad de agua). Los suelos no arcillosos pueden contener partículas de cuarzo, feldespato o mica, suficientemente pequeñas para caer dentro de la clasificación de las arcillas. Por consiguiente, es apropiado para las partículas de suelo menores que 2μ o 5μ como se define bajo diferentes sistemas ser llamadas partículas tamaño arcilla en vez de arcilla. Las partículas de arcilla son en su mayoría de tamaño coloidal ($<1\mu$) con 2μ de límite superior. [9]

A continuación se presenta los límites de suelo separado de algunos organismos:

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas) < 0.075	

Cuadro. 1. Limite de tamaños de suelos separados.

II.6.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Este sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino si más de la mitad de sus partículas, en peso son finas. [10]

Suelos gruesos. El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo. El significado se especifica a continuación.

- a) Gravas y suelos en que predominen éstas. Símbolo genérico *G* (gravel).
- b) Arenas y suelos arenosos. Símbolo genérico *S* (sand).

Las gravas y arenas se separan con la malla N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico *G*, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla 200) no pasa la malla N° 4, y es del grupo genérico *S*, en caso contrario.

Las gravas y las arenas se subdividen en cuatro tipos:

1. Material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Símbolo *W* (well graded). En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos *GW* y *SW*.
2. Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Símbolo *P* (poorly graded). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos *GP* y *SP*.
3. Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. Símbolo *M* (del sueco *mo* y *mjala*). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos *GM* y *SM*.
4. Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Símbolo *C* (clay). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos *GC* y *SC*.

Grupo GW y SW. Estos suelos son bien graduados y con pocos finos o limpios por completo. La presencia de los finos que puedan contener estos grupos no debe producir cambios apreciables en las características de resistencia de la fracción gruesa, ni interferir con su capacidad de drenaje. Los anteriores requisitos se garantizan en la práctica, especificando que en estos grupos el contenido de partículas finas no sea mayor de un 5%, en peso. La graduación se juzga, en el laboratorio, por medio de los coeficientes de uniformidad y de curvatura. Para considerar una grava bien graduada se exige que su coeficiente de uniformidad sea mayor que 4, mientras el de curvatura debe estar comprendido entre 1 y 3. En el caso de las arenas bien graduadas, el coeficiente de uniformidad será mayor de 6, en tanto el de curvatura debe estar entre 1 y 3. [10]

Grupo GP y SP. Estos suelos son mal graduados, es decir, son de apariencia uniforme o presentan predominio de un tamaño o de un margen de tamaños, faltando alguno

intermedios; en laboratorio, debe satisfacer los requisitos señalados para los dos grupos anteriores, en lo referente a su contenido de sus partículas finas, pero no cumplen los requisitos de graduación indicados para su consideración como bien graduados.

Grupo GM y SM. En estos grupos el contenido de finos afecta las características de resistencia, esfuerzo-deformación y la capacidad de drenaje libre de la fracción gruesa; en la práctica se ha visto que esto ocurre para porcentajes de finos superiores a 12%, en peso, por lo que esa cantidad se toma como frontera inferior de dicho contenido de partículas finas. La plasticidad de los finos estos grupos varía entre nula y media; es decir, es requisito que los límites de plasticidad localicen a la fracción que pasa la malla 40 debajo de la línea A de la carta de plasticidad o bien que su índice de plasticidad sea menor que 4. [10]

Grupo GC y SC. El contenido de finos de estos grupos de suelo debe ser mayor que 12%, en peso, y por las mismas razones expuestas para los grupos *GM* y *SM*. Sin embargo, en estos casos, los finos son de media a lata plasticidad; es ahora requisito que los límites de plasticidad sitúen a la fracción que pasa la malla N° 40 sobre la línea A de la carta de plasticidad, teniéndose, además, la condición de que el índice plástico sea mayor que 7.

A los suelos gruesos con contenido de finos comprendido entre 5% y 12%, en peso, el Sistema Unificado los considera casos de frontera, adjudicándoles un símbolo doble. Por ejemplo, un símbolo *GP-GC* indica una grava mal graduada, con un contenido entre 5% y 12% de finos plásticos (arcillosos).

Cuando un material no cae claramente dentro de un grupo, deberán usarse también símbolos dobles, correspondientes a casos de frontera. Por ejemplo, el símbolo *GW-SW* se usará para un material bien graduado, con menos de 5% de finos y formada de su fracción gruesa por iguales proporciones de grava y arena.

Suelos finos. El sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, elegidas por un criterio similar al usado para los suelos gruesos, y dando lugar a las siguientes divisiones:

- a) Limos inorgánicos, de símbolo genérico *M* (del sueco *mo* y *mjala*).

- b) Arcillas inorgánicas, de símbolo genérico *C* (clay).
- c) Limos y arcillas orgánicas, de símbolo genérico *O* (organic).

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdivide, según su límite líquido, en dos grupos. Si éste es menor de 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L (low compressibility), obteniéndose por esta combinación los grupos *ML*, *CL* y *OL*. Los suelos finos con límite líquido mayor 50%, o sea de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico la letra H (high compressibility), teniéndose así los grupos *MH*, *CH* y *OH*.

Ha de notarse que las letras L y H no se refieren a baja o alta plasticidad, pues esta propiedad del suelo, como se ha dicho, ha de expresarse en función de los parámetros (*LL* e *I_p*), mientras que en el caso actual sólo el valor del límite líquido interviene. Por otra parte, ya se hizo notar que la compresibilidad de un suelo es una función directa del límite líquido, de modo que un suelo es más comprensible a mayor límite líquido. [10]

Los suelos altamente orgánicos, usualmente fibrosos, tales como turbas y suelos pantanosos, extremadamente compresibles, forman un grupo independiente de símbolo *Pt* (del inglés peat; turba).

Grupo CL y CH. En estos grupos se encasillan las arcillas inorgánicas. El grupo *CL* comprende a la zona sobre la línea A de la carta de plasticidad, definida por: $LL < 50\%$ e $I_p > 7\%$.

El grupo *CH* corresponde a la zona arriba de la línea A de la carta de plasticidad, definida por $LL > 50\%$. Las arcillas formadas por descomposición química de cenizas volcánicas, tales como la bentonita o la arcilla del Valle de México, con límites líquidos de hasta 500%, se encasillan en el grupo *CH*. [10]

Grupo ML y MH. El grupo *ML* corresponde la zona bajo la línea A de la carta de plasticidad, definida por $LL < 50\%$ y la porción sobre la línea A de la carta de plasticidad

con $I_p < 4\%$. El grupo MH corresponde a la zona debajo de la línea A de la carta de plasticidad, definida $LL > 50\%$.

Los suelos finos que caen sobre la línea A de la carta de plasticidad y con $4\% < I_p < 7\%$ se consideran casos de frontera, asignándoles el símbolo doble *CL- ML*.

Grupos OL y OH. Las zonas correspondientes a estos dos grupos son las mismas que las de los grupos *ML* y *MH*, respectivamente, si bien los orgánicos están siempre en lugares próximos a la línea A de la carta de plasticidad.

Grupo Pt. Las pruebas de límites pueden ejecutarse en la mayoría de los suelos turbosos, después de un completo remoldeo. El límite líquido de estos suelos suele estar entre 300% y 500%, quedando su posición en la carta de plasticidad netamente debajo de la línea A de la carta de plasticidad; el índice plástico normalmente varía entre 100% y 200%.

II.7. Las arcillas.

Las arcillas constituyen casi el 70% de la corteza terrestre y la mayor ventaja de estos materiales, aparte de su disponibilidad, es que debido a su estructura laminar, obligan a que una reacción química se produzca en un plano y no en el espacio tridimensional, lo que hace que ésta sea mucho más rápida. Además, la facilidad para modificar sus propiedades adecuándolas a las necesidades concretas de la aplicación a la que son destinadas, justifica su utilización. [11]

Se define la arcilla como partículas microscópicas en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales, las arcillas se definen como partículas menores a 0.002. En algunos casos, las partículas de tamaño entre 0.002 y 0.005 mm también se denominan arcillas. Las partículas se clasifican como arcilla con base en su tamaño y no contienen necesariamente materiales arcillosos. Las arcillas se definen como aquellas partículas que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua(xxx) (la plasticidad es la propiedad tipo masilla de las arcillas cuando contienen cierta cantidad de agua). Los suelos no arcillosos pueden contener partículas de cuarzo, feldespato o mica, suficientemente pequeñas para caer dentro de la clasificación de las arcillas. Por

consiguiente, es apropiado para las partículas de suelo menores que 2μ o 5μ como se define bajo diferentes sistemas ser llamadas partículas tamaño arcilla en vez de arcilla. Las partículas de arcilla son en su mayoría de tamaño coloidal ($<1\mu$) con 2μ de límite superior. [11braja]

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen, casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. [12Juárez Badillo]

Los silicatos forman el árbol genealógico de las arcillas

II.7.1. Silicatos.

No fue sino hasta el año de 1912 cuando, gracias a los físicos Bragg y Laue, que descubrieron las propiedades de los rayos X, fue posible desentrañar la estructura de los minerales. Estos son compuestos cristalinos, es decir, que a escala molecular están formados por planos y caras muy bien definidos, los cuales tienen la propiedad de dispersar los rayos X y producir así patrones de interferencia, los cuales nos proporcionan información muy valiosa sobre los arreglos cristalinos de las sustancias minerales.

Después, con el microscopio electrónico, desarrollado por primera vez por Knoll y Ruska en Alemania en el 1931, fue posible observar directamente los minerales cristalinos, su forma y su geometría [13].

Los silicatos están formados por cristales regulares y, si vamos a una escala más pequeña, veríamos que estos cristales tienen a su vez una unidad básica: el tetraedro (en griego “cuatro caras”), tal y como se ilustra en la figura 5. Esta es el “unidad elemental” con que podemos construir los edificios moleculares que forman a los silicatos.

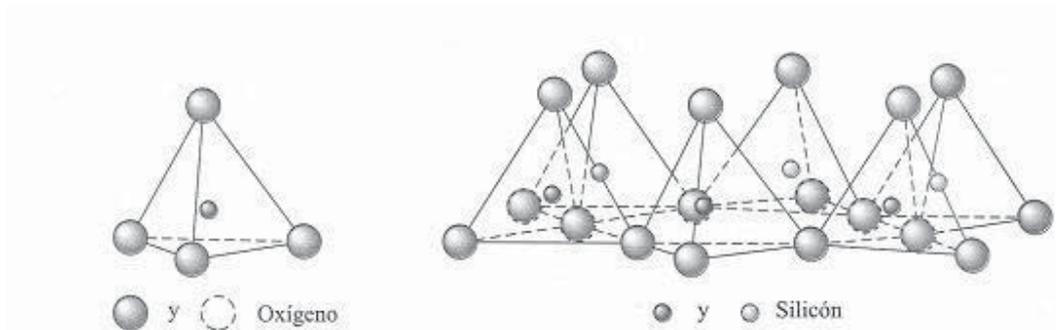


Figura 5. Unidades básicas de los silicatos.

El tetraedro de la figura 5 está compuesto por un átomo central de silicio (Si) y cuatro átomos de oxígeno en las esquinas (O). Si cada átomo de silicio tiene cuatro cargas eléctricas positivas, mientras que cada átomo de oxígeno tiene dos cargas negativas, es necesario que cada uno de los átomos de oxígeno use una de sus cargas para atraer a una de las cargas del silicio, quedando así saturado el átomo central (Si), mientras que las esquinas todavía tienen una carga negativa para enlazarse a otro átomo con carga positiva. Cuando esto último ocurre, entonces tenemos que se puede formar una cadena de tetraedros, mediante los enlaces del tipo:



Similarmente, mediante este mecanismo podemos formar cadenas verticales que se unen a las cadenas horizontales para formar redes, de la manera siguiente: si seguimos armando la estructura, podemos superponer una red encima de otra, a manera de formar unidades tridimensionales [13].

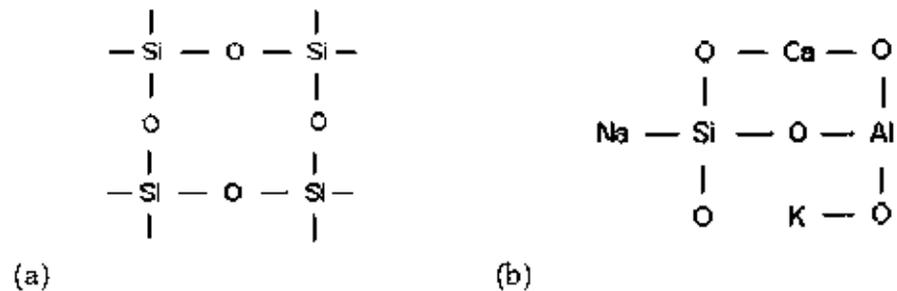


Figura 6. Una cadena de tetraedro (a) y unidades tridimensionales (b).

También podemos sustituir uno de los átomos de silicio por otro, por ejemplo de aluminio (Al), con lo cual la unidad quedaría desequilibrada, ya que el aluminio sólo tiene tres cargas eléctricas positivas en vez de cuatro, dejando una carga negativa "extra" en uno de los átomos de oxígeno, por ejemplo la figura 6(b).

Como se observa en la figura 6, la carga negativa desequilibrada puede ser compensada por un catión positivo, por ejemplo el sodio (Na) o el potasio (K), con lo cual se logra nuevamente una estructura neutra [13].

Existen dos reglas básicas que nos dicen cómo unir dos o más tetraedros

(Reglas de Pauling):

1) La suma de las cargas negativas debe ser igual a la suma de las cargas positivas, de manera que la estructura sea eléctricamente neutra.

2) Todos los elementos con carga positiva (cationes) pueden enlazarse o rodearse de elementos cargados negativamente, coordinándose con ellos de modo que las unidades coordinadas dependen únicamente de los tamaños entre el catión (+) y el anión (-) respectivo.

Existe una tercera regla conocida como Regla de Lowenstein: No es válido enlazar dos tetraedros que tengan un átomo central de aluminio cada uno. Esto nos

indica que dos tetraedros de aluminio sólo pueden enlazarse mediante otro tetraedro intermedio a base de silicio.

Siguiendo estas sencillas reglas podemos armar la estructura de manera que un tetraedro (1T) pueda unirse a otro para formar un arreglo tipo 2T (dos tetraedros) o bien 3T, etc. Así, en la figura I.3 se reúnen todas las posibles combinaciones de tetraedros que dan origen a una serie de vistosas geometrías, en forma de cadena simple, doble, redes de motivos hexagonales, etc. Lo más sorprendente es que cada uno de estos arreglos es típico de alguno de los minerales de silicatos más conocidos. Así vemos que el mineral circón está compuesto de tetraedros aislados (1T), mientras que los piroxenos por cadenas simples de un número infinito de miembros (nT) [13].

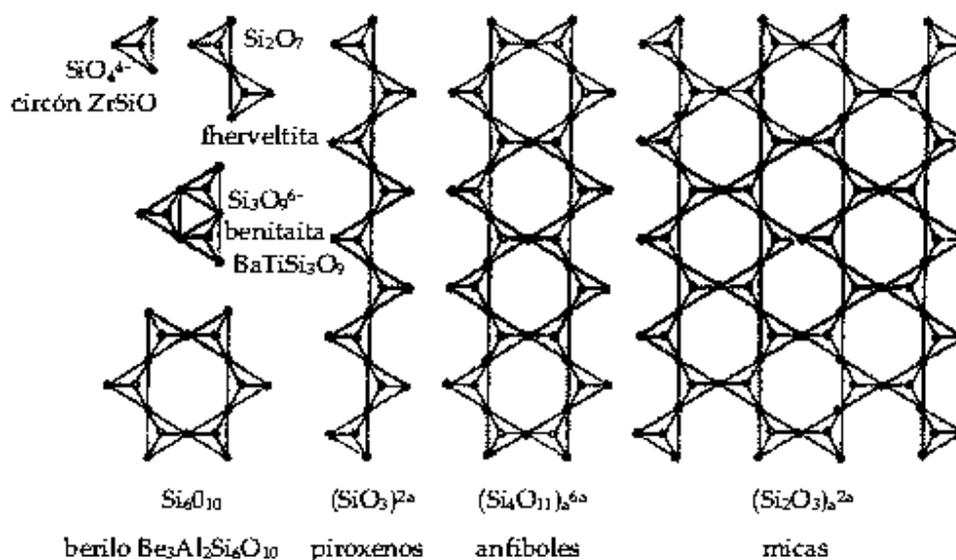


Figura 7. Posibles combinaciones de tetraedros.

En particular, las redes de tetraedros que se extienden a lo largo y a lo ancho, formando hojas completas, constituyen el grupo de filosilicatos, o estructuras laminares, del que forman parte las arcillas.

Una propiedad extraordinaria de estas estructuras es su posibilidad de ser capaces de sustituir al átomo de silicio (Si), situado en el centro de los tetraedros (Figura 7),

por otro de menor carga como el aluminio (Al^{3+}), generando así una deficiencia de carga positiva, o un exceso de carga negativa en el tetraedro, la cual necesita atraer a otros cationes para compensarse, por ejemplo Na, K, Ca, etc. Este es el mecanismo que permite a los silicatos tener propiedades superficiales únicas de acidez e intercambio iónico, tan importantes que a ellas se deben las propiedades catalíticas de las arcillas. Esto es un ejemplo típico de lo que ocurre a menudo en la química, es decir, que los arreglos cristalinos, las sustituciones, etc., representan aspectos físicos, que ocurren a escala molecular, estableciendo o modificando las propiedades químicas de los materiales [13].

II.7.2. Estructura cristalina de las arcillas.

La estructura cristalina de las arcillas está formada principalmente por dos grupos: grupos de sílice tetraédricos y grupos de alúmina octaédricos [14].

Los grupos del mismo tipo están unidos entre sí hexagonalmente formando capas de tetraedros y octaedros (figura I.4).

La estructura final resulta de la condensación de ambas capas para formar las láminas. Para ello se comparten los oxígenos apicales de la capa tetraédrica con los oxígenos libres de la octaédrica. Si un mineral de arcilla presenta un empaquetamiento de una capa tetraédrica y una octaédrica se denomina de tipo 1:1; de una octaédrica entre dos tetraédricas, de tipo 2:1; y si son dos de cada uno, tipo 2:2.

En los huecos octaédricos se alojan generalmente Al^{3+} o Mg^{2+} . Si el ión es el Mg^{2+} , se ocuparán todos los huecos y tendremos una configuración trioctaédrica, pero si es el Al^{3+} , debido a su mayor carga, sólo se ocuparán $2/3$ de los mismos, dando lugar a la estructura dioctaédrica.

El Si^{4+} y el Al^{3+} de la capa tetraédrica y octaédrica respectivamente, pueden ser sustituidos por otros elementos que posean un radio iónico adecuado para adaptarse en la estructura. Este fenómeno, llamado sustitución isomórfica, es responsable de muchas propiedades de los minerales de arcilla. Así, un catión Si^{4+} puede ser reemplazado por un Al^{3+} , y un catión Al^{3+} por un Mg^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Ni^{2+} . Debido

a esto, se ha provocado una densidad de carga negativa, compensada por cationes que se encuentran en el espacio interlaminaar (cationes de cambio), que son normalmente intercambiables y su número constituye la capacidad catiónica de cambio (CCC) de una arcilla, lo cual nos da una idea cualitativa y cuantitativa de la tendencia del mineral a la intercalación. Se define como los miliequivalentes (meq) de cationes intercambiables por 100 g de arcilla. [14].

II.7.3. Clasificación de los minerales de arcilla.

El Comité Internacional para Estudios de arcillas (CIPEA) [9], recomienda las siguientes divisiones y subdivisiones para los minerales de arcillas cristalinas:

a) Silicatos laminares : con empaquetamiento 1:1

con empaquetamiento 2:1

con empaquetamiento 2:2

b) Silicatos fibrosos: sepiolita

paligorskita

Los silicatos laminares (filosilicatos) se pueden clasificar de muchas maneras, siendo una de las más extendida la realizada por Bailey y col. [10]. Basándose en ésta, Mott [11], hace una clasificación, incluyendo los silicatos laminares y fibrosos, tabla I.1.

Los minerales de arcilla se clasifican en ocho grupos principales según el tipo de empaquetamiento (1:1 ó 2:1), densidad de carga y tipo de cationes interlaminares. Cada

uno de estos grupos da lugar a subgrupos según el tipo de capa octaédrica (di- o tri-) y finalmente a especies, atendiendo a la composición química y a la geometría de la superposición de las capas individuales.

Los grupos de minerales de la serpentina, caolín y talco, por tener carga nula y por tanto, no poseer iones en el espacio interlaminar, y el grupo de la vermiculita, por tener una elevada densidad de carga, presentan dificultades para ser utilizados en nuestro trabajo.

Por otro lado, el grupo de la mica tiene carga laminar, pero posee en el espacio interlaminar iones K^+ no hidratables y como resultado de ello pierde la capacidad de hinchamiento y el intercambio del K^+ con otros iones es muy difícil. [14].

Tipo Empaquetamiento	Grupo	Carga	Tipo Interlámina	Di/Tri	Subgrupo
1:1	Serpentina	0	ninguno	Tri	Serpentina
	Kaolin	0	ninguno	Di	Kaolin
2:1	Talco	0	ninguno	Tri	Talco
	Pirofilita	0	ninguno	Di	Pirofilita
	Esmectita	0.6<d<1.2	cationes hidratados	Tri	Saponita
				Di	Montmorillonita (Bentonita)
	Vermiculita	1.2<d<1.8	cationes hidratados	Tri	Vermiculita trioct.
				Di	Vermiculita dioct.
	Mica	2	Normalmente K^+	Tri	Mica trioct.
				Di	Mica dioct.
Mica frágil	4	catión divalente	Tri	Mica frágil trioct.	
			Di	Mica frágil dioct.	
2:2	Clorita	variable	hidróxido en capa oct.	Tri	Clorita trioct.
			Di	Clorita dioct.	
2:1	Sepiolita	variable	alguno	Tri	Sepiolita
	Palygorskita			Di	Palygorskita

El grupo de la clorita presenta carga variable y tiene entre las láminas cationes coordinados octaédricamente con grupos hidroxilo que impiden que se pueda intercambiar.

Los grupos de la palygorskita y sepiolita presentan canales, ocupados por agua, debido a que los tetraedros no disponen sus bases en el mismo plano. Son de estructura fibrosa y no pueden hincharse. Por último, el grupo de la esmectita es el más utilizado en los procesos de apilamiento, ya que posee unas propiedades adecuadas, tales como capacidad de hinchamiento, CCC, estabilidad, apropiado tamaño de partícula, etc. Por este motivo, vamos a estudiar con más detalle este grupo. [14].

II.7.4. clasificación de la arcilla de acuerdo a su estructura reticular.

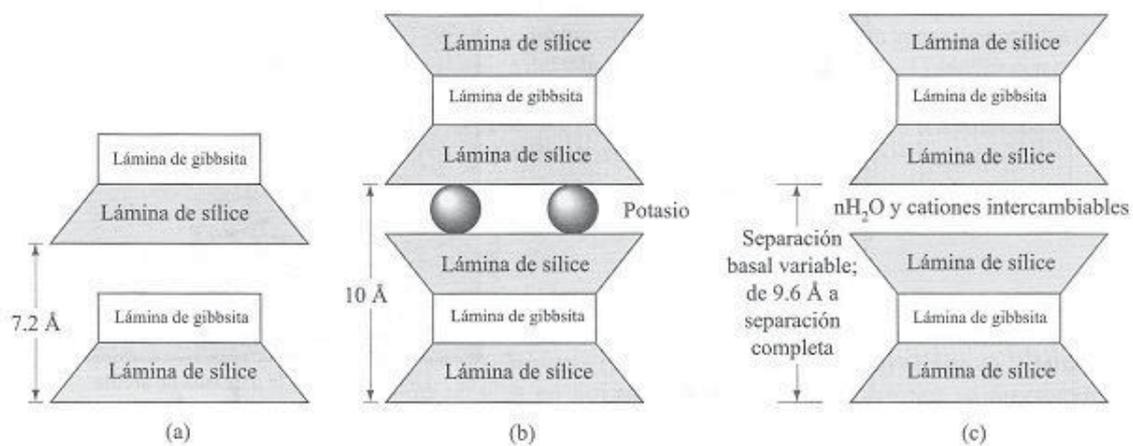
En base a su estructura reticular las arcillas se dividen en:

Caolinita. Consiste en capas repetidas de láminas de elementales de sílice-gibbsita, cada capa es aproximadamente de 7.2 Å de espesor y se mantienen unidas entre sí por enlaces hidrogénicos. La caolinita ocurre como placas, cada una con una dimensión lateral de 1000 a 20 000 Å y un espesor de 100 a 1000 Å. El área superficial de las partículas de caolinita por masa unitaria es aproximadamente de 15 m²/g. El área superficial por masa unitaria se define como superficie específica. [15].

Ilita. Consiste en una lámina de gibbsita enlazada a dos láminas de sílice, una arriba y otra abajo, y es denominada a veces mica arcillosa. Las capas de ilita están enlazadas entre sí por iones de potasio. La carga negativa para balancear los iones de potasio proviene de la sustitución de aluminio por silicio en las láminas tetraédricas. La sustitución de un elemento por otro, sin cambio en la forma cristalina, se conoce como sustitución isomorfa. Las partículas de ilita tienen generalmente dimensiones que varían entre 1000 y 5000 Å y espesores de 50 a 500 Å. La superficie específica de las partículas es aproximadamente de 80 m²/g. [15].

Monmorilonita. Tiene una estructura similar a la ilita, es decir, una lámina de gibbsita intercalada entre dos láminas de sílice. En la Monmorilonita hay sustitución isomorfa de

magnesio y hierro por aluminio en las láminas octaédricas. Los iones de potasio no están aquí presentes como en el caso de la illita y una gran cantidad de agua es atraída hacia los espacios entre las capas. Las partículas de Monmorilonita tienen dimensiones laterales de 1000 a 5000 Å y espesores de 10 a 15 Å. La superficie específica es aproximadamente de 800 m²/g. [15].



Además de caolinita, illita y Monmorilonita, otros minerales arcillosos comunes generalmente encontrados son clorita, haloisita, vermiculita y atapulgita.

Las partículas de arcilla llevan una carga neta negativa sobre la superficie, resultado de una sustitución isomorfa y de una ruptura en la continuidad de la estructura en sus bordes. Cargas negativas mayores se derivan de superficies específicas mayores. Algunos lugares cargados positivamente ocurren también en los bordes de las partículas. [15].

En arcilla seca, la carga negativa es balanceada por cationes intercambiables, como Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ y K⁺, que rodean a las partículas mantenidas juntas por atracción electrostática. Cuando se agrega agua a la arcilla, esos cationes y un pequeño número de aniones flotan alrededor de las partículas de arcilla. A esto se le llama capa difusa doble. La concentración de cationes decrece con la distancia desde la superficie de la partícula. [15].

