



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE  
HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PROFESIONAL**

**“ESTABILIZACIÓN DE ARCILLA PARA USO EN  
ESTRUCTURAS PATRIMONIALES: EVALUACIÓN DE SUS  
PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS A EDADES  
TARDÍAS”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**BERSAIN DE LEON AMBROCIO**

**ASESOR:**

**DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN**

**COASESORES**

**M. A. WILFRIDO MARTINEZ MOLINA**

**DR. HUGO LUIS CHAVÉZ GARCÍA**

**MORELIA MICHOACÁN, MARZO 2017**



## ÍNDICE

ÍNDICE .....	II
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT .....	X
OBJETIVO.....	XI
JUSTIFICACIÓN.....	XII
DEDICATORIAS.....	XIII
AGRADECIMIENTOS.....	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL O REFERENCIAL.....	3
2.1 ANTECEDENTES .....	3
2.2 ARCILLA .....	6
2.2.1 HISTORIA DE LA ARCILLA.....	6
2.2.2 ORIGEN DE LA ARCILLA.....	7
2.2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS.....	21
2.2.4 PROPIEDADES DE LA ARCILLA.....	24
2.2.4.1 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA ARCILLA .....	24
2.2.4.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ARCILLA .....	32
2.2.4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ARCILLA.....	35
2.2.5 ARCILLA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN.....	42
2.3 AGREGADOS.....	43
2.3.1 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS .....	44
2.3.1.1 FÍSICAS .....	44
2.3.1.2 QUÍMICAS .....	45
2.3.1.3 MECÁNICAS .....	45
2.3.2 AGREGADOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN.....	46
2.4 AGUA.....	46
2.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA .....	47
2.4.2 ESPECIFICACIONES.....	50
2.4.3 AGUA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN.....	52
2.5 MORTEROS.....	53
2.5.1 TIPOS Y USOS.....	53





2.6	MATERIALES EN ESTUDIO COMO ADITIVO DE LA ARCILLA .....	56
2.6.1	YESO.....	56
2.6.1.1	ANTECEDENTES .....	57
2.6.1.2	CARACTERÍSTICAS .....	58
2.6.1.3	TIPOS Y USOS.....	60
2.6.1.4	YESO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN.....	63
2.6.2	FIBRA DE NOPAL.....	63
2.6.2.1	ANTECEDENTES .....	64
2.6.2.2	CARACTERÍSTICAS.....	65
2.6.2.3	TIPOS Y USOS.....	66
2.6.2.4	FIBRA DE NOPAL UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN .....	68
2.6.3	SULFATO DE SODIO.....	69
2.6.3.1	ANTECEDENTES .....	74
2.6.3.2	CARACTERÍSTICAS .....	75
2.6.3.3	TIPOS Y USOS.....	77
2.6.3.4	SULFATO DE SODIO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN.....	78
2.7	ADITIVOS .....	79
2.7.1	TIPOS Y USOS.....	79
3	METODOLOGÍA.....	83
3.1	CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	83
3.1.1	ARCILLA .....	83
3.1.1.1	DISGREGACIÓN DEL MATERIAL.....	83
3.1.1.2	MATERIAL QUE PASA LA MALLA ASTM No 40 .....	84
3.1.1.3	DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO. ....	85
3.1.1.4	DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE PLÁSTICO.....	88
3.1.1.5	DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN LINEAL Y VOLUMÉTRICA. (LC Y CL).....	90
3.1.2	YESO .....	95
3.1.3	FIBRA DE NOPAL.....	98
3.1.4	SULFATO DE SODIO.....	99
3.1.5	AGUA .....	100
3.2	PRUEBAS REALIZADAS A LAS MEZCLAS EN FRESCO .....	101
3.2.1	FLUIDEZ .....	101
3.2.2	POTENCIAL DE HIDRÓGENO.....	105
3.2.3	TEMPERATURA.....	107





3.2.4 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES .....	107
3.2.4.1 CUBOS .....	108
3.2.4.2 CILINDROS.....	110
3.2.4.3 PRISMAS.....	111
3.2.4.4 BRIQUETAS .....	111
3.3 PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO ENDURECIDO.....	112
3.3.1 NO DESTRUCTIVAS.....	113
3.3.1.1 OBTENCIÓN DE DIMENSIONES .....	113
3.3.1.2 HUMEDAD .....	114
3.3.1.3 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA .....	114
3.3.1.4 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU) .....	116
3.3.2 DESTRUCTIVAS.....	117
3.3.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE .....	117
3.3.2.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN .....	120
3.3.2.3 RESISTENCIA A LA TENSIÓN DIRECTA.....	122
3.3.2.4 ESFUERZO-DEFORMACIÓN.....	124
3.3.2.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO .....	125
3.3.3 PRUEBAS POR DURABILIDAD .....	125
3.3.3.1 ABSORCIÓN CAPILAR .....	125
4. RESULTADOS Y DESCRIPCIONES .....	129
4.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	129
4.1.1 ARCILLA .....	129
4.1.1.1 DISGRECIÓN DEL MATERIAL .....	129
4.1.1.2 MATERIAL QUE PASA LA MALLA ASTM No. 40.....	129
4.1.1.3 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO. ....	129
4.1.1.4 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE PLÁSTICO.....	130
4.1.1.5 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN. (LC Y CL).....	133
4.1.2 YESO.....	134
4.1.3 FIBRA DE NOPAL.....	134
4.1.4 SULFATO DE SODIO.....	134
4.1.5 AGUA .....	134
4.2 PRUEBAS REALIZADAS A LAS MEZCLAS EN FRESCO .....	135
4.2.1 FLUIDEZ .....	135
4.2.2 DISEÑO DE MEZCLA.....	136





4.2.3 POTENCIAL DE HIDRÓGENO.....	136
4.2.4 TEMPERATURA.....	137
4.3 PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO ENDURECIDO.....	137
4.3.1 NO DESTRUCTIVAS.....	137
4.3.1.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	137
4.3.1.2 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU).....	139
4.3.2 DESTRUCTIVAS.....	141
4.3.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.....	141
4.3.2.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN.....	143
4.3.2.3 RESISTENCIA A LA TENSIÓN DIRECTA.....	144
4.3.2.4 ESFUERZO DEFORMACIÓN.....	145
4.3.2.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO.....	151
4.3.3 PRUEBAS POR DURABILIDAD.....	152
4.3.3.1 FAGERLUD.....	152
5 CONCLUSIONES.....	156
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: DEPÓSITOS ARCILLOSOS EN MÉXICO, (BIBLIOTECADIGITAL, 2008)	17
ILUSTRACIÓN 2: CLASIFICACIÓN DE MOTT SOBRE LOS MINERALES ARCILLOSOS (LAS ARCILLAS PROPIEDADES Y USOS 2002).	20
ILUSTRACIÓN 3: EL TETRAEDRO ELEMENTAL O LA PIRÁMIDE TRIANGULAR, (BIBLIOTECADIGITAL, 2008)	27
ILUSTRACIÓN 4: CADENA DE TETRAEDROS, MEDIANTE LOS ENLACES DEL TIPO: ...O-SI-O-SI-O-SI-O-. (BIBLIOTECADIGITAL, 2008)	28
ILUSTRACIÓN 5: SUSTITUCIÓN DE ÁTOMOS DE SILICIO POR EJEMPLO DE ALUMINIO, (BIBLIOTECADIGITAL, 2008)	28
ILUSTRACIÓN 6: ARCILLAS ESMECTITAS DEL GRUPO 2:1. FÓRMULA QUÍMICA, (BIBLIOTECADIGITAL, 2008)	30
ILUSTRACIÓN 7: LA ESTRUCTURA DE LOS SILICATOS, O EL MECANO, (BIBLIOTECADIGITAL, 2008)	31
ILUSTRACIÓN 8: ESTADOS DE COMPACTACIÓN, (HIDALGO, 2011)	35
ILUSTRACIÓN 9: ESTRUCTURA PANALOIDE, (HIDALGO, 2011)	36
ILUSTRACIÓN 10: ESTRUCTURA FLOCULENTE, (HIDALGO, 2011)	36
ILUSTRACIÓN 11: ESTRUCTURA CASTILLO DE NAIFE, (HIDALGO, 2011)	37
ILUSTRACIÓN 12: ESTRUCTURA DEL SUELO, (HIDALGO, 2011)	37
ILUSTRACIÓN 13: ESTRUCTURA GRANULAR EN SUELOS, (HIDALGO, 2011)	40
ILUSTRACIÓN 14: ESTRUCTURA DE BLOQUES EN LOS SUELOS, (HIDALGO, 2011)	40
ILUSTRACIÓN 15: ESTRUCTURA PRISMÁTICA DE LOS SUELOS, (SIMBASICA, 2014)	41
ILUSTRACIÓN 16: ESTRUCTURA LAMINAR DE LOS SUELOS, (SIMBASICA, 2014)	41
ILUSTRACIÓN 17: FRENTE DE ATAQUE DEL BANCO DE ARCILLA EN LA RIVERA DEL LAGO DE CUITZEO EN SANTIAGO UNDAMEO, MÉXICO. (DE LEON AMBROCIO, 2016)	42
ILUSTRACIÓN 18: YESO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN, (CV, 2008)	63
ILUSTRACIÓN 19: FIBRA DE NOPAL, (NOPALMIX, 2010)	64
ILUSTRACIÓN 20: FIBRA DE NOPAL UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN. (DE LEON AMBROCIO, 2016)	69
ILUSTRACIÓN 21: HORNO-REACTOR PROCESO MANNHEIM (CARLOS, 2007)	71
ILUSTRACIÓN 22: COLUMNA-REACTOR PROCESO HARGREAVES, (CARLOS, 2007)	72
ILUSTRACIÓN 23: SULFATO DE SODIO DE LA INVESTIGACIÓN, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	78
ILUSTRACIÓN 24: DISGREGACIÓN DEL MATERIAL (DE LEON AMBROCIO, 2016)	84
ILUSTRACIÓN 25: HOMOGENIZACIÓN DEL MATERIAL, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	85
ILUSTRACIÓN 26: COLOCACIÓN DEL MATERIAL EN LA COPA DE CASAGRANDE, (AMBROCIO, 2016)	86
ILUSTRACIÓN 27: FORMA Y DIMENSIONES DE LA RANURA, (TRANSPORTE, 2007)	87
ILUSTRACIÓN 28: ELABORACIÓN DE CILINDROS DEL MATERIAL EN LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO, (AMBROCIO, 2016)	89
ILUSTRACIÓN 29: LLENADO DE LA CÁPSULA PARA LA OBTENCIÓN DE CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA, Y SUMERGIDO DE LA MUESTRA SECA EN EL MERCURIO PARA LA OBTENCIÓN DE SU DENSIDAD. (AMBROCIO, 2016)	93
ILUSTRACIÓN 30: LLENADO DE CÁPSULA PARA OBTENCIÓN DE LA CONTRACCIÓN LINEAL Y MEDICIÓN FINAL DE LA MUESTRA SECA QUE DETERMINACIÓN LA CONTRACCIÓN DEL MATERIAL. (AMBROCIO, 2016)	95
ILUSTRACIÓN 31: DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDROGENO (PH) CON TIRAS REACTIVAS, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	106
ILUSTRACIÓN 32: DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDROGENO (PH) CON PHMETRO, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	106
ILUSTRACIÓN 33: ELABORACIÓN DE BRIQUETAS, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	112





ILUSTRACIÓN 34: OBTENCIÓN DE MEDIDAS DE LAS CARAS LATERALES DE LOS ESPECÍMENES, (AMBROCIO, 2016)	113
ILUSTRACIÓN 35: OBTENCIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LOS ESPECÍMENES, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	114
ILUSTRACIÓN 36: PRUEBA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA, (AMBROCIO, 2016)	115
ILUSTRACIÓN 37: PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO, (AMBROCIO, 2016)	117
ILUSTRACIÓN 38: PRUEBA A COMPRESIÓN SIMPLE EN ESPECÍMENES CÚBICOS, (AMBROCIO, 2016)	118
ILUSTRACIÓN 39: ESPECÍMENES PROBADOS POR EDAD Y POR MEZCLA, (DE LEÓN AMBROCIO, 2016):	119
ILUSTRACIÓN 40: PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE EN CILINDROS, (DE LEÓN AMBROCIO, 2016)	119
ILUSTRACIÓN 41: PRUEBA DE TENSIÓN POR FLEXIÓN EN ESPECÍMENES PRISMÁTICOS, (DE LEÓN AMBROCIO, 2016)	121
ILUSTRACIÓN 42: ESPECÍMENES PRISMÁTICOS PROBADOS A TENSIÓN POR FLEXIÓN POR EDAD Y POR MEZCLA, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	122
ILUSTRACIÓN 43: COLOCACIÓN DE BRIQUETA EN LA MÁQUINA, PARA LLEVAR ACABO LA PRUEBA DE TENSIÓN DIRECTA, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	123
ILUSTRACIÓN 44: MUESTRAS PROBADAS POR EDAD Y MEZCLA A TENSIÓN DIRECTA, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	123
ILUSTRACIÓN 45: DETERMINACIÓN DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN LOS CILINDROS, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	124
ILUSTRACIÓN 46: COLOCACIÓN DE ESPECÍMENES EN EL RECIPIENTE CON EL TIRANTE DE AGUA, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	128
ILUSTRACIÓN 47: OBTENCIÓN Y PÉRDIDA DE MASA EN EL MINUTO 30, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	128
ILUSTRACIÓN 48: CLASIFICACIÓN DEL SUELO CON LA CARTA DE PLASTICIDAD, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	132
ILUSTRACIÓN 49: RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN CUBOS DE LA MEZCLA TESTIGO, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	137
ILUSTRACIÓN 50: RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN PRISMAS (ARCILLA), (AMBROCIO, 2017)	138
ILUSTRACIÓN 51: VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CUBOS, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	139
ILUSTRACIÓN 52: VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN PRISMAS, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	139
ILUSTRACIÓN 53: VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CILINDROS, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	140
ILUSTRACIÓN 54: COMPRESIÓN SIMPLE EN CUBOS DE LAS DIFERENTES MEZCLAS, (AMBROCIO, 2017)	141
ILUSTRACIÓN 55: COMPRESIÓN SIMPLE EN CILINDROS DE LAS DIFERENTES MEZCLAS, (AMBROCIO, 2017)	142
ILUSTRACIÓN 56: TENSIÓN POR FLEXIÓN EN PRISMAS, (AMBROCIO, 2017)	143
ILUSTRACIÓN 57: TENSIÓN DIRECTA EN BRIQUETAS DE LA MEZCLA TESTIGO (ARCILLA), (AMBROCIO, 2017)	144
ILUSTRACIÓN 58: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN ESPECÍMENES DE LA MEZCLA TESTIGO, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	145
ILUSTRACIÓN 59: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN ESPECÍMENES DE LA MEZCLA ARCILLA-YESO, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	145
ILUSTRACIÓN 60: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN ESPECÍMENES DE LA MEZCLA ARCILLA-FIBRA DE NOPAL, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	146
ILUSTRACIÓN 61: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN ESPECÍMENES DE LA MEZCLA ARCILLA-SULFATO DE SODIO, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	146





ILUSTRACIÓN 62: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN ESPECÍMENES DE LA MEZCLA TESTIGO (ARCILLA), (DE LEON AMBROCIO, 2017)	147
ILUSTRACIÓN 63: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN ESPECÍMENES DE LA MEZCLA ARCILLA-YESO, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	147
ILUSTRACIÓN 64: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN ESPECÍMENES DE LA MEZCLA ARCILLA-FIBRA DE NOPAL, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	148
ILUSTRACIÓN 65: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN ESPECÍMENES DE LA MEZCLA ARCILLA-SULFATO DE SODIO, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	148
ILUSTRACIÓN 66: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN ESPECÍMENES DE LA MEZCLA TESTIGO (ARCILLA), (DE LEON AMBROCIO, 2017)	149
ILUSTRACIÓN 67: : ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN ESPECÍMENES DE LA MEZCLA ARCILLA-YESO, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	149
ILUSTRACIÓN 68: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN LA MEZCLA ARCILLA-FIBRA DE NOPAL, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	150
ILUSTRACIÓN 69: ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN LA MEZCLA ARCILLA-SULFATO DE SODIO, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	150
ILUSTRACIÓN 70: ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR PARA UNA MUESTRA DE LA MEZCLA SULFATO DE SODIO, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	153

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: LÍMITES PERMISIBLES DE SALES E IMPUREZAS DEL AGUA, (NMX-C-122-ONNCCE, 2004)	51
TABLA 2: VALOR NUTRITIVO DEL NOPAL, (ANDRÉS ANTONIO TORRES ACOSTA, 2010)	68
TABLA 3: RESULTADOS DE LÍMITE LÍQUIDO EN LAS MEZCLAS, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	130
TABLA 4: DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DE LA MEZCLA TESTIGO, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	130
TABLA 5: RESULTADOS DEL ÍNDICE PLÁSTICO DE LAS MEZCLAS ELABORADAS, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	131
TABLA 6: RESULTADOS DE CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA EN LAS MEZCLAS ELABORADAS, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	133
TABLA 7: DETERMINACIÓN DE LA CONTRACCIÓN LINEAL DE LA MEZCLA TESTIGO, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	133
TABLA 8: LÍMITES PERMISIBLES, (BERNABE REYES, 2015)	135
TABLA 9: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE FLUIDEZ, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	135
TABLA 10: RESULTADOS DEL CONTENIDO DE AGUA PARA LAS MEZCLAS EN ESTUDIO, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	136
TABLA 11: RESULTADOS DE PH EN LAS MEZCLAS EN FRESCO, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	136
TABLA 12: RESULTADOS DE TEMPERATURA EN LAS MEZCLAS EN FRESCO, (DE LEON AMBROCIO, 2016)	137
TABLA 13: RESULTADOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICOS, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	151
TABLA 14: SERIE DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN CAPILAR Y POROSIDAD EFECTIVA, (DE LEON AMBROCIO, 2017)	152
TABLA 15: RESULTADOS DE SORCIÓN CAPILAR (S), (DE LEON AMBROCIO, 2017)	153
TABLA 16: RESULTADOS DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR, (K) (DE LEON AMBROCIO, 2017).	154
TABLA 17: RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL AGUA, (M). (DE LEON AMBROCIO, 2017)	154
TABLA 18: RESULTADOS DE LA POROSIDAD EFECTIVA, ( $\epsilon E$ ), (DE LEON AMBROCIO, 2017)	154







## RESUMEN

En la presente investigación se abordan temas referentes a pruebas realizadas a un mortero elaborado a base de arcilla con la implementación de aditivos, con el propósito de lograr una mejor estabilización del material para ser utilizado en la restauración de estructuras antiguas y/o patrimoniales, mantener el ámbito de construcción con este material, así como el mejoramiento de las características físicas y mecánicas. Para lograrlo se elaboró una mezcla testigo, es decir solo Arcilla, y mezclas de Arcilla con porcentajes determinados de aditivos en relación a la masa. Los aditivos fueron Yeso en un 6%, Fibra de Nopal 0.5% y Sulfato de sodio 0.5%. La arcilla en estudio se obtuvo de la localidad de Santiago Undameo, Michoacán, México. Primeramente se realizó una disgregación del material, para lograr una homogenización y poder pasarlo por la malla ASTM No. 40 como lo establece la Norma (D-4318 ASTM). La caracterización del material se realizó por medio de las pruebas de Límite Líquido, Límite e Índice Plástico, Contracción Volumétrica y Contracción Lineal. Se elaboraron especímenes cúbicos de 5cm x 5cm x 5cm, prismáticos de 4cm x 4cm x 16 cm, cilíndricos de 5cm de diámetro x 10cm de alto y briquetas, siguiendo las especificaciones de la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004). Se trabajó con pruebas destructivas y no destructivas, las primeras incluyen a la Compresión Simple, Tensión por Flexión y Tensión Directa, con las cuales se determina la resistencia del material ante diferentes sollicitaciones mecánicas, así como también su plasticidad. Las pruebas no destructivas incluyen a la Resistividad Eléctrica y Velocidad de Pulso Ultrasónico, con estas determinamos de forma indirecta la porosidad y el Módulo de Elasticidad Dinámico del material analizado. Las pruebas antes mencionadas se realizaron a 5 especímenes de cada mezcla a las edades de 150,180 y 220 días. Se realizó la prueba de Absorción Capilar a la edad de 250 días a especímenes cúbicos, con la cual se determina la porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ), absorción capilar (k) y resistencia a la penetración del agua (m), siendo esta un parámetro de diseño por durabilidad. De los resultados obtenidos durante el desarrollo de las pruebas, los aditivos que mejor estabilizaron a la arcilla fueron Yeso y Sulfato de Sodio, ya que presentaron mejores resultados que la mezcla Testigo.

**Palabras clave:** arcilla, aditivos, mezclas, estabilización, morteros, edades tardías.





## ABSTRACT

This research addresses issues relating to the tests carried out to a mortar made from clay with the implementation of additives, with the aim of achieving a better stabilization of the material to be used in the restoration of ancient structures, maintaining the scope of construction with this material, as well as the improvement of the physical and mechanical properties. To achieve this was developed a mixture control, i.e. only clay, and clay blends with certain percentage of additive in relation to the mass.

The additives were Gypsum in 6%, Nopal Fiber 0.5% and Sodium Sulphate 0.5%. The clay in study was obtained from the locality of Santiago Undameo, Michoacán, Mexico. First a disintegration of the material was carried out, to achieve a homogenization and to pass through the ASTM mesh No. 40 as established by the Standard (D-4318 ASTM). The characterization of the material was carried out through the liquid limit, limit plastic, index plastic, volumetric shrinkage and linear shrinkage tests. Were prepared cubic specimens of 5 cm x 5 cm x 5 cm, prismatic specimens of 4 cm x 4 cm x 16 cm, cylindrical specimens of 5 cm of diameter by 10 cm of high and briquettes, following them specifications of the standard (NMX-C-159-ONNCCE, 2004). We worked with destructive and non-destructive tests, the first including Simple compression, stress by bending and direct stress, with which determines the strength of the material to different mechanical stress, as well as its plasticity. Non-destructive tests include the electrical resistivity and ultrasonic pulse velocity, with these determined indirectly porosity and modulus of dynamic elasticity of the material analysed. The above tests were performed on 5 specimens of each mixture at the ages of 150, 180 and 220 days. The Capillary Absorption test was performed at 250 days of age on cubic specimens, with which the effective porosity ( $\epsilon_e$ ), capillary absorption (k) and resistance to water penetration (m) were determined, being this a parameter of design by durability. From the results obtained during the development of the tests, the additives that best stabilized the clay were Gypsum and Sodium Sulfate, as they presented better results than the control mixture.

**Keywords:** clay, additives, mixtures, stabilization, mortars, late ages.





## OBJETIVO

### General

Mejorar las características físicas y mecánicas de morteros base arcilla con la implementación de aditivos en la mezcla arcilla-agua para mejorar sus propiedades físico-mecánicas y así poder emplearlo en la restauración de estructuras antiguas de tierra cruda, con el fin de mantener la estética de dicha estructura y proporcionarle mayor estabilidad en sus materiales constituyentes.

### Particulares

Evaluar el comportamiento del mortero estabilizado con diferentes aditivos naturales y minerales para edades tardías.

La implementación de la arcilla 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.

Mantener el ámbito de construcción, restauración o mantenimiento de las edificaciones de suelo que existen en el estado de Michoacán.

Obtener proyectos sustentables manteniendo un equilibrio con el medio ambiente al emplear un material ecológico y estabilizado que garantice mayor vida útil en construcciones de tierra.

Continuar con la evaluación de las mezclas que dieron los mejores resultados en investigaciones previas, analizando su comportamiento a edades tardías e identificando la factibilidad del material de adición, porcentajes y metodología empleada.

Los resultados obtenidos serán la iniciativa para continuar la investigación del uso de diferentes materiales y porcentajes en la estabilización de suelos arcillosos.

Obtener un mortero de calidad, que se adecue a las exigencias establecidas en la normativa.





Obtener resultados satisfactorios en pruebas destructivas (compresión simple, tensión directa y flexión por medio de tensión) y no destructivas (resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, entre otros), sin alterar las características físicas de las arcilla.

## JUSTIFICACIÓN

Nuestra región cuenta con cantidades abundantes de arcilla del tipo montmorillonita, común en suelos y sedimentos, encontrándose disponible en casi todas las regiones del planeta. Desde la antigüedad este material ha sido la materia prima para las construcciones de la zona purépecha, en otras regiones de nuestro estado y del país, específicamente en la construcción de viviendas prehispánicas y centros ceremoniales. Las estructuras elaboradas a base de tierra cruda representan una gran importancia para nuestra 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.

Se estima que entre un 40% y un 80% de la construcción en el mundo está hecha a base de tierra cruda, en nuestro país las investigaciones estiman que existen 131 edificaciones a base de tierra cruda por cada 1200 km<sup>2</sup>. Las construcciones de tierra cruda son de gran importancia cultural para muchos países tales como: Australia, California, Colombia, México, Nuevo México, Perú, Chile y Alemania entre otros. El consumo de la arcilla se mide en millones de toneladas por la gran cantidad de productos y estructuras fabricadas con este material. Sin duda, la tierra cruda está muy presente en el paisaje arquitectónico y patrimonial, constituyendo una de las características más reconocidas de nuestra identidad cultural.

En la presente investigación se desarrolla el estudio de materiales empleados como aditivos para la elaboración de morteros a base de arcilla, los cuales son yeso, sulfato de sodio y fibra de nopal. Se decidió utilizar los aditivos ya mencionados por sus características reactivas pusilánimas y por resultados obtenidos en investigaciones anteriores donde han funcionado como un aditivo adecuado para su uso en la construcción con cemento portland. Se emplearon estos aditivos en la elaboración de morteros, porque se fabrican a partir de materia prima extraída directamente de la Naturaleza, y tras procesos de transformación más o menos intensos se colocan en obra.





## DEDICATORIAS

A mi mamá: **CEFERINA AMBROCIO PÉREZ**, por su incomparable amor, por su cariño, comprensión, y confianza que me ha brindado, por la paciencia que me ha tenido todos estos años, por rus consejos, regaños y preocupaciones, porque sin ti esto no hubiera sido posible. Por todo el sacrificio que hiciste para que yo terminara mis estudios, por tu apoyo incondicional. Porque siempre fuiste mi columna vertebrar para mantenerme de pie, por enseñarme que el que persevera alcanza, por enseñarme que el trabajo es la fuente para poder vivir. Por eso y por muchas cosas más hoy te quiero decir ¡GEACIAS POR TODO MAMÁ!

A mi papá: **EFRAIN DE LEON MAZARIEGOS**, por sacarnos adelante a mí y a todo mi familia, por explicarme lo bueno y lo malo, por enseñarme a trabajar, a valorar a las personas que nos quieren y a no tener miedo, por ser mi ejemplo a seguir, porque no conozco a un hombre más leal que tu papá.

Porque ser mi ángel de la guardia, porque nunca me dejó solo y desde arriba me ha cuidado. En donde quiera que estés ¡MUCHAS GRACIAS PAPÁ!

A mis hermanas: **OREVELINA DE LEON AMBROCIO, ZOILA DE LEON AMBROCIO, BERTILA DE LEON AMBROCIO, FLRORIDALMA DE LEON AMBROCIO Y MAGNOLIA DE LEON AMBROCIO**. Por el sincero amor que me tienen, por sus sabios consejos, por divertidas, por cuidarme, porque no les gusta que me enferme, por todas los momentos que hemos vividos juntos, las quiero, GRACIAS.

A mis hermanos: **NOE ABRAHAM DE LEON AMBROCIO, LEONEL DE LEON AMBROCIO, GALINDO DE LEÓN AMBROCIO, OGLER DE LEON AMBROCIO**, por todas la risas que hemos compartido, por todos los momentos malos que hemos superado, porque sé que siempre me extenderán la mano y estarán ahí cuando los necesite. Porque a pesar de las complicaciones de la vida siempre han salido adelante, por todo los consejos buenos y medios malos, por todo el apoyo, por ser mis hermanos gracias.





## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por regalarme hasta vida, por darme la fortaleza de vivir por llenarme con sus bendiciones todos los días. Por guiarme por el buen camino y darme la oportunidad de terminar esta carrera profesional. Gracias Dios.

A mis padres, voy estar agradecido con ellos toda mi vida, los llevare conmigo en cada paso que dé. A mis hermanas y hermanos por haber estado en todo momento apoyándome, por sus incontables consejos y por el todo el cariño que me demuestran, gracia familia.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por ser la institución que me formó profesionalmente, a la Facultad de Ingeniería Civil, a los profesores que me impartieron clases para brindarme sus conocimientos, al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, departamento de Resistencia de Materiales, por apoyarme con los materiales y el equipo necesario y desarrollar mi investigación dentro de sus instalaciones.

A mi asesora, la Doctora Elia Mercedes Alonso Guzmán, por compartirme sus consejos y sus valiosas enseñanzas, por haberme dado la oportunidad de realizar mi investigación bajo su asesoría, por resolver mis dudas y darme la confianza necesaria. Muchas gracias. Al M.A. Wilfrido Martínez Molina, por su liderazgo en la Facultad de Ingeniería Civil, por ser parte de esta investigación, gracias.

Al Dr. Hugo Luis Chávez García por sus sabios consejos y el apoyo brindado gracias.

A Sandra del Carmen arguello Hernández, a Cipriano Bernabé Reyes, por todas las dudas que me resolvieron, porque nunca se negaron a ayudarme, por sus consejos e ideas para conducir la investigación por el mejor camino, por todo su apoyo durante el desarrollo de mi investigación, en verdad muchas gracias. ¡Gracias! Berna por todos los ratos de revisión y las pláticas de amigos que tuvimos gracias.

A Amarais Flores Ponce por su gran apoyo, por su amistad y por tantos momentos compartidos durante las pruebas en el desarrollo de la investigación.

A los ingenieros Isaías, Noel, Wilbert, Hugo. por ayudarme con las pruebas





realizadas , a Emanuel , Colín, Fidel , Job, a los compañeros del servicio social, por estar un muchas coladas y por compartir momentos y formar parte de este gran logro en mi vida. A todo el personal del laboratorio de materiales muchas gracias.

A mis amigos, Juan García (la muñeca), Kevin Alcanzar (el cochiloco), Fernando Gutiérrez (Osorio Chong), José Alberto Chávez (el Betillo), Missael Camilo (namecusiein), Juan José López (el jj). Gracias por haber estado ahí en las buenas y en las malas, por tantos momentos y experiencias vividas muchas gracias.