Las moléculas de agua son polares. Los átomos de hidrogeno no están dispuestos de manera simétrica alrededor de un átomo de oxígeno; más bien, forman un ángulo de enlace

de 105°. En consecuencia, una molécula de agua actúa como una pequeña barra con carga positiva en un extremo y una carga negativa en el otro, y esto se conoce como dipolo.

El agua dipolar es atraída por la superficie cargada negativamente de las partículas de arcilla y por los cationes en la capa doble. Los cationes a su vez son atraídos a las partículas de suelo. Un tercer mecanismo por el cual el agua es atraída a las partículas de arcilla es el enlace hidrogénico, en el que los átomos de hidrógeno en las moléculas de agua son compartidos con átomos de oxígeno sobre la superficie de la arcilla. Algunos cationes parcialmente hidratados en el agua de poros son también atraídos a la superficie de las partículas de arcilla. Estos cationes atraen a las moléculas de agua dipolar. La fuerza de atracción entre el agua y la arcilla decrece con la distancia desde la superficie de las partículas. Toda el agua mantiene unida a las partículas de arcilla por fuerza de atracción se conoce agua de capa doble. La capa interior del agua de capa doble, que se mantiene unida muy fuertemente por la arcilla, se conoce como agua adsorbida y es más viscosa que el agua libre. La orientación del agua alrededor de las partículas de arcilla da a los suelos arcillosos sus propiedades plásticas. [15].

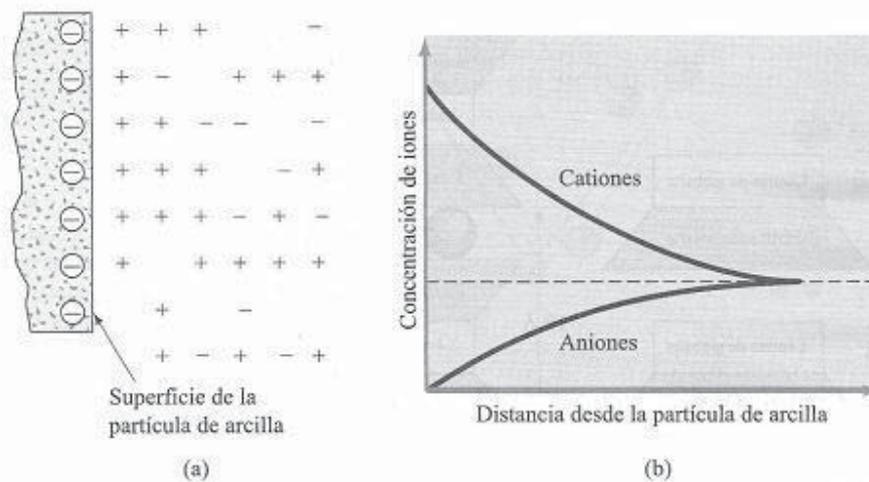


Figura 8.a) Superficie de la partícula, b) aniones y cationes.

Mineral	Densidad de sólidos, G_s
Cuarzo	2.65
Caolinita	2.6
Illita	2.8
Monmorilonita	2.65 – 2.80
Haloisita	2.0 – 2.55
Feldespato de potasio	2.57
Feldespato de sodio y calcio	2.62 – 2.76
Clorita	2.6 – 2.9
Biotita	2.8 – 3.2
Moscovita	2.76 – 3.1
Hornablenda	3.0 – 3.47
Limonita	3.6 – 4.0
Olivina	3.27 – 3.37

Figura 9. Densidad de algunos sólidos.

II.7.5. Propiedades fisicoquímicas de las arcillas.

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 μm)
- Su morfología laminar (filosilicatos).
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas. [16]

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado

variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales. [16]

❖ Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

A continuación se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas:

Caolinita de elevada cristalinidad hasta	15 m^2/g
Caolinita de baja cristalinidad hasta	50 m^2/g
Halloisita hasta	60 m^2/g
Illita hasta	50 m^2/g
Montmorillonita	80–300 m^2/g
Sepiolita	100–240 m^2/g
Paligorskita	100–200 m^2/g

❖ Capacidad de Intercambio catiónico

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un

determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina. [16]

A continuación se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico

(en meq/100 g):

Caolinita:	3-5
Halloisita:	10-40
Illita:	10-50
Clorita:	10-50
Vermiculita:	100-200
Montmorillonita:	80-200
Sepiolita-paligorskita:	20-35

❖ Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita). [16]

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de

procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato). [16]

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

❖ **Hidratación e hinchamiento**

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

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida. [16]

❖ **Plasticidad**

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

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

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

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material. [16]

❖ **Tixotropía**

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

III. MATERIALES Y MÉTODOS DE PRUEBA.

III.1. Materiales.

El material con el que se trabajó para intentar mejorar los aspectos de cambios volumétricos, resistencia mecánica y que al mismo tiempo conservara sus propiedades

físicas como color, fue obtenido del banco las tabiquerías de Santiago Undameo Michoacán, la cual fue denominada mediante el método de difracción de Rayos X, como una arcilla Monmorillonita la cual se describieron sus características anteriormente.

Los elementos que se le adicionaron para tratar el objetivo antes mencionado fueron: cal, cemento, yeso, mucílago de nopal e hidróxido de sodio, en adiciones de 2, 4, 6, 8, 10 % en relación al peso.

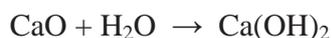
III.1.1. Cal.

La cal hidratada para construcción (Hidróxido de Calcio Ca(OH)_2), conocida también como Cal Apagada, es un polvo de color blanco, hecho a base de piedra caliza calcinada a altas temperaturas, hidratándole después para obtener un producto de la más alta calidad, adecuado para construcción. Excelente para trabajos de cimentación, estabilización de suelos, mampostería, preparación de morteros, acabados y aplanados, impermeabilización y pintura a bajo costo, entre otros. [17]

Este material utilizado para hacer mortero de cal se obtiene de las rocas calizas calcinadas a una temperatura entre 900 y 1200 °C, durante días, en un horno rotatorio o en un horno tradicional, romano o árabe. En estas condiciones el carbonato es inestable y pierde una molécula de óxido de carbono.

La fabricación de cales comprende dos procesos químicos: calcinación e hidratación.

La cal apagada se obtiene a partir de la cal viva haciendo una reacción estequiométrica con agua, esta reacción es exotérmica:



Por lo tanto la fabricación de cales comprende dos procesos químicos: calcinación e hidratación, a las cuales van asociados las operaciones de transporte, trituración y pulverización de la caliza además de la separación por aire y el almacenamiento adecuado de la cal obtenida. [17]

Proceso de calcinado

El proceso de calcinación de la caliza ocurre en hornos del tipo rotatorio y vertical, pero la caliza que se introduce a estos hornos no puede ser cualquier caliza:

- La caliza no puede ser muy porosa o muy húmeda debido a que esto aumenta la demanda de combustible.
- La caliza utilizada no debe tener impurezas del tipo partículas de Si debido a que esta reacciona con el CaO formando silicatos, los cuales se acumulan en el fondo de los hornos, obstruyendo el paso del material

Ejemplos de hornos de calcinado

Los hornos utilizados son de distinto tipo, estos pueden ser:

Rotativos

Usados generalmente para calcinar una caliza con un tamaño pequeño de partícula (6-60) mm.

- Equipados generalmente con calentadores previos y refrigerantes
- Están mejor equipados para la obtención de una cal de calidad debido a su instrumentación
- Produce una cantidad máxima de cal por hombre-hora
- Su gran desventaja es su alto consumo de combustible

Más del 50% de la cal producida en EEUU se produjo en este tipo de hornos

Verticales

Usados generalmente cuando la cal obtenida no requiere de una gran pureza

- Son más simples
- Constan de un alimentador de combustible y una correa calentadora

- Rendimiento de combustible es mayor que el horno rotativo

Actualmente existen hornos más modernos.

Factores que influyen en las propiedades de la cal obtenida

Muchas de las propiedades de la cal dependen de la calidad de la caliza utilizada como también del proceso de calcinado, y de estas propiedades, dependen los usos que se le da a la cal aquí hay un breve resumen de estos factores que influyen en las propiedades de la cal obtenida:

- La dureza de la cal obtenida, depende de las impurezas de la caliza utilizada como también de la temperatura de calcinación, una impura, da una cal dura si se calcina a temperaturas elevadas.
- La porosidad - y como consecuencia la densidad – de las cales también depende de la temperatura de calcinación, a mayor temperatura menor porosidad y por lo tanto una mayor densidad, como consecuencia de esto a mayor temperatura, la cal va perdiendo actividad química, es por esta razón que conviene sintetizar la cal a temperaturas lo mas cercanas a la temperatura de disociación de la caliza.
- Las calizas que contienen entre un 15 – 30 % de materia arcillosa produce cales altamente hidráulicas (cales cementicias)

Usos de la cal y características de la caliza de donde se obtienen estas cales

Respecto a los usos que se le da a la cal obtenida dependen los distintos grados de pureza que requiera la caliza, por ejemplo para la cal usada en la industria se requiere un grado de pureza mucho mayor de la caliza, si lo comparamos con la pureza requerida para usos agrícolas así para cada uso se dan características de la caliza para satisfacer necesidades y aquí se presenta un resumen:

Para usos industriales

Gran parte de la caliza no sirve por problemas de pureza, por esta razón gran parte de la cal se obtiene a partir de conchas de mar las cuales son basadas en CaCO_3 puro.

Para usos en construcción

La cal se usa principalmente en enlucidos y estuco principalmente como cal hidráulica la cual contiene gran cantidad de impurezas silíceas por que debido a esto la cal hidráulica fragua bajo el agua y tiene propiedades plásticas, generalmente se usa como sustituto del cemento, la cal hidratada se usa para la fabricación de ladrillos de cal los cuales consisten en la cal hidráulica mas arena los cuales juntos forman silicatos monocálcicos los cuales tienen propiedades aislantes, por esto mismo se agrega a algunas carreteras de arena cal hidráulica para formar silicatos sobre esta y así formar un “ cemento natural” donde obviamente no se requiere cal de gran pureza. [17]

Para usos agrícolas

La cal se usa generalmente para neutralizar los ácidos presentes en el suelo aunque se usa más la caliza directamente para estos fines en donde se requiere poca pureza.

Para usos metalúrgicos

La cal viva tiene un gran uso como fundente en la manufactura del acero donde se requiere una cal de una gran pureza, además la cal se usa en el trefilado de alambres como lubricante, también se usa en la fabricación de lingotes en moldes de hierro para evitar la adherencia de estos lingotes, otro uso de la cal es para neutralizar los ácidos con los que se limpian los productos del acero, en este sentido se prefiere la cal para neutralizar que la caliza debido a que la caliza produce CO_2 al contacto con ácidos lo cual es un problema debido a que puede generar asfixias en los que lo manipulan. La lechada de cal se usa como aislante temporal a la corrosión, en el recocido del acero, se usa además en casi todos los procesos para la extracción de Mg, también para recuperar la sílice de la bauxita, se emplea en la flotación de minerales no féreos donde actúa como depresor y mantiene la alcalinidad correcta, para todos estos usos metalúrgicos se requiere una cal de una pureza superior a las anteriores y como consecuencia una caliza de una pureza mayor de donde sintetizar esta cal.

Para usos varios

Se usa la lechada de cal para neutralizar los gases nocivos producidos en la refinación de metales, gases como H₂S, SO₂. Se usa la cal hidratada para la fabricación de NaOH por la siguiente reacción: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2\text{NaOH} + \text{CaCO}_3$. También se usa en la fabricación de carburo de calcio cuando reacciona esta con coque. La cal se usa también en el tratamiento de residuos de la industria del papel. Y en el tratamiento de las aguas potables para mejorar su calidad y también para ablandar agua, junto con sales de hierro se usa para coagular sólidos suspendidos en el agua y también para neutralizar el “agua ácida” que produce la corrosión de las cañerías.

III.1. 2. Cemento.

Los cementos grises tienen un color muy peculiar gracias al cual también se les conoce como cementos Portland. El nombre nació en 1824, cuando el inglés Joseph Aspdin logró desarrollar una excelente cal hidráulica para construcción a la que llamó cemento Portland porque el gris era muy parecido al de las piedras halladas en la localidad de ese nombre, en Inglaterra. Se denomina cemento a un conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava, más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece al reaccionar con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, denominado hormigón (en España y el caribe hispano) o concreto (en Sudamérica). Su uso está muy generalizado en construcción e ingeniería civil, su principal función la de aglutinante. [18]

La industria del cemento incluye las instalaciones con hornos que emplean el proceso húmedo o seco para producir cemento de piedra caliza, y las que emplean agregado liviano para producirlo a partir de esquisto o pizarra. Se utilizan hornos giratorios que elevan los materiales a temperaturas de 1400 °C. Las materias primas principales son piedra caliza, arena de sílice, arcilla, esquisto, marga y óxidos de tiza. Se agrega sílice, aluminio y hierro en forma de arena, arcilla, bauxita, esquisto, mineral de hierro y escoria de alto horno. Se introduce yeso durante la fase final del proceso. La tecnología de hornos de cemento se emplea en todo el mundo. Usualmente, las plantas de cemento se ubican

cerca de las canteras de piedra caliza a fin de reducir los costos de transporte de materia prima.[18]

III.1.2.1. Historia.

Desde la antigüedad se emplearon pastas y morteros elaborados con arcilla, yeso o cal para unir mampuestos en las edificaciones. Fue en la Antigua Grecia cuando empezaron a usarse tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini, los primeros cementos naturales. En el siglo I a. C. se empezó a utilizar el cemento natural en la Antigua Roma, obtenido en Pozzuoli, cerca del Vesubio. La bóveda del Panteón es un ejemplo de ello. En el siglo XVIII John Smeaton construye la cimentación de un faro en el acantilado de Edystone, en la costa Cornwall, empleando un mortero de cal calcinada. El siglo XIX, Joseph Aspdin y James Parker patentaron en 1824 el *Portland Cement*, denominado así por su color gris verdoso oscuro similar a la piedra de Portland. Isaac Johnson, en 1845, obtiene el prototipo del cemento moderno, con una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura. En el siglo XX surge el auge de la industria del cemento, debido a los experimentos de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran cemento de calidad homogénea; la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular y los métodos de transportar hormigón *fresco* ideados por Juergen Hinrich Magens que patenta entre 1903 y 1907.[18]

III.1.2.2. Tipos de cemento.

Se pueden establecer dos tipos básicos de cementos:

1. de origen arcilloso: obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente;
2. de origen porcelánico: la porcelana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos.

Desde el punto de vista químico se trata en general de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, obtenidos a través del cocido de calcáreo, arcilla y arena. El material obtenido, molido muy finamente, una vez que se mezcla con agua se hidrata y solidifica progresivamente. Puesto que la composición química de los cementos es compleja, se utilizan terminologías específicas para definir las composiciones. .[18]

El cemento portland

El tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón o concreto es el cemento portland.

Producto que se obtiene por la pulverización del clinker portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el clinker. Cuando el cemento portland es mezclado con el agua, se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adherentes que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su *resistencia característica*.

Con el agregado de materiales particulares al cemento (calcáreo o cal) se obtiene el *cemento plástico*, que fragua más rápidamente y es más fácilmente trabajable. Este material es usado en particular para el revestimiento externo de edificios.

III.1.3. Yeso.

El **yeso** es un producto preparado básicamente a partir de una piedra natural denominada aljez, mediante deshidratación, al que puede añadirse en fábrica determinadas adiciones de otras sustancias químicas para modificar sus características de fraguado, resistencia, adherencia, retención de agua y densidad, que una vez amasado con agua, puede ser utilizado directamente. También, se emplea para la elaboración de materiales prefabricados. El yeso, como producto industrial, es sulfato de calcio hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), también llamado vulgarmente "yeso cocido". Se comercializa molido, en forma de polvo. Una variedad de yeso, denominada alabastro, se utiliza profusamente, por

su facilidad de tallado, para elaborar pequeñas vasijas, estatuillas y otros utensilios.

El yeso natural, o sulfato cálcico bihidrato $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, está compuesto por sulfato de calcio con dos moléculas de agua [19].

Si aumentamos la temperatura hasta lograr que se desprendan totalmente las dos moléculas de agua, fuertemente combinada, se obtienen durante este proceso diferentes yesos empleados en la construcción, los que de acuerdo con las temperaturas crecientes de deshidratación pueden ser:

Temperatura ambiente: piedra de yeso, o sulfato de calcio bihidrato: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

107 °C: formación de sulfato de calcio hemihidrato: $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$.

107 - 200 °C: desecación del hemihidrato, con fraguado más rápido que el anterior: yeso comercial para estuco.

200 - 300 °C: yeso con ligero residuo de agua, de fraguado lentísimo y de gran resistencia.

300 - 400 °C: yeso de fraguado aparentemente rápido, pero de muy baja resistencia

500 - 700 °C: yeso anhidro o extra cocido, de fraguado lentísimo o nulo: yeso muerto. Con resistencia nula debido a la falta de fraguado

750 - 800 °C: empieza a formarse el yeso hidráulico que se endurece muy lentamente, pero dando superficies duras y muy resistentes [19].

800 - 1000 °C: yeso hidráulico normal, o de pavimento. Este yeso no tiene expansión ni retracción, alcanza gran resistencia a la compresión gran dureza y puede ser pulido. Con este yeso se fabrican baldosas y se imitan mármoles [19].

1000 - 1400 °C: yeso hidráulico con mayor proporción de cal libre y fraguado más rápido con resistencia alta [19].

III.1.3.1. Historia de la utilización del yeso.

El yeso es uno de los más antiguos materiales empleado en construcción. En el período Neolítico, con el dominio del fuego, comenzó a elaborarse yeso calcinando aljez, y a utilizarlo para unir las piezas de mampostería, sellar las juntas de los muros y para revestir los paramentos de las viviendas, sustituyendo al mortero de barro. En *Çatal Hüyük*, durante el milenio IX a. C., encontramos guarnecidos de yeso y cal, con restos de pinturas al fresco. En la antigua Jericó, en el milenio VI a. C., se usó yeso moldeado.

En el Antiguo Egipto, durante el tercer milenio a. C., se empleó yeso para sellar las juntas de los bloques de la Gran Pirámide de Giza, y en multitud de tumbas como revestimiento y soporte de bajorrelieves pintados. El palacio de Cnosos contiene revestimientos y suelos elaborados con yeso. [13].

El escritor griego Teofrasto, en su tratado sobre la piedra, describe el yeso (*gipsos*), sus yacimientos y los modos de empleo como enlucido y para ornamentación. También escribieron sobre las aplicaciones del yeso Catón y Columela. Plinio el Viejo describió su uso con gran detalle. Vitruvio, arquitecto y tratadista romano, en sus Diez libros sobre arquitectura, describe el yeso (*gypsum*), aunque los romanos emplearon normalmente morteros de cal y cementos naturales.

Los Sasánidas utilizaron profusamente el yeso en albañilería. Los Omeyas dejaron muestras de su empleo en sus alcázares sirios, como revestimiento e incluso en arcos prefabricados.

La cultura musulmana difundió en España el empleo del yeso, ampliamente adoptada en el valle del Ebro y sur de Aragón, dejando hermosas muestras de su empleo decorativo en el

arte de las zonas de Aragón, Toledo, Granada y Sevilla.

Durante la Edad Media, principalmente en la región de París, se empleó el yeso en revestimientos, forjados y tabiques. En el Renacimiento para decoración. Durante el periodo Barroco fue muy utilizado el estuco de yeso ornamental y la técnica del *staff*, muy empleada en el Rococó.

En el siglo XVIII el uso del yeso en construcción se generaliza en Europa. Lavoisier presenta el primer estudio científico del yeso en la Academia de Ciencias. Posteriormente Van t'Hoff y Le Chatelier aportaron estudios describiendo los procesos de deshidratación del yeso, sentando las bases científicas del conocimiento ininterrumpido posterior. [13].

III.1.3.2. Usos.

Es utilizado profusamente en construcción como pasta para guarnecidos, enlucidos y revoques; como pasta de agarre y de juntas. También es utilizado para obtener estucados y en la preparación de superficies de soporte para la pintura artística al fresco.

Prefabricado, como paneles de yeso (Dry Wall o Sheet rock) para tabiques, y escayolados para techos.

Se usa como aislante térmico, pues el yeso es mal conductor del calor y la electricidad.

Para confeccionar moldes de dentaduras, en Odontología. Para usos quirúrgicos en forma de férula para inmovilizar un hueso y facilitar la regeneración ósea en una fractura.

En los moldes utilizados para preparación y reproducción de esculturas.

En la elaboración de tizas para escritura.

En la fabricación de cemento.

III.1.4. Hidróxido de sodio.

El **hidróxido de sodio** (NaOH) o 'hidróxido sódico, también conocido como sosa cáustica o

soda cáustica, es un hidróxido cáustico usado en la industria (principalmente como una base química) en la fabricación de papel, tejidos, y detergentes. Además es usado en la Industria Petrolera en la elaboración de Lodos de Perforación base Agua.

A temperatura ambiente, el hidróxido de sodio es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe humedad del aire (higroscópico). Es una sustancia manufacturada. Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor que puede ser suficiente como para encender materiales combustibles. El hidróxido de sodio es muy corrosivo. Generalmente se usa como una solución de 50% en peso o como sólido que se comercializa como pellets, hojuelas y barras. [13].

Es una sustancia exclusivamente producida por el hombre y por tal razón no se encuentra en la naturaleza en su estado normal.

Identidad de la sustancia química:

Fórmula Molecular: NaOH

Estructura Molecular: Na – O – H

CAS: 1310-73-2

Número UN:

UN 1823 (Sólido)

UN 1824 (Solución)

Riesgo Principal UN: 8 (Solución)

Propiedades físicas

PROPIEDAD	VALOR
Peso Molecular (g/mol)	40,0
Estado Físico	Sólido
Punto de Ebullición (°C) (760 mmHg)	1.390; puro 105; solución acuosa 6% en peso 120; solución acuosa 34% peso 150; solución acuosa 55% en peso
Punto de Fusión (°C)	318; puro
Presión de Vapor (mmHg)	0; puro
Gravedad Específica (Agua = 1)	2,13; puro 1.219; 20% solución acuosa 1.430; 40% solución acuosa 1.525; 50% solución acuosa
Densidad del Vapor (Aire = 1)	No Aplica
PH	14; Solución 5%
Límites de Inflamabilidad (%)	No Aplica
Punto de Auto Inflamación	No Aplica
Solubilidad en Agua (g/ml)	1,11

Cuadro 2. Propiedades químicas.

El Hidróxido de Sodio es una base fuerte, se disuelve con facilidad en agua generando gran cantidad de calor y disociándose por completo en sus iones, es también muy soluble en Etanol y Metanol. Reacciona con ácidos (también generando calor), compuestos orgánicos halogenados y con metales como el Aluminio, Estaño y Zinc generando Hidrógeno, que es un gas combustible altamente explosivo.

El Hidróxido de Sodio es corrosivo para muchos metales. Reacciona con sales de amonio generando peligro de producción de fuego, ataca algunas formas de plástico, caucho y recubrimientos.

El Hidróxido de Sodio Anhidro reacciona lentamente con muchas sustancias, sin embargo la velocidad de reacción aumenta en gran medida con incrementos de temperatura.

Los metales más nobles como el Níquel, Hidróxido de Sodio Plata y Oro son atacados solo a altas temperaturas y en atmósferas oxidantes.

En presencia de la humedad del ambiente, el hidróxido de sodio reacciona con el Dióxido de Carbono para generar Carbonato de Sodio. Reacciona con el Monóxido de Carbono bajo presión para dar formato de Sodio, también en presencia de humedad.

La hidratación paulatina del Hidróxido de Sodio genera seis diferentes hidratos: NaOH.H₂O, NaOH.2H₂O, NaOH.3, 5H₂O, NaOH.4H₂O, NaOH.5H₂O, NaOH.7H₂O. La gran afinidad del Hidróxido de Sodio por el agua causa una reducción en la presión de vapor del agua y por tal razón es un muy buen agente secante.

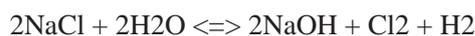
Incompatibilidades.

Es incompatible con ácidos y compuestos halogenados orgánicos como el Tricloroetileno. La reacción con Nitrometano u otros compuestos nitro similares produce sales sensibles al impacto. El contacto con metales como Aluminio, Magnesio, Estaño o Zinc puede liberar gas Hidrógeno (inflamable). Reacciona rápidamente con azúcares para producir Monóxido de Carbono. Reacciona con materiales inflamables.

Producción.

De forma general, el hidróxido de sodio se produce por electrólisis de soluciones acuosas de cloruro de sodio o por la reacción de carbonato de sodio con hidróxido de calcio.

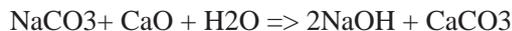
La forma más común de producción de hidróxido de sodio es como solución al 50% por electrólisis de cloruro de sodio. En esta reacción se genera hidróxido de sodio, cloro e hidrógeno de acuerdo con la siguiente ecuación:



Por lo común ingresa al proceso una solución de cloruro de sodio del 27%, esta sufre el proceso de electrólisis; la solución resultante se hace pasar por celdas de diafragma,

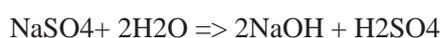
de membrana o de mercurio, según la tecnología instalada. En la celda de diafragma resulta una solución de entre 9% y 12% de NaOH y 18% de NaCl; la solución pasa a concentración por evaporación, donde también se purifica por procedimientos de cristalización fraccionada. La celda de mercurio genera directamente la solución de 50% de concentración; el mercurio se retira por centrifugación y posterior cristalización o por paso a través de un sistema de filtración (cartuchos o platos). Finalmente en la celda de membrana, en la que se evita la mezcla de electrolitos por la presencia de la membrana, se obtiene una solución de 28% a 35% de NaOH que se concentra luego hasta 50% por acción de evaporadores de película descendente. La solución final que se genera por este procedimiento es muy pura. [20].

En el proceso de caustización del carbonato de sodio, se mezcla una solución caliente de carbonato de sodio al 12% con una solución de óxido de calcio. En este proceso precipita carbonato de calcio quedando en solución el hidróxido de sodio de acuerdo a la reacción siguiente:



El carbonato de sodio se retira y la solución de hidróxido de sodio al 12% remanente se introduce en una serie de operaciones de evaporación y concentración.

Otro tipo de proceso de producción de hidróxido de sodio consiste en la combinación del proceso de electrólisis con celdas de diálisis. Se usa en el tratamiento de aguas residuales que contienen sales de sodio para minimizar las concentraciones de estas sustancias en los vertimientos. La materia prima consiste en sales inorgánicas de sodio que por acción del conjunto de operaciones se transforman en hidróxido de sodio y en el ácido correspondiente al anión de la sal sódica como se muestra en la reacción del siguiente ejemplo:



El equipo de operación en este procedimiento consiste de series de celdas electrolíticas separadas entre sí por membranas de intercambio iónico catiónicas, aniónicas

y bipolares. Se obtiene una solución de entre 15% y 30% que contiene aún restos de las sales iniciales.