A mi novia Camila Madrigal González, por todo el apoyo, por los celos hacia la tesis, por hacerme reír con tus cosas, por ser como eres, por este tiempo a mi lado gracias.

A mi prima, Ogulve Audilene Gerónimo De Leon, por aguantar mi bromas, por ser mi única prima que Estudia ingeniería civil, por ser la consentida, gracias.





## 1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de construcción en la antigüedad eran empíricos, como las demás actividades artesanales, 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 y con la implementación de nuevos materiales de construcción.

La presente investigación se desarrolló con base en la relevancia que tienen las estructuras elaboradas a base de tierra cruda en nuestro entorno social y cultural, 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 lo anterior se implementaron aditivos para adoptar mejoras en las características mecánicas de estos materiales mediante un proporcionamiento óptimo. El uso de este material toma importancia en la reconstrucción o restauración de estructuras que forman parte del patrimonio cultural 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. Se ha tratado de controlar el problema de los agrietamientos que presentan las estructuras usando temperatura y horneado para mejorar la calidad de los elementos de construcción; 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. En la actualidad existen diferentes métodos para mejorar la calidad de un material elaborados con arcilla.

La humedad del ambiente es un factor muy importante en el comportamiento de la arcilla no solo en la pérdida de humedad sino también en las propiedades mecánicas. En lugares donde el clima es extremoso, los materiales arcillosos tienden a presentar aumento en su volumen o expansión, debido a las bajas temperaturas y humedad en el ambiente; en lugares donde el clima es muy cálido o seco, por el contrario, la arcilla tiende a presentar contracciones volumétricas, provocando graves problemas en la construcción de elementos a base de tierra cruda (arcilla), así como en el terreno natural. 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  $100^{\circ}03'32''$  y  $103^{\circ}44'49''$  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  $1000^{\circ}\text{C}$ , 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. Las temperaturas del estado de Michoacán son completamente variables ya que cuenta con diferentes altitudes con respecto al nivel del mar.

En el presente estudio se implementaron el yeso, fibra de nopal y sulfato de sodio como aditivos en la mezcla arcilla-agua, con los cuales se pretende mejorar las propiedades físico-mecánicas así como los cambios volumétricos característicos en este tipo de material en presencia del agua. La utilización de fibra de nopal es factible por su abundancia en el país y por sus buenas propiedades de resistencia mecánica; el yeso, por su gran importancia en la construcción y por sus favorables características, se utilizó como el aditivo del cual se espera obtener un buen resultado en la experimentación tanto de pruebas destructivas como no destructivas. El sulfato de sodio por su alta reacción química en presencia de humedad presenta una cristalización que nos ayuda a mejorar el comportamiento mecánico de la arcilla, es decir, el esfuerzo a la compresión, tensión directa y flexión por medio de tensión. Las pruebas destructivas mencionadas se realizarán a edades tardías de 150, 180 y 220 días, en especímenes cúbicos de 5cm de arista, prismáticos de 4cm x 4cm x 16 cm y briquetas. En los cuales se espera que conforme se incremente la edad, los especímenes pierdan humedad y por ende presenten una mejora en las propiedades mecánicas.





## 2. MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL O REFERENCIAL

### 2.1 ANTECEDENTES

La arcilla ha sido un material que ha jugado un papel importante en el ámbito de la construcción ya que se ha utilizado como material de construcción desde la antigüedad. Hace 9000 años se conocen técnicas de construir con adobe en muchas partes del mundo. En Turkestán (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 Teotihuacán tiene un núcleo de 2 millones de toneladas de adobe. La ciudad Shibam en Yemen, llamada el -ManhattanII 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. 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 elaboradas con arcilla.

En México, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Argentina y en el Sur y Norte de Chile, las casas de adobe son aún 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.

En la actualidad existen en el estado de Michoacán y todo el país importantes estructuras de arcilla que son patrimonio de la humanidad. Por lo cual se han





desarrollado investigaciones para mantener dichas estructuras en buen estado y darle mejor estética y mayor durabilidad. De igual forma existen investigaciones previas a esta las cuales tienen como objetivo mejorar las características físico-mecánicas de la arcilla para poder darle el uso adecuado y satisfacer las necesidades de la sociedad. Entre dichas investigaciones están: MINEROLOGÍA DE ROCAS DE SUELOS, la cual consistió en realizar un estudio en varios tipos de rocas y estableciendo diversas investigaciones sobre la montmorillonita en 1985. EVALUACIÓN DE ADITIVOS USADOS EN EL TRATAMIENTO DE ARCILLAS EXPANCIVAS, consistió en observar el potencial de expansión de los suelos y los efectos que los aditivos provocaban, en el 2006. LAS PUZOLANAS EN EL AHORRO ENERGÉTICO EN LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, obtener los resultados de los estudios acerca de la naturaleza de las fases producidas en la reacción puzolánica-cal, en presencia de agua, en 1983. MORTEROS DE CAL: APLICACIÓN EN EL PATRIMONIO HISTORICO, estos estudios permitieron conocer la composición de un mortero antiguo entre otros aspectos, en 2002. LOS COMIENZOS DE LA TECNOLOGÍA DE LA CAL EN EL MUNDO MAYA: INNOVACIÓN Y CANTINUIDAD DESDE EL PRECLÁSTICO DEDIO AL CLÁSICO TARDIO EN NAKBE, PETÉN, GAUTEMALA, Análisis de los estucos y pinturas arquitectónicas de Nakbe: resultados preliminares de los estudios de los suelos y simposio de investigaciones Arqueológicas en Guatemala, en 2001. PREVENCIÓN Y ELIMINACIÓN DE EFLORESCENCIAS EN LA RESTAURACIÓN DE LADRILLAS DE CONSTRUCCIÓN. Investigación realizada en España, con el objetivo de eliminar la eflorescencia en los ladrillos de construcción, en 2001. MORTEROS COMO ELEMENNTOS DE ESTUDIO EN ARQUEOLOGÍA-ARQUEOMETRÍA MEDIEVAL, su principal objetivo fue el estudio de todos los morteros posibles de la época medieval para poder haber reparaciones en las estructuras y así mantener la estética de las estructuras. En 2005. (EF HANSEN, 2001)

LA NORMA ASTM D 6276 COMO INSTRUMENTO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA FINES PATRIMONIALES. Investigación realizada en la UMSNH. Su principal objetivo fue la implementación de aditivos para lograr una estabilización volumétrica y el mejoramiento de las características físico-mecánicas en la arcilla para uso patrimonial. (Flores, 2010)





## ***El Yeso como Material de Construcción***

En este caso hay constancia de que ya en el siglo IX a.C. se utilizaba como material para revestimientos en Turquía. Llamamos yeso de construcción al producto pulverulento procedente de la cocción de la piedra de yeso o aljez, que una vez mezclado con agua, en determinadas porciones, es capaz de fraguar en el aire. Este yeso se denomina sulfato de calcio hemihidratado o semihidrato ( $\text{CaSO}_4 \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ).

### ***Fabricación del Yeso***

La piedra de yeso o aljez se extrae de canteras a cielo abierto o de canteras subterráneas. Esta materia prima extraída, previamente a su cocción, se tritura utilizando maquinaria apropiada, como pueden ser: los molinos de rodillos, machacadoras de mandíbulas, etc. El tamaño de grano tras su trituración viene determinado principalmente por el método o sistema de cocción a emplear.

### **PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL YESO**

- 1.- Canteras.
- 2.- Trituración de la materia prima.
- 3.- Almacenado en silos de la materia prima.
- 4.- Horno de cocción.
- 5.- Molienda del yeso fabricado.
- 6.- Almacenado en silos del yeso fabricado.
- 7.- Zona de carga directa del yeso en camiones cisterna.
- 8.- Zona de ensacado automático del yeso. (proinsia)

### ***FIBRA DE NOPAL COMO ADITIVO EN ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN***

Por las características que presenta este aditivo orgánico (fibra de nopal) en la actualidad se han desarrollado investigaciones en las cuales la adición de fibra de nopal presenta buenas características tanto en resistencia a compresión como en flexión. El proceso de elaboración consiste en someter al nopal a una serie de





procesos sin alterar demasiado sus componentes para que pueda ser utilizado con sus propiedades naturales.

## **SULFATO DE SODIO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.**

Sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Por oxidación se forma de los sulfuros de muchos elementos cuando estos entran en contacto con el oxígeno del aire, el sulfato en presencia de agua tiende a cristalizarse, por tanto proporcionan una mayor resistencia a los materiales para la construcción.

## 2.2 ARCILLA

### 2.2.1 HISTORIA DE LA ARCILLA

#### **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. 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 mm ( $2\ \mu$ ). 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  $2\ \mu$  o  $5\ \mu$  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  $2\mu$  de límite superior. (Das., fundamentos de la ingeniería geotécnica., 1998)

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. (EF HANSEN, 2001)

Desde hace 9,000 años se conocen técnicas de construir con adobe en muchas partes del mundo. En Turkestán (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 3,200 años. La pirámide del Sol en Teotihuacán tiene un núcleo de 2 millones de toneladas de adobe. La ciudad Shibam en Yemen, llamada el -ManhattanII 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. (Flores, 2010)

## 2.2.2 ORIGEN DE LA ARCILLA

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. 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 (Gonzalez, 2012).

## **COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LA TIERRA.**

La Tierra tiene una estructura compuesta por cuatro grandes zonas o capas: la geósfera, la hidrósfera, la atmósfera y la biósfera. 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 (Gonzalez, 2012).

### **LA GEÓSFERA.**

Los geólogos han diseñado dos modelos geológicos que establecen una división de la estructura terrestre, el modelo geostático y el modelo geodinámico. (Gonzalez, 2012)

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 Mohorovic 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 magmáticos

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.

*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 ( $\text{SiO}_2$ ) y aluminio, es de tipo ácido y con una densidad media de 2.7. (Gonzalez, 2012)

**MANTO.** Es una capa intermedia entre la corteza y el núcleo que llega hasta una profundidad de 2,900 km. El cambio de la corteza al manto está determinado por la discontinuidad de Mohorovic. 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)

**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.

### **MODELO GEODINÁMICO**

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

**LITÓSFERA.** 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.

**ASTENÓSFERA.** Es la porción del manto que se comporta de manera fluida. En esta capa las ondas sísmicas disminuyen su velocidad.

**MESÓSFERA.** 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 mesósfera y la endósfera. Aquí las rocas pueden calentarse mucho y subir a la litósfera, pudiendo desembocar en un volcán.

**ENDÓSFERA.** 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. (Gonzalez, 2012)

### **LA HIDRÓSFERA.**

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.

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 CO<sub>2</sub>, y por tanto el efecto invernadero era mayor.

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 estratósfera absorbe la mayoría de esta radiación ultravioleta, reduciendo el efecto. El ozono protege a la biósfera del pernicioso efecto de la radiación ultravioleta. La magnetósfera también actúa como un escudo que protege al planeta del viento solar. (Gonzalez, 2012)

### **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 biósfera. Así, la gran cantidad de oxígeno libre se obtiene por la fotosíntesis de las plantas, que por la acción de la energía solar transforma CO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>. El oxígeno libre en la atmósfera es una consecuencia de la presencia de vida (de vegetación) y no al revés.

Las capas de la atmósfera son: la tropósfera, la estratósfera, la mesósfera, la termósfera, y la exósfera. Sus alturas varían con los cambios estacionales. (Gonzalez, 2012)

### **LA BIÓSFERA.**

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 biósfera. La biósfera comenzó a evolucionar hace aproximadamente 3500 millones de años ( $3.5 \times 10^9$ ). La hipótesis Gaia es un modelo científico de la biósfera terrestre formulado por el biólogo James Lovelock que sugiere que la vida sobre la Tierra organiza las condiciones climáticas para favorecer su propio desarrollo. (Gonzalez, 2012)

### **SUELO.**

Es común la creencia 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 (Júarez Baldillo, 206).

"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 (Júarez Baldillo, 2006). 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.

### **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. (Ill., 1997)

### **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 (Ill., 1997).

*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 al acuñaamiento.

*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 (III., 1997).

*Efectos de organismos.* Las actividades de las plantas y de los animales también promueven la desintegración de las rocas. Las raíces de los árboles, 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. (III., 1997)

### **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 que 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. (III., 1997)

*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 la herrumbre, 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. (III., 1997)

*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. (III., 1997)

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 ( $\text{CO}_2$ ), 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, ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), que es un agente eficaz en la agresión química de minerales tales como la calcita y la dolomía. (III., 1997)

## **EL ORIGEN DE LOS SILICATOS**

Aun con las técnicas modernas disponibles hoy en día, el conocimiento que tenemos de la corteza terrestre es muy limitado, ya que sólo se ha explorado una pequeñísima porción del casquete superficial, es decir aproximadamente los primeros cuatro kilómetros a partir de la superficie, o sea el 0.062% del diámetro terrestre (12 740 km). Sin embargo, mediante métodos indirectos, como los sísmológicos, se ha logrado poner en evidencia que la estructura interna de la Tierra está formada por capas que tienen una composición más o menos definida: así, hacia el interior de la superficie encontramos la capa llamada SIAL, situada entre los 40 y 100 km de profundidad, que es rica en sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y aluminio, es de tipo ácido y con una densidad media de 2.7. Más hacia el interior hallaremos la capa denominada SIMA, rica en hierro y magnesio pero con algunas porciones de sílice, aluminio y otros elementos, de carácter básico, más caliente y fluido que la capa SIAL. La capa SIMA es considerada la madre





directa de todas las formaciones minerales que afloraron a la superficie. Es decir, que es muy probable que las primeras rocas superficiales se hayan formado por el enfriamiento y cristalización posterior de las corrientes de magma provenientes de la capa SIMA, acarreadas por las erupciones volcánicas y enfriadas en la superficie, dando origen a las rocas básicas como los basaltos. En cambio, la afloración del material fundido proveniente de la capa SIAL, a través de las hendiduras y fallas, originó la formación de las rocas ígneas de carácter ácido: los granitos. Las segregaciones del magma caliente, su migración y su compactación posteriores, dieron origen a diversos minerales, como las cromitas, magnetitas, corindón, sienitas, mármoles y cuarcitas, entre otros. Unos más resultaron de la presión de los suelos al replegarse, como ocurrió con el grafito. (Bibliotecadigital, 2008)

La acción de los vapores y de los gases calientes sobre las primeras rocas condujo a su alteración y a la consecuente formación de mezclas finas de minerales. Estas últimas permanecieron en forma de residuos o bien fueron transportadas y depositadas en los lechos de los ríos y en los fondos marinos. El arrastre y depósito de esas mezclas finas pudo efectuarse por vía fluvial, es decir, por acción de los ríos o bien por medio de los glaciares y los vientos. El resultado fue su depósito en los lechos lacustres y marinos, lo cual produjo los yacimientos más importantes. Por lo anterior, es fácil aceptar que el 95% de la corteza terrestre está formada por silicatos. La corteza tiene una densidad media de 2.7, mientras que la densidad media de la Tierra es de 5.5, o sea que en el interior se concentran los elementos más pesados, hierro, níquel, etcétera.

La familia de los silicatos comprende la mayoría de los minerales de la corteza terrestre, incluido el cuarzo y, como veremos, su composición y estructura están relacionados directamente con la historia geológica de la Tierra, es decir, que dependen de la naturaleza de la roca madre que les dio origen, así como del ambiente a que fueron sometidos durante la etapa de arrastre o deposición. Las arcillas son, pues, una rama de los silicatos y su formación obedeció a tres mecanismos principales: 1) por herencia, 2) por neoformación y 3) por transformación. El primer mecanismo indica que el material arcilloso fue derivado





directamente de una roca madre y es este tipo de arcillas el que predomina en los sedimentos de lagos y mares.