Para producir hidróxido de sodio sólido se parte de la solución de la misma concentración comercial (50%) realizando inicialmente una evaporación al vacío para preconcentrar la solución hasta un 60%. La solución anterior se concentra hasta alrededor de un 99% usando un evaporador de película descendente y como medio calefactor una sal fundida de NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3 que maneja temperaturas mayores de $400\text{ }^\circ\text{C}$. en seguida el producto se introduce en un evaporador flash con ayuda de una tubería con calefacción. El NaOH fundido se enfría y se pasa a formado luego de su solidificación y de otros pasos preventivos. [20]

Aplicaciones y usos

Normalmente las aplicaciones del hidróxido de sodio requieren de soluciones diluidas. Se usa en la manufactura de jabones y detergentes, papel, explosivos pigmentos y productos del petróleo y en la industria química en general. Se usa también en el procesamiento de fibras de algodón, en electroplateado, en limpieza de metales, recubrimientos óxidos, extracción electrolítica y como agente de ajuste de pH. Se presenta también en forma comercial en limpiadores para estufas y drenajes. En la industria de alimentos tiene importancia en los procesos de pelado químico.

Todo el hidróxido de sodio consumido puede clasificarse en las siguientes aplicaciones

En la industria química inorgánica se usa en la manufactura de sales de sodio, para la digestión alcalina de minerales metálicos y en la regulación de pH.

En aplicaciones industriales de química orgánica se emplea en reacciones de saponificación, producción de intermediarios nucleofílicos aniónicos, en reacciones de esterificación y eterificación en la catálisis básica.

En la industria de papel se usa para el cocido de la madera en la operación de eliminación de lignina. En la industria textil se usa en la producción de fibras de viscosa.

Además se usa en el tratamiento de fibras de algodón para mejorar sus propiedades. La industria de los detergentes lo usa para la producción de fosfato de sodio y para procesos de sulfonación en medio básico. En la jabonería se usa para la saponificación de grasas y sebos. En la producción de aluminio se usa para el tratamiento de la bauxita. En tratamiento de aguas residuales y purificación de agua de proceso se emplea para regenerar resinas de intercambio iónico.

Además de las industrias anteriores, el hidróxido de sodio tiene aplicaciones en el electroplateado, en la industria del petróleo y del gas natural, en la manufactura de vidrio, en la industria de los alimentos, la limpieza y otros.

III.1.5. Múcilago de nopal.

Entre los nopales silvestres o cultivados del Altiplano mexicano y, particularmente, en los Estados de México, Hidalgo y Querétaro, uno de los más abundantes es *Opuntia tomentosa* Salm-Dick. Esta especie presenta un porte arborescente, pencas alargadas y grandes (cladodios o artículos) y una gran cantidad de mucílago o “baba”, como se le conoce vulgarmente. Al igual que casi todos los nopales de México, *O. tomentosa* tiene una gran diversidad de usos: como alimento humano, como especie medicinal, etc. Muchos de estos usos están ligados a la alta concentración de mucílago que presentan sus cladodios. El mucílago de nopal es un polímero lineal cuyo peso molecular oscila alrededor de 13×10^6 g/mol y que está compuesto por polisacáridos emparentados con las pectinas. Se sabe que su composición glucídica es aproximadamente de 47% de arabinosa, 23% de xylosa, 18% de galactosa, 7% de ramnosa y 5% de ácido galacturónico, respecto a su peso molecular.

III.1.6. Agua.

El **agua** (del latín *aqua*) es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H_2O); es decir, que una molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno enlazados covalentemente a un átomo de oxígeno.

Fue Henry Cavendish quien descubrió en 1781 que el agua es una sustancia compuesta y no un elemento, como se pensaba desde la Antigüedad. Los resultados de dicho descubrimiento fueron desarrollados por Antoine Laurent de Lavoisier dando a conocer que el agua estaba formada por oxígeno e hidrógeno. En 1804, el químico francés Joseph Louis Gay-Lussac y el naturalista y geógrafo alemán Alexander von Humboldt demostraron que el agua estaba formada por dos volúmenes de hidrógeno por cada volumen de oxígeno (H₂O).

Las propiedades fisicoquímicas más notables del agua son:

- El agua es insípida e inodora en condiciones normales de presión y temperatura. El color del agua varía según su estado: como líquido, puede parecer incolora en pequeñas cantidades, aunque en el espectrógrafo se prueba que tiene un ligero tono azul verdoso. El hielo también tiende al azul y en estado gaseoso (vapor de agua) es incolora.
- El agua bloquea sólo ligeramente la radiación solar UV fuerte, permitiendo que las plantas acuáticas absorban su energía.
- Ya que el oxígeno tiene una electronegatividad superior a la del hidrógeno, el agua es una molécula polar. El oxígeno tiene una ligera carga negativa, mientras que los átomos de hidrógenos tienen una carga ligeramente positiva del que resulta un fuerte momento dipolar eléctrico. La interacción entre los diferentes dipolos eléctricos de una molécula causa una atracción en red que explica el elevado índice de tensión superficial del agua.
- La fuerza de interacción de la tensión superficial del agua es la fuerza de van der Waals entre moléculas de agua. La aparente elasticidad causada por la tensión superficial explica la formación de ondas capilares. A presión constante, el índice de tensión superficial del agua disminuye al aumentar su temperatura. También tiene un alto valor adhesivo gracias a su naturaleza polar.

- La capilaridad se refiere a la tendencia del agua de moverse por un tubo estrecho en contra de la fuerza de la gravedad. Esta propiedad es aprovechada por todas las plantas vasculares, como los árboles.
- Otra fuerza muy importante que refuerza la unión entre moléculas de agua es el enlace por puente de hidrógeno.
- El punto de ebullición del agua (y de cualquier otro líquido) está directamente relacionado con la presión atmosférica. Por ejemplo, en la cima del Everest, el agua hierve a unos 68° C, mientras que al nivel del mar este valor sube hasta 100°. Del mismo modo, el agua cercana a fuentes geotérmicas puede alcanzar temperaturas de cientos de grados centígrados y seguir siendo líquida. Su temperatura crítica es de 373.85 °C (647,14 K), su valor específico de fusión es de 0,334 kJ/g y su índice específico de vaporización es de 2,23kJ/g.
- El agua es un disolvente muy potente, al que se ha catalogado como el disolvente universal, y afecta a muchos tipos de sustancias distintas. Las sustancias que se mezclan y se disuelven bien en agua —como las sales, azúcares, ácidos, álcalis, y algunos gases (como el oxígeno o el dióxido de carbono, mediante carbonación)— son llamadas *hidrófilas*, mientras que las que no combinan bien con el agua —como lípidos y grasas— se denominan sustancias *hidrofóbicas*. Todos los componentes principales de las células de proteínas, ADN y polisacáridos se disuelven en agua. Puede formar un azeótropo con muchos otros disolventes.
- El agua es miscible con muchos líquidos, como el etanol, y en cualquier proporción, formando un líquido homogéneo. Por otra parte, los aceites son *inmiscibles* con el agua, y forman capas de variable densidad sobre la superficie del agua. Como cualquier gas, el vapor de agua es miscible completamente con el aire.
- El agua pura tiene una conductividad eléctrica relativamente baja, pero ese valor se incrementa significativamente con la disolución de una pequeña cantidad de

material iónico, como el cloruro de sodio.

- El agua tiene el segundo índice más alto de capacidad calorífica específica sólo por detrás del amoníaco así como una elevada entalpía de vaporización ($40.65 \text{ kJ mol}^{-1}$); ambos factores se deben al enlace de hidrógeno entre moléculas. Estas dos inusuales propiedades son las que hacen que el agua "modere" las temperaturas terrestres, reconduciendo grandes variaciones de energía.
- La densidad del agua líquida es muy estable y varía poco con los cambios de temperatura y presión. A la presión normal (1 atmósfera), el agua líquida tiene una mínima densidad (0,958 kg/l) a los 100 °C. Al bajar la temperatura, aumenta la densidad (por ejemplo, a 90 °C tiene 0,965 kg/l) y ese aumento es constante hasta llegar a los 3,8 °C donde alcanza una densidad de 1 kg/litro. Esa temperatura (3,8 °C) representa un punto de inflexión y es cuando alcanza su máxima densidad (a la presión mencionada). A partir de ese punto, al bajar la temperatura, la densidad comienza a disminuir, aunque muy lentamente (casi nada en la práctica), hasta que a los 0° disminuye hasta 0,9999 kg/litro. Cuando pasa al estado sólido (a 0 °C), ocurre una brusca disminución de la densidad pasando de 0,9999 kg/l a 0,917 kg/l.
- El agua puede descomponerse en partículas de hidrógeno y oxígeno mediante electrólisis.
- Como un óxido de hidrógeno, el agua se forma cuando el hidrógeno o un compuesto conteniendo hidrógeno se quema o reacciona con oxígeno o un compuesto de oxígeno. El agua no es combustible, puesto que es un producto residual de la combustión del hidrógeno. La energía requerida para separar el agua en sus dos componentes mediante electrólisis es superior a la energía desprendida por la recombinación de hidrógeno y oxígeno. Esto hace que el agua, en contra de lo que sostienen algunos rumores, no sea una fuente de energía eficaz.
- Los elementos que tienen mayor electropositividad que el hidrógeno como el litio, el sodio, el calcio, el potasio y el cesio desplazan el hidrógeno del agua, formando

hidróxidos. Dada su naturaleza de gas inflamable, el hidrógeno liberado es peligroso y la reacción del agua combinada con los más electropositivos de estos elementos es una violenta explosión.

III.2. Métodos de prueba.

III.2.1. Determinación del potencial de hidrogeno (PH) (ASTM D 6276)

Para determinar el potencial de hidrogeno se utilizo el procedimiento de la norma ASTM D 6276. Este método de prueba proporciona un medio para estimar la proporción necesaria cal-suelo para la estabilización de un suelo. Este método de prueba es realizado con material que pasa la malla No. 40 (425 μ m). Este método de prueba es usado para determinar el porcentaje mínimo de cal de la mezcla suelo-cal para obtener un ph de al menos 12.4.

Procedimiento.

Se preparan una serie de muestras de arcilla equivalentes a 25 gr, secadas al aire libre.

Determinar la masa de cada muestra de suelo secada al aire libre equivalente a 25 gr, con la siguiente fórmula: $M_a=25 \times (1.0+ (W/100))$

Donde:

M_a = masa de suelo secada al aire libre.

W= contenido de agua en %, de la muestra de suelo secada al aire libre.

Colocar cada muestra seca en botellas de plástico y tapar herméticamente.

Se preparan 6 especímenes de 2, 4, 6, 8 y 10% del equivalente de 25 gr secados al horno de la masa del suelo. La sexta muestra es de 2 gr de cal la cual representa una solución saturada de cal.

Añadir uno de los cinco primeros especímenes de cal a una de las muestras de suelo en botellas de plástico, tapa herméticamente, se marca el porcentaje en el frasco, y homogeneizar por agitación. Se repite este procedimiento para las otras cuatro muestras del suelo y cal.

Se añade 100 ml de agua a cada uno de las mezclas suelo-cal, así como a la botella que contiene 2.0 gr de cal.

Se agitan las botellas con las mezclas y la de agua-cal por un mínimo de 30 segundos o hasta que los especímenes estén bien mezclados. Se sigue agitando las muestras durante 30 segundos cada 10 minutos durante una hora.

En caso necesario calentar o enfriar la muestra según sea necesario para que la temperatura de la muestra se mantenga a 25°C.

Dentro de los últimos 15 minutos de la hora del periodo de agitación, se determina el ph de cada muestra de suelo-cal-agua. La temperatura de las muestras tiene que estar a 25°C a la hora de determinar el ph.

Registrar el valor de ph de cada mezcla suelo-cal-agua y par la mezcla cal-agua.

III.2.2. Determinación de los estados de consistencia. (Atterberg) [5]

Cuando existen minerales de arcilla en un suelo de grano fino, éste puede ser remodelado en presencia de alguna humedad sin desmoronarse. Esta naturaleza cohesiva es debida al agua absorbida que rodea las partículas de arcilla. A principios de 1900, un científico sueco Albert Mauritz Atterberg, desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenido de agua variables. A muy bajo contenido de agua, el suelo se comporta más como un sólido frágil. Cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo y el agua fluyen como un líquido. Por tanto, dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básico, denominados sólido, semisólido, plástico y líquido.

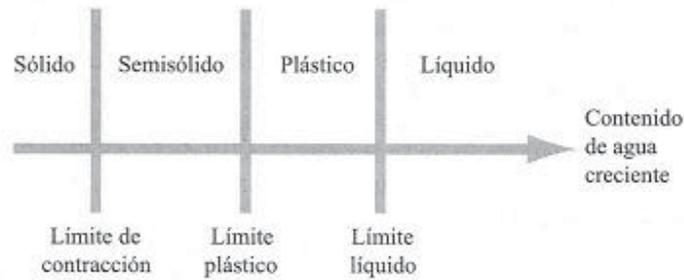


Figura 10. Estados de consistencia.

El contenido de agua, en porcentaje, en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, se define como el límite de contracción. El contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a plástico es el límite plástico y de estado plástico a líquido es el límite líquido. Esos límites también se conocen como límites de atterberg.

El objetivo de esta prueba es determinar los límites de plasticidad, para clasificar el material.

Equipo necesario:

Malla N° 40

Cápsula de porcelana

Copa de Casagrande con su respectivo ranurador.

Espátula.

Molde metálico para las contracciones lineales

Molde metálico para las contracciones volumétricas

Vidrio de reloj.

Charola de plástico con recipiente para determinar volúmenes.

Balanza con precisión de 0.01 gr y capacidad de 800 grs.

Mercurio.

III.2.2.1. Determinación del límite líquido.

Para la prueba del límite líquido se coloca el material homogeneizado en la copa de Casagrande. Se corta una ranura al centro de la muestra del suelo, usando la herramienta de corte estándar (ranurador), después se inicia con el conteo de los golpes, la copa debe estar calibrada para que la altura de caída sea de 10 mm. El contenido de agua, en porcentaje requerido para cerrar una distancia de 12.7 mm a lo largo del fondo de la ranura, a los 25 golpes se define como el límite líquido

Procedimiento. (D-4318 ASTM)

- 1.-El material que se pretende analizar se tiene que secar al sol por si contiene humedad esta se pierda y así poder realizar el disgregado y el posterior cribado por la malla No. 40,
- 2.-Del material que se criba por la malla No. 40, se toma una cantidad de aproximadamente 250 gr, y se coloca en una cápsula de porcelana.
- 3.- Al material colocado en la cápsula de porcelana se le agrega agua destilada hasta quedar completamente saturado y se deja un periodo de 24 horas.



Figura 11. Muestra saturada.

4.-Una vez dejado saturar el material durante 24 horas se procede a homogeneizar la muestra para iniciar con los tanteos en la copa de Casagrande en tres diferentes tanteos, el primer tanteo tiene que cerrar la ranura entre 10 y 20 golpes, el segundo tanteo entre 20 y 30 golpes, finalizando con el tanteo de 30 a 40 golpes. En cada tanteo se tiene que obtener la humedad de cada tanteo.

5.-Para el primer tanteo se coloca el suelo homogeneizado en la copa de Casagrande, llenando a la mitad, con un espesor de 10mm, se ranura al centro, manteniendo el ranurador perpendicular a la copa de Casagrande las dimensiones del ranurador son de 11mm en la parte superior y 2mm en la parte inferior, debiendo tener los bordes redondeados para evitar la deformación en el acomodo del suelo.

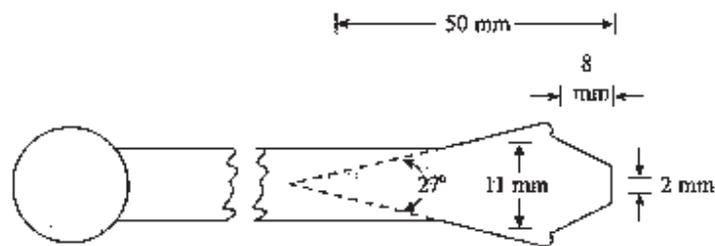


Figura 12. Espátula de laboratorio.



Figura 13. Copa de Casagrande.

6.- Una vez llenada la copa de Casagrande y ranurado el material, el golpeo se hace girando la manivela si es manual a la velocidad de 2 rev/seg, y si es eléctrica sólo de enciende. Se

procede a contar el número de golpes necesarios para que la ranura cierre una distancia de 12.7mm, la ranura debe cerrarse por el flujo del suelo y no por deslizamiento del suelo respecto a la copa.

7.-En una En una capsula de vidrio de reloj, se extrae una muestra representativa de aproximadamente 10 gr. del centro de la copa, cerca de donde cerró la ranura para obtener la humedad. Se pesa la cápsula con el material húmedo al centésimo de gramo (0.01 gr). Se deja secar en el horno durante 24 hrs. A 110 ± 5 °C, se saca y se obtiene el peso seco.

8.-Una vez realizado los tres tanteos con el número de golpes y su correspondiente contenido de agua en porcentaje se realiza la curva de fluidez en escala semilogarítmica en las abscisas y en las ordenadas escala natural. En seguida se muestra un ejemplo de dicho procedimiento.

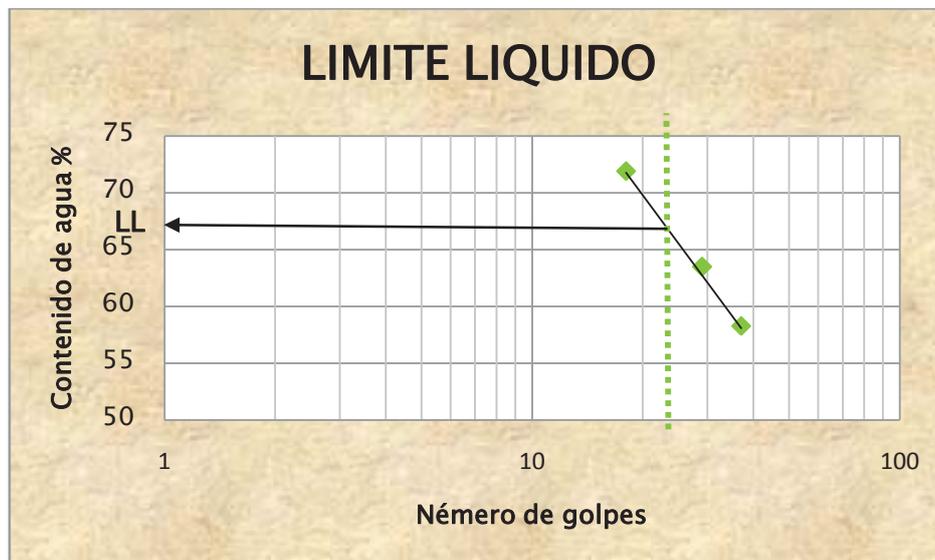


Figura. 14. Ejemplo de cálculo de límite líquido.

III.2.2.2. Determinación del límite plástico e índice plástico.

El límite plástico se define como el contenido de agua, en porcentaje con el cual el suelo al ser moldeado en rollitos de 3.2 mm de diámetro se fractura o agrieta. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo.

Procedimiento.

1. Del material que se utilizó para el límite líquido y específicamente del tanteo que cerró a más de 30 golpes se toma aproximadamente 25 gr de material.
2. Se forman con la mano rollitos 3 mm de diámetro aproximadamente, se puede apoyar sobre un vidrio rugoso para mayor facilidad.
3. El límite plástico será cuando los rollitos se inicien a fracturar o presentar grietas al amasarlos para que queden al diámetro de 3 mm.

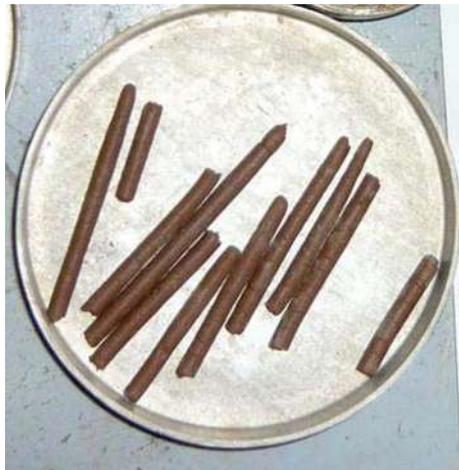


Figura.15. rollitos para límite plástico

4. Una vez realizado los rollitos se colocan en el vidrio de reloj y se pesan al 0.01 gr y posteriormente se colocan en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se dejan secar por un periodo de 24 horas.
5. Se saca del horno y se pesan para determinar el peso seco y así conocer la humedad de los rollitos.
6. Se repite todo el proceso para obtener tres determinaciones que puedan promediarse para obtener el límite plástico.
7. Para obtener el límite plástico se utiliza la siguiente fórmula:

$$Lp = \frac{Ww}{Ws} \times 100$$

Donde:

Lp = Límite Plástico

Ww = Peso de la muestra húmeda.

Ws = Peso de la muestra seca.

Determinación del índice plástico.

Comprende todas las humedades para las cuales un suelo es plástico. Es la diferencia aritmética entre el contenido de humedad en el límite líquido y el límite plástico.

Para la determinación del índice plástico se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_p = LL - L_p$$

Donde:

IP= índice plástico.

LL= Límite líquido.

LP=Límite plástico.

III.2.2.3.Determinación del límite de contracción. (LC y CL)

La masa de suelo se contrae conforme se pierde gradualmente el agua del suelo. Con una pérdida continua de agua, se alcanza una etapa de equilibrio en la que más pérdida de agua de agua conduciría a que no haya cambio de volumen. El contenido de agua, en porcentaje, bajo el cual el cambio de volumen de la masa del suelo seco, se define como límite de contracción.

Determinación del límite de contracción volumétrica (LC).

Procedimiento.

Esta prueba se hace del material que sobra del ensaye del límite líquido del tanteo entre 20 y 30 golpes, con una humedad ligeramente mayor en un 10%.

1. Con el material, mezcla de suelo y agua en las condiciones indicadas se procede a llenar el molde de prueba, previamente engrasado para evitar que el material se adhiera a las paredes.
2. Se determinan los pesos de cápsulas metálicas vacías y limpias y se anotan en la columna correspondiente. Se cubre el interior de la cápsula con una capa delgada de aceite.
3. Se llena la cápsula en 3 capas con la pasta preparada, golpeándola con la parte inferior de esta, de modo que se expulsan las burbujas de aire.
4. Una vez que se han removido todas las burbujas y que se ha llenado totalmente la cápsula, se engrasa utilizando la espátula de cuchillo, y se limpia perfectamente.
5. Se pesan las cápsulas Metálica con el material húmedo; se anotan los datos.
6. Se dejan los especímenes a temperatura ambiente durante 12 hrs. Posteriormente se dejan secar al aire hasta ver un cambio marcado en el color de las muestras. Finalmente se dejan secar en el horno durante 18 hrs. Estas precauciones son, generalmente suficientes para evitar el agrietamiento de las muestras durante el secado.
7. Se pesan las cápsulas con las muestras secas y se anotan los valores obtenidos. Generalmente, las cápsulas tienen un volumen conocido. Para verificar u obtener este dato, basta llenar de mercurio la cápsula hasta derramarlo, y engrasar mediante una placa de vidrio que se presiona hacia abajo, para forzar al excedente a salir de la cápsula. El peso del mercurio requerido para llenar la cápsula dividido entre su densidad (13.55 g/cm^3) es el volumen de la cápsula. Se anotan los volúmenes de las cápsulas es decir; los volúmenes de las muestras húmedas.
8. Para determinar el volumen de las pastillas secas se procede de la manera siguiente: Un recipiente se llena de mercurio hasta derramarlo. Se engrasa mediante un dispositivo especial de lucita, presionándolo hacia abajo para forzar al excedente de mercurio a salir del recipiente. El mercurio se derrama en una charola de lucita inclinada, y se recoge en la parte inferior de ésta en una cápsula protegida con una cubierta de lucita que impide pérdidas de mercurio. La charola se limpia perfectamente con una brocha de cerda fina.

9. En la parte inferior de la charola de lucita se coloca, en el de la anterior, una nueva cápsula limpia y tarada.
10. Se coloca la pastilla de suelo seco sobre la superficie del mercurio y se sumerge, lentamente, con movimiento de rotación mediante el dispositivo de lucita. Se mantiene sumergido el conjunto mientras se limpia perfectamente el recipiente y la base. En esta operación, el mercurio desalojado representa el volumen de la muestra seca. Se pesa el mercurio desalojado, el valor obtenido se anota en el registro.

El límite de contracción se calcula con la siguiente fórmula:

$$LC\% = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) \times 100 - \left(\frac{v_i - v_f \rho_w}{m_2} \right) \times 100$$

Donde:

LC % = Límite de contracción lineal en porcentaje.

m_1 = masa del suelo húmedo en el recipiente al principio de la prueba (gr).

m_2 = masa del suelo seco (gr).

v_i = volumen inicial del suelo húmedo, es decir, el volumen dentro del recipiente en cm^3 .

v_f = volumen final de la muestra seca (gr).

ρ_w = densidad del agua (gr/cm^3).



Figura. 16. Cápsulas de contracción.

Determinación del límite de contracción lineal (CL).

Procedimiento.

Esta prueba al igual que para la determinación del límite de contracción volumétrica (LC) se hace del material que sobra del ensaye del límite líquido del tanteo entre 20 y 30 golpes, con una humedad ligeramente mayor en un 10%.

1. Con el material, mezcla de suelo y agua en las condiciones indicadas se procede a llenar el molde de prueba, previamente engrasado para evitar que el material se adhiera a las paredes. El material se coloca en tres capas, procurando en cada capa dar unos ligeros golpes contra una superficie dura.
Para realizar esta operación deberá tomarse el molde de sus dos extremos y golpearlo, procurando que el impacto lo reciba en toda la base, la cual se consigue manteniendo, durante la caída, paralela la base del molde a la superficie sobre la cual se golpea. Esta operación se debe de realizar hasta expulsar el aire incrustado. Y finalmente se enrasa el molde con una espátula.
2. Se debe de dejar secar el molde con el material a una temperatura ambiente, hasta que su color cambie de oscuro a claro y se coloca en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C de 18 a 24 hrs.

3. Se saca del horno y se determina la longitud de la barra y la longitud interior del molde.

Para determinar la contracción lineal (CL), se utiliza la siguiente fórmula:

$$CL\% = \left(\frac{L_i - L_f}{L_i} \right) \times 100$$

Donde:

CL= Contracción lineal en porcentaje.

L_i = Longitud inicial de la barra del suelo húmedo en cm (longitud interior del molde).

L_f = Longitud final de la barra del suelo seco en cm.



Figura. 17. Método del mercurio.