Los otros dos mecanismos implicaron una reacción química entre varios componentes —o bien a partir de la arcilla original—, por lo que este tipo de formación requirió de mayor energía y de ciertas condiciones hidrotérmicas. Curiosamente, estos mecanismos están relacionados con la latitud en el planeta, de modo que encontramos que el primer mecanismo fue más común en las regiones árticas, mientras que la neoformación y la transformación resultaron dominantes en los trópicos húmedos. A las arcillas que se presentan en la naturaleza como una pasta suave se les llama "lodos", mientras que aquellas que tienen la apariencia de un sólido blancuzco se les denomina piedra lodosa o bien roca laminada (en inglés: shale). Es importante que a los depósitos de arcilla se les nombre arcillosos, a fin de distinguirlos de los depósitos arenosos y además plásticos, a fin de diferenciarlos de las rocas ígneas. (Bibliotecadigital, 2008)

### **FORMACIONES ARCILLOSAS EN MÉXICO**

Los trabajos de investigación realizados por Enciso (1968) y De Pablo (1990) indican que el territorio nacional estuvo sujeto a una gran actividad volcánica durante los periodos Oligoceno-Mioceno, lo cual provocó la formación de enormes depósitos de rocas vidriosas que a su vez fueron alteradas y dieron origen a la mayor parte de las arcillas que encontramos en México. Estas son, por lo regular, del tipo montmorillonita y sus formaciones más abundantes se localizan al norte del país, en el Estado de Durango, siendo las de Cuencamé, Velardeña, Pedriceña, Rodeo y Nazas las más conocidas y las que actualmente se encuentran en explotación.

También existen depósitos importantes en Puebla, en los límites de Tlaxcala y Puebla, en Chupaderos, Zacatecas, en Oaxaca, en Neutla, Guanajuato, en Huayacocotla, Veracruz y en numerosas formaciones menores localizadas en las antiguas zonas lacustres como el valle de México como se muestra en la ilustración 1.





*Ilustración 1: Depósitos arcillosos en México, (Bibliotecadigital, 2008)*

Sin duda la zona localizada en Durango es la más extensa y se sabe ahora, gracias a los trabajos de Enciso y De Pablo que esas arcillas fueron originadas por la alteración de las rocas piroclásticas depositadas previamente en el valle por medio de una nube ardiente. La subsecuente alteración de tales rocas ígneas y la deposición del material alterado en suelo seco dio origen al mineral arcilloso más rico en potasio, como el de la zona de Vizcarra, mientras que el mineral depositado en la zona lacustre (de origen marino aparentemente) se alteró y produjo las arcillas color verde y rosa típicas de la región de Cuencamé. Estas formaciones se encuentran a una altura de 1 340 m sobre el nivel del mar, en el valle de Cuencamé-La Lagunilla, que se extiende hasta Pedriceña y por el oeste hasta Rodeo y Nazas, donde la altura disminuye a 1 128 m. Esta zona contiene los depósitos más importantes de México, que representan un gran potencial económico. En su mayor parte la calidad de la arcilla es superior, del tipo montmorillonita expandible, y ocurre en concentraciones variables según la zona, es decir 85% en la región de Pedriceña, 50 a 70% en Nazas, un 50% en Las Cuevas y una porción variable en Cuencamé. En esta última se encuentran frentes de color blanco y rosa con espesores entre 2 y 6 m, mientras que la arcilla que se encuentra en contacto con el polvo alterado tiene sólo un espesor







de 50 cm y su color es verde, cambiando luego a rosa y presentando frentes de hasta 4 y 8 m de espesor. (Bibliotecadigital, 2008)

### **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. Los grupos del mismo tipo están unidos entre sí hexagonalmente formando capas de tetraedros y octaedros.

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. (LAS ARCILLAS Y SUS PROIEDADES, 2002)

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. (LAS ARCILLAS Y SUS PROIEDADES, 2002)





## **CLASIFICACIÓN DE LOS MINERALES DE ARCILLA.**

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

a) Silicatos laminares, b) Silicatos fibrosos

Los silicatos laminares (filosilicatos) se pueden clasificar de muchas maneras, siendo una de las más extendida la realizada por Bailey y Col.

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 como se observa es la ilustración 2. (LAS ARCILLAS Y SUS PROPIEDADES, 2002)





Tipo Empaque-tamiento	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
	<b>Esmectita</b>	0.6<d<1.2	cationes hidratados	Tri	Saponita
				Di	<b>Montmorillonita (Bentonita)</b>
	Vermiculita	1.2<d<1.8	cationes hidratados	Tri	Vermiculita trioct.
				Di	Vermiculita dioct.
	Mica	2	Normalmente K <sup>+</sup>	Tri	Mica trioct.
				Di	Mica dioct.
Mica frágil	4	cación 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

*Ilustración 2: Clasificación de Mott sobre los minerales arcillosos (Las arcillas propiedades y usos 2002).*

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 paligorskita 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. (LAS ARCILLAS Y SUS PROIEDADES, 2002).





### 2.2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS

Por su origen, las arcillas se clasifican en:

Arcillas grasas. Son arcillas muy plásticas y untuosas. Cocción en blanco. Se emplean en la manufactura de loza.

Arcillas refractarias. Son arcillas que contienen poco óxido metálico y álcalis, y pueden resistir temperaturas elevadas sin desagregarse, por cuya razón se usan en la construcción de hornos, crisoles, estufas y obras similares.

Arcillas de alfarería. Son arcillas semirefractarias de fuerte acción y muy semejantes a las arcillas refractarias. Se emplean en alfarería y cerámica. (Quiminet, 2006)

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 elementales de sílice-gibbsita, cada capa es aproximadamente de  $7.2 \text{ \AA}$  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  $\text{Å}$  y un espesor de 100 a 1000  $\text{Å}$ . El área superficial de las partículas de caolinita. Por masa unitaria es aproximadamente de  $15 \text{ m}^2/\text{g}$ . El área superficial por masa unitaria se define como superficie específica. (Das., Fundamentos de ingeniería geotécnica, 1999)

*Illita*. 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 illita 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 illita tienen generalmente dimensiones que varían entre 1000 y 5000  $\text{Å}$  y espesores de 50 a 500  $\text{Å}$ . La superficie específica de las partículas es aproximadamente de  $80 \text{ m}^2/\text{g}$





*Montmorillonita.* Tiene una estructura similar a la illita, es decir, una lámina de gibbsita intercalada entre dos láminas de sílice. En la montmorillonita 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 montmorillonita tienen dimensiones laterales de 1000 a 5000 Å y espesores de 10 a 15 Å. La superficie específica es aproximadamente de 800 m<sup>2</sup>/g. (Das., Fundamentos de ingeniería geotécnica, 1999)

A continuación se presenta un glosario de los apelativos más comunes de algunas arcillas:

*Arcilla figulina:* es aquella que contiene impurezas como la arena, la caliza y los óxidos de hierro. (Bibliotecadigital, 2008)

*Arcilla refractaria:* es rica en óxidos metálicos y tiene la propiedad de ser muy resistente al calor.

*Arcilla roja:* esta clase la integra generalmente un depósito de tipo marino formado por los restos de materiales calcáreos y férricos, polvo volcánico, restos de esponjas silíceas, dientes de tiburón, etc. El color rojizo proviene por lo común de sus componentes férricos. Se ha encontrado que estos depósitos son muy extensos, y cubren hasta el 60% de la superficie marina. (Bibliotecadigital, 2008)

*Arcilla ferruginosa:* contiene en su composición diferentes cantidades y tipos de óxido de hierro y puede ser de color amarillo, ocre e inclusive negra (tierras de Siena) debido al óxido de hierro hidratado, mientras que las arcillas rojas contienen, por lo general, un óxido conocido como hematita. Esta particularidad de las arcillas explica por qué en algunas regiones el barro es negro o rojizo, lo cual incide en los colores de la cerámica que se fabrica a partir de estos materiales. Recordemos en este punto al barro negro de Oaxaca, tan distinto de la cerámica ocre o rojiza de la zona central del valle de México. (Bibliotecadigital, 2008)





Arcilla magra y arcilla grasa: estos materiales contienen cierto grado de impurezas, lo que afecta sus propiedades plásticas, es decir, que a mayor contenido de impurezas se obtiene una pasta menos plástica (arcilla magra) al amasarla con agua. (Bibliotecadigital, 2008)

Arcilla de batán: llamadas también tierra de batán, debido al uso que tuvieron en el "batanado" de las telas y de las fibras vegetales como el algodón. Este proceso consistía en limpiar las fibras formadas en la máquina (batán) eliminando la materia grasa mediante la adición de arcilla, por lo general del tipo esmectita, cuyo nombre proviene del griego smektikós: "que limpia." (Bibliotecadigital, 2008)

Arcilla marga: es un material impermeable y frágil, con un contenido de caliza de entre 20 y 60%, aproximadamente. (Bibliotecadigital, 2008)

Arcillas de esquisto o pizarra: las constituyen formaciones antiguas que se presentan en forma de estratos o de plaquetas paralelas que se han dividido por la presión del suelo. (Bibliotecadigital, 2008)

Arcilla atapulgita: también conocida como tierra de Florida o floridrín, aunque algunas veces se la llamó tierra de Fuller. El último apelativo empleó también para denominar a las sepiolitas. Actualmente la atapulgita es llamada paligorskita. (Bibliotecadigital, 2008)

Arcilla bentonita: nombre comercial de las arcillas tipo montmorillonita, las que, tratadas con compuestos químicos aminados se vuelven repelentes al agua — hidrofóbicas—, aunque mantienen gran afinidad por las especies orgánicas, en particular los aceites, las grasas y los colorantes o pigmentos naturales. El nombre bentonita proviene de Fort Benton, Wyoming, EUA, donde W. C. Knight descubrió un enorme yacimiento de este tipo de arcilla en 1896. (Bibliotecadigital, 2008)





## 2.2.4 PROPIEDADES DE LA ARCILLA

### 2.2.4.1 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA ARCILLA

#### **CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO**

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.

- 1.-Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- 2.- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- 3.- Disociación de los grupos hidróxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como la carga permanente que supone un 80% de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones del 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. 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





Por otro lado, en efecto, la mayor parte de las cimas de los yacimientos de petróleo de las costas del Golfo de México (EUA-México) ocurren a la profundidad en la que usualmente se produce la transformación de las arcillas tipo esmectita (E) en las denominadas illitas (I). Ambas tienen la misma estructura laminar, excepto que las segundas no son expandibles debido a las fuertes cargas electrostáticas que mantienen a las hojas ligadas. Así, la transformación de la esmectita en illita pudo haber desempeñado papel importante en la génesis del petróleo: al ser contenidas las moléculas orgánicas en el interior del espacio interlaminar de la esmectita, aquellas estaban "protegidas" de la oxidación y sujetas a un proceso de tipo catalítico que pudo haberlas convertido en petróleo, tal y como ahora lo conocemos. Pero es un hecho experimental que la sustitución del silicio (Si) por aluminio en las hojas que componen el *acordeón químico* de la esmectita, origina un exceso de carga electrostática negativa en las hojas, de tal magnitud a escala molecular que provoca la deshidratación del potasio (K), el cual se encuentra comúnmente en el espacio interlaminar de las arcillas. Luego, el agua así expulsada pudo haber acarreado en su paso a los hidrocarburos formados en el interior de las arcillas, mientras que la contracción subsecuente de las hojuelas de arcilla deshidratada podría haber provocado un colapso en el material, dejando hendiduras y poros por los que pudo migrar el fluido hacia los recipientes rocosos. (Bibliotecadigital, 2008)

Por otro lado, la estructura laminar de las arcillas permite el almacenamiento de agua en el espacio interlaminar, formando así agregados lodosos difíciles de romper. La combinación de la arcilla con la materia orgánica del suelo y algunos óxidos minerales contribuye a la estabilidad estructural necesaria para resistir los efectos mecánicos destructivos. La porosidad interna de las hojuelas de arcilla y su carga electrostática asociada son adecuadas para la absorción de especies tales como los cationes de potasio ( $K^+$ ), magnesio ( $Mg^{++}$ ) y amonio ( $NH_4^+$ ), los cuales son liberados bajo condiciones ácidas apropiadas, pudiendo ser absorbidos por las raíces de las plantas. (Bibliotecadigital, 2008)







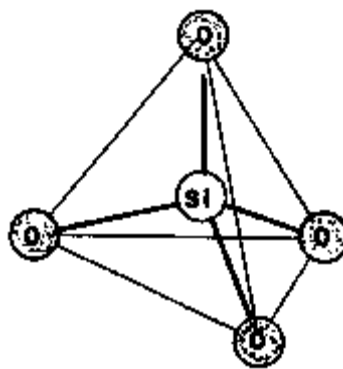
La acidez es provocada por una acumulación de iones de hidrógeno ( $H^+$ ) provenientes de compuestos químicos disueltos en el agua y acarreados por las lluvias; en ellos la concentración ácida llega a ser tal que algunos de los otros cationes atrapados por las arcillas, como los iones  $Al^{3+}$  se disuelven rápidamente en las soluciones, pasando a las raíces vegetales y provocando efectos tóxicos en las plantas. Es por ello que un suelo fértil debe estar balanceado en lo que a la acidez se refiere y el tratamiento en este caso consiste en la neutralización de la acidez mediante la agregación de compuestos alcalinos, como el carbonato de calcio. Luego tenemos que la combinación de acidez e intercambio iónico en las arcillas del terreno es importante en el desarrollo de los suelos agrícolas. Éstos, en la actualidad, se encuentran expuestos a las contaminaciones por lluvia ácida proveniente de las zonas industriales y por los abonos químicos y plaguicidas, los cuales son absorbidos por las arcillas minerales provocando los efectos combinados de acidez e intercambio mencionados. En cualquier caso, las arcillas son las protagonistas en la formación de los suelos agrícolas y sus propiedades son determinantes para el crecimiento de los vegetales. Por otra parte, la mineralogía del suelo es resultado de diversos factores, el clima y el intemperismo, así tenemos que en las regiones tropicales predominan los caolines mezclados con óxidos minerales (oxisoles) y los suelos negros formados por esmectitas expandibles (vertisoles) combinadas. Si la acidez es baja ( $pH > 6$ ) el suelo arcilloso tiende a ser rico en calcio, en cambio si la acidez es alta ( $pH < 6$ ) el aluminio tiende a ser más abundante, lo que trae efectos tóxicos para la vegetación. Otros cationes, como el amonio, los nitratos y los fosfatos, también son retenidos por las arcillas del suelo e intercambiados bajo condiciones de humedad y acidez adecuadas, siendo realmente accesibles a las plantas y representando una fuente importante de nutrientes. La composición óptima del suelo debe incluir una fracción de arcilla compuesta de partículas menores a 2 micras, y una proporción mayor de sedimentos con tamaños de partícula entre 2 y 60 micras. Esta combinación parece incluir las mejores características para el cultivo y crecimiento de las raíces vegetales. Es claro, pues, que las arcillas son los componentes del suelo que provocan la mayor influencia en su productividad. (Bibliotecadigital, 2008)





No menos importante ha sido la interacción de las arcillas con las moléculas orgánicas. Su afinidad por las bases orgánicas nucleicas, como la guanina, la citosina, etc., ha provocado interés creciente entre la comunidad científica que trata de atribuir un papel preponderante a los compuestos minerales de tipo laminar en la formación de las moléculas prebióticas. (Bibliotecadigital, 2008)

No fue sino hasta el año de 1912 cuando, gracias a los físicos W. L. Bragg y M. Laue, que descubrieron las propiedades de los rayos X, fue posible desentrañar la estructura interna 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 E. Ruska en 1931, fue posible observar directamente los cristales minerales, su forma y su geometría. Mediante las técnicas apuntadas, se sabe que 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 ilustración 3.