Las pruebas de tensión, compresión, flexión y módulo de elasticidad son las que se utilizan en morteros y usadas en nuestros especímenes de arcilla, ya que no existen especificaciones para especímenes de arcilla.

III.2.3. Prueba de granulometría.

En los comienzos de la investigación de las propiedades de los suelos se creyó que las propiedades mecánicas dependían directamente de la distribución de las partículas constituyentes según sus tamaños; por ello era preocupación especial de los ingenieros la búsqueda de métodos adecuados para obtener tal distribución.

Cuando se requiere conocer con mayor exactitud el porcentaje de material que pasa la malla N° 200 o bien, en el caso de estudios especiales, la muestra seca y disgregada obtenida como se indico en el paso 1, se someterá a un lavado previo, colocándola en un recipiente provisto de vertedero y aplicándole una corriente de agua en forma continua y de tal manera que derrame sobre la malla Núm. 0.075 convenientemente colocada; durante este proceso la muestra se removerá en forma adecuada para propiciar el arrastre de la fracción fina, suspendiendo el lavado cuando el agua que salga del vertedero este clara; se dejara escurrir la muestra y a continuación se seca en el horno a peso constante, a una temperatura de 105 ± 5 °C; posteriormente se saca del horno, se deja enfriar a la temperatura ambiente y se determina su peso registrándolo como W'_m (Peso de la muestra después del lavado), con aproximación de 1 gramo. La diferencia entre W_m y W'_m (Peso de la muestra antes del lavado) es el peso de la fracción que pasa la malla N° 200.

1. La fracción que pasa la malla N° 4 se cuartea, para obtener el equivalente a 200 gramos de material seco; dicha cantidad se determina previamente aplicando la siguiente fórmula:

$$W_h = 200(1 + \omega_2)$$

Donde:

W_h = Es el peso de la muestra húmeda equivalente a 200 gr de material seco.

ω_2 = es el contenido de agua del material que pasa la malla Núm. 4.75, expresado en forma decimal.

1. Se coloca esta muestra en el vaso metálico y se agrega 500 centímetros cúbicos de agua aproximadamente, dejándose en reposo durante 12 horas, como mínimo.

2. Después de transcurrido este lapso de tiempo, se lava la muestra a través de la malla Núm. 0.075 (N° 200). El lavado se hará agitando el contenido del vaso con la varilla durante 15 segundos, moviéndola en forma de 8 y dejando reposar dicho contenido durante 30 segundos. Inmediatamente después se decanta la suspensión sobre la malla Núm. 0.075 (N° 200). Para facilitar el paso de las partículas final a través de la malla, deberá aplicarse sobre esta un chorro de agua a baja presión.



Figura 18. Saturación de la muestra

3. Se repite la operación de lavado hasta que el agua decantada salga clara.
4. A continuación se regresa al vaso metálico el material que se haya retenido en la malla Núm. 0.075 (N° 200). utilizando un poco de agua, la que se decantara del vaso al final de la operación, cuidando que no haya arrastre de partículas.
5. Se seca el material en el mismo vaso metálico, dejándolo en el horno un lapso no menor de 16 horas, a una temperatura de 105 ± 5 °C, hasta peso constante; a continuación se saca del horno y se deja enfriar en el desecador de cristal hasta que la muestra tenga una temperatura cercana a la ambiental.
6. Se superponen las mallas a partir de la charola de fondo, en el siguiente orden, Núm. 0.075, Núm. 0.150, Núm. 0.250, Núm. 0.425, Núm. 0.850 y Núm. 2.0. Se vierte el material sobre la malla superior, se coloca la tapa, y se efectúa la operación de cribado, imprimiendo al juego de mallas un movimiento vertical y horizontal, durante 5 minutos; en esta operación es conveniente utilizar el agitador mecánico.



Figura 19. Juego de mallas.

7. Se quita la tapa, se separa la malla Núm. 2.0 y se agita sobre una charola. Hasta que se estime que el peso del material que pase dicha malla durante 1 minuto, no sea mayor de 1 gr. Se vierte sobre la malla Núm. 0.850 el material que paso la malla Núm. 2.0 y se deposito en la charola. Se repite este procedimiento del cribado adicional con cada una de las mallas restantes. Las partículas que hayan quedado atoradas deberán regresarse a las porciones retenidas correspondientes, cepillando las mallas por al revés. A continuación se pesan los materiales retenidos en cada una de las mallas y se anotan los pesos respectivos como W_j .

III.2.4. Densidad de sólidos.

Procedimiento.

1. Inmediatamente después de preparar la muestra que pasa la malla N°40, utilizando el embudo, se introduce el material en el matraz previamente calibrado. Posteriormente se llena el matraz con agua destilada hasta aproximadamente la mitad de su capacidad y se coloca el matraz en baño maría por aproximadamente 15 o 20 minutos.
2. Empleando el dispositivo de succión, se aplica vacío al matraz durante 15 min, con objeto de extraer el aire atrapado en la muestra. Para facilitar este proceso se agita cuidadosamente la suspensión con un movimiento giratorio del matraz alrededor de su eje. La succión máxima que se aplique no deberá exceder de 100 mm de Hg

(0.136 kg/cm^3). En caso de no contar con el dispositivo de succión, utilizando la parrilla eléctrica o fuente de calor, se pone en ebullición el agua del matraz durante 10 min aproximadamente, moviendo al mismo tiempo el material con el agitador mientras hierve, hasta expulsar el aire atrapado.

3. Se deja enfriar el matraz hasta alcanzar la temperatura ambiente y se adiciona el volumen de agua destilada necesaria para alcanzar la marca de aforo, y en su caso, se vuelve aplicar el vacío para asegurar que no haya quedado aire atrapado en la muestra, lo cual ocurriría cuando ya no se observe ninguna variación en el nivel del menisco; si es necesario, se quitara o agregara agua destilada utilizando el cuentagotas, de tal forma que el nivel inferior del menisco coincida con la marca de aforo.
4. Se secan cuidadosamente la superficie exterior del matraz y el interior del cuello del mismo. Para esta última operación se emplea un lienzo absorbente enrollado, evitando tocar el menisco.
5. Se obtiene la masa del matraz con el material y el agua, registrándolo como, W_{fsw} , en gr.
6. Se tapa el matraz y se invierte varias veces en forma cuidadosa con el fin de uniformizar la temperatura de la suspensión, a continuación se coloca el bulbo del termómetro en el centro del matraz y se registra la temperatura, misma que es considerada como la temperatura de la prueba t_p .
7. Hecho lo anterior, se vierte toda la suspensión a una capsula de porcelana, empleando el agua necesaria para arrastrar todas las partículas de suelo y se deja reposar durante 24 h. Se elimina el agua sobrante mediante una cuidadosa decantación y se lleva la muestra al horno para su secado total a masa constante, a una temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$; se determina y se anota la masa seca de la muestra, W_s , en gr.
8. Finalmente, utilizando la curva de calibración del matraz, se obtiene la masa del matraz con el agua, en gr, correspondiente a la temperatura de prueba t_p y se registra como W_{fw} .

Cálculos

Se calcula y se reporta como resultado de la prueba lo siguiente:

- a) La densidad relativa del material seco, se determina empleando la siguiente expresión:

$$S_s = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}}$$

Donde:

S_s = Densidad relativa de sólidos del material, (adimensional).

W_s = Masa del material secado al horno, (gr).

W_{fw} = Masa del matraz lleno de agua a la temperatura de prueba t_p , determinada gráficamente de la curva de calibración del matraz, (gr).

W_{fsw} = Masa del matraz conteniendo al suelo y agua hasta la marca de aforo, a la temperatura de prueba t_p , (gr).

- b) La absorción del material, se determina empleando la siguiente expresión:

$$W_{ab} = \frac{W_{sat} - W_s}{W_s} 100$$

Donde:

W_{ab} = Absorción del material, (%).

W_1 = Masa del suelo no cohesivo, saturado y superficialmente seco, (g).

W_s = Masa del material secado al horno, (g).

III.2.5. Prueba de fluidez.

Ya que no existen especificaciones para la fluidez de las mezclas de arcilla, se toma como referencia la prueba de fluidez en morteros, para así poder calcular el porcentaje de agua, que de una mayor manejabilidad de la mezcla.

El objetivo de esta prueba es determinar el agua necesaria para que la mezcla sea manejable, plástica y dúctil.

Equipo:

- Mesa de fluidez eléctrica o manual.
- Aceite SAE-10 o cualquier otro lubricante con la misma densidad.
- Molde.
- Calibrador.
- Varilla para compactar 5/8”.

Procedimiento de prueba.

1. Lubricación de la mesa de fluidez. El eje vertical de la mesa de fluidez se mantendrá limpio y lubricado con aceite SAE-10. No debe haber aceite entre las caras de apoyo de la saliente del eje y el soporte. El aceite sobre la cara de la leva disminuirá el desgaste y facilitará la uniformidad del funcionamiento, se recomienda levantar la mesa y dejarla caer doce veces antes de comenzar a realizar la prueba.
2. El molde para colocar el espécimen para el ensaye será de bronce o latón con diámetro de la boca superior de 70 mm, las superficies definidas por la base y el borde superior serán perpendiculares entre sí y al eje del cono vertical.
3. El calibrador se utilizará para medir el diámetro de la mezcla extendida en la mesa de fluidez, tendrá una exactitud tal que la distancia entre las quijadas deberá ser de 102 mm cuando el indicador se encuentre en cero.
4. Se debe humedecer la parte superior de la mesa, se limpiará del material arenoso, y se eliminará el exceso de agua con una franela húmeda, todo para poder

realizar el ensaye, se centra el molde en la mesa, después se ajusta y se llena, en dos capas, que en total dan el volumen del molde, se compacta cada una de las capas con 25 golpes, las cuales se distribuyen en la sección transversal, teniendo cuidado de no penetrar la capa anterior, al finalizar se enrasa con una llana el exceso de mortero y se retira, limpiando el área de la mesa que se encuentra al molde, el molde se removerá con un tirón firme hacia arriba. La mesa se eleva y se deja caer 1.3 cm, 15 veces durante 15 segundos. Es decir una caída por cada segundo, durante 15 segundos, haciendo girar la leva a una velocidad uniforme, el diámetro del mortero extendido será el promedio de 6 medidas distribuidas simétricamente leídas y redondeadas al 0.5 cm.

Cálculos.

Se registra como el porcentaje en que se incrementa el diámetro del mortero con respecto al diámetro original de la base de la mezcla moldeada.

$$Fluidez\% = \left(\frac{25cm - \text{diámetro extendido}}{25cm} \right) \times 100$$



Figura 20. Mesa para la prueba de fluidez.

III.2.6. Compresión simple. (ASTM C109/C109M-07).

Equipo.

- Máquina universal de pruebas
 - Una porción de arcilla procurando que sea la cantidad suficiente para llenar los moldes que deseamos llenar.
 - Un molde con dimensiones de 5 X 5 X 5 cm.
 - Un pisón de material no absorbente.
 - Una balanza con aproximación al décimo de gramo.
 - Una probeta graduada.
 - Espátulas.
 - Cantidad de agua calculada en la prueba de fluidez.
1. Se elabora la mezcla con las proporciones correspondientes arcilla-agua, arcilla-adición-agua. Procurándose que sea suficiente para el colado de los moldes. Cubrirse ligeramente las caras interiores con aceite o grasa lubricante ligeramente y posteriormente se llena el molde en cuatro capas, aplicando con el pisón ocho golpes a cada capa repartidas en toda su área, se enrasa el molde con la espátula.
 2. Se descimbran los especímenes cuando estén parcialmente secos de modo que puedan ser retirados del molde sin ser deformados por el tacto.
 3. Se prueban los especímenes según la edad de prueba indicada.
 4. Se miden las dimensiones del espécimen que va a estar en contacto con la platina móvil de la máquina universal de pruebas. Se llevan las muestras a la máquina debiendo poner en la platina fija.
 5. Se debe girar el espécimen quedando la parte superior donde se coló a uno de los costados para que la carga se aplique en uno de los costados del espécimen.

Cálculos.

$R = W/A$

Dónde.

R= Resistencia a la compresión en kg/cm^2 .

W= Carga de ruptura de la muestra en kg.

A= Área de la muestra en cm^2 .

III.2.7.Tensión en briquetas (ASTM C190-59-2000).

Objetivo. Determinar la resistencia a la tensión en un material de arcilla secado a temperatura ambiente con/sin estabilizante.

Equipo.

- Un molde para fabricar briquetas.
- Espátula, charolas, vidrio, una probeta graduada.
- Máquina de pruebas con mordazas especiales para briquetas.
- Munición o postas para aplicar la carga.
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento.

1. Realizar la mezcla de arcilla con agua y su respectivo porcentaje de estabilizante en una charola, se procede a llenar los moldes previamente engrasados comprimiendo la mezcla con el dedo índice y se enrasa con la espátula.
2. Después hay que descimbrar las briquetas una vez que no se deformen al tacto.
3. Se toman las medidas de la sección media (S_m) de la briqueta, se lleva a la máquina que previamente será nivelada, se aplicará la carga lentamente por medio de municiones hasta la falla de las muestras, las municiones serán colocadas en la tolva de la máquina.

4. Después de la falla de la muestra se retirarán las municiones pesándolas al décimo de gramo. El peso de las municiones (P_m) será considerado como la carga que soportó la sección media de la briqueta.

Cálculos.

$$R = \frac{P_m \times 50}{S_m}$$

Dónde.

R= resistencia a la tensión en kg/cm^2 .

P_m = peso de las municiones o carga de ruptura en kg.

S_m = sección media de la briqueta en cm^2 .

50= Constante de la máquina. Michaelis de tensión.

III.2.8. Determinación de la resistencia a la flexión en vigas de arcilla ASTM C293 (cargada en el punto medio).

Objetivo. Conocer el procedimiento de ensaye para determinar la resistencia a flexión de arcilla en vigas moldeadas en el laboratorio.

Equipo.

- Molde para vigas de 4 X 4 X 16 cm.
- Un pisón de material no absorbente.
- Máquina de pruebas.
- Accesorios para flexión (apoyos redondos de acero).
- Vernier o fluxómetro.

Procedimiento.

1. Realizar la mezcla de arcilla con agua y su respectivo porcentaje de estabilizante en una charola, se procede a llenar los moldes previamente engrasados, apisonando con golpes uniformes en dos capas, y por último se enrasa con la espátula.
2. Se toman las dimensiones reales de la muestra.
3. Se gira la muestra de la parte superior donde se coló.
4. Se marca la muestra donde va a ser aplicada la carga y donde se apoyará (centro de la muestra y a una pulgada de separación para los apoyos en ambas extremidades).
5. Se coloca la muestra en la máquina universal, cuidando que los apoyos coincidan con las marcas. Se nivela la máquina.
6. Se aplica la carga lentamente hasta la ruptura.

Cálculos.

Si la fractura ocurre en el tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calculará con:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en no más del 5% del claro, el módulo de ruptura se calculará con:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Donde:

R =Módulo de ruptura en kg/cm²

P =Carga de ruptura en Kg.

L =Claro en cm.

b =Peralte promedio en cm.

d =Ancho de la muestra en cm.

a =Distancia entre la línea de falla y el apoyo más cercano.

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en más del 5% del claro,

Los resultados deben de descartarse.

El esfuerzo cortante se calcula con la siguiente expresión.

$$\sigma = \frac{3P}{2A}$$

σ = Esfuerzo cortante.

A=Área transversal de la viga.

P =Carga de ruptura en Kg.

III.2.9. Módulo de elasticidad dinámico en especímenes prismáticos por medio de la frecuencia resonante (método de prueba no destructivo).

Los ensayos no destructivos son una herramienta útil para determinar la calidad del material, pero en ningún caso reemplazan a los destructivos.

En el caso de estructuras de dudosa calidad, ya sea afectada por esfuerzos o ataques de elementos agresivos al hormigón, se suele aplicar esta técnica con el fin de efectuar un diagnóstico preliminar del elemento en estudio. Efectuado éste, se podrán investigar las zonas con mayor daño con técnicas destructivas, y emitir una opinión más fundada sobre la estructura. En general se puede señalar, que los ensayos no destructivos son la etapa previa de los ensayos.

Entre las pruebas no destructivas se encuentra el uso del equipo ultrasónico. Con esta prueba es posible determinar el grado de homogeneidad, entre otras características. Esto se logra a través de mediciones de la velocidad ultrasónica sobre el material que se va a probar.

Los materiales que se ensayan con este método son heterogéneos, como la madera y el hormigón; se excluyen los metales, ya que provocan una serie de irregularidades que afectan los resultados obtenidos.

Así el equipo hace posible conocer el hormigón en las siguientes cualidades: homogeneidad, la presencia de fisuras, los huecos, los cambios en hormigón debidos a diferentes causas como ataques del fuego y bioquímicos, así como también la calidad del hormigón.

III.3. Estadística e ingeniería.

Pocas áreas han experimentado tan poderosamente el impacto del desarrollo reciente de la estadística como la ingeniería y la administración industrial. Ciertamente, sería difícil sobreestimar las contribuciones de la estadística a los problemas de la producción, al uso eficaz de materiales y fuerza de trabajo, a la investigación básica y al desarrollo de nuevos productos. Como en el caso de las demás ciencias, la estadística se ha convertido en herramienta vital para los ingenieros, ya que les permite comprender fenómenos sujetos a variación y predecirlos o controlarlos eficazmente.

III.3.1. Antecedentes.

Las técnicas estadísticas se utilizan en casi todos los aspectos de la vida. Mediante las encuestas se recaba toda clase de información que se desee para ser procesada estadísticamente lo cual es muy importante para conocer y predecir resultados [17].

La estadística según New Collegiate Dictionary de Webster se define como “una rama de las matemáticas que trata de la recopilación, análisis, la interpretación y la presentación de una gran cantidad de datos numéricos”. Kendall y Stuart afirman: “la estadística es la rama del método científico que trata de los datos reunidos al contar o medir las propiedades de una población”. La estadística trata los métodos para obtener conclusiones a partir de los resultados de los experimentos o procesos [17].

III.3.2. Población y muestra.

En el trabajo estadístico es importante saber cuándo estamos tratando con una población completa de observaciones, o con una muestra de observaciones seleccionadas de una población específica [16].

Una población se define como la totalidad de valores posibles (mediciones o conteos) de una característica particular de un grupo especificado de objetos. Tal grupo especificado de objetos se llama un universo. Obviamente, un universo puede tener varias poblaciones asociadas con él. Estos son algunos ejemplos de universos y poblaciones:

- 1) Los empleados de la Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo, alrededor tal hora y tal año.
- 2) Asociados con el universo anterior, hay muchas poblaciones de

Tipos de sangre, población de pesos de los empleados, población de pesos de los empleados, la población de los empleados, etc.

Este solamente fue un ejemplo para indicar la importancia de definir claramente la población en investigación [18].

El concepto de muestra, correspondiente a una población, seleccionada de acuerdo con una regla o plan. Las cosas importantes que debemos saber son: 1) que estamos tratando con una muestra y 2) qué población ha sido muestreada [18].

Si tratamos con toda la población, nuestro trabajo estadístico será principalmente descriptivo. Por el contrario, si tratamos con una muestra. El trabajo estadístico no únicamente describe la muestra, sino que también proporciona información respecto a la población muestreada [18].

III.3.3. Tipos de muestra.

En la práctica se han encontrado varias clases de o tipos de muestras. Las características que distinguen a un tipo de otro son: 1) la manera de obtención de la muestra, 2) el número de variables consideradas, 3) el fin para el que fue extraída la muestra. La manera de obtener la muestra es muy importante y será discutida posteriormente [18].

Las muestras pueden agruparse en dos grandes clases, cuando se considera su método de selección, a saber, las que seleccionan por criterio y las que se seleccionan por medio de un mecanismo casual.

Las muestras elegidas de acuerdo con un mecanismo casual, son llamadas muestras de probabilidad, si cada elemento de la población tiene una probabilidad conocida de pertenecer a la muestra. En particular, si cada elemento tiene la misma probabilidad de pertenecer a la muestra, entonces esta es conocida como una muestra al azar [18].

¿Por qué se prefieren las muestras al azar a las muestras elegidas subjetivamente? Una contestación a esta pregunta puede formularse de la siguiente manera: una buena muestra es aquella a partir de la cual pueden hacerse generalizaciones respecto a la población; mientras que una mala muestra es aquella que no permite tales generalizaciones[18].

Para generalizar las muestras de la población necesitamos estar capacitados para deducir, a partir de cualquiera de las suposiciones respecto a la población, cuando la muestra observada está dentro del rango de variación del muestreo que puede ocurrir para dicha población, bajo el método dado de muestreo. Tales deducciones pueden hacerse, sí y sólo sí, se aplican las leyes de la probabilidad matemática. El objetivo de la naturaleza al azar de este tipo de muestreo, es asegurar que esas leyes son aplicables. Si tuviésemos leyes igualmente estables y muy bien definidas de las tendencias personales, se podría usar el muestreo subjetivo [18].

III.3.4. Presentación de datos.

Una vez obtenida una muestra al azar de una población específica, se recurre a una manera de reducirla a una manera más entendible ya que en una forma amplia de datos. No es fácil de apreciar ningún patrón o norma en los valores observados, ni es fácil estimar el tiempo de funcionamiento. Es conveniente ordenar los valores en una distribución de frecuencias. Para efectuar esto primero hacemos el arreglo de valores por el orden de magnitud, y así establecemos el rango de nuestros datos, y además podemos estimar burdamente el promedio de la función [18].

III.3.5. Definiciones.

Estadística descriptiva. Recopilación y análisis de los datos. Pueden ser datos referentes a toda la población, o solo una muestra, pero en este último caso no se pretende sacar conclusiones acerca de la población a la que pertenece la muestra [19].

Estadística inferencial o deductiva. Utiliza la información que se desprende del análisis de una muestra para realizar una estimación de las propiedades de la población de la que se extrajo [19].

Gráficos. Un gráfico es una representación de una relación entre variables. Muchos tipos de gráficos aparecen en estadística, según la naturaleza de los datos involucrados y el propósito de los gráficos [17].

Distribución de frecuencias.

Fila de datos. Una fila de datos consiste en datos recogidos que no han sido organizados numéricamente [17].

Ordenación. Es un conjunto de datos numéricos de orden creciente o decreciente, la diferencia entre el mayor y el menor se llama rango de ese conjunto de datos [17].

Distribución de frecuencias. Es una disposición organizada de los datos recogidos en un estudio. Contiene un listado de las distintas modalidades del fenómeno considerado, con la frecuencia absoluta, relativa y acumulada de cada una. Cuando el número de modalidades es demasiado grande (esto siempre ocurre con las escalas continuas) se agrupan en clases [19].

Frecuencia absoluta o moda. La frecuencia absoluta de una modalidad es el número de veces que se repite esa modalidad como resultado de ese experimento [19].

Frecuencia relativa. Es la frecuencia absoluta partida por el número total de observaciones [19].

Frecuencia acumulada (Absoluta o relativa). Igual que en cada uno de los anteriores casos pero sumado, no solo, los resultados de la modalidad de que se trate, sino también las de todas las precedentes [19].

Histograma y polígonos de frecuencia. Son dos representaciones gráficas de las distribuciones de frecuencias [17].

1.- Histograma de frecuencias, consiste en un conjunto de rectángulos con base en el eje horizontal, centros en las marcas de clase y longitudes iguales a los tamaños de los intervalos de clase; y áreas proporcionadas a las frecuencias de clase.

Si los intervalos de clase tienen todas las mismas anchuras, las alturas de los rectángulos son proporcionales a las frecuencias de clase, entonces es costumbre tomar las alturas iguales a las frecuencias de clase.

2.- Un polígono de frecuencias es un gráfico de trozos de frecuencia de clase con relación a la marca de clase. Puede obtenerse conectando los puntos medios de las partes superiores de los rectángulos del histograma.

Curvas de frecuencia. Los datos recogidos pueden considerarse usualmente como pertenecientes a una muestra de una población grande. Ya que son posibles muchas observaciones sobre esa población, es teóricamente posible escoger intervalos de clase muy pequeños y tener todavía números razonables de observación de cada clase [17].

Tipos de curva de frecuencia. 1.- Las curvas de frecuencias simétricas o de campana de Gauss, se caracterizan por las observaciones equidistantes del máximo central. Tienen la misma frecuencia.

2.- Las curvas de frecuencias sesgadas, la cola de la curva a un lado del máximo central es más larga que el otro lado. Si la cola mayor está a la derecha la curva es asimétrica y positiva y viceversa.

3.- Una curva de frecuencias en forma de U tiene 2 máximos en ambos extremos.

4. Una curva de frecuencia bimodal tiene dos máximos.

5.-Una curva de frecuencia multimodal tiene más de dos máximos.

III.3.6. Cálculo de los parámetros estadísticos de una muestra.

Si se va a describir una muestra en una forma razonable, es de desear que se calculen ciertos valores representativos que resuman un gran volumen de información [18].

Media aritmética. No es de extrañar que la media aritmética sea el más común de estos valores representativos. La media de la muestra representada con \bar{X} , se define como el promedio aritmético de todos los valores de la muestra [16].

$$\text{Media aritmética } \bar{X} = \frac{(X_1 + \dots + X_n)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \sum X/n$$

Donde n es el número de observaciones en la muestra.

En el ejemplo anterior, se ilustra el método de cálculo de la media aritmética. Debe notarse que la media aritmética está afectada por cada elemento de la muestra y principalmente por los valores extremos. Dos propiedades interesantes de la media aritmética son: 1) la suma de las desviaciones a partir de la media aritmética es cero y 2) la suma de los cuadrados de la desviación a partir de la media aritmética es menor que la suma de los cuadrados de las desviaciones a partir de cualquier otro valor [18].

Como era de esperarse, la media tiene ventajas y desventajas. Las ventajas son: 1) es el promedio más comúnmente empleado, 2) es fácil de calcular, 3) se entiende fácilmente, 4) se presta a manipulaciones algebraicas. La mayor desventaja de la media aritmética es que está desproporcionalmente afectada por los valores extremos, y que por consiguiente puede estar muy lejos de ser una representación de la muestra [18].

Media geométrica. La media geométrica de G de un conjunto de N números positivos es la raíz N-ésima del producto de esos números y se denota como:

$$G = \sqrt[N]{X_1 X_2 X_3 \dots X_N}$$

Mediana. La mediana de un conjunto de números ordenados en magnitud es el valor central o la media de los dos valores centrales. Para datos agrupados, la mediana obtenida por interpolación viene dada por:

$$M = L_1 + \left[\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{mediana}} \right] C$$

Donde:

M = Mediana.

L₁ = Frontera inferior de la clase de la media.

N= Número de datos (frecuencia total).

(Σ f)₁ = suma de frecuencias de la clase de la mediana.

f_{mediana} = Frecuencia de la clase mediana.

C = Rango del intervalo de clase de la mediana.

La moda. Otro valor útil en la descripción de una muestra es la moda. La moda se define como el valor que ocurre más frecuentemente en la muestra. La moda de la muestra se representa con MO. Es obvio que la moda no siempre ocurrirá con un valor central, si no, como ocurre a menudo, puede ser un valor extremo. Así mismo una muestra puede tener más de una moda. Desde ahora haremos distinción entre la moda absoluta o moda relativa. Una moda absoluta es la que hemos definido (por supuesto que puede haber más de una moda absoluta); una moda relativa es el valor que ocurre con mayor frecuencia que sus valores vecinos aún si no es una moda absoluta [18].

$$MO \cong L_m + \left[\frac{d_1}{d_1 + d_2} \right] (C)$$

Donde:

L_m = Límite inferior de la clase modal.

d_1 = la diferencia (sin consideración de signo) entre la frecuencia de la clase modal y la frecuencia de la clase precedente.

d_2 = la diferencia (sin consideración de signo) entre la frecuencia de la clase modal y la frecuencia de la clase siguiente.

C = Amplitud de la clase modal.

Ya que la moda, por definición, es el valor más representativo, a menudo se considera como el valor más representativo de los valores representativos discutidos. Sin embargo, su importancia disminuye a medida que el número de observaciones llega a ser limitado [18].

La desviación estándar y la varianza. Tal vez, la medida de variabilidad mejor conocida y más ampliamente empleada, es la desviación estándar. Casi de igual importancia es el cuadrado de la desviación estándar, cantidad que es conocida como la varianza [16].

Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}$$

Varianza

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{(n-1)}}$$

IV. Resultados.

IV.1. Medición del pH (potencial de Hidrogeno).

Para la medición del pH seguí el procedimiento de la norma ASTM D 6276 así como la utilización de tiras reactivas para una comparación. El pHmetro utilizado fue un HI 98127 de la marca HANNA instruments, y las tiras indicadoras de ph fueron unas de la marca MERCK.

Un punto que es necesario mencionar es que al realizar la medición del pH con el pHmetro la norma marca que se tiene q mantener una temperatura de 25 °C lo cual por las condiciones del clima y espacio resultaba un poco difícil pero aun así no variando demasiado, para lo cual realice unas pruebas manteniendo la temperatura a 25 °C y otra de comparación en la cual la lectura de temperatura variaba con algunos grados y el resultado fue que con la variación de temperatura en la muestra de tan sólo algunos grados no era significativa la variación del pH en el pHmetro como se muestra a continuación.

Material natural

Lectura de PH		Temperatura °C
Phmetro	Tira	
5.7	5	23.3
5.7	5	25

Material natural

Lectura de PH		Temperatura °C
Phmetro	Tira	
5.6	5	25
5.7	5	25

Estabilizante: Cal (cal muro)

% estabilizante	Lectura de PH		Temperatura °C
	Phmetro	Tira	
Sol. Saturada	12.4	14	24.8
2%	11.3	11	24.2
4%	12	12	24.5
6%	12.3	12	24.7

Estabilizante: Cal (cal muro)

% estabilizante	Lectura de PH		Temperatura °C
	Phmetro	Tira	
Sol. Saturada	12.5	14	25
2%	11.3	11	25
4%	12.1	12	25
6%	12.3	12	25

Las pruebas realizadas posteriormente ya no mantuvo exactamente la temperatura a 25 °C pero ± 3 °C ya que no variaba realmente la lectura del phmetro, los resultados son los siguientes:

Estabilizante: Mucílago de Nopal

% estabilizante	Lectura de PH		Temperatura °C
	Phmetro	Tira	
Sol. Saturada	5.3	4	23.6
2%	5.8	5	24.3
4%	5.9	6	24.2
6%	6.2	6	23.8

Estabilizante: Hidróxido de sodio

% estabilizante	Lectura de PH		Temperatura °C
	Phmetro	Tira	
Sol. Saturada	12.8	14	25.2
2%	12.3	12	24.5
4%	12.5	13	24.3
6%	12.6	13	24.2

Estabilizante: Yeso

% estabilizante	Lectura de PH		Temperatura °C
	Phmetro	Tira	
Sol. Saturada	7.6	7	23
2%	5.6	6	23.5
4%	5.8	5	23.2
6%	5.9	6	23.7

Estabilizante: Cemento gris (tolteca)

% estabilizante	Lectura de PH		Temperatura °C
	Phmetro	Tira	
Sol. Saturada	11.9	12	24.6
2%	10.8	10	24.4
4%	11.5	11	24.4
6%	11.7	11	24.3

IV.2. Clasificación del material analizado.

Para clasificar el material realice la prueba de los límites de consistencia o límites de Atterberg, realicé tres pruebas ya que los resultados obtenidos rondaban sobre los límites de la línea A de la carta de plasticidad y con límite líquido entre 50. Para lo cual realice 3 pruebas obteniendo las siguientes clasificaciones.

LIMITE LÍQUIDO										
Prueba No.	Cápsula No.	NÚMERO DE GOLPES			Peso Cápsula + Suelo Húmedo	Peso Cápsula + Suelo Seco	Peso del Agua	Peso de la cápsula	Peso del suelo seco	Contenido de agua (w)
-----	-----	-----	-----	-----	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	%
1	27	37			31.74	24.43	7.31	11.89	12.54	58.29
2	8		29		30.05	21.65	8.4	8.42	13.23	63.49
3	39			18	27.53	19.59	7.94	8.55	11.04	71.92

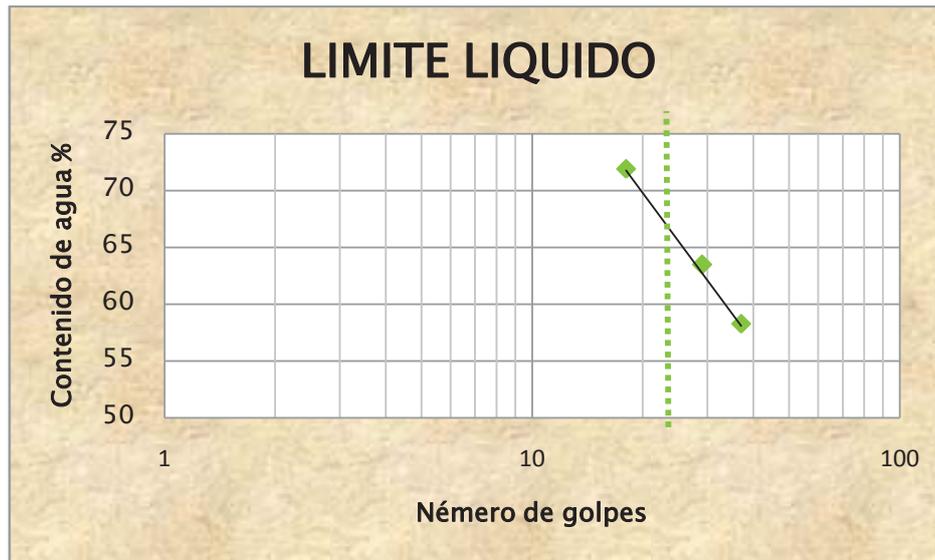
LIMITE PLÁSTICO										
1	44				18.17	16.9	1.27	11.78	5.12	24.80

CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA										
C. Petri	3				109.36	98.25	11.11	80.4	17.85	62.24

Volumen Inicial =	17.94 cm ³
Volumen Final =	9.35 cm ³
Contracción Volumétrica (CV %) =	14.12

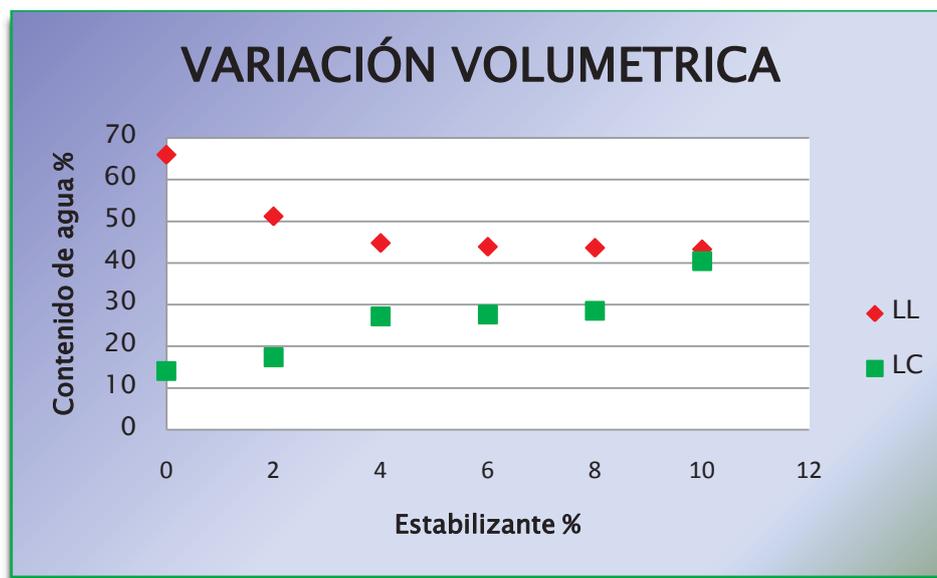
Contracción lineal

Longitud Inicial =	10 cm
Longitud Final =	8.25 cm
Contracción Lineal (CL %) =	17.5



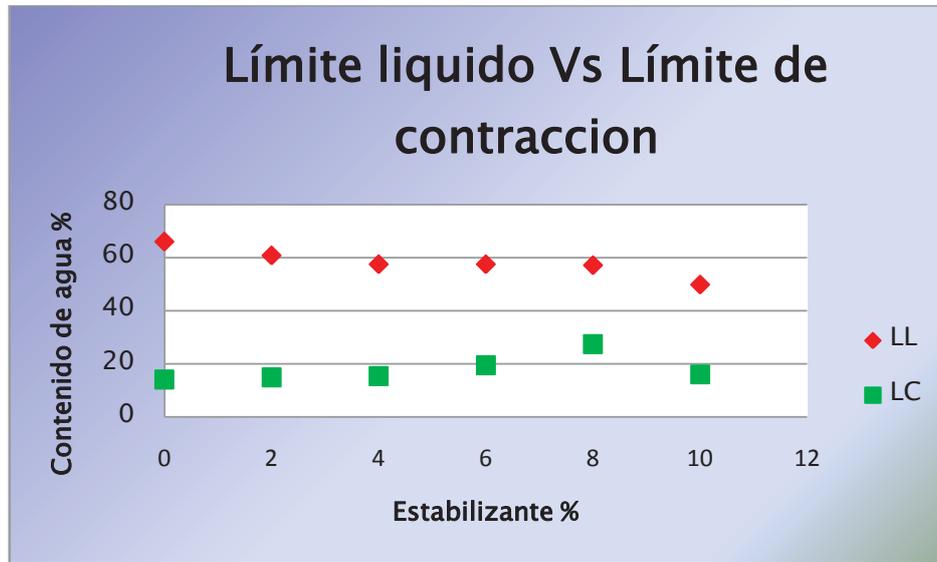
IV.2.1. Límites de consistencia.

LÍMITES	M. NATURAL	ESTABILIZANTE CAL				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL	66	51.2	44.8	43.9	43.64	43.2827
LP	24.8	25.8	35.38	39.47	30.18	36.46
IP	41.2	25.4	9.42	4.43	13.46	6.82
LC	14.12	17.43	27.21	27.67	28.56	40.46
CL	17.5	13.1	7.9	6.2	6.01	4.2
SUCS	CH	CH	ML	ML	CL	ML
	0	2	4	6	8	10
Δ C. agua%	51.88	33.77	17.59	16.23	15.08	2.8227



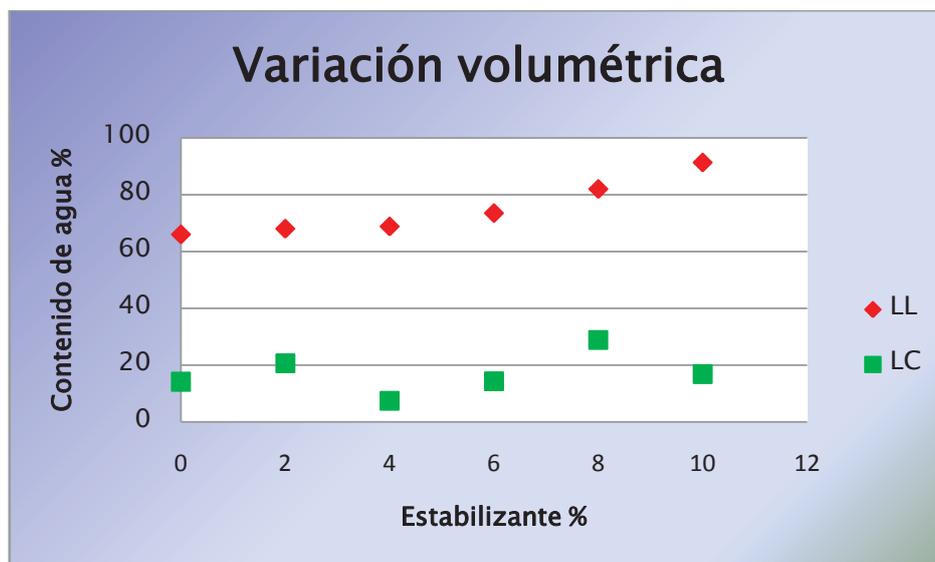
Gráfica 1.Cal.

LIMITES	M. NATURAL	ESTABILIZANTE YESO				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL	66	60.8	57.5	57.5	57.127	49.832
LP	24.8	22.32	17.43	25.44	16.08	19.91
IP	41.2	38.48	40.07	32.06	41.04	29.92
LC	14.12	14.95	15.45	19.53	27.45	16.06
CL	17.5	15.9	15.5	14.55	15.6	20.27
SUCS	CH	CH	CH	CH	CH	CL
	0	2	4	6	8	10
Δ C. agua%	51.88	45.85	42.05	37.97	29.677	33.772



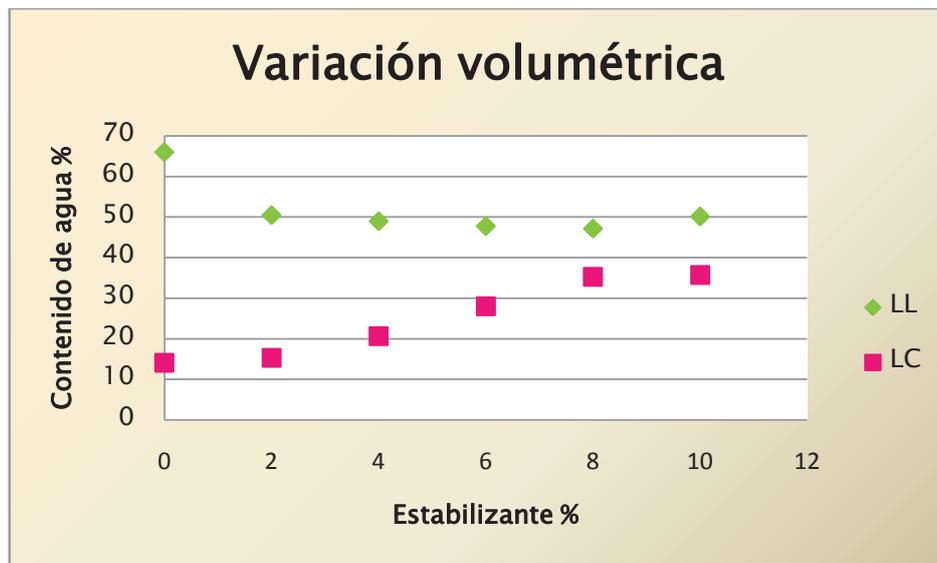
Grafica 2. Yeso

LIMITES	M. NATURAL	ESTABILIZANTE MUCÍLAGO DE NOPAL				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL	66	68	68.8	73.5	82	91.345
LP	24.8	22.31	19.94	15.22	19.26	19.66
IP	41.2	45.69	48.86	58.28	62.89	71.68
LC	14.12	20.61	7.43	14.28	28.82	16.82
CL	17.5	16.1	16.4	16.2	17.9	19.3
SUCS	CH	CH	CH	CH	CH	CH
	0	2	4	6	8	10
Δ C. agua%	51.88	47.39	61.37	59.22	53.18	74.525



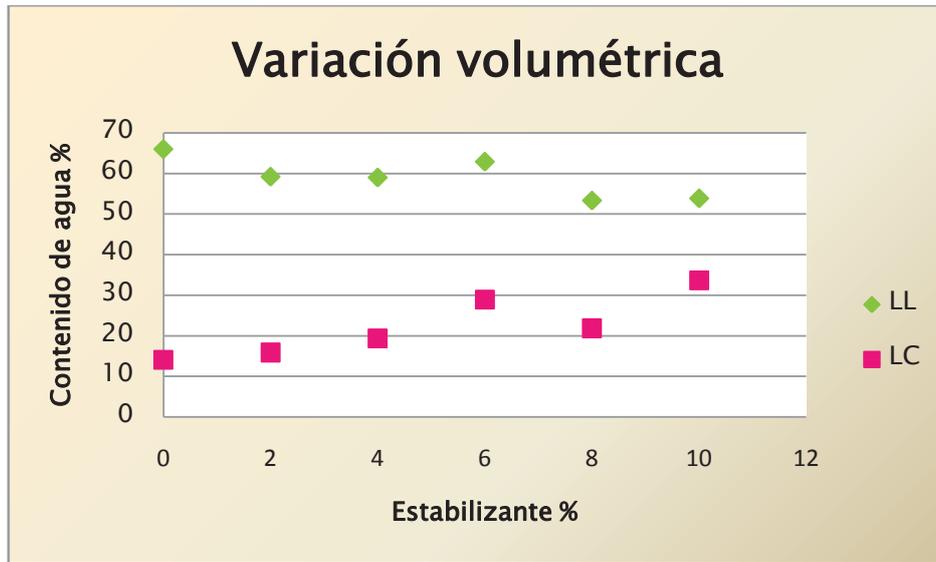
Gráfica 3. Mucílago de nopal.

LIMITES	M. NATURAL	ESTABILIZANTE CEMENTO				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL	66	50.5	49	47.8	47.17	50.16
LP	24.8	29.69	22.82	30.5	30.9	39.57
IP	41.2	20.81	26.18	17.3	10.27	10.59
LC	14.12	15.34	20.67	28.04	35.32	35.77
CL	17.5	13	12.3	7	5.6	4.9
SUCS	CH	MH	CL	CL	ML	ML
	0	2	4	6	8	10
Δ C. agua%	51.88	35.16	28.33	19.76	11.85	14.39



Grafica 4. Cemento.

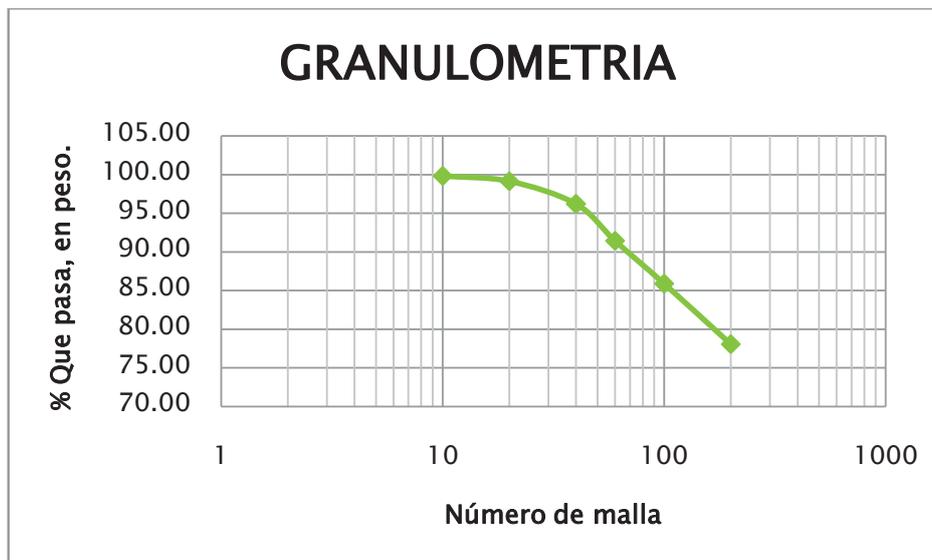
LIMITES	M. NATURAL	ESTABILIZANTE HIDROXIDO DE SODIO				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL	66	59.2	59	62.9	53.32	53.86
LP	24.8	53.91	30.45	30.27	24.91	28.4
IP	41.2	5.29	28.55	32.63	28.41	25.46
LC	14.12	15.91	19.37	28.94	21.87	33.69
CL	17.5	16.1	13.48	11.1	9	6.8
SUCS	CH	MH	CH	CH	CH	CH
	0	2	4	6	8	10
Δ C. agua%	51.88	43.29	39.63	33.96	31.45	20.17



Grafica 5. Hidróxido de sodio.

IV.3. Granulometría.

GRANULOMETRÍA			
Malla Nº	Peso del suelo retenido (gr)	% Retenido parcial	% Que pasa
10	0.36	0.18	99.82
20	1.36	0.68	99.14
40	5.88	2.94	96.20
60	9.53	4.765	91.44
100	11.1	5.55	85.89
200	15.62	7.81	78.08
pasa 200	156.15	78.075	0.00
suma	200	100	



Grafica 6. Curva granulométrica.

IV.4. Densidad de sólidos.

DENSIDAD DE SOLIDOS (Ss)			
PRUEBA No.	1	2	3
Matraz No.	10	11	12
Wfsw (gr.)	719.2	719.2	724.5
Temperatura (C°)	35	31.5	33
Wfw (gr.)	689.635	689.339	694.807
Capsula de evaporación No.	A	B	C
Peso cápsula muestera seca (gr.)	808.3	809.7	703.7
Peso cápsula (gr.)	761.5	763	657.2
Ws (gr.)	46.8	46.7	46.5
Ss	2.715	2.773	2.767

Para la densidad de sólidos se toma el promedio de las tres pruebas que se realizaron, para nuestro caso la $S_s = 2.751$

IV.5.Pruebas de fluidez.

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA NATURAL					
Material:					
Arcilla =		500 gr			
Agua =		200 ml			
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
10.8	10.5	10	10.8	10.5	10.5
Fluidez % = 57.93					

Para este tanteo el material no muy trabajable ya que era muy plástico y al momento de llenar el molde no se podía llenar con facilidad y quedaban burbujas de aire aun con el apisonamiento debido.

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA NATURAL					
Material:					
Arcilla =		500 gr			
Agua =		300 ml			
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
21	22.5	21	21	21.5	20
Fluidez % = 15.33					

Con esta proporción la mezcla es muy fluida y no es conveniente para el llenado de los moldes ya que se salía con facilidad de los moldes como escurrimiento por lo que se descarta.

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA NATURAL					
Material:					
Arcilla =	500 gr				
Agua =	250 ml				
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
23.5	24.5	24	25	24.5	24.5
Fluidez % =			2.67		

Con este contenido de agua la mezcla fue trabajable y se aprecio que al llenado de los moldes se hizo de forma correcta.

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA NATURAL					
Material:					
Arcilla =	500 gr				
Agua =	225 ml				
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
18.5	18	18	18.2	18	18
Fluidez % =			27.53		

Con este contenido de agua se trabaja de manera aceptable pero al momento de realizar lo llenados de los moldes aun se tiene el problema de las burbujas de aire que se generan.

Para las mezclas de arcilla-cal se realizaron los siguientes tanteos:

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -CAL 6%					
Material:					
Arcilla =	350 gr				
Cal =	21 gr				
Agua =	225 ml				
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
24	24	23.5	24	24.5	24.5
Fluidez % = 3.67					

Con esta cantidad de agua no se logro el objetivo deseado ya que era muy fluida la mezcla.

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -CAL 6%					
Material:					
Arcilla =	350 gr				
Cal =	21 gr				
Agua =	200 ml				
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
23	23	23.5	23	23.5	23.5
Fluidez % = 7.00					

Aun no se consiguió el objetivo aun era muy fluida l amezcla.

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -CAL 6%					
Material:					
Arcilla =		350 gr			
Cal =		21 gr			
Agua =		190 ml			
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
22.8	23	23	24	23	23
Fluidez % =			7.47		

Esta es la mejor proporción con respecto al agua. Ya que fue muy trabajable.

Para las mezclas de arcilla-cemento se realizaron los siguientes tanteos.

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -CEMENTO 6%					
Material:					
Arcilla =		350 gr			
Cal =		21 gr			
Agua =		180 ml			
Diámetros :					
1	2	3	4	5	6
23	22	21.5	23	21.5	22
Fluidez % =			11.33		

Siendo la de 180 ml, la que mejor se comporto.

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -CEMENTO 6%					
Material:					
Arcilla=		350 gr			
Cal =		21 gr			
Agua =		200 ml			
Diámetros :					
1	2	3	4	5	6
24	23	23	23.5	23	23.5
Fluidez % =			6.67		

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -CEMENTO 6%					
Material:					
Arcilla =		350 gr			
Cal =		21 gr			
Agua =		150 ml			
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
20	21	20.5	20	20.5	21
Fluidez % = 18.00					

Para las mezclas de arcilla- yeso se realizaron los siguientes tanteos.

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -YESO 6%					
Material:					
Arcilla=		350 gr			
Cal=		21 gr			
Agua=		200 ml			
Diametros:					
1	2	3	4	5	6
22.5	23	23	23.5	23	23
Fluidez % = 8.00					

Siendo el de 200 ml de agua la que mejor resultados se obtuvo.

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -YESO 6%					
Material:					
Arcila=	350 gr				
Cal=	21 gr				
Agua=	190 ml				
Diametros:					
1	2	3	4	5	6
22	22.5	22	22.5	22.5	22
Fluidez % = 11.00					

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -YESO 6%					
Material:					
Arcila=	350 gr				
Cal=	21 gr				
Agua=	180 ml				
Diametros:					
1	2	3	4	5	6
17.5	18.5	17	17.5	18	17.5
Fluidez % = 29.33					

Para la mezcla arcilla-hidróxido de sodio se realizaron las siguientes pruebas

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -HIDROXIDO DE SODIO 6%					
Material:					
Arcilla =	350 gr				
Cal =	21 gr				
Agua =	335 ml				
Díametros:					
1	2	3	4	5	6
22	22.5	22.5	22	22	22.5
Fluidez % = 11.00					

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -HIDROXIDO DE SODIO 2%					
Material:					
Arcilla =	350 gr				
Cal =	21 gr				
Agua =	350 ml				
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
31	30	30	30	31	30
Fluidez % = -21.33					

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -HIDROXIDO DE SODIO 6%					
Material:					
Arcilla =	350 gr				
Cal =	21 gr				
Agua =	220 ml				
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
7	6.8	7	6.5	6.5	7
Fluidez % = 72.80					

Siendo la de 335 ml con la cual se decidió debido a su mejor desempeño.