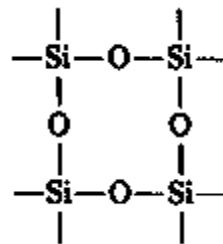


*Ilustración 3: El tetraedro elemental o la pirámide triangular, (Bibliotecadigital, 2008)*

El tetraedro de la ilustración 4 está compuesto por un átomo central de silicio (Si) y cuatro átomos de oxígeno en las esquinas (O).

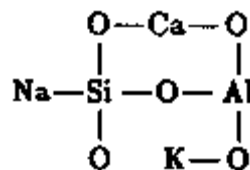


Si cada átomo de silicio tiene cuatro cargas eléctricas positivas, mientras que cada átomo de oxígeno tiene dos cargas negativas, es necesario que cada uno de los átomos de oxígeno use una de sus cargas para atraer a una de las cargas del silicio, quedando así saturado el átomo central (Si), mientras 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: ...-O-Si-O-Si-O-Si-O-...



*Ilustración 4: cadena de tetraedros, mediante los enlaces del tipo: ...-O-Si-O-Si-O-Si-O-. (Bibliotecadigital, 2008)*

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 este "Mecano", podemos superponer una red encima de otra, a manera de formar arreglos tridimensionales. También podemos sustituir uno de los átomos de silicio por otro, por ejemplo de aluminio (Al), con lo cual el arreglo quedaría desbalanceado, 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, como se muestra en la ilustración 5:



*Ilustración 5: sustitución de átomos de silicio por ejemplo de aluminio, (Bibliotecadigital, 2008)*





Como se observa en este esquema, la carga negativa desbalanceada puede ser satisfecha por un catión positivo, por ejemplo el sodio (Na) o el potasio (K), con los cuales se logra nuevamente una estructura neutra.

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 los arreglos coordinados dependen únicamente de los tamaños entre el catión (+) y el anión (-) respectivo.

Debido a su avidez por el agua y las moléculas orgánicas las montmorillonitas encuentran aplicaciones muy variadas que van desde la extracción de esencias naturales hasta la fabricación de catalizadores para procesar los hidrocarburos derivados del petróleo. Los mecanismos que intervienen a escala molecular para llevar a cabo estas reacciones serán explicados en los capítulos siguientes, por ahora sólo mencionaremos que: la estructura de “*sándwich*” y el grado de sustitución catiónica determinan en gran medida las propiedades de las arcillas.

Más aún, la sustitución de cationes se lleva a cabo mediante mecanismos muy sencillos. En la ilustración 6 muestra la fórmula estructural de las arcillas tipo esmectita, en donde podemos apreciar las sustituciones que se realizan en las hojas de cada uno de los minerales. (Bibliotecadigital, 2008)





Mineral	Carga	Composición (octa) (tetra) O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Pirofillita	( E = 0 )	Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Talco	"	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Minnesotaita	"	(Fe, Mg) <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Saponita	( E <sup>+</sup> = 0.33 )	Mg <sub>3</sub> (Si <sub>3.6</sub> , Al <sub>.33</sub> ) O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O
Saponita férica	"	(Fe <sup>2+</sup> , Mg) <sub>3</sub> (Si <sub>3.6</sub> , Al <sub>.33</sub> ) O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O
Hectorita	"	(Mg <sub>2.6</sub> , Li <sub>.33</sub> ) Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O
Sauconita	"	(Mg, Zn) <sub>3</sub> (Si <sub>3.6</sub> , Al <sub>.33</sub> ) O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O
Stevensita	( 2E <sup>+</sup> = 2x )	Mg <sub>3-x</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Montmorillonita	( E <sup>+</sup> = 0.33 )	(Al <sub>1.67</sub> , Mg <sub>.33</sub> ) Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O
Beidellita	"	Al <sub>2</sub> (Si <sub>3.6</sub> , Al <sub>.33</sub> ) O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O
Nontronita	"	Fe <sub>2</sub> <sup>3+</sup> (Si <sub>3.6</sub> , Al <sub>.33</sub> ) O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O
Volkonskoita	"	(Al, Fe <sup>3+</sup> , Cr) <sub>2</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O

Ilustración 6: Arcillas esmectitas del grupo 2:1. Fórmula química, (Bibliotecadigital, 2008)

Existe otra familia de arcillas que se asemeja a la de las montmorillonitas: las vermiculitas, que tienen la misma estructura de sandwich, pero que pueden presentar un grado de sustitución mayor en la hoja octaédrica, originando una carga residual mayor que las montmorillonitas y, por eso mismo, la atracción entre las láminas es mayor también, por lo que la estructura no es tan expansible. (Bibliotecadigital, 2008)

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 el mecano 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 ilustración 7 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 silicatos minerales 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). 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. (Bibliotecadigital, 2008)

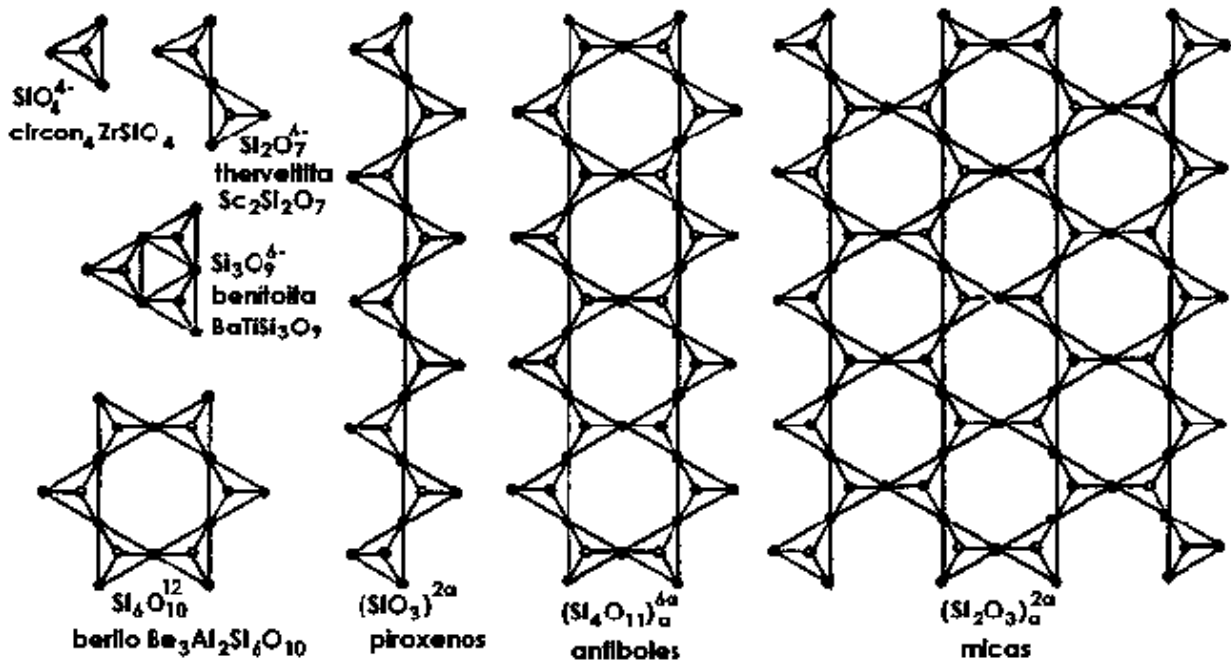


Ilustración 7: La estructura de los silicatos, o el mecano, (Bibliotecadigital, 2008)

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, por otro de menor carga como el aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ), 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: fundamento de las propiedades químicas de las sustancias es la física que ocurre a escala molecular. (Bibliotecadigital, 2008)

#### 2.2.4.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ARCILLA

##### ***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 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. (LAS ARCILLAS Y SUS PROIEDADES, 2002)

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  $100-200 m^2/g$ . (LAS ARCILLAS Y SUS PROIEDADES, 2002)

##### ***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). 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).

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 o EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA***

La hidratación y la 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 si 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. (LAS ARCILLAS Y SUS PROIEDADES, 2002)







## **PLASTICIDAD**

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma un envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de las 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. 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. (LAS ARCILLAS Y SUS PROIEDADES, 2002)

## **TIXOTROPÍA**

La tixotropía se define como el fenómeno consiste 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. Par que una arcilla tixotrópica muestre esta especial comportamiento deberá poseer un contenido de agua próximo a su límite líquido. Por lo contrario, en torno a su límite plástico no existirá la posibilidad de comportamiento tixotrópico. (LAS ARCILLAS Y SUS PROIEDADES, 2002)

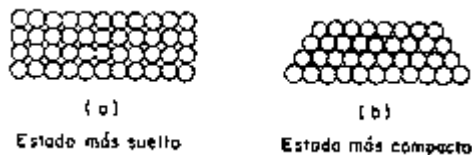




### 2.2.4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ARCILLA

Las propiedades mecánicas de las arcillas dependen del tipo de estructura de dicha arcillas como a continuación se presenta.

Estructura Simple. Es aquella que se produce cuando las fuerzas de gravedad son predominantes en la disposición de las partículas, es por lo tanto una disposición típica de los suelos de granos gruesos como las gravas y arenas. Las partículas se disponen apoyándose directamente unas sobre otras y cada partícula posee varios puntos de apoyo. Desde el punto de vista ingeniería, su comportamiento mecánico queda definido por su compacidad y por la orientación de las partículas, como se muestra en la ilustración 8. (Hidalgo, 2011)



*Ilustración 8: Estados de compactación, (Hidalgo, 2011)*

Para medir la compacidad de un suelo de estructura simple, Terzaghi propuso la relación empírica, determinable en el laboratorio, llamada compacidad relativa.

$$Cr (\%) = \frac{e \text{ máx.} - e \text{ nat.}}{(e \text{ máx.} - e \text{ mín.})}$$

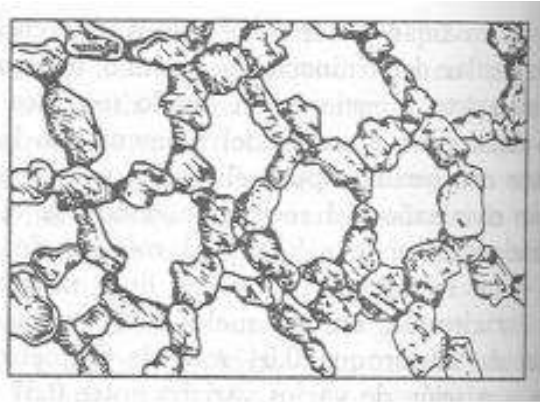
e máx. = Relación de vacíos correspondiente al estado más suelto del suelo.

e mín. = Relación de vacíos correspondiente al estado más compacto del suelo.

e nat. = Relación de vacíos del suelo en estado natural. (Hidalgo, 2011)

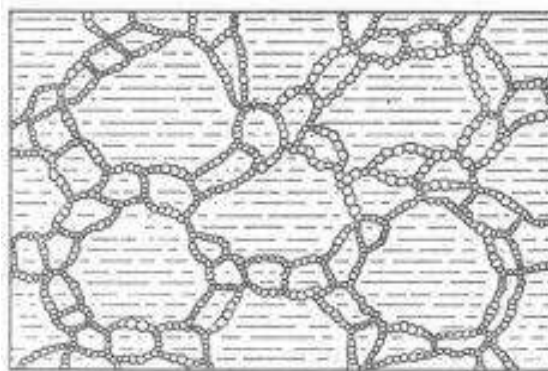


Estructura Panaloide. Esta estructura se considera típica en suelos de partículas pequeñas (0.02 mm de diámetro o algo menores), en estas partículas la gravedad ejerce un efecto que hace que tiendan a sedimentarse en un medio continuo acuoso, como se muestra en la ilustración 9. Pero dada su pequeña masa, las partículas en el proceso de sedimentación, son atraídas por otras partículas de su tamaño similar, ahora otras partículas se van añadiendo, formando celdas con una cantidad importante de vacíos formando panales al llegar a su recorrido de sedimentación. (Hidalgo, 2011)



*Ilustración 9: Estructura panaloide, (Hidalgo, 2011)*

Floculenta. Cuando en el proceso de sedimentación, dos partículas menores de 0.02 mm llegan a tocarse, se adhieren con fuerza y se sedimentan juntas; así otras partículas pueden unirse al grupo, formando un grumo, con estructura similar a un panal. El mecanismo anterior es una estructura muy blanda y suelta, llamada floculenta. Esta estructura es similar a la panaloide, pero sus cadenas de partículas son dobles (ilustración 10). (Hidalgo, 2011)



*Ilustración 10: Estructura floculenta, (Hidalgo, 2011)*

d) Castillo de naipes. Goldschmidt y Lambe, proponen una interpretación diferente para los flóculos de la estructura, ya que las partículas de las arcillas, son laminas con diferente intensidad de carga y magnitud en la superficie como en las aristas, por ello las partículas tienen un acomodo parecido a un castillo de naipes o floculada como se observa en la ilustración 11. (Hidalgo, 2011)

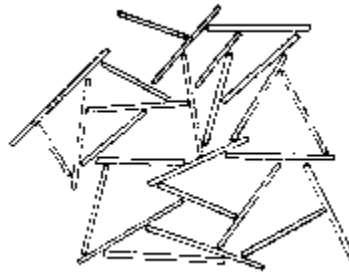


Ilustración 11: Estructura castillo de naipe, (Hidalgo, 2011)

Algunos autores coinciden en que la estructura de los flóculos de las arcillas, pueden separarse y orientarse, debido a las presiones osmóticas que son generadas y eliminadas por el incremento o pérdida de agua en el suelo, lo que concluye que el agua con la carga de sus iones, orienta a las láminas de arcilla en sus aristas como se observa en la ilustración 12. (Hidalgo, 2011)

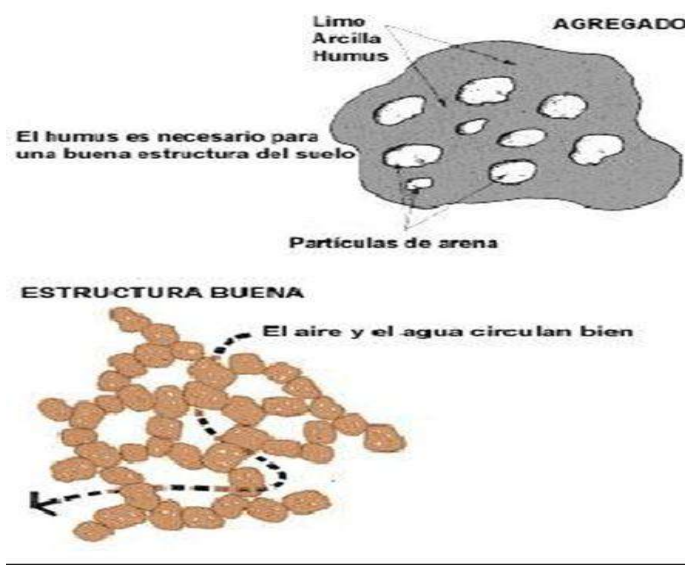


Ilustración 12: Estructura del suelo, (Hidalgo, 2011)



## **ESTRUCTURA**

La estructura es la forma en que las partículas del suelo se reúnen para formar agregados. De acuerdo a esta característica se distinguen suelos de estructura esferoidal (agregados redondeados), laminar (agregados en láminas), prismática (en forma de prisma), blocosa (en bloques), y granular (en granos). La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas.