Para la mezcla arcilla-nopal se realizaron:

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -MUCÍLAGO DE NOPAL 4%					
Material:					
Arcilla =		350 gr			
Cal =		7 gr			
Agua =		178 ml			
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
8	7.5	7.5	8	7.5	8
Fluidez % = 69.00					

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -MUCÍLAGO DE NOPAL 4%					
Material:					
Arcilla =		350 gr			
Cal =		7 gr			
Agua =		188 ml			
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
11	11	10.5	11	10.5	11
Fluidez % = 56.67					

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -MUCÍLAGO DE NOPAL 4%					
Material:					
Arcilla =		350 gr			
Cal =		7 gr			
Agua =		198 ml			
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
14.5	15	14.5	14.5	14.5	14
Fluidez % = 42.00					

PRUEBA DE FLUIDEZ					
ARCILLA -MUCÍLAGO DE NOPAL 4%					
Material:					
Arcilla =		350 gr			
Cal =		7 gr			
Agua =		208 ml			
Diámetros:					
1	2	3	4	5	6
15	15.5	16	16.5	16.5	16
Fluidez % =			36.33		

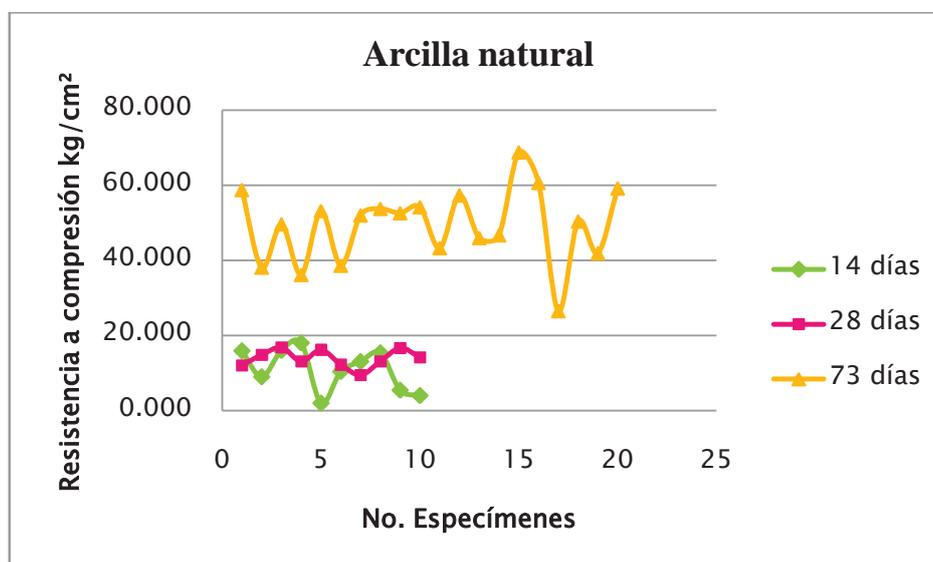
En esta prueba realice 4 debido a la dificultad para encontrar el agua adecuada, pero la cantidad de agua ideal es de 208 ml.

IV.6. Pruebas de compresión.

ARCILLA NATURAL								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
		A	B	H ₁				
14	1	4.52	4.63	4.395	175.22	20.9276	332.5	15.888
	2	4.64	4.86	4.3	171.5	22.5504	202.5	8.980
	3	4.61	4.75	4.37	185.63	21.8975	350	15.984
	4	4.46	4.55	4.245	173.84	20.293	365	17.986
	5	4.81	4.8	4.445	188.19	23.088	45.5	1.971
	6	4.54	4.54	4.405	175.95	20.6116	214.25	10.395
	7	4.49	4.61	4.33	176.38	20.6989	270	13.044
	8	4.6	4.56	4.315	174.96	20.976	322	15.351
	9	4.65	4.68	4.4	183.63	21.762	118	5.422
	10	4.77	4.65	4.455	187.13	22.1805	88.5	3.990

ARCILLA NATURAL								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
		A	B	H ₁				
28	1	4.6	4.52	4.255	155.26	20.792	250	12.02
	2	4.45	4.61	4.275	157.43	20.5145	304.5	14.84
	3	4.37	4.45	4.3	158.94	19.4465	326.5	16.79
	4	4.57	4.49	4.295	158.74	20.5193	268	13.06
	5	4.6	4.61	4.315	165.37	21.206	343	16.17
	6	4.48	4.57	4.175	159.59	20.4736	250	12.21
	7	4.71	4.54	4.155	158.05	21.3834	202	9.45
	8	4.53	4.48	4.29	160.24	20.2944	265.5	13.08
	9	4.61	4.52	4.32	165.43	20.8372	347	16.65
	10	4.6	4.7	4.09	159.77	21.62	306.5	14.18

ARCILLA NATURAL								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
		A (cm)	B (cm)	H ₁ (cm)				
73	1	4.18	4.35	4.63	158.4	18.183	1068	58.736
	2	4.17	4.5	4.67	159.4	18.765	714.5	38.076
	3	4.47	4.35	4.53	158.7	19.4445	964	49.577
	4	4.46	4.3	4.48	150	19.178	693	36.135
	5	4.44	4.25	4.44	147.8	18.87	1003	53.153
	6	4.17	4.6	4.51	157.1	19.182	740	38.578
	7	4.43	4.16	4.51	150.7	18.4288	957.5	51.957
	8	4.43	4.19	4.5	156.2	18.5617	997	53.713
	9	4.27	4.3	4.16	144	18.361	965	52.557
	10	4.3	4.6	4.53	162.4	19.78	1071	54.146
	11	4.1	4.57	4.47	150.7	18.737	810.5	43.257
	12	4.3	4.05	4.33	143.7	17.415	997.5	57.278
	13	4.43	4.16	4.74	154.9	18.4288	847	45.961
	14	4.49	4.17	4.52	153.8	18.7233	874	46.680
	15	4.42	4.32	4.55	158.8	19.0944	1312.5	68.737
	16	4.46	4.28	4.54	160	19.0888	1157.5	60.638
	17	4.55	4.24	4.51	153.3	19.292	511	26.488
	18	4.48	4.16	4.49	150	18.6368	938	50.331
	19	4.37	4.07	4.54	145.6	17.7859	745	41.887
	20	4.49	4.2	4.5	156.7	18.858	1115	59.126

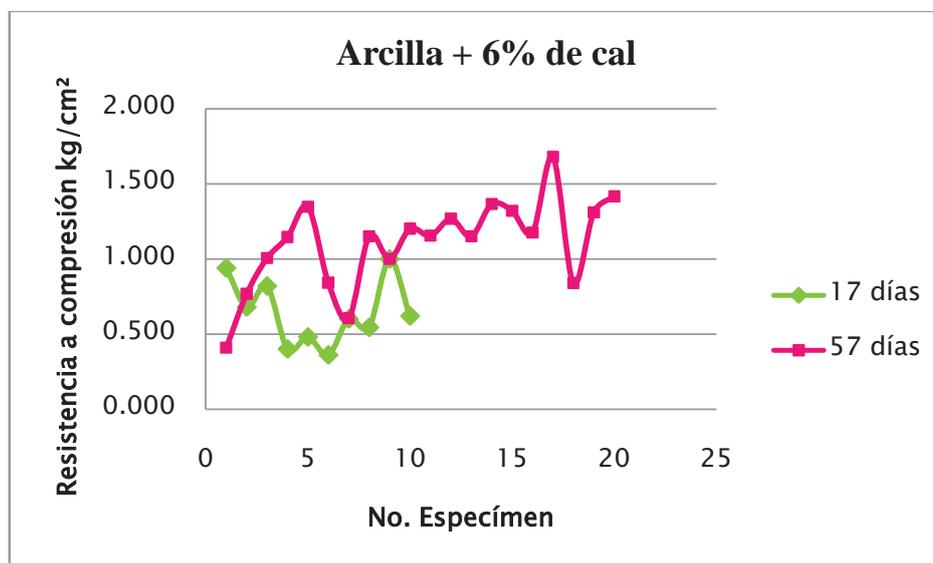


Grafica 7. Resistencia a compresión en cubos de arcilla natural.

ARCILLA -6% DE CAL								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen	Peso (gr)	Área (cm²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm²)
		A	B	H ₁				
17	1	5	5	4.72	165.24	25	23.5	0.940
	2	5	5	4.81	173.78	25	17	0.680
	3	5	5	4.845	165.62	25	20.5	0.820
	4	5	5	4.975	166	25	10	0.400
	5	5	5	4.94	163.17	25	12	0.480
	6	5	4.99	4.955	163.93	24.95	9	0.361
	7	5	5	4.905	164.13	25	15	0.600
	8	5	4.96	4.975	166.2	24.8	13.5	0.544
	9	5	5	4.94	170.36	25	25	1.000
	10	5	5	4.84	164.43	25	15.5	0.620

ARCILLA -6% DE CAL								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen	Peso (gr)	Área (cm²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm²)
		A (cm)	B (cm)	H ₁ (cm)				
57	1	5	4.89	5	161.2	24.45	10	0.409
	2	5	4.95	5	160.1	24.75	19	0.768
	3	5	4.97	5	165.8	24.85	25	1.006

4	5	4.8	5	170	24	27.5	1.146
5	5	4.97	5	164.6	24.85	33.5	1.348
6	4.93	4.82	5	159.6	23.7626	20	0.842
7	4.96	5	5	156.9	24.8	15	0.605
8	4.95	5	5	164.6	24.75	28.5	1.152
9	5	5	5	174.2	25	25	1.000
10	4.94	4.8	5	165	23.712	28.5	1.202
11	5	4.85	4.95	161.3	24.25	28	1.155
12	5	4.97	5	167.3	24.85	31.5	1.268
13	5	4.78	4.98	160.5	23.9	27.5	1.151
14	4.95	4.88	5	169.1	24.156	33	1.366
15	4.95	4.82	5	169.4	23.859	31.5	1.320
16	5	4.93	5	163.3	24.65	29	1.176
17	5	5	5	161.7	25	42	1.680
18	5	5	5	167.5	25	21	0.840
19	5	4.81	5	166	24.05	31.5	1.310
20	5	4.94	5	164.8	24.7	35	1.417

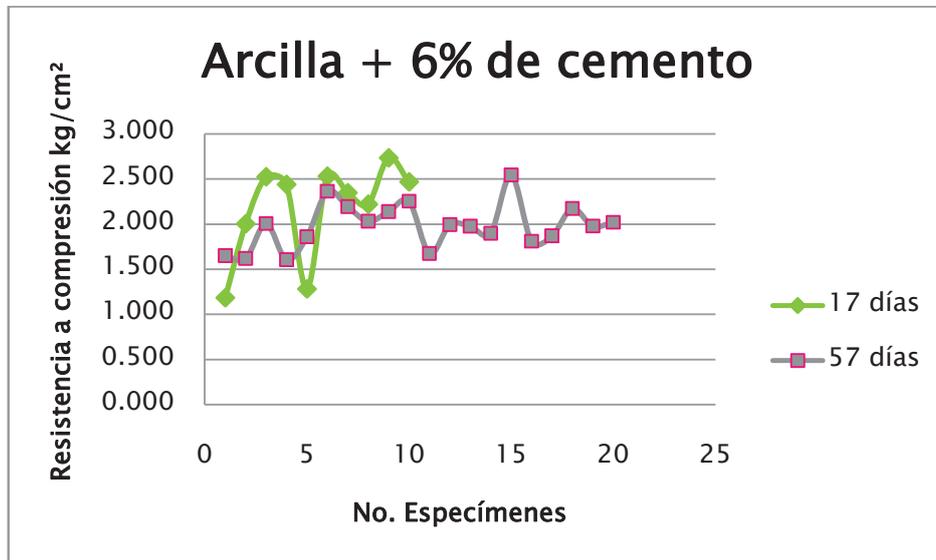


Grafica 8. Resistencia a compresión en cubos de arcilla + 6% de cal.

ARCILLA NATURAL + 6% DE CEMENTO								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
		A	B	H ₁				
17	1	4.73	5	4.395	165.3	23.65	28	1.184
	2	4.74	5	4.3	167.8	23.7	47.5	2.004
	3	4.96	4.79	4.37	163.5	23.7584	60	2.525
	4	4.97	4.74	4.245	158.4	23.5578	57.5	2.441
	5	4.99	4.69	4.445	170	23.4031	30	1.282
	6	5	4.74	4.405	165.6	23.7	60	2.532
	7	4.93	4.75	4.33	165	23.4175	55	2.349
	8	4.85	4.92	4.315	160	23.862	53	2.221
	9	5	4.57	4.4	168	22.85	62.5	2.735
	10	4.97	4.89	4.455	159.7	24.3033	60	2.469

ARCILLA + 6% DE CEMENTO								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
		A (cm)	B (cm)	H ₁ (cm)				
57	1	4.9	4.7	5	166.9	23.03	38	1.650
	2	4.94	4.75	5	167.4	23.465	38	1.619
	3	4.94	4.74	4.88	159.6	23.4156	47	2.007
	4	4.96	4.9	4.93	167.1	24.304	39	1.605
	5	4.92	4.7	5	165.4	23.124	43	1.860
	6	4.96	4.69	4.88	160.4	23.2624	55	2.364
	7	4.97	4.77	4.85	164.3	23.7069	52	2.193
	8	4.92	4.7	5	164.8	23.124	47	2.033
	9	4.9	4.77	5	167.7	23.373	50	2.139
	10	4.95	4.66	4.86	159.4	23.067	52	2.254
	11	5	4.78	5	163.6	23.9	40	1.674
	12	4.96	4.7	4.87	160.5	23.312	46.5	1.995
	13	5	4.55	4.97	161.5	22.75	45	1.978
	14	4.99	4.75	4.87	158.7	23.7025	45	1.899
	15	4.8	4.5	5	156.3	21.6	55	2.546
	16	5	4.75	4.94	160.6	23.75	43	1.811
	17	5	4.6	5	170.6	23	43	1.870
	18	4.9	4.6	4.94	162	22.54	49	2.174

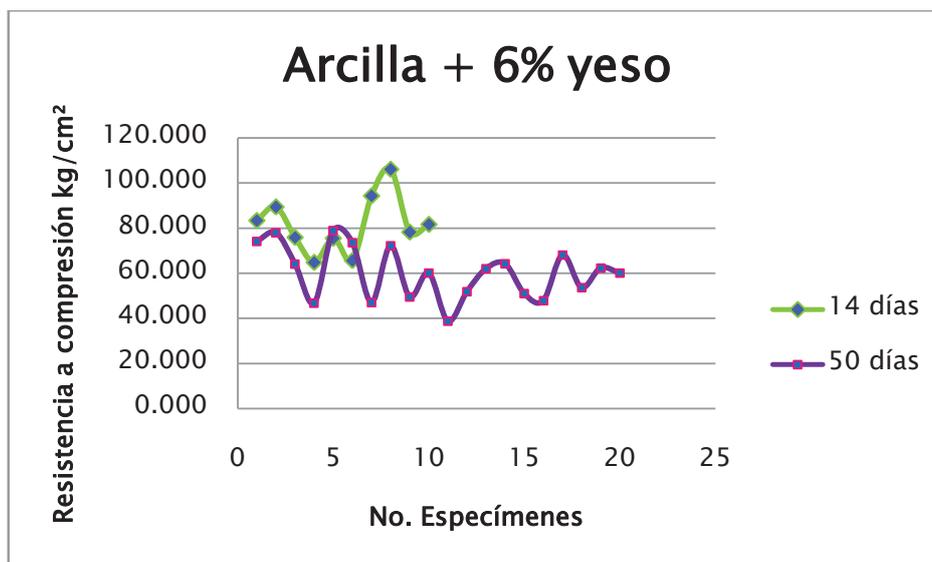
19	5	4.65	5	164.7	23.25	46	1.978
20	5	4.8	5	167	24	48.5	2.021



Grafica 9. Resistencia a compresión en cubos de arcilla + 6% de cemento.

ARCILLA NATURAL + 6% DE YESO								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
		A	B	H ₁				
14	1	4.18	4	4.395	143.2	16.72	1395	83.433
	2	4.16	3.98	4.3	146.1	16.5568	1481.5	89.480
	3	4.19	3.96	4.37	139.9	16.5924	1260	75.938
	4	4.24	4	4.245	145.5	16.96	1100	64.858
	5	4.21	4.04	4.445	142.1	17.0084	1285	75.551
	6	4.09	4.07	4.405	138.6	16.6463	1093	65.660
	7	4.34	3.94	4.33	145.4	17.0996	1614	94.388
	8	4.2	4.07	4.315	141	17.094	1815	106.178
	9	4.37	3.96	4.4	145.5	17.3052	1355	78.300
	10	4.38	3.92	4.455	150.7	17.1696	1403	81.714

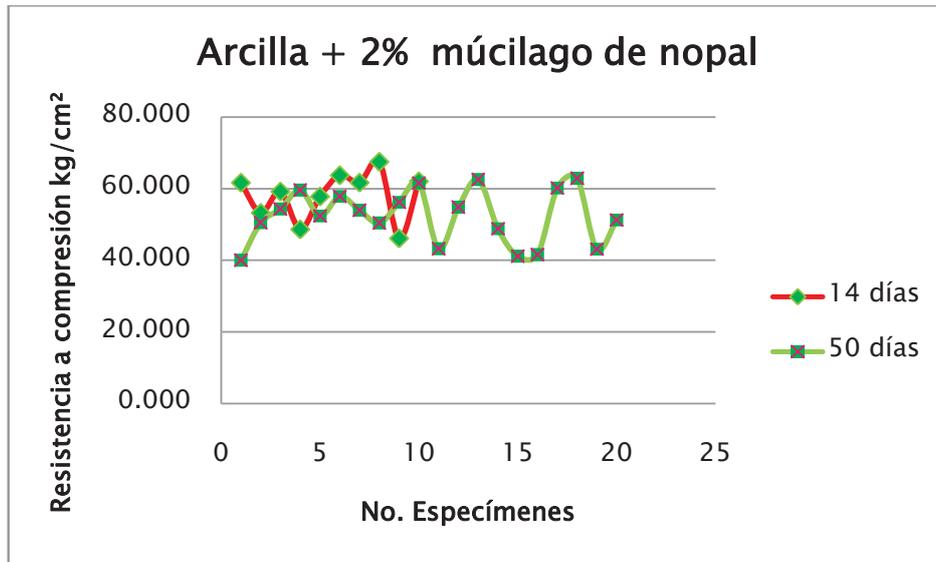
ARCILLA NATURAL + 6% DE YESO								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
		A (cm)	B (cm)	H ₁ (cm)				
50	1	4.13	3.96	4.15	133.9	16.3548	1212.5	74.137
	2	4.08	3.93	4.07	128.5	16.0344	1250	77.957
	3	4.06	3.96	4.08	129.7	16.0776	1031.5	64.158
	4	4.17	3.89	4.15	133.2	16.2213	758	46.729
	5	4.08	3.88	4.12	133	15.8304	1250	78.962
	6	4.12	3.89	4.34	135.5	16.0268	1180	73.627
	7	4.13	3.95	4.03	127.8	16.3135	767.5	47.047
	8	4.13	3.92	4.25	134.7	16.1896	1169.5	72.238
	9	4.27	4.06	4.18	141.2	17.3362	859.5	49.578
	10	4.32	3.9	4.09	134.8	16.848	1013.5	60.156
	11	4.19	3.91	4.36	137.1	16.3829	635.5	38.790
	12	4.12	3.99	4	127.6	16.4388	852.5	51.859
	13	4.13	4.01	4.05	133.2	16.5613	1028	62.072
	14	4.12	4	4.06	127.9	16.48	1058	64.199
	15	4.09	3.95	4.13	131.6	16.1555	823.5	50.973
	16	4.09	3.99	4.17	133	16.3191	781	47.858
	17	4.2	3.93	4.19	136.7	16.506	1125	68.157
	18	3.9	4.22	4.15	131.8	16.458	882.5	53.621
	19	4.13	3.96	4.22	132.1	16.3548	1020	62.367
	20	4.17	3.9	4.08	128.8	16.263	978	60.137



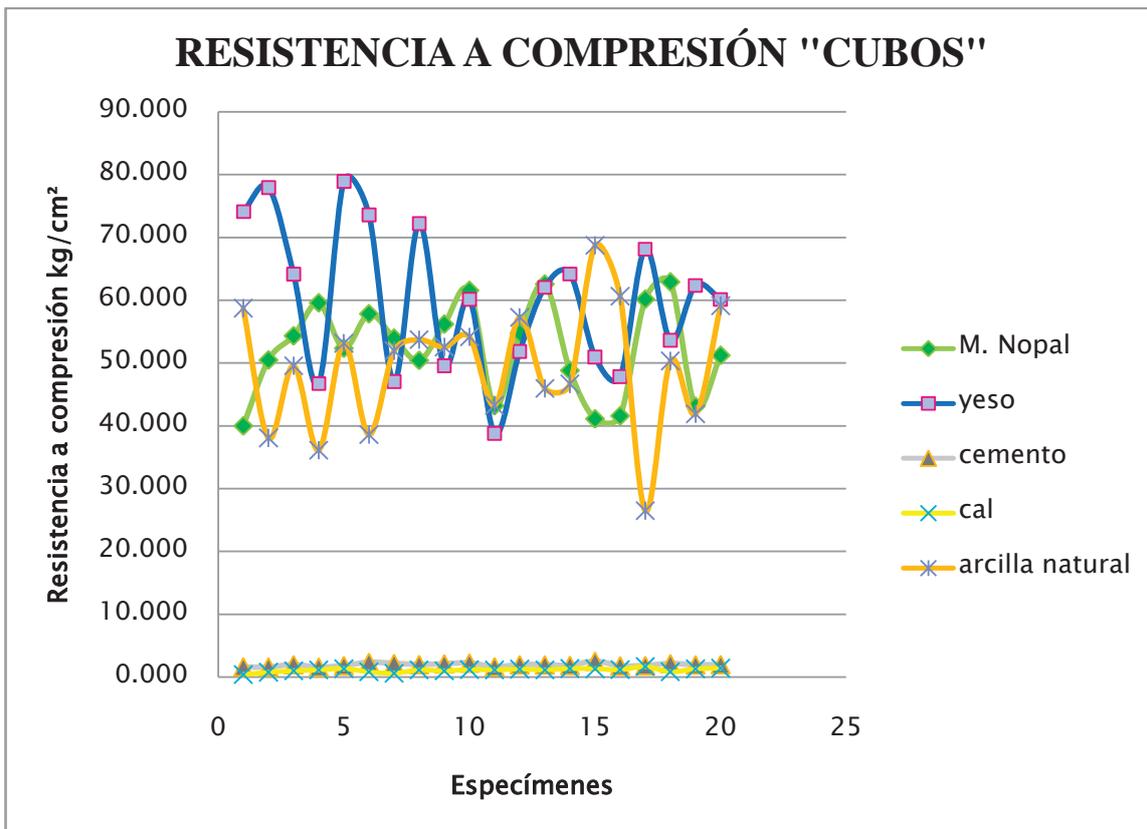
Grafica 10. Resistencia a compresión en cubos de arcilla + 6% de yeso.

ARCILLA + 2% DE MÚSILAGO DE NOPAL								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen H ₁	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
		A	B					
14	1	4.35	4.3	4.42	153.2	18.705	1153.5	61.668
	2	4.31	4.15	4.36	146.6	17.8865	952.5	53.252
	3	4.38	4.28	4.36	152	18.7464	1109.5	59.185
	4	4.34	4.15	4.43	151.5	18.011	876	48.637
	5	4.37	4.25	4.47	153.5	18.5725	1073.5	57.801
	6	4.38	4.3	4.32	151.9	18.834	1200.5	63.741
	7	4.5	4.24	4.37	153.6	19.08	1177	61.688
	8	4.32	4.24	4.37	152.7	18.3168	1236.5	67.506
	9	4.26	4.25	4.39	141.4	18.105	835	46.120
	10	4.39	4.24	4.3	148.4	18.6136	1155	62.051

ARCILLA NATURAL + 2 % DE MÚSILAGO DE NOPAL								
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Lados de aplicación de la carga		Altura del espécimen	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
		A (cm)	B (cm)	H ₁ (cm)				
50	1	4.24	4.32	4.52	140	18.3168	732.5	39.991
	2	4.35	4.24	4.36	141.3	18.444	931	50.477
	3	4.44	4.24	4.42	144.2	18.8256	1023	54.341
	4	4.43	4.22	4.32	143.1	18.6946	1114	59.589
	5	4.3	4.26	4.29	136.9	18.318	959	52.353
	6	4.39	4.22	4.24	138.9	18.5258	1071.5	57.838
	7	4.21	4.27	4.33	138.3	17.9767	970	53.959
	8	4.17	4.24	4.35	137.6	17.6808	891.5	50.422
	9	4.21	4.43	4.35	141.1	18.6503	1048	56.192
	10	4.4	4.19	4.37	142.2	18.436	1135	61.564
	11	4.3	4.18	4.23	135.1	17.974	776.5	43.201
	12	4.33	4.26	4.18	134.7	18.4458	1011	54.809
	13	4.13	4.21	4.35	135	17.3873	1088	62.574
	14	4.36	4.13	4.3	138.4	18.0068	879	48.815
	15	4.37	4.28	4.22	140.7	18.7036	769	41.115
	16	4.36	4.17	4.34	140.8	18.1812	756	41.581
	17	4.3	4.26	4.24	138.2	18.318	1102	60.159
	18	4.35	4.14	4.37	139.3	18.009	1133	62.913
	19	4.31	4.1	4.35	138.3	17.671	761.5	43.093
	20	4.3	4.22	4.27	133.6	18.146	929.5	51.223



Grafica 11. Resistencia a compresión en cubos de arcilla + 2% de mucílago de nopal.

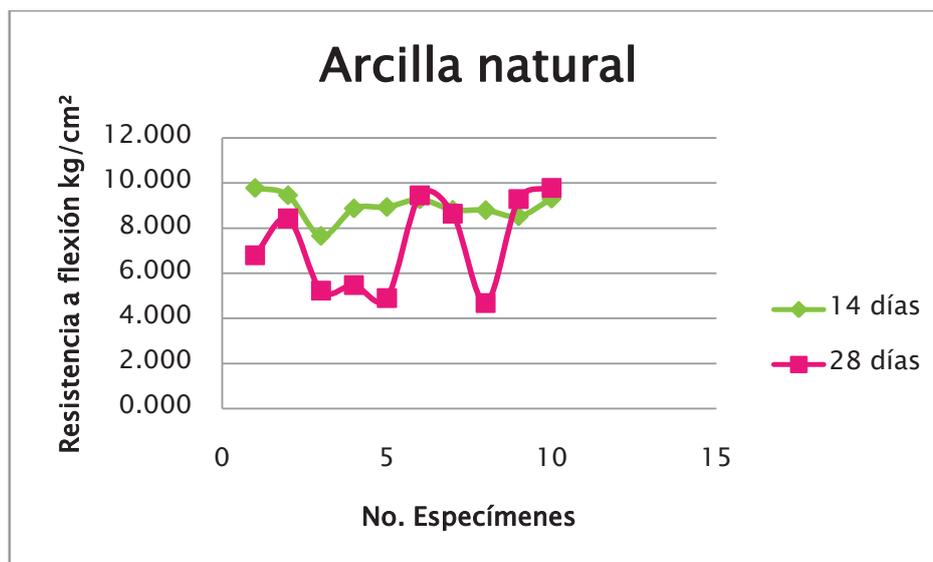


Grafica 12. Resistencia a compresión en cubos.