El grado de estructura es la intensidad de agregación y expresa la diferencia entre la cohesión dentro de los agregados y la adhesividad entre ellos. Debido a que estas propiedades varían según el contenido de humedad del suelo, el grado de estructura debe determinarse cuando el suelo no esté exageradamente húmedo o seco. Existen cuatro grados fundamentales de estructura que se califican entre 0 y 3, de la manera siguiente:

Sin estructura: condición en la que no existen agregados visibles o bien no hay un ordenamiento natural de líneas de debilidad, tales como:

Estructura de aglomerado (coherente) donde todo el horizonte del suelo aparece cementado en una gran masa;

Estructura de grano simple (sin coherencia) donde las partículas individuales del suelo no muestran tendencia a agruparse, como la arena pura;

Estructura débil: está deficientemente formada por agregados indistintos apenas visibles. Cuando se extrae del perfil, los materiales se rompen dando lugar a una mezcla de escasos agregados intactos, muchos quebrados y mucho material no agregado;

Estructura moderada: se caracteriza por agregados bien formados y diferenciados de duración moderada, y evidentes aunque indistintos en suelos no alterados. Cuando se extrae del perfil, el material edáfico se rompe en una mezcla de varios agregados enteros distintos, algunos rotos y poco material no agregado;





Estructura fuerte: se caracteriza por agregados bien formados y diferenciados que son duraderos y evidentes en suelos no alterados. Cuando se extrae del perfil, el material edáfico está integrado principalmente por agregados enteros e incluye algunos quebrados y poco o ningún material no agregado.

#### Clases y tipos de estructura del suelo

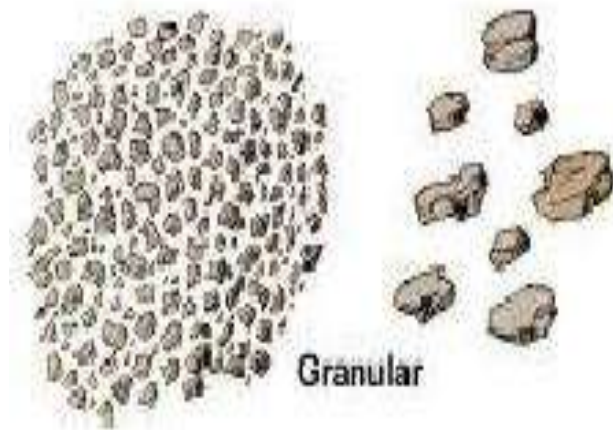
La clase de estructura describe el tamaño medio de los agregados individuales. En relación con el tipo de estructura de suelo de donde proceden los agregados, se pueden reconocer, en general, cinco clases distintas que son las siguientes:

- Muy fina o muy delgada
- Fina o delgada
- Mediana
- Gruesa o espesa
- Muy gruesa o muy espesa

El tipo de estructura describe la forma o configuración de los agregados individuales. Aunque generalmente los técnicos en suelos reconocen siete tipos de estructuras del suelo, sólo usaremos cuatro tipos. Estos se clasifican del 1 al 4, de la forma siguiente:

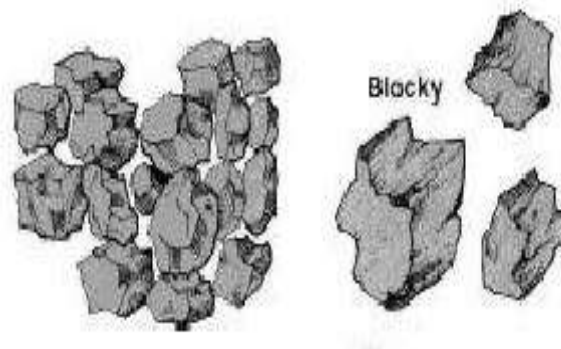
1.- Estructuras granulares y migajosas: en la ilustración 13 observamos las partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos. El agua circula muy fácilmente a través de esos suelos. Por lo general, se encuentran en el horizonte A de los perfiles de suelos. (Simbasica, 2014)





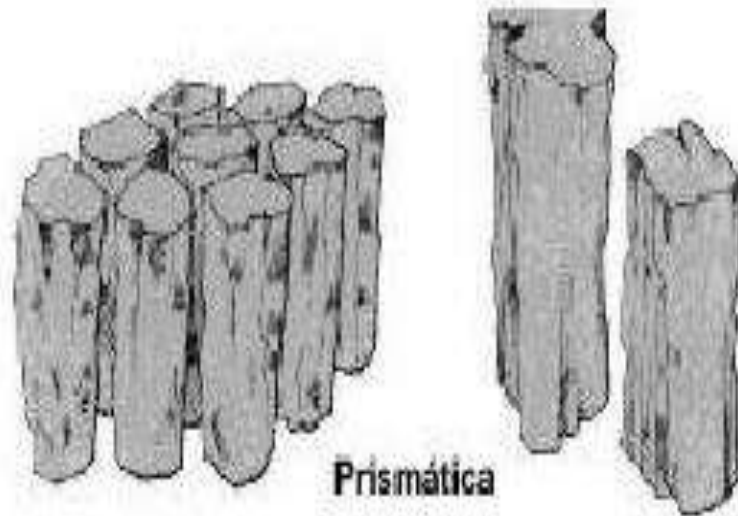
*Ilustración 13: Estructura granular en suelos, (Hidalgo, 2011)*

2.-Estructuras en bloques o bloques subangulares: son partículas de suelo que se agrupan en bloques casi cuadrados o angulares con los bordes más o menos pronunciados. Los bloques relativamente grandes indican que el suelo resiste la penetración y el movimiento del agua. Suelen encontrarse en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla. En la ilustración 14 se observa una estructura de bloques.



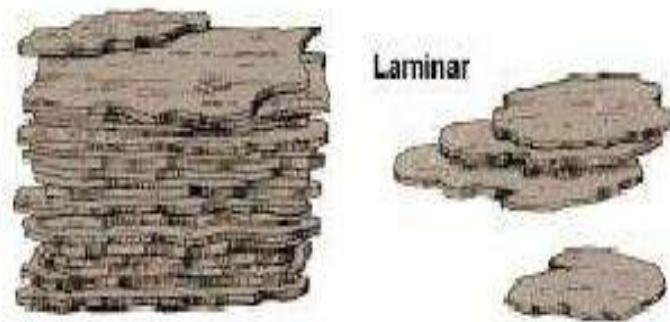
*Ilustración 14: Estructura de bloques en los suelos, (Hidalgo, 2011)*

3.- Estructuras prismáticas y columnares: son partículas de suelo que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas como se ve en la ilustración 15, pero definidas. El agua circula con mayor dificultad y el drenaje es deficiente. Normalmente se encuentran en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla; (Simbasica, 2014).



*Ilustración 15: Estructura prismática de los suelos, (Simbasica, 2014)*

4.- Estructura laminar: se compone de partículas de suelo agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra. A menudo las láminas se traslapan, lo que dificulta notablemente la circulación del agua como se observa en la ilustración 16. Esta estructura se encuentra casi siempre en los suelos boscosos, en parte del horizonte A y en los suelos formados por capas de arcilla. (Simbasica, 2014)



*Ilustración 16: Estructura laminar de los suelos, (Simbasica, 2014)*





## 2.2.5 ARCILLA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN

La "arcilla" usado en esta investigación proviene del banco de Santiago Undameo, Michoacán, México. Es tenencia de Morelia ubicada a 15 Km de distancia de la ciudad, con coordenadas geográficas: Latitud 19.6 y Longitud -101.283, altura media de 2020 msnm y una población de 1400 habitantes. Como se muestra en la ilustración 17 el banco de material tiene un frente de ataque. Este material actualmente se utiliza para fabricar productos cerámicos y bloques de adobe y tabique para construcción.



*Ilustración 17: Frente de ataque del banco de arcilla en la rivera del lago de Cuitzeo en Santiago Undameo, México. (De Leon Ambrocio, 2016)*

Es una montmorillonita que se caracteriza por tener una estructura similar a la illita, es decir, una lámina de gibbsita intercalada entre dos láminas de sílice. En la montmorillonita 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. Además es un suelo con característica de plasticidad lo cual se hace un material muy trabajable.

La técnica de obtención del suelo arcilla fue a través de un muestreo, el cual consistió en extraer aproximadamente 750 kilogramos de material arcilloso, (ASTM-D-75, 2003), (NMX-C-030-ONNCCE, 2004), que se trasladó al Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Universidad Michoacana de San Nicolás de





Hidalgo. Se realizó la homogenización del material, el rompimiento de terrones y cuarteo (NMX-C-170-ONNCCE, 1997).

Los resultados de la caracterización de la arcilla se muestran en la sección de resultados.

### 2.3 AGREGADOS

Los agregados también llamados áridos son aquellos materiales inertes, de forma granular naturales o artificiales, que en presencia de agua forman un todo compacto (piedra artificial), conocido como mortero o concreto. (Rivera, 2002)

Como agregado de las mezclas de mortero o concreto se puede considerar todos aquellos materiales que tienen una resistencia propia suficiente (resistencia de la partícula), no perturben ni afecten desfavorablemente las propiedades y características de las mezclas y garanticen una adherencia suficiente con la pasta endurecida de la mezcla. En general la mayoría son materiales inertes, es decir, que no desarrollan ningún tipo de reacciones con los demás componentes de la mezcla, sin embargo, existen algunos agregados cuya fracción más fina presenta actividad en virtud de sus propiedades hidráulicas colaborando con el desarrollo de la resistencia mecánica, tales como: las escorias de alto ornó de las siderúrgicas, los materiales de origen volcánico en donde ay sílice activo, entre otros. (Rivera, 2002)

Pero hay algunos otros agregados, que presentan elementos nocivos y eventualmente inconvenientes que reaccionan afectando la estructura interna y su durabilidad, como por ejemplo, los que presentan elementos sulfurados, los que contienen partículas pulverulentas más finas o aquellas que se encuentran en descomposición latente como algunas pizarras. (Rivera, 2002)

Ellos dan cuerpo al concreto, reducen pérdidas y afectan la economía. Anteriormente, los agregados fueron considerados como materiales químicamente inertes, pero ahora se ha reconocido que algunos de los agregados son químicamente activos y ciertos agregados muestran enlaces químicos agregados en la interfaz del agregado y la pasta de cemento. (Hernández S. d., 2012)





## 2.3.1 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

### 2.3.1.1 FÍSICAS

Las propiedades físicas de los agregados son los que le brindan una mejor calidad, eficiencia y durabilidad a las mezclas a realizar y por supuesto una mejor resistencia y durabilidad a las estructuras construidas con los agregados adecuados.

**GRANULOMETRÍA.** Es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en masa, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición. La malla No. 4 separa las gravas de las arenas. (INSTITUTO DEL CONCRETO, 2014)

**POROSIDAD Y ABSORCIÓN.** Cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad.

**MASA UNITARIA.** La relación entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de éste, da una cifra llamada masa unitaria. La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa. (INSTITUTO DEL CONCRETO, 2014)

**FORMA.** La forma de los agregados es una característica importante ya que afecta a la trabajabilidad del concreto, esta forma depende del tipo de roca que lo originó, ya que para ciertas piedras resulta determinante el sistema de clivaje, las posibles inclusiones en la roca y su estado de meteorización. La forma del agregado influye directa o indirectamente en el comportamiento del concreto, ya que se relaciona con la trabajabilidad, la resistencia y otras propiedades. Las formas perjudiciales son las muy alargadas y/o escamosas ya que tendrán una influencia objetable en la trabajabilidad, los porcentajes de cemento, la resistencia y la durabilidad. (INSTITUTO DEL CONCRETO, 2014)





**TEXTURA.** Reviste especial importancia por su influencia en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también, por su efecto sobre las propiedades del concreto o mortero endurecido, tales como, densidad, resistencia a la compresión y a la flexión, cantidad requerida de agua, etc. En términos generales, se puede decir que la textura superficial es áspera en las piedras obtenidas por trituración y lisa en los cantos rodados, de río, quebrada o mar. (INSTITUTO DEL CONCRETO, 2014)

### 2.3.1.2 QUÍMICAS

Las características químicas que se debe buscar en los agregados para una mezcla son las siguientes.

**EPITAXIA:** esta es la única reacción química favorable de los agregados conocidos hasta el momento. Da mejor adherencia entre ciertos agregados calizos y la pasta de cemento, a medida que transcurre el tiempo.

**REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO:** la sílice activa, presente en algunos agregados, reacciona con los álcalis del cemento produciendo expansiones, destrucción de la masa y pérdida de características resistentes. (INSTITUTO DEL CONCRETO, 2014)

### 2.3.1.3 MECÁNICAS

**DUREZA.** Esta propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales. (INSTITUTO DEL CONCRETO, 2014)

**RESISTENCIA.** El agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca





falle antes que la pasta de cemento endurezca. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se le han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración. Adicionalmente, cuando se aumenta la adherencia por la forma o textura superficial del agregado al buscar una alta resistencia del concreto, también aumenta el riesgo de que las partículas del agregado fallen antes de la pasta de cemento endurecida. (INSTITUTO DEL CONCRETO, 2014)

**TENACIDAD O RESISTENCIA A LA FALLA POR IMPACTO.** Es una propiedad que depende de la roca de origen y se debe tener en cuenta ya que tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del concreto que con ellos se elabore. (INSTITUTO DEL CONCRETO, 2014)

**ADHERENCIA.** Es la interacción que existe en la zona de contacto agregado pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas. (INSTITUTO DEL CONCRETO, 2014)

### 2.3.2 AGREGADOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

## 2.4 AGUA

El agua es el producto de la combinación de dos átomos el oxígeno y el hidrógeno y hasta el momento es el único elemento capaz de experimentar tres tipos de estado a priori incompatibles: líquido (mares, océanos, lagos), gaseoso (en forma de vapor de agua en la atmósfera) y sólido (nieve, hielo).





En su formato más tradicional, el líquido, cuando está a temperatura ambiente, sus características son: inodora, insípida, líquida e incolora, salvo en grandes volúmenes como puede ser el caso de los mares y los océanos, suele mostrar una coloración azul. Su principal función es la de la conservación de los seres vivos, ya que hasta hoy no existe ninguna forma de vida que pueda sobrevivir sin ella. Al día de hoy existen dos tipos de teorías acerca del origen del agua, contando cada una con una importante cantidad de adeptos. La primera que parte de la base que las rocas que conforman el manto terrestre están conformadas por una importante cantidad de agua cree que tanto el hidrógeno como el oxígeno son dos compuestos que ya existían en la nube que dio origen al planeta hace ya 4.500 millones de años, el sistema solar lleno de escombros chocó contra el planeta y ahí se unieron estos dos haciendo vapor de agua y por el otro, hay una teoría más nueva, que supone que en realidad fueron los cometas impactando sobre la tierra los que nos trajeron uno de los cuatro elementos esenciales. En orden a la necesidad de agua que tienen los seres vivos para seguir viviendo es que hoy en día el agua se ha convertido en una de las principales preocupaciones de los hombres en particular como es el caso de algunas organizaciones no gubernamentales y de los hombres en grupo, como ser el caso de los gobiernos, ya que el recurrente maltrato al ambiente, en este también incluimos a la contaminación que sufren algunas aguas del mundo y la superpoblación que está experimentando el planeta tierra, son los dos monstruos a combatir para que los seres vivos que vivimos en la tierra puedan seguir haciéndolo, porque si la curva ciertamente sigue en el camino en el que está ese 71 % de agua que cubre la tierra ya no será suficiente para satisfacer las necesidades del que todo ser humano necesita satisfacer con el agua para su vida (definiciónABC, 2010).