IV. 7. Prueba a flexión en vigas.

VIGAS DE ARCILLA NATURAL									
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura (cm)	LONGITUD (cm)	PESO (gr)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia kg/cm ²	Cortante kg/cm ²
		A	H	L					
14	1	3.5	3.24	14.11	280.3	43	11.34	9.783	5.688
	2	3.45	3.24	14.2	277.6	40	11.178	9.460	5.368
	3	3.9	3.21	14.09	275.4	41.5	12.519	7.658	4.972
	4	3.52	3.27	14.07	284.4	40	11.5104	8.875	5.213
	5	3.49	3.22	14.07	278.5	39	11.2378	8.940	5.206
	6	3.48	3.23	14.15	280.1	40	11.2404	9.275	5.338
	7	3.44	3.3	14.14	279.3	38	11.352	8.816	5.021
	8	3.51	3.26	14.03	285.9	39.5	11.4426	8.802	5.178
	9	3.48	3.24	14.12	284.5	37	11.2752	8.524	4.922
	10	3.46	3.25	14.13	286.1	40	11.245	9.304	5.336

VIGAS DE ARCILLA NATURAL									
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura (cm)	LONGITUD (cm)	PESO (gr)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia kg/cm ²	Cortante kg/cm ²
		A	H	L					
28	1	3.42	3.23	14.09	278.8	28.5	11.0466	6.797	3.870
	2	3.47	3.32	14.07	279.6	37.5	11.5204	8.433	4.883
	3	3.48	3.27	14.09	278.1	23	11.3796	5.233	3.032
	4	3.54	3.28	14.08	285	25	11.6112	5.474	3.230
	5	3.49	3.29	14	280	22	11.4821	4.897	2.874
	6	3.46	3.22	14.08	278.7	40.5	11.1412	9.456	5.453
	7	3.44	3.27	14	281.7	37.5	11.2488	8.644	5.001
	8	3.43	3.29	14.14	277.4	20	11.2847	4.681	2.658
	9	3.45	3.22	14.1	276.4	39.5	11.109	9.296	5.334
	10	3.43	3.24	14.07	282	41.5	11.1132	9.788	5.601



Grafica 13. Resistencia a flexión en vigas.

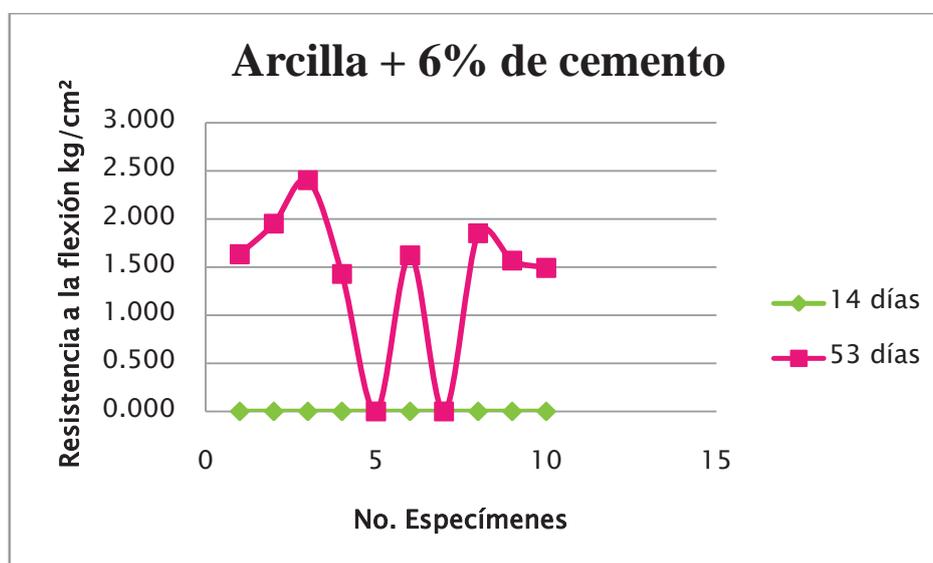
VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CAL									
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura (cm)	LONGITUD (cm)	PESO (gr)	Carga (kg)	Área (cm²)	Resistencia kg/cm²	Cortante kg/cm²
		A	H	L					
17	1	3.8	3.86	15.4	299.8	0	14.668	0.000	0.000
	2	3.82	3.85	15.3	302.5	0	14.707	0.000	0.000
	3	3.8	3.8	15.5	301.1	0	14.44	0.000	0.000
	4	3.78	3.85	15.4	300.25	0	14.553	0.000	0.000
	5	3.7	3.8	15.5	301.8	0	14.06	0.000	0.000
	6	3.8	3.8	15.5	290.3	0	14.44	0.000	0.000
	7	3.74	3.79	15.5	305	0	14.1746	0.000	0.000
	8	3.75	3.77	15.5	294.2	0	14.1375	0.000	0.000
	9	3.78	3.8	15.5	284.3	0	14.364	0.000	0.000
	10	3.72	3.82	15.4	306.3	0	14.2104	0.000	0.000

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CAL									
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura (cm)	LONGITUD (cm)	PESO (gr)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia kg/cm ²	Cortante kg/cm ²
		A	H	L					
57	1	3.83	3.9	15.4	306.5	0	14.937	0.000	0.000
	2	3.66	3.94	15.5	296	0	14.4204	0.000	0.000
	3	3.82	3.8	15.39	306.7	0	14.516	0.000	0.000
	4	3.66	3.91	15.5	289.6	0	14.3106	0.000	0.000
	5	3.7	3.82	15.47	287.4	0	14.134	0.000	0.000
	6	3.84	3.82	15.4	302.2	0	14.6688	0.000	0.000
	7	3.8	3.88	15.5	285.1	0	14.744	0.000	0.000
	8	3.74	3.87	15.5	290.5	0	14.4738	0.000	0.000
	9	3.8	3.92	15.5	294.4	0	14.896	0.000	0.000
	10	3.7	3.83	15.5	298	0	14.171	0.000	0.000

En este ensayo con 6% de cal agregado a la arcilla no se pudo determinar el esfuerzo a flexión ya que la maquina no registro carga, por lo que se obtuvo el registro como nulo.

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CEMENTO									
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura (cm)	LONGITUD (cm)	PESO (gr)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia kg/cm ²	Cortante kg/cm ²
		A	H	L					
14	1	3.7	3.75	15.5	300	0	13.875	0.000	0.000
	2	3.76	3.8	15.35	311.5	0	14.288	0.000	0.000
	3	3.73	3.81	15.31	305.9	0	14.2113	0.000	0.000
	4	3.8	3.85	15.5	314.5	0	14.63	0.000	0.000
	5	3.73	3.84	15.5	307.1	0	14.3232	0.000	0.000
	6	3.72	3.88	15.45	306.1	0	14.4336	0.000	0.000
	7	3.75	3.79	15.34	307.7	0	14.2125	0.000	0.000
	8	3.7	3.8	15.28	303.4	0	14.06	0.000	0.000
	9	3.77	3.84	15.5	310.5	0	14.4768	0.000	0.000
	10	3.74	3.75	15.5	301.7	0	14.025	0.000	0.000

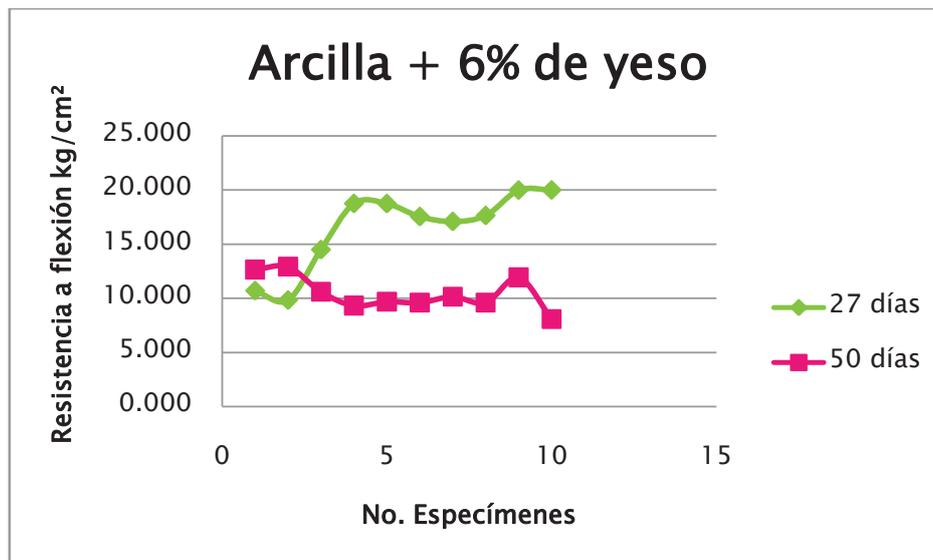
VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CEMENTO									
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra N°	Ancho (cm)	Altura (cm)	LONGITUD (cm)	PESO (gr)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia kg/cm ²	Cortante kg/cm ²
		A	H	L					
53	1	3.79	3.7	15.3	295.3	8.5	14.023	1.635	0.909
	2	3.72	3.82	15.4	295.5	10	14.2104	1.952	1.056
	3	3.73	3.85	15.38	301.3	12.5	14.3605	2.404	1.306
	4	3.78	3.8	15.43	301.1	7.5	14.364	1.430	0.783
	5	3.82	3.87	15.38	305	0	14.7834	0.000	0.000
	6	3.74	3.9	15.5	305.3	8.5	14.586	1.624	0.874
	7	3.74	3.95	15.46	307.8	0	14.773	0.000	0.000
	8	3.83	3.8	15.4	301.1	10	14.554	1.851	1.031
	9	3.77	3.9	15.3	296.4	8.5	14.703	1.567	0.867
	10	3.81	3.81	15.4	301.9	8	14.5161	1.493	0.827



Grafica 14. Resistencia a flexión en vigas.

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE YESO									
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura (cm)	LONGITUD (cm)	PESO (gr)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia kg/cm ²	Cortante kg/cm ²
		A	H	L					
27	1	3.2	3.46	13.5	273.8	45	11.072	10.694	6.096
	2	3.23	3.52	13.57	287	42.5	11.3696	9.825	5.607
	3	3.18	3.49	13.6	282.7	60	11.0982	14.485	8.109
	4	3.21	3.4	13.5	274	78	10.914	18.746	10.720
	5	3.22	3.4	13.55	280	78	10.948	18.741	10.687
	6	3.22	3.45	13.56	278	74	11.109	17.543	9.992
	7	3.17	3.4	13.54	274.8	69	10.778	17.085	9.603
	8	3.18	3.443	13.55	280	72.5	10.94874	17.637	9.933
	9	3.33	3.52	13.56	284.7	92	11.7216	19.987	11.773
	10	3.15	3.53	13.57	289.9	82.5	11.1195	19.997	11.129

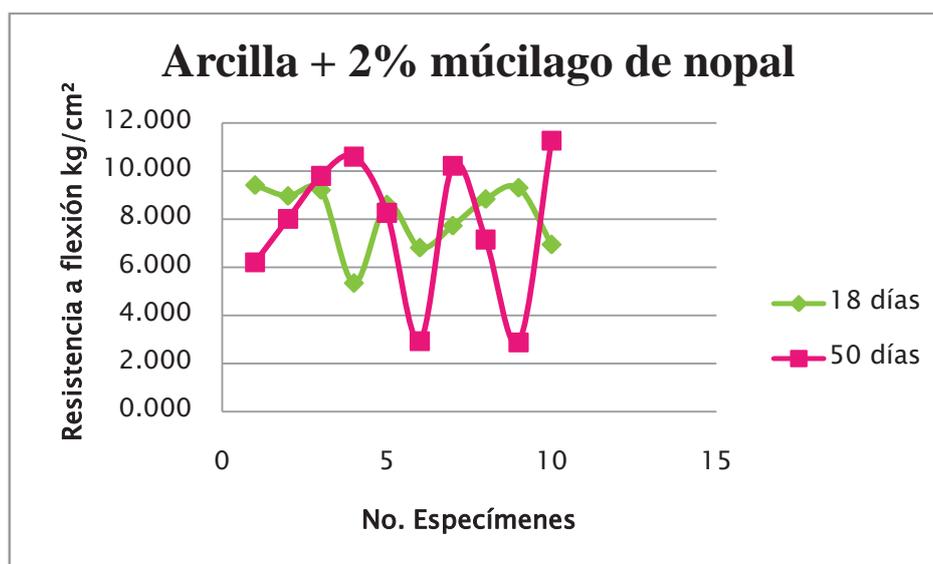
VIGAS DE ARCILLA + 6% DE YESO									
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura (cm)	LONGITUD (cm)	PESO (gr)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia kg/cm ²	Cortante kg/cm ²
		A	H	L					
50	1	3.24	3.36	13.5	282.4	53	10.8864	12.652	7.303
	2	3.17	3.4	13.65	283.4	51.5	10.778	12.918	7.167
	3	3.2	3.36	13.57	280.6	43	10.752	10.611	5.999
	4	3.18	3.35	13.4	280.2	38	10.653	9.333	5.351
	5	3.29	3.15	13.55	280	39	10.3635	9.688	5.645
	6	3.2	3.46	13.7	288.2	39.5	11.072	9.610	5.351
	7	3.32	3.49	13.57	293.5	46	11.5868	10.152	5.955
	8	3.17	3.42	13.54	284.1	39	10.8414	9.600	5.396
	9	3.42	3.22	13.64	285.7	52.5	11.0124	11.932	7.151
	10	3.17	3.38	13.54	278.9	32.5	10.7146	8.095	4.550



Grafica 15. Resistencia a flexión en vigas.

VIGAS DE ARCILLA + 2% DE MÚCILAGO DE NOPAL									
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura (cm)	LONGITUD (cm)	PESO (gr)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia kg/cm ²	Cortante kg/cm ²
		A	H	L					
18	1	3.3	3.45	13.5	254.1	42	11.385	9.413	5.534
	2	3.31	3.43	13.5	254	40	11.3533	8.962	5.285
	3	3.26	3.47	13.57	251	40	11.3122	9.209	5.304
	4	3.2	3.48	13.55	252.4	22.5	11.136	5.348	3.031
	5	3.33	3.55	13.55	255.3	40	11.8215	8.607	5.075
	6	3.52	3.26	13.55	258.7	32.5	11.4752	6.815	4.248
	7	3.3	3.46	13.4	247.3	35	11.418	7.728	4.598
	8	3.33	3.46	13.45	253.9	40.5	11.5218	8.835	5.273
	9	3.28	3.45	13.5	250.3	41	11.316	9.301	5.435
	10	3.27	3.4	13.5	247.1	30	11.118	6.948	4.047

VIGAS DE ARCILLA + 2% DE MÚCILAGO DE NOPAL									
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura (cm)	LONGITUD (cm)	PESO (gr)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia kg/cm ²	Cortante kg/cm ²
		A	H	L					
50	1	3.39	3.39	13.57	259.6	28.5	11.4921	6.211	3.720
	2	3.34	3.39	13.5	245.9	36	11.3226	8.015	4.769
	3	3.39	3.4	13.5	255.3	45.5	11.526	9.805	5.921
	4	3.29	3.35	13.44	245.3	46	11.0215	10.605	6.260
	5	3.35	3.46	13.64	261	37.5	11.591	8.267	4.853
	6	3.29	3.32	13.5	250.8	12.5	10.9228	2.929	1.717
	7	3.24	3.4	13.57	248.8	43	11.016	10.228	5.855
	8	3.17	3.31	13.58	247.7	28	10.4927	7.155	4.003
	9	3.28	3.4	13.5	250.6	12.5	11.152	2.877	1.681
	10	3.26	3.41	13.5	244.7	48.5	11.1166	11.268	6.544

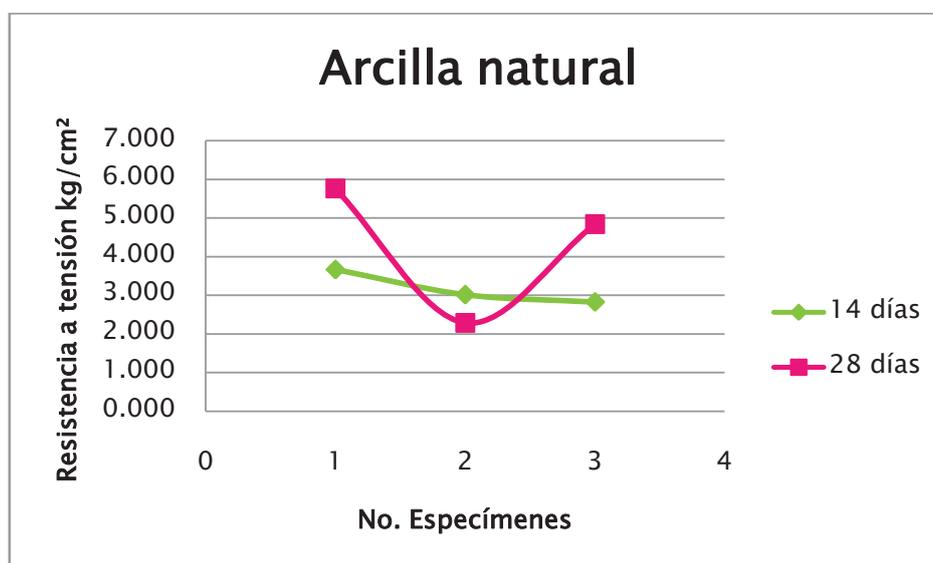


Grafica 16. Resistencia a flexión en vigas.

IV. 8. Prueba de tensión en briquetas.

ARCILLA NATURAL						
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura	Área (cm ²)	Peso de municiones (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
		A	H (cm)			
14	1	2.25	2.04	4.59	0.3365	3.666
	2	2.2	2.06	4.53	0.2735	3.017
	3	2.22	2.04	4.53	0.2561	2.827

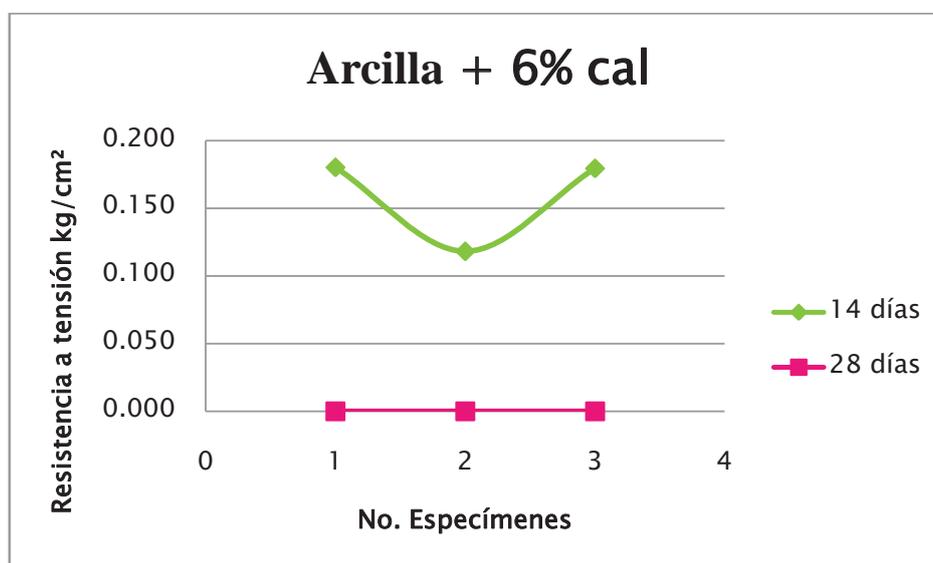
ARCILLA NATURAL						
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm)	Altura	Área (cm ²)	Peso de municiones (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
		A	H (cm)			
28	1	2.24	2.05	4.59	0.529	5.760
	2	2.24	2.05	4.59	0.21	2.287
	3	2.28	2.07	4.72	0.4565	4.836



Grafica 17. Resistencia a tensión en briquetas arcilla natural.

ARCILLA + 6% CAL						
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra N°	Ancho (cm)	Altura	Área (cm ²)	Peso de municiones (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
		A	H (cm)			
14	1	2.4	2.31	5.54	0.05	0.451
	2	2.37	2.32	5.50	0.04	0.364
	3	2.4	2.32	5.57	0.02	0.180

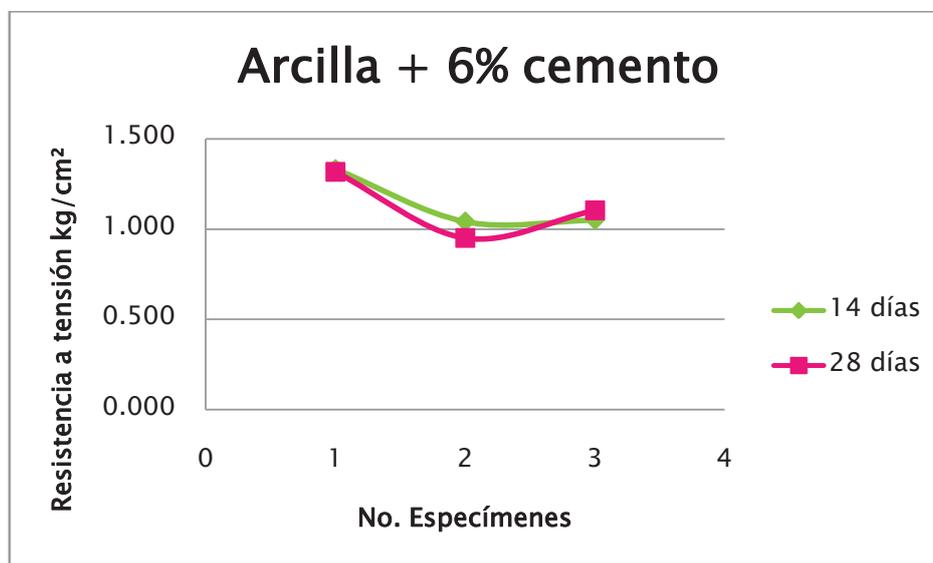
ARCILLA + 6% CAL						
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra N°	Ancho (cm)	Altura	Área (cm ²)	Peso de municiones (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
		A	H (cm)			
28	1	2.38	2.33	5.55	0	0.000
	2	2.5	2.33	5.83	0	0.000
	3	2.41	2.33	5.62	0	0.000



Grafica 18. Resistencia a tensión en briquetas arcilla + 6% cal.

ARCILLA + 6% CEMENTO						
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm) A	Altura	Área (cm ²)	Peso de municiones (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
			H (cm)			
14	1	2.43	2.33	5.66	0.151	1.333
	2	2.43	2.3	5.59	0.1165	1.042
	3	2.44	2.34	5.71	0.12	1.051

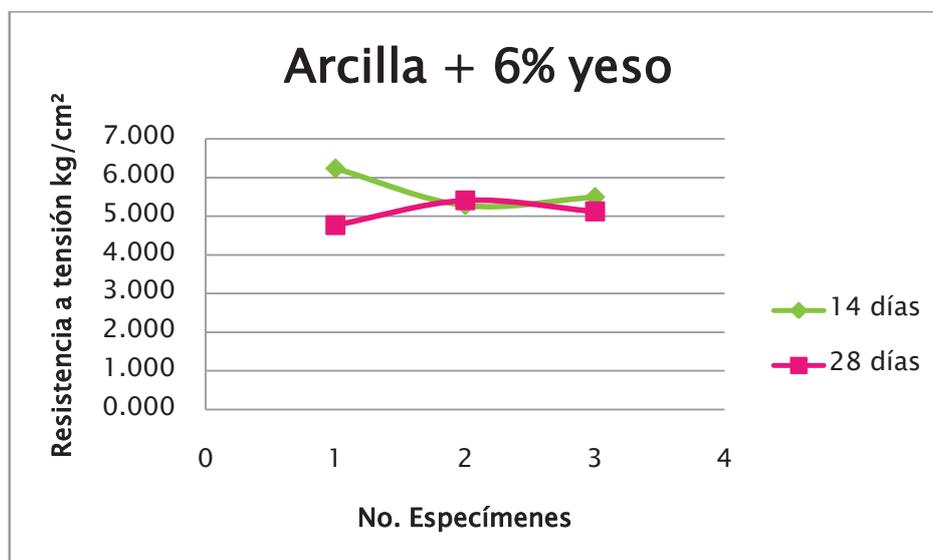
ARCILLA + 6% CEMENTO						
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm) A	Altura	Área (cm ²)	Peso de municiones (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
			H (cm)			
28	1	2.4	2.32	5.57	0.1468	1.318
	2	2.39	2.32	5.54	0.1055	0.951
	3	2.37	2.29	5.43	0.1199	1.105



Grafica 19. Resistencia a tensión en briquetas arcilla + 6% cemento.

ARCILLA + 6% YESO						
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm) A	Altura	Área (cm ²)	Peso de municiones (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
			H (cm)			
14	1	2.28	2.1	4.79	0.5972	6.236
	2	2.22	2.07	4.60	0.4853	5.280
	3	2.17	2.09	4.54	0.4985	5.496

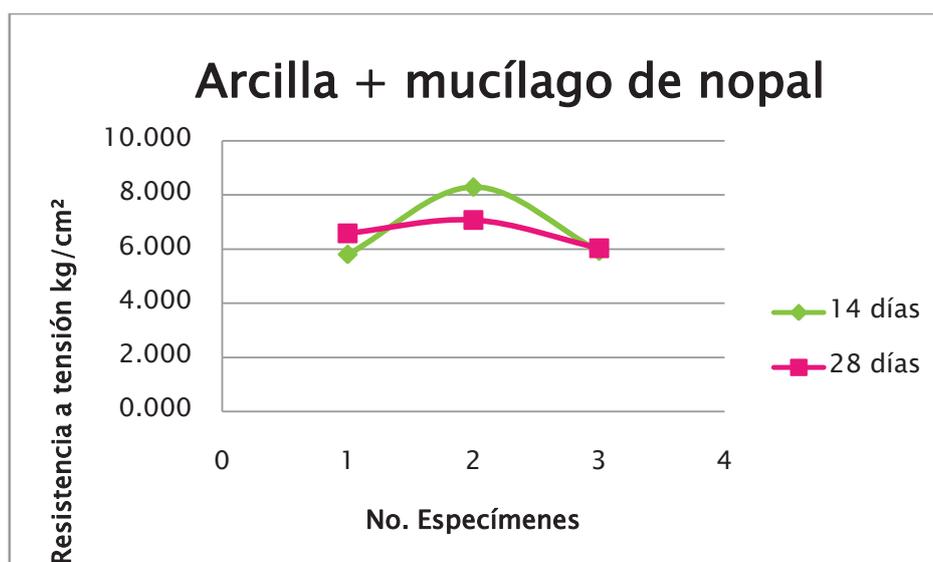
ARCILLA + 6% YESO						
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm) A	Altura	Área (cm ²)	Peso de municiones (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
			H (cm)			
28	1	2.4	2.32	5.57	0.5312	4.770
	2	2.39	2.32	5.54	0.5997	5.408
	3	2.37	2.29	5.43	0.5562	5.124



Grafica 20. Resistencia a tensión en briquetas arcilla + 6% yeso.

ARCILLA + 2% MÚCILAGO DE NOPAL						
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm) A	Altura	Área (cm ²)	Peso de municiones (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
			H (cm)			
14	1	2.11	1.87	3.95	0.458	5.804
	2	2.12	1.87	3.96	0.6574	8.291
	3	2.08	1.82	3.79	0.4484	5.922

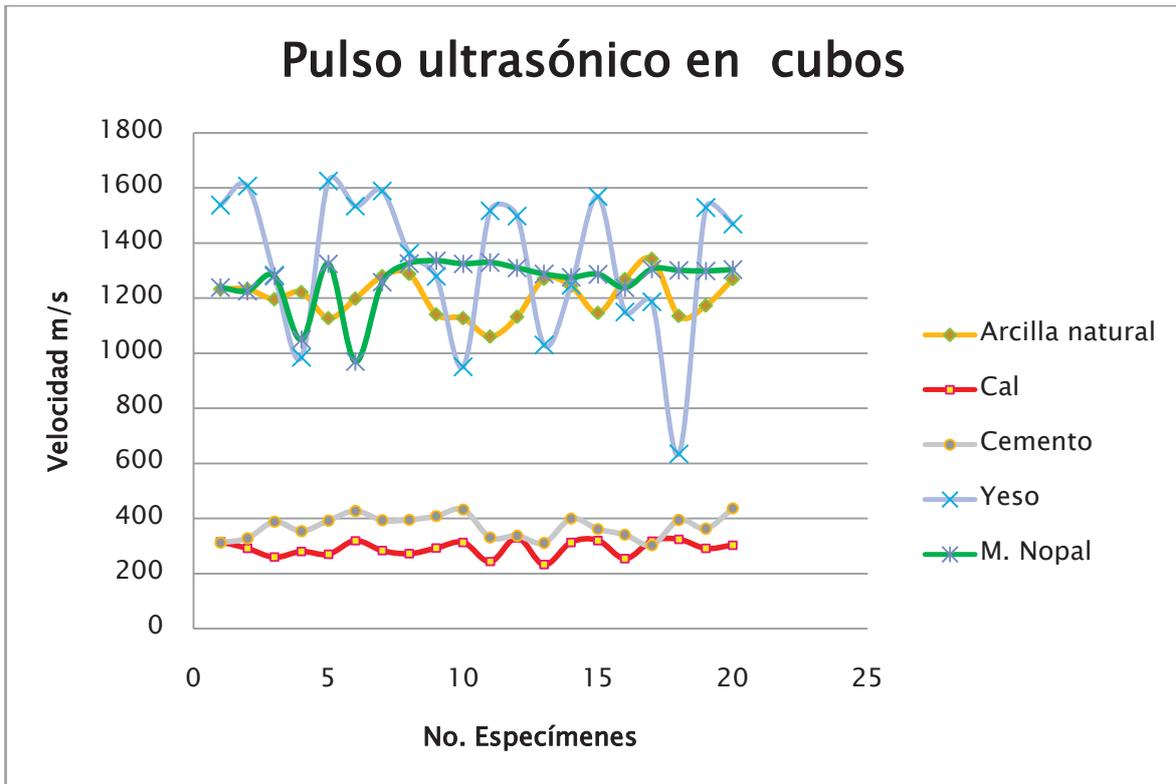
ARCILLA + 2% MÚCILAGO DE NOPAL						
EDAD DE PRUEBA (Días)	Muestra Nº	Ancho (cm) A	Altura	Área (cm ²)	Peso de municiones (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
			H (cm)			
28	1	2.12	1.85	3.92	0.5169	6.590
	2	2.05	1.88	3.85	0.5457	7.080
	3	2.08	1.88	3.91	0.472	6.035



Grafica 20. Resistencia a tensión en briquetas arcilla + 2% mucílago de nopal.

IV.9. Pruebas de pulso ultrasónico.

PRUEBA DE ULTRASONIDO A CUBOS					
MUESTRA No. 1	ARCILLA NATURAL	CAL 6%	CEMENTO 6%	YESO 6%	MÚCILAGO DE NOPAL 2%
1	1233	315	312	1538	1239
2	1233	291	328	1607	1226
3	1196	259	388	1284	1280
4	1222	280	354	985	1049
5	1127	270	392	1625	1325
6	1198	319	427	1534	969
7	1280	283	393	1589	1258
8	1288	272	395	1363	1326
9	1141	292	408	1279	1336
10	1127	313	432	951	1325
11	1060	243	331	1517	1330
12	1132	330	337	1498	1310
13	1270	232	311	1030	1288
14	1244	313	399	1247	1276
15	1146	320	361	1569	1287
16	1269	254	341	1150	1238
17	1343	318	303	1187	1306
18	1135	324	394	635	1301
19	1173	291	363	1529	1299
20	1269	303	436	1469	1304



Grafica 21. Velocidades del pulso ultrasónico.

IV.10. Resultados estadísticos.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CUBOS A COMPRESIÓN (kg/cm ²)								
MATERIAL	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
ARCILLA NATURAL	26.488	68.737	49.350	48.299	51.144	N/A	98.753	9.937
ARCILLA + 6% CAL	0.409	1.68	1.108	1.060	1.153	N/A	0.090	0.299
ARCILLA + 6% CEMENTO	1.605	2.546	1.983	1.969	1.987	N/A	0.063	0.251
ARCILLA + 6% YESO	38.790	78.962	60.231	59.137	61.114	N/A	135.047	11.621
ARCILLA + 2% M. NOPAL	39.991	62.913	52.311	51.786	53.156	N/A	55.641	7.459

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE BRIQUETAS A TENSIÓN (kg/cm ²)								
MATERIAL	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
ARCILLA NATURAL	26.488	68.737	49.350	48.299	51.144	N/A	98.753	9.937
ARCILLA + 6 % CAL	0.409	1.68	1.108	1.060	1.153	N/A	0.090	0.299
ARCILLA + 6 % CEMENTO	1.605	2.546	1.983	1.969	1.987	N/A	0.063	0.251
ARCILLA + 6 % YESO	38.790	78.962	60.231	59.137	61.114	N/A	135.047	11.621
ARCILLA + 2 % M. NOPAL	39.991	62.913	52.311	51.786	53.156	N/A	55.641	7.459

PRUEBA A 14 DÍAS

VIGAS DE ARCILLA NATURAL (RESISTENCIA A LA FLEXION kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
7.658	9.783	8.944	8.926	8.907	#N/A	0.342	0.585

VIGAS DE ARCILLA NATURAL (RESISTENCIA AL CORTANTE kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
4.922	5.688	5.224	5.220	8.880	#N/A	0.051	0.226

PRUEBA A 28 DÍAS

VIGAS DE ARCILLA NATURAL (RESISTENCIA A LA FLEXION kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
4.681	9.788	7.270	6.994	7.615	#N/A	4.266	2.065

VIGAS DE ARCILLA NATURAL (RESISTENCIA AL CORTANTE kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
2.658	5.601	4.193	4.038	8.970	#N/A	1.386	1.177

PRUEBA A 17 DÍAS

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CAL (RESISTENCIA A LA FLEXION kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
0.000	0.000	0.000	#¡NUM!	0.000	0	0.000	0.000

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CAL (RESISTENCIA AL CORTANTE kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
0.000	0.000	0.000	#¡NUM!	0.000	0	0.000	0.000

PRUEBA A 57 DÍAS

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CAL (RESISTENCIA A LA FLEXION kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
0.000	0.000	0.000	#¡NUM!	0.000	0	0.000	0.000

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CAL (RESISTENCIA AL CORTANTE kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
0.000	0.000	0.000	#¡NUM!	0.000	0	0.000	0.000

PRUEBA A 14 DÍAS

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CEMENTO (RESISTENCIA A LA FLEXION kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
0.000	0.000	0.000	#¡NUM!	0.000	0	0.000	0.000

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CEMENTO (RESISTENCIA AL CORTANTE kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
0.000	0.000	0.000	#¡NUM!	0.000	0	0.000	0.000

PRUEBA A 53 DÍAS

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CEMENTO (RESISTENCIA A LA FLEXION kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
0.000	2.404	1.396	#¡NUM!	1.595	0	0.620	0.787

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE CEMENTO (RESISTENCIA AL CORTANTE kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
0.000	1.306	0.765	#¡NUM!	1.530	0	0.185	0.430

PRUEBA A 27 DÍAS

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE YESO (RESISTENCIA A LA FLEXION kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
9.825	19.997	16.474	16.043	17.590	#N/A	13.277	3.644

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE YESO (RESISTENCIA AL CORTANTE kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
5.607	11.773	9.365	9.117	17.637	#N/A	4.405	2.099

PRUEBA A 50 DÍAS

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE YESO (RESISTENCIA A LA FLEXION kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
8.095	12.918	10.459	10.356	9.920	#N/A	2.450	1.565

VIGAS DE ARCILLA + 6% DE YESO (RESISTENCIA AL CORTANTE kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
4.550	7.303	5.987	5.922	9.881	#N/A	0.869	0.932

PRUEBA A 18 DÍAS

VIGAS DE ARCILLA + 2% DE MÚCILAGO DE NOPAL (RESISTENCIA A LA FLEXION kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
5.348	9.413	8.117	8.001	8.721	#N/A	1.847	1.359

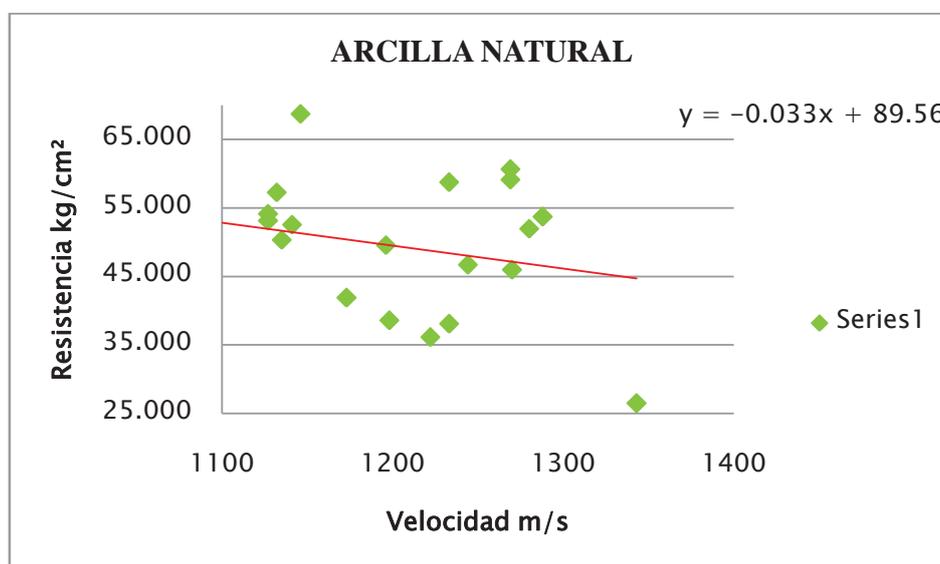
VIGAS DE ARCILLA + 2% DE MÚCILAGO DE NOPAL (RESISTENCIA AL CORTANTE kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
3.031	5.534	4.783	4.713	7.922	#N/A	0.641	0.801

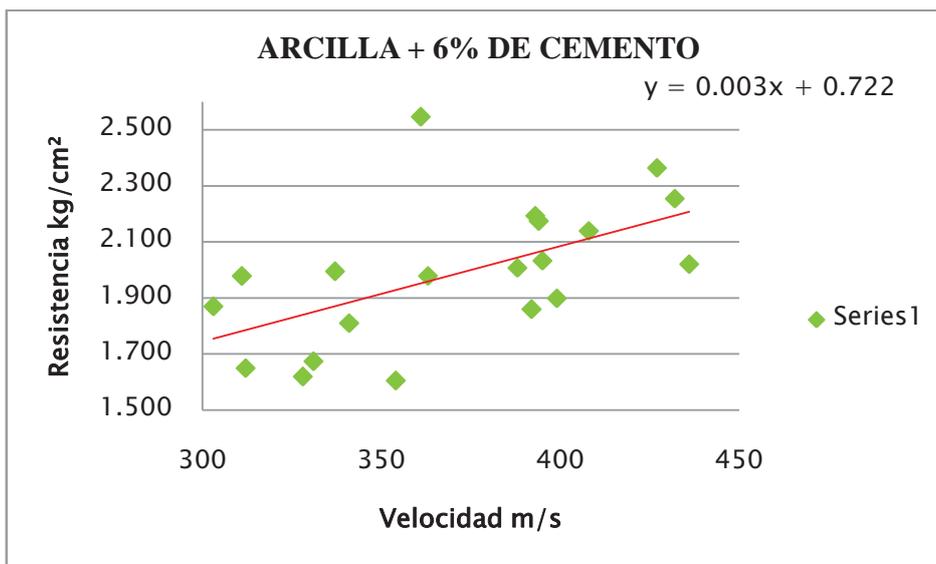
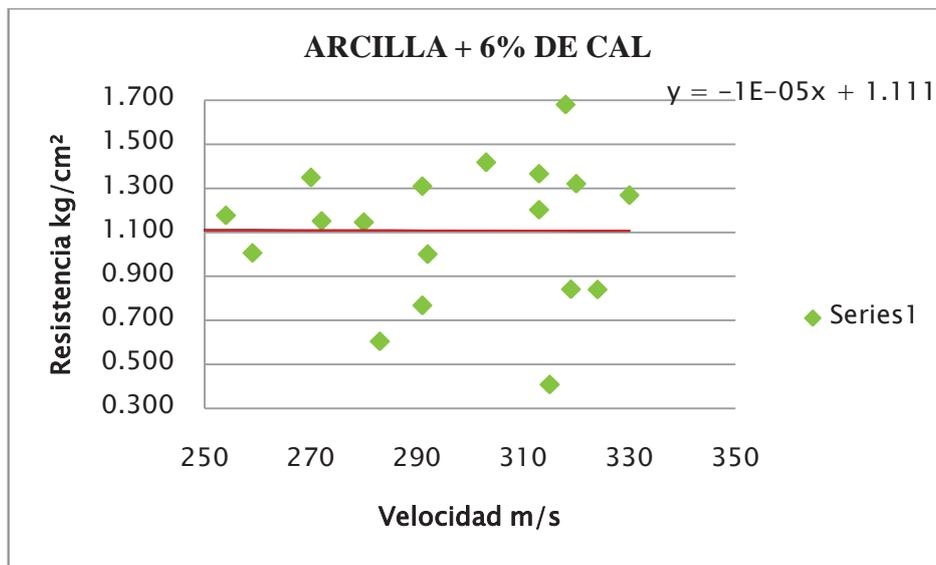
PRUEBA A 50 DÍAS

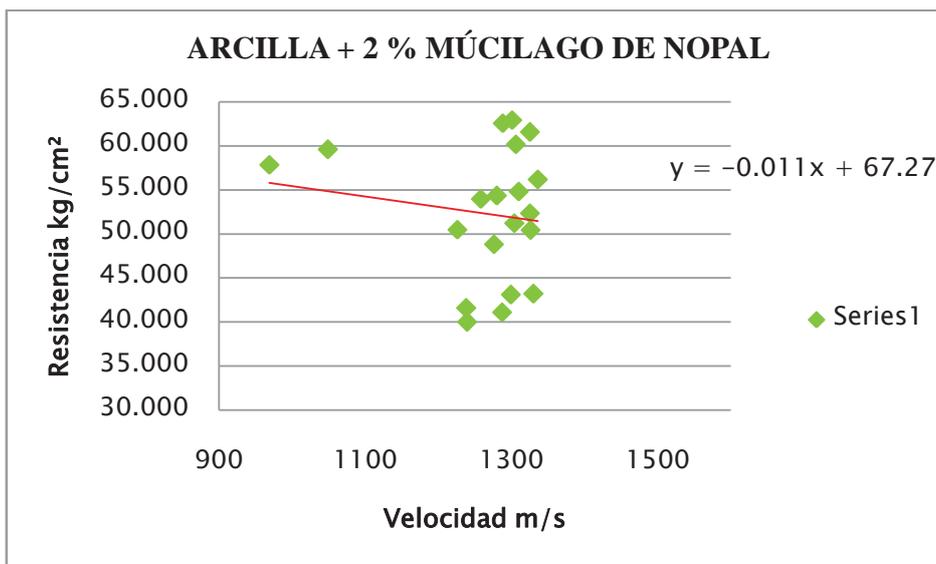
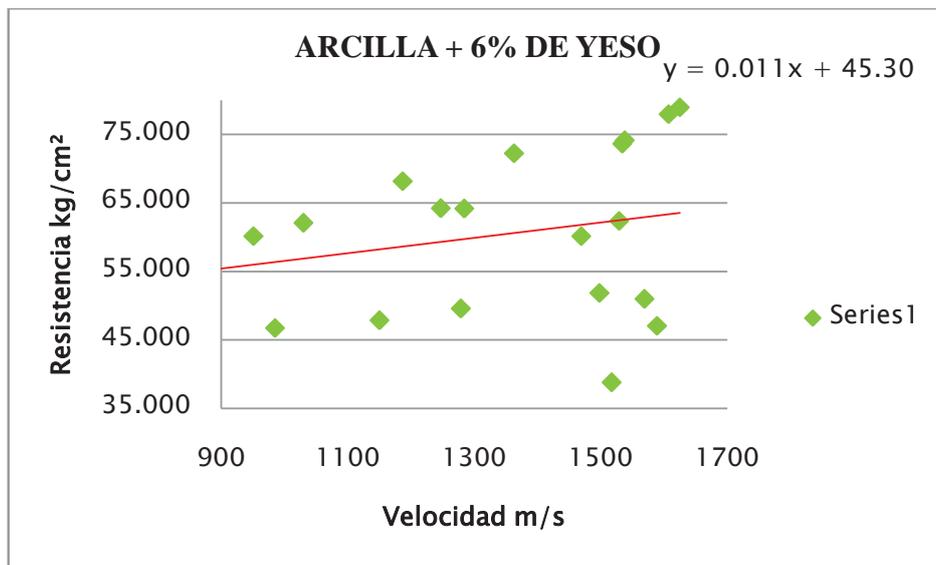
VIGAS DE ARCILLA + 2% DE MÚCILAGO DE NOPAL (RESISTENCIA A LA FLEXION kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
2.877	11.268	7.736	7.036	8.141	#N/A	8.994	2.999

VIGAS DE ARCILLA + 2% DE MÚCILAGO DE NOPAL (RESISTENCIA AL CORTANTE kg/cm ²)							
MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMETICA	MEDIA GEOMÉTRICA	MEDIANA	MODA	VARIANZA	DESVIACIÓN
1.681	6.544	4.532	4.121	7.446	#N/A	3.097	1.760

IV.11. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a compresión.







V. CONCLUSIONES Y ANALISIS DE RESULTADOS

Sobre los resultados de la medición del PH los materiales q se utilizaron como estabilizantes dos no cumplieron con la norma ASTM D 6276 ya que dieron valores menores de 12, estos valores fueron de entre 5 y 6 siendo el yeso y el mucílago de nopal, en lo q respecta al cemento gris anda alrededor del mínimo de 12.4 ya que dio valores 11.5, 11.7, 11.8, 12.0 y 12.2 con las proporciones de 2%,4%,6%, 8% y 10% respectivamente.

Los materiales que se utilizaron como estabilizantes como lo fue la cal e hidróxido de sodio si cumplen con lo especificado en la norma ASTM D 6276 ya que dan valores de PH de 12 y mayores de 12.

En los resultados cuando se utiliza cal la mejor proporción que mejora las propiedades volumétricas es la de 10%, pero varía mucho el color por lo que se utilizó la proporción de 6% ya que también da buenos resultados respecto a sus propiedades volumétricas pero tiene un menor cambio de color respecto a la arcilla natural.

De las adiciones de mucílago de nopal y yeso no cumplen con la norma ASTM que establece el mínimo de 12.4 para la mezcla pero aun así se realizaron pruebas mecánicas con la proporción de 2% para el mucílago de nopal y de 6% para el yeso, ya que esta proporción fue la que brindo mejor estabilización volumétrica.

En lo que respecta al hidróxido de sodio se eligió en un principio la proporción de 6% ya que presentaba buena estabilización volumétrica, pero al realizar especímenes para las pruebas mecánicas se notó que aparecía una capa de cristales lo cual provocaba la disgregación de los especímenes por lo que realicé especímenes con las proporciones menores de 4 y 2% pero aun así aparecían los cristales por lo que no se pudieron realizar pruebas mecánicas a las proporciones propuestas.

Mediante las pruebas realizadas para la clasificación del suelo se obtuvo que el suelo pertenece a las CH (arcillas de alta compresibilidad) un punto importante que es de mencionar es que la clasificación variaba de CH y CL (arcillas de baja plasticidad) por lo cual realice 3 pruebas de las cuales 2 resultaron CH y así le asigné la clasificación.

En lo que se refiere a las pruebas mecánicas es de notar que la proporción de 6% de yeso en adición con respecto al peso fue la que presento una mejora en la resistencia a la compresión en comparación a la arcilla testigo o arcilla natural, de igual manera esta misma proporción fue la mejor en resistencia a la flexión y a la par una pequeña mejora respecto a la resistencia la tensión.

El porcentaje de 2% de mucílago de nopal se comporta de manera similar que la arcilla natural aunque si mejora un poco sus propiedades mecánicas y reduce un poco los cambios volumétricos.

Lo que sí es importante mencionar es que los porcentajes de cal y cemento aunque son los que mejor funcionaron en la cuestión de controlar los cambios volumétricos, no ocurre en las propiedades mecánicas ya que incluso disminuyeron las resistencias de tensión, flexión (nula prácticamente) y compresión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- 1.-W. Martínez Molina², M. C. Morales Garibay¹, E. M. Alonso Guzmán^{2,3}, J. C. Rubio Avalos², F. A. Velasco Ávalos², C. Lara Gómez¹ y M. A. Mondragón Ornelas¹. “Minerales estabilizadores en arcillas; relación entre porcentajes adicionados y efecto estético”. México, 2007.
- 2.- Mattone Roberto., Paseo Gloria., Rivotti Alezio., Tosco Viviana., “Uso de productos naturales para mejorar el comportamiento al agua de revoques a base de tierra”. Politecnico di Torino-Facolta di Architettura DINSE/Dipartimento di Science e Tecniche per i Processi di insediamento Viale Mattioli 36-10125, Pág 1 Torino ITALIA.
- 3.-Garnica A. P., Pérez S.A., Gómez L.J.A., Ovil V.E.Y., “Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres”. Publicación técnica No. 201 Instituto Mexicano del Transporte. Pág. VII. Sanfandila Qro, 2002.
- 3.- W. Martínez^{1*}, E. Alonso¹, J. C. Rubio¹, H. L. Chávez¹, L. F. Guerrero², F. Velasco¹, C. Chávez³, M. Ávalos⁴, M. Olgún⁵, C. Morales⁵ y B. Méndez⁵., “ESTABILIZACIÓN VOLUMÉTRICA CON YESO Y CAL DE ARCILLAS MONTMORILLONÍICAS PARA EMPLEO EN ADOBES EN ESTRUCTURAS PATRIMONIALES EN MICHOACÁN, MÉXICO”, México 2007.
- 4.- LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS (2002)
Emilia García Romero: Universidad Complutense (Madrid)
Mercedes Suárez Barrios: Universidad de Salamanca.
- 5.- JUÁREZ BADILLO, E. y Rico Rodríguez, A., Mecánica de Suelos I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Editorial Limusa, México, Tercera Edición, Séptima Reimpresión, 1981, pag. 41-49.
- 6.-Aguinaco Carreño, J. M., 1984, “Estudio de la cal hidratada, producida en las caleras cercanas a la ciudad de Morelia”, tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 6-9
- 7.-Askeland, D. R., 1998, La Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Editorial Ciencias Internacional Thompson, 3ª Edición, México, ISBN968-7529-36-9, 433-443
- 8.-ASTM, American Society for Testing and Materials, 2000, Section Four, Construction; Cement, Lime and Gypsum, Volume 04.01, EEUU, C230M-98ε1
- 9.-Atlas Ilustrado de Minerales, 2004, Ed. Susaeta, ISBN 84-305-4870-X, España, 34-37
- 10.-Cas, R. A. F. and J. V. Wright, 1988a, Volcanic Successions, Ed. Unwin Hyman, ISBN 0-04-552021-6, UK, 17

- 11.-*Cas*, R. A. F. and J. V. Wright, 1988b, Volcanic Successions, Ed. Unwin Hyman, ISBN 0-04-552021-6, UK, 335-343
- 12.-*Chang*, R., 1999, Química, Sexta Edición, Editorial McGraw Hill, 708
- 13.-*Dana*, E. S., W. E. Ford, 1986, Tratado de Mineralogía, Editorial CECSA, 16ª Impresión, México, 741-745
- 14.-*Deer*, W. A., R. A. Howie, J. Zussman, 1996, An Introduction to the Rock-Forming Minerals, Ed. Longman Scientific and Technical, Second Edition, ISBN 0-582-30094-0, UK, 352-383
- 15.-*Holmes*, A., 1966, Geología Física, Ediciones Omega, 5 Edición, Barcelona, 479-490
- 16.-<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/Estructurapgk-Sp.bmp>, consulta 27/04/2010
- 17.-*Juárez* Badillo, E. y Rico Rodríguez, A., 1990, Mecánica de Suelos Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Editorial Noriega Limusa, México, Tercera Edición, 13ª Reimpresión, ISBN 968-18-0069-9, 149-165
- 18.-*Leet*, D. L., y S. Judson, 2000, “Fundamentos de Geología Física”, Editorial Limusa, Decimonovena Reimpresión, ISBN 968-18-0475-9, pp. 55-84
- 19.-*Mitchel*, J. K., 1993, Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons Inc., EEUU, ISBN 0-471-85640-1, 30-40
- 20.-*Olguín* Domínguez Mario Alberto, 2008, “Efectos Mecánicos de la estabilización volumétrica de montmorillonita con CaSO₄”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México
- 21.-*Rico* Rodríguez, A., H. Del Castillo Mejía, 1995, La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, Tomo I, Editorial Limusa, 12ª reimpresión, México, ISBN 968-18-0054-0, 108-111