#### 2.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA

Las siguientes características y propiedades fisicoquímicas son las más notables del agua.

a) 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. (Química Orgánica, 2012)

b) El agua bloquea sólo ligeramente la radiación solar UV fuerte, permitiendo que las plantas acuáticas absorban su energía. (Química Orgánica, 2012)

c) 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 de la 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. (Química Orgánica, 2012)

d) 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. (Química Orgánica, 2012)

e) 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. (Química Orgánica, 2012)

f) 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. 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. principales de las células de proteínas, ADN y polisacáridos se disuelven en agua. Puede formar un azeótropo con muchos otros disolventes. (Química Orgánica, 2012)

g) 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. (Química Orgánica, 2012)

h) 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. (Química Orgánica, 2012)

i) 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 kJ mol<sup>-1</sup>); 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. (Química Orgánica, 2012)

j) 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. (Química Orgánica, 2012)

k) 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. (Química Orgánica, 2012)

l) Los elementos que tienen mayor electro positividad que el hidrógeno como el litio, el sodio, el calcio, el potasio y el cesio desplazan el hidrógeno del agua, formando hidróxidos.

#### 2.4.2 ESPECIFICACIONES

Por las características del agua anteriormente mencionadas, el agua confiere las propiedades adecuadas en los procesos de construcción, rigiendo la norma NMX-C-122-2004-ONNCCE. Las condiciones y límites que se deben de cumplir cuando el agua se pretenda usar para la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir con los requisitos y límites señalados en dicha norma, en este caso como no existe una norma en la cual





nos podemos basar para la elaboración de morteros a base arcilla se utilizaron las especificaciones de la norma NMX-C-122-2004-ONNCCE. Cuando el empleo de agua de mar sea la última alternativa, se debe usar únicamente para la elaboración y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites de la siguiente tabla, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han aportado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

Tabla 1: Límites permisibles de sales e impurezas del agua, (NMX-C-122-ONNCCE, 2004)

<b>Sales e impurezas</b>	<b>Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.</b>	<b>Cementos sulfuresistentes Límites en p.p.m.</b>
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el CL (a)		
Para concreto con acero de preesfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1000 (c)
Sulfato como SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (a)	3000	3500
Magnesio como Mg <sup>++</sup> (a)	100	150
Carbonatos como CO <sub>3</sub>	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO <sub>2</sub>	5	3
Álcalis totales como Na <sup>+</sup>	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5





- (a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.
- (b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX -C-088.
- (c) Cuando se use cloruro de calcio  $\text{CaCl}_2$  como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden marcar límites para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas, ya que algunas impurezas pueden tener efecto sobre la resistencia de fraguado y aún afectar la durabilidad y otras propiedades (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). (Hernández S. d., 2012).

### 2.4.3 AGUA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN

El agua utilizada para el desarrollo de la investigación fue potable, es decir, que sea líquida, transparente, inodora, incolora e insípida basándonos el norma (NMX-C-122-ONNCCE, 2004) que nos establece los límites permisibles y condiciones que el agua debe de cumplir para poder ser utilizada. En este caso el agua usada proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

El agua se tomó tal y como llega a las instalaciones para así realizar las mezclas lo más apegado posible al agua que se utiliza en la obra, en condiciones reales con el objetivo de utilizar el agua con las mismas características y condiciones que sería utilizada en el campo.





## 2.5 MORTEROS

El MORTERO, es toda materia plástica que está compuesto por la mezcla de conglomerante inorgánicos como son: AGUA, AGLUTINANTE, Y ARENA, los cuales se utilizan para obra de albañilería como material de agarre, Aplanados y Repellados, revestimiento de pared, bloques para formar muros, Hechura de Registros, Emboquillados y Resanes, Entortados y Chaflanes en azoteas. Ahora bien, estos pueden contener aglutinantes como: Cemento, Cal, Cemento de Albañilería o Mortero. (Jiménez, 2000).

En construcción, se llama mortero a la combinación de aglomerantes y aglomerados, para de esta manera obtener un conglomerante.

Los aglomerantes son materiales capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos exclusivamente físicos.

Se denomina conglomerante al material capaz de unir fragmentos de uno o varios materiales y dar cohesión al conjunto mediante transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos. Los conglomerantes son utilizados como medio de ligazón, formando pastas llamadas morteros o argamasas mediante procesos químicos.

Para esta investigación se realizó un mortero a base de arcilla (arcilla/agua) con aditivos orgánicos y cristalinos que se pretende tenga características favorables para utilizarlo como uso patrimonial.

### 2.5.1 TIPOS Y USOS

Los morteros se clasifican de acuerdo al tipo de fraguado o según su tipo de composición.

#### **MORTERO FÍSICO.**

El paso del estado pastoso o semilíquido al sólido, se presenta mediante el secado o fraguado que se da sin recursos químicos, esto puede aplicarse a los morteros de barro, morteros de suelo refractario, morteros de asfalto y los modernos morteros con adhesivos a base de materiales sintéticos.





**MORTERO QUÍMICO.** El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química, por ejemplo en este tipo de mortero contamos con los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial. Las mezclas entre estos tipos de morteros y el empleo de distintos aditivos también se hacen frecuentes.

**MORTERO AÉREO.**

Es aquel que fragua al contacto con el aire, como los morteros de arcilla, yeso y cal hidratada.

**MORTERO BITUMINOSO.**

Son los morteros en los cuales se emplean emulsiones asfálticas o cemento asfáltico para su elaboración.

**MORTERO HIDRÁULICO.**

Tiene la propiedad de endurecer rápidamente, además tiene las propiedades de fraguar en contacto con el agua o en presencia de humedad como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento.

Los morteros más comunes son los de cemento y están compuestos de:

MORTERO = AGLUTINANTE + MATERIAL INERTE + LIQUIDO DE AMASADO

Mortero= (cemento) + (arena) + (agua)

**Los morteros se clasifican de acuerdo a su tipo de conglomerante en:**

**MORTEROS DE CAL:** está fabricado con cal, arena y agua. Esta cal puede ser tanto aérea como hidráulica. Los morteros de cal se caracterizan por:

Por su plasticidad, Por su color y Por su trabajabilidad en la aplicación.

**MORTEROS DE CEMENTO:** de aluminato de calcio Fabricados a base de cemento de aluminato de calcio, arena y agua. Ahora bien Si en este tipo de morteros la arena es del tipo refractaria obtenemos los morteros refractarios.

**MORTEROS BASTARDO DE CEMENTO DE BASE PÓRTLAND Y CAL AÉREA:**

Son morteros compuestos por dos clases de conglomerantes compatibles, es decir, cemento y cal. Se caracterizan por su alta trabajabilidad, comunicada por la cal, presenta colores claros por lo que se utilizan como mortero de agarre en fábricas de ladrillo cara vista. También se puede clasificar en Morteros de Cemento Portland ya





que utiliza cemento como conglomerante. Ahora bien existen morteros especiales como son:

**MORTEROS DE CEMENTO-COLA:** Son morteros fabricados con un conglomerante a base de mezclas de cemento de base, estos necesitan poca agua para su amasado y endurecen rápidamente.

**MORTEROS LIGEROS:** Se emplean en cubiertas planas para dar pendiente a los faldones.

**MORTEROS SIN FINOS:** Se utilizan principalmente para la fabricación de piezas de mortero aligerado y para pavimentos filtrantes.

**MORTEROS IGNÍFUGOS:** Se emplean para revestir estructuras metálicas, formadas por elementos de acero, o cualquier otro elemento al que se le tenga que proporcionar resistencia al fuego. Por otra parte; los morteros que tienen poca cantidad de cemento son los llamados morteros pobres o ásperos, esos morteros son muy difíciles de trabajar. (Jiménez, 2000)

## **USOS**

Los morteros son utilizados, para obras de albañilería, como material de agarre, revestimiento de paredes, aplanados y repellados, bloques para formar muros, hechura de registros, emboquillados y resanes, entortados y chaflanes en azoteas etc. Los morteros se han empleado tradicionalmente para pegar tabiques y en todo tipo de aplanados en muros y techos, sin embargo existen muchas otras aplicaciones en la ingeniería civil que tienen que ver con la necesidad de colocar un material de textura lo suficientemente fina para poder penetrar en pequeñas ranuras ya sea para sellar, resanar o nivelar con mucha mayor facilidad de lo que es posible de hacer con los concretos. Debido a que los morteros no llevan grava son más fáciles de manejar y se consume menos energía en su mezclado y colocación, ya sea manual o por medios mecánicos. (Jiménez, 2000)





## 2.6 MATERIALES EN ESTUDIO COMO ADITIVO DE LA ARCILLA

### 2.6.1 YESO

El yeso es un término que procede del latín *gypsum*, aunque su origen se remonta a la lengua griega. Se trata del sulfato de calcio hidratado, que suele ser blanco y que resulta compacto o terroso. 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 semihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ), 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 se deshidrata mediante la acción del fuego y logra endurecerse con rapidez cuando se amasa con agua. Este material es utilizado en el ámbito de la construcción, en la escultura artística y en la medicina (para mantener en su lugar un hueso roto tras una fractura). Como producto industrial, el yeso es el sulfato de calcio semihidratado y suele conocerse como yeso cocido. Se vende en forma de polvo, es decir, molido.

No obstante, no hay que olvidar que existen muchos tipos diferentes de yeso que se emplean por los profesionales de la construcción. Entre los más significativos están el negro, el mate, el cristalizado o el blanco. (Merino, 2010)

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

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 bihidratado:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

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

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.

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.

1000 - 1400 °C: yeso hidráulico con mayor proporción de cal libre y fraguado más rápido con resistencia alta. (yeso.com, 2010)

### 2.6.1.1 ANTECEDENTES

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. 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. Vitrubio, 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.

### 2.6.1.2 CARACTERÍSTICAS

- El yeso cuenta con excelentes propiedades bioclimáticas, de aislamiento y regulación higrométrica, mecánicas y estéticas se utiliza en guarnecidos, enlucidos, prefabricados y relieves arquitectónicos, proporcionando bienestar y comodidad. Esencial como agente retardante en la producción de cemento.
- Agricultura para mejorar las tierras de cultivo, como abono y desalinizador.
- Medicina se utiliza en traumatología para elaborar vendas de yeso, en la fabricación de moldes quirúrgicos y odontológicos y en la producción de pasta dentífrica.





- Industria química y farmacéutica como fuente de calcio, componente en medicamentos y lápices labiales.
- Industria de alimentos en el tratamiento de agua, limpieza de vinos, refinación de azúcar, vegetales enlatados y alimentos para animales.

El yeso se encuentra abundantemente en la naturaleza, no es tóxico, respetuoso con el medio ambiente y sus residuos son biodegradables; esto entre otras características lo hacen un material natural y ecológico. Por lo tanto dentro del gran auge que tiene hoy día las construcciones verdes (Green Buildings), el yeso es uno de los componentes que nos ayudara a darle a nuestras construcciones esta categoría.

Por sus excelentes cualidades higrométricas el yeso es el más eficaz y natural regulador de la humedad ambiental en los interiores de las edificaciones. Absorbe la humedad excesiva y la libera cuando hay sequedad.

La utilización de yeso en los revestimientos interiores de las edificaciones puede aumentar en un 35% la capacidad de aislamiento térmico frente a construcciones no revestidas.

Debido a su elasticidad y estructura finamente porosa, el yeso ofrece una excelente capacidad de insonorización. Disminuye ecos y reverberaciones, mejorando las condiciones acústicas de las edificaciones.

El yeso es completamente incombustible y resistente al fuego. Al exponerse al calor se produce una gradual liberación del agua de cristalización en forma de vapor que retrasa la elevación de temperatura absorbiendo el calor, sin emanar gases tóxicos que son la principal causa de accidentes fatales en la mayoría de incendios.

El yeso, debido a su excelente plasticidad y moldeo, posee infinidad de posibilidades en decoración. Es compatible con casi todos los elementos de decoración: papel, tapiz, madera, pintura, texturizados, etc.

La blancura natural del yeso conforma el soporte más adecuado para aplicar cualquier tipo de acabado posterior, tanto en blanco como en otros colores.





El yeso en estado plástico es muy manejable, modelable y liviano y se adhiere fácilmente a las superficies.

El yeso, una vez formada la red cristalina en el fraguado, es estable en el tiempo e inalterable ante las variaciones ambientales.

El yeso es el componente principal de las planchas de drywall, por lo tanto es correcto determinar que muchas de las propiedades del yeso la comparten sus productos derivados, entre estos, al que hacemos referencia en nuestro blog. (impermeable, 2015)

### 2.6.1.3 TIPOS Y USOS

#### **YESO CRUDO**

Es el yeso utilizado en el sector de la construcción, el cual se obtiene luego de calentar el yeso natural a unos 120 grados Celsius, produciendo parcialmente una deshidratación. Este se puede clasificar en:

- Industrial: que también se conoce como yesos de horno mecánico. Ejemplo: yeso grueso, el bifase, el de escayola y el yeso fino.
- Artesanal: se le suelen identificar como yeso tradicional o multifase. Se destaca el yeso blanco, que es empleado para embellecer acabados; el yeso rojo, que es utilizado en trabajos de restauración; y el yeso negro, que posee mayor impureza.
- Adictivo: aquí se logra destacar el yeso fino, el grueso, los de gran dureza artificial, los de cola y adhesivos, etc. (impermeable, 2015)

#### **YESO COCIDO**

Indica al yeso que es molido y amasado con agua, y que al someterse al aire se fragua hidráulicamente, dando a lugar un sólido. (impermeable, 2015).





### **YESO GRUESO**

Es empleado en la construcción como pasta de agarre de los tabiques, así como también en revestimientos del interior de inmuebles y como conglomerante. Está formado por anhídrita II artificial, y por semihidrato  $SO_4Ca \cdot 1/2 H_2O$ . (impermeable, 2015)

### **YESO PREFABRICADO**

Este posee una gran resistencia y pureza, siendo empleado en tabiquería para la elaboración de elementos prefabricados. Se forma con  $SO_4Ca$  (II)–anhídrita II artificial– y con  $SO_4Ca \cdot 1/2 H_2O$ . (impermeable, 2015)

### **YESO FINO**

Es empleado en los revestimientos interiores para enlucirlos, blanquearlos y refinarlos. Además de estar constituido de anhídrita II artificial y de semihidrato, posee una granulación mucho más fina. (impermeable, 2015)

### **YESO DE ESCAYOLA O DE MOLDEO**

Empleado para la realización de elementos prefabricados para tabiques y techos. Está formado por sulfato cálcico semihidratado. Se caracteriza por su gran pureza y resistencia. Es muy empleado en prefabricados y yesos de moldeo. Poseen un grado de finura mayor. Escayola especial Utilizado en la realización de trabajos decorativos, en la realización de elementos prefabricados para paneles para tabiques, bovedillas y techos. También está formado por sulfato cálcico semihidratado pero tiene mayor potencia. (impermeable, 2015)

### **YESO BLANCO O DE ENLUCIR**

Compuesto por yeso sobrecosido, yeso hemihidratado, y por la mezcla de anhídritas III y II. Es considerado como el material principal y el más recomendado para enlucir las fachadas. Se logra conservar en excelente estado durante largo tiempo. (impermeable, 2015)

### **YESO MÁRMOL**





Es un yeso de enlucido al cual se le añade sales de alumbre y se lleva a cocción a una temperatura de 600 grados Celsius. (impermeable, 2015)

### **YESO LIPOLÍTICO**

Es el tipo de yeso utilizado en el yeso-terapia. Está conformado por diversos concentrados naturales que logran incrementar el calor del cuerpo, lo cual ayuda a las personas a adelgazar ciertas partes del cuerpo, cuando estos se envuelven formando vendas. (impermeable, 2015)

### **USOS**

Conocido también como aljez, los usos del yeso son frecuentados en la construcción, y el mismo puede emplearse para la preparación y elaboración de materiales o utensilios prefabricados. Los usos del yeso datan de épocas antiguas, donde era empleado en edificaciones y construcciones. Hoy en día, el yeso es muy utilizado para la elaboración y perfeccionamiento de mamposterías, revoques, enlucidos y guarnecidos, también se usa para lograr estucados y en la elaboración de superficies para pintura al fresco.

Entre los múltiples usos del yeso para la construcción encontramos que se usa para:

Reconstrucción y revestimiento de muros, Compuesto del cemento, Aislante térmico, Molduras, elementos ornamentales y estatuillas.

**EL YESO BLANCO:** es el que utiliza para los acabados interiores y la mampostería, y para algunas otras obras pequeñas como divisiones, en placas preformuladas como el Durlok. Es el yeso que recubre las paredes, las molduras, los paneles y los techos en la gran mayoría de las construcciones, y se debe a que su acabado es más liso, parejo, moldeable y decorativo. Puede ser perforado y modelado con gran facilidad, permitiendo estilos y decoraciones exquisitas y a bajo costo. Puede ser mezclado con otros materiales, tales como porcelana y mármol (en placas, trozos y polvos) para adquirir acabados mucho más lujosos. ( ENGINEERING TOMORROW, 2008)





**EL YESO NEGRO:** por su parte, es el utilizado para la construcción más estructural. Se elige para levantar o erigir tabiques y reforzar paredes, entremezclándose con otros materiales. ( ENGINEERING TOMORROW, 2008)

#### 2.6.1.4 YESO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN

El yeso utilizado en la investigación fue de la marca tolteca como se muestra en la ilustración 18, obtenido en una distribuidora de materiales en la ciudad de Morelia Michoacán México.



*Ilustración 18: Yeso utilizado en la investigación, (CV, 2008)*

El yeso, como producto industrial, es sulfato de calcio hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ), también llamado comunmente "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.

#### 2.6.2 FIBRA DE NOPAL



La ‘Opuntia Ficus-Índica’ que se denomina así de acuerdo con su nomenclatura binomial, es la llamada nopal, tuna o chumbera; pertenece al género Opuntia, de la familia de las cactáceas. Las funciones básicas de estas plantas se realizan por los tallos con forma de segmentos elípticos aplanados y sin espinas. En sus bordes aparecen las flores en forma de corona que se transforman en frutos denominados tunos; mismos que poseen una cáscara gruesa, espinosa, y con una pulpa abundante en semillas. Esta planta es originaria de México, donde es conocida desde tiempos prehispánicos. Como se observa en la ilustración 19, la fibra de nopal proviene de esta planta a través de procesos de molido (triturado) con la maquinaria adecuada, los manejos requeridos, se obtiene la fibra de nopal la cual fue utilizada para esta investigación.



*Ilustración 19: fibra de nopal, (NoPalmix, 2010)*

### 2.6.2.1 ANTECEDENTES

Territorio mesoamericano en México (Agrupación Sierra Madre, S.C.)

El origen e historia del nopal están íntimamente relacionados con las civilizaciones más antiguas de nuestro país, pero en especial con las mesoamericanas y de manera particular, con la cultura azteca. Existen evidencias arqueológicas que permiten afirmar que las poblaciones indígenas asentadas en las zonas semiáridas





de Mesoamérica, fueron las que iniciaron su cultivo de modo formal. Los antiguos relatos hacen mención a la gran variedad de nopales que existían, así como el uso que se les daba. Al acercarse la época de fructificación de los nopales, los pobladores se alimentaban de sus frutos. Sin duda, los nopales influyeron en el asentamiento de tribus errantes que concurrían en la época de fructificación a las zonas habitadas por estas plantas; y acababan por fijar ahí su residencia. (Andrés Antonio Torres Acosta, 2010)

La evidencia del conocimiento y uso del nopal por los primeros pobladores mexicanos se encuentra en excavaciones de Tamaulipas y Puebla. En éstas se encontraron fosilizadas semillas y cáscaras de tuna, así como fibras de pencas de nopal, con antigüedad de siete mil años. (Andrés Antonio Torres Acosta, 2010)

En nuestro territorio el nopal que más se cultiva es tuna blanca o tuna piedra. En la región de los otomíes, para preparar una huerta de nopales, primero se acondiciona el suelo y al terminar de limpiar la tierra se hacen hoyos para meter las plantas. Éstas deben ir dentro de depresiones más grandes que se llenan de agua cuando llueve. No requieren ser sembradas profundamente, porque de no hacerlo, producen vástagos y se pudren. Las hojas o pencas que sirven de semillas son podadas de otra planta muchos días antes y las dejan enjutarse. Las hojas se extienden al sol por tres meses para secarlas bien. Los que siembran en luna llena, dicen que el nopal dará tunas rápidamente. Los que lo hacen en luna nueva, creen que no dará fruto, que sólo producirá nuevas hojas. (Hernández S. d., 2012)

### 2.6.2.2 CARACTERÍSTICAS

Las funciones básicas de estas plantas se realizan por los tallos con forma de segmentos elípticos aplanados y sin ó con espinas. En sus bordes aparecen las flores en forma de corona que se transforman en frutos denominados tunos; mismos que poseen una cáscara gruesa, espinosa, y con una pulpa abundante en semillas. Los nopales llegan a medir hasta 4m de altura y a tener un tronco leñoso, segregan una sustancia viscosa llamada mucílago o comúnmente “baba de nopal”, cuya función es cicatrizar las heridas de la propia planta. El contenido nutricional de esta planta comprende minerales como calcio, hierro, aluminio, magnesio, sulfatos,







fosfato, potasio, sílice, sodio, carbohidratos, componentes nitrogenados, además de vitaminas A, B1, B2 y C. Las semillas de la tuna tienen un alto contenido de sustancias grasas y proteínas. Una característica importante del nopal es su alto contenido de carbohidratos (glucosa), que agrupados en grandes cadenas forman el almidón, considerado también como aditivo en la elaboración de morteros, para retener agua de amasado y favorecer el fraguado en los morteros y así mismo lograr una mayor durabilidad. (Hernández S. d., 2012)

Gracias a su alto contenido de fibras, el nopal se caracteriza por ser una planta con propiedades muy eficaces para el control de los síntomas de diabetes, logrando estabilizar de manera satisfactoria los niveles de glucosa en sangre, evita tanto el aumento como una baja excesiva, que ponga en riesgo de sufrir hipoglucemia.

Los tipos de fibra que aporta el nopal son soluble e insoluble como la pectina, el mucílago (ésta se puede apreciar en la baba que genera el nopal cuando se cuece o licua) y gomas que son provechosas para el sistema digestivo.

De esta forma, las cualidades curativas de esta planta incrementan los niveles de insulina y la sensibilidad a esta hormona reguladora del metabolismo, logrando estabilizar y regular la cantidad de azúcar en la sangre. Investigaciones en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) han demostrado que la ingestión de nopal antes de cada alimento, durante 10 días, provoca la reducción de las concentraciones de azúcar en sangre. (TUSALUDENCORTO, 2015)

Lo anterior, se ha observado en personas que son resistentes a la insulina, o sea en pacientes con diabetes mellitus tipo 2, pero para las personas con diabetes tipo 1, quienes no producen insulina, el consumo del nopal no deberá sustituir en ningún caso el tratamiento establecido por su médico.

El nopal también posee propiedades diuréticas, analgésicas, cardiotónicas, laxantes y desparasitantes. Se trata de un alimento excelente, con alto contenido de calcio, potasio, fósforo, sodio, vitaminas C, A, B, B2, E, clorofila, 17 aminoácidos esenciales y no esenciales, como tiamina, riboflavina y niacina. (TUSALUDENCORTO, 2015)

### 2.6.2.3 TIPOS Y USOS





Investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo, principalmente del Centro Regional Universitario Centro Norte (Crucen), ubicado en el estado de Zacatecas, registraron 50 variedades de nopal, tuna y xoconostle en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales, para evitar que extranjeros se acrediten los derechos de los productos naturales de México. (universia, 2010)

Clemente Gallegos Vázquez, investigador del Crusen, explicó que con la obtención del registro Mexicano y los productores de manera independiente pueden enfrentar cualquier tipo de controversia comercial que se pueda presentar, en caso de que algún extranjero quiera obtener los derechos de una de las variedades de nopal, tuna o xoconostle, por lo que se solicitará el registro de otras 20 variedades de xoconostle, fruto que es de alta potencialidad en la medicina. (universia, 2010)

### ***Uso del nopal***

Son muchos los sectores industriales que se pueden beneficiar con la explotación de los nopales, ya que esta planta es de gran ayuda para el desarrollo de diferentes tecnologías para beneficio del hombre. A continuación se mencionan algunos de estos, y la forma de explotación de este cactáceo (Sáenz 2006): - Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y analcohólicas de tuna y nopalitos). - Agroindustria de alimentos para animales (suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y semillas). - Industria farmacéutica (protectores gástricos de extractos de mucílago; cápsulas y tabletas de polvo de nopal). - Industria cosmética (cremas, *shampoo*, lociones de cladodios) - Industria de suplementos alimenticios (fibra y harinas de cladodios) - Industria productora de aditivos naturales (gomas de cladodios; colorantes de la fruta) - Sector de la construcción (compuestos ligantes de los cladodios) - Sector energético (producción de biogás a partir de las pencas) - Sector productor de insumos para la agricultura (productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos) - Sector turismo (artesanías con base en cladodios lignificados) - Industria textil (uso de colorantes naturales, como el carmín de cochinilla). El nopal se usa en todas estas industrias no sólo por su fácil producción y almacenaje, sino por sus diversas propiedades (Andrés Antonio Torres Acosta, 2010).





### Valor nutritivo en 100 g de peso neto de nopal fresco

Tabla 2: Valor nutritivo del nopal, (Andrés Antonio Torres Acosta, 2010)

Concepto	Contenido
Porción comestible	78.00
Energía (Kcal)	27.00
Proteína (g)	1.70
Grasas (g)	0.30
Carbohidratos (g)	5.60
Calcio (mg)	93.00
Hierro (mg)	1.60
Tiamina (mg)	0.03
Riboflavina (mg)	0.06
Niacina (mg)	0.03
Ascórbico (mg)	8.00

#### 2.6.2.4 FIBRA DE NOPAL UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolló con un porcentaje de adición del 0.5% de fibra de nopal en estado deshidratado con relación al peso de la arcilla en estado seco, con el objetivo principal de utilizar esta fibra como aditivo en mortero a base arcilla para el mejoramiento físico-mecánico y la durabilidad del mortero. El producto usado es de una empresa de productos comerciales, la marca de este producto es: CU CÚ como se muestra en la ilustración 20. El cual fue adquirido por el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.





*Ilustración 20: fibra de nopal utilizada en la investigación. (De Leon Ambrocio, 2016)*

### 2.6.3 SULFATO DE SODIO

El sulfato de sodio o sulfato sódico ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) es una sustancia incolora, cristalina con buena solubilidad en el agua y mala solubilidad en la mayoría de los disolventes orgánicos con excepción de la glicerina. (CAMIMEX, 2013)

Su fórmula química molecular es  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , y su nombre según la IUPAC es sulfato (VI) de sodio. Su masa molecular es de 142,04 g por mol, y cuenta con una densidad bastante alta ( $884^\circ\text{C}$ ), la cual baja considerablemente cuando la sustancia se encuentra hidratada (decahidratado  $10\text{H}_2\text{O}$  a  $32^\circ\text{C}$ ). Cuando el sulfato de sodio se encuentra hidratado ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), se consigue disolver en agua a través del enfriamiento de ésta gracias al efecto de entropía, en cambio, cuando la sal de sulfato de sodio no se encuentra hidratada, desprende energía, es decir, es exotérmica cuando se hidrata y seguidamente se disuelve. Cuando se ha enfriado una solución de este tipo que se encuentre saturada, suele verse una sobresaturación, es decir, se ve la disolución con más cantidad de sal disuelta de la que podría admitir.



En la actualidad, la gran parte del sulfato de sodio que se produce procede de las minas del mineral glauberita, además de los lagos de tipo salados. Las principales zonas de producción son China, seguido de España, donde podemos encontrar el yacimiento más grande a nivel mundial del mineral glauberita. El sulfato de sodio también puede obtenerse a través de diferentes procedimientos industriales, a modo de subproducto, donde es neutralizado con  $H_2SO_4$  con bases sódicas. (GUIA-QUIMICA, 2013)

Es un producto muy importante, y se encuentra en 12 tipos de depósitos minerales, sin embargo sólo dos de ellos son comercialmente importantes, la Tenardita y la Mirabilita. La primera es un mineral incoloro y blanco, la segunda se encuentra en salmueras, en estos casos posee un 56% de agua de cristalización (sal de Glauber). Adicionalmente de la extracción natural, este químico es producido en grandes cantidades como subproducto de reacciones por ejemplo de producción de sales de potasio, cloruro de sodio y bórax, y en procesos de producción de metales. En México la obtención de este compuesto se realiza mediante la extracción de Mirabilita, primero realizando un minado hidráulico en la Laguna del Rey en Coahuila, esta salmuera contiene sales de sulfato de sodio y de magnesio, la salmuera virgen se envía a tanques de almacenamiento donde se enfría y después se cristaliza para obtener sal Glauber, posteriormente esta sal se sedimenta y se lava y filtra, una vez limpia se funde para obtener sulfato de sodio anhidro. (COSMOS, 1995)

## ***PRODUCCIÓN DE SULFATO DE SODIO.***

### ***EXTRACCIÓN MINERA***

Después del cloruro de sodio, el sulfato de sodio es la forma natural más común de las sales de sodio. Sus formas minerales más comunes (tenardita,  $Na_2SO_4$ ; mirabilita,  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ; glauberita,  $Na_2SO_4 \cdot CaSO_4$ ; astracanita,  $Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$ ; burcaita,  $2Na_2SO_4 \cdot Na_2CO_3$ ) pueden ser encontradas en depósitos masivos de sales solubles, como uno de los componentes principales en la mayoría de los lagos salinos y playas del mundo, en depósitos minerales salinos y suelos alcalinos. La fuente principal del sulfato de sodio es el lixiviado de yeso natural. En la industria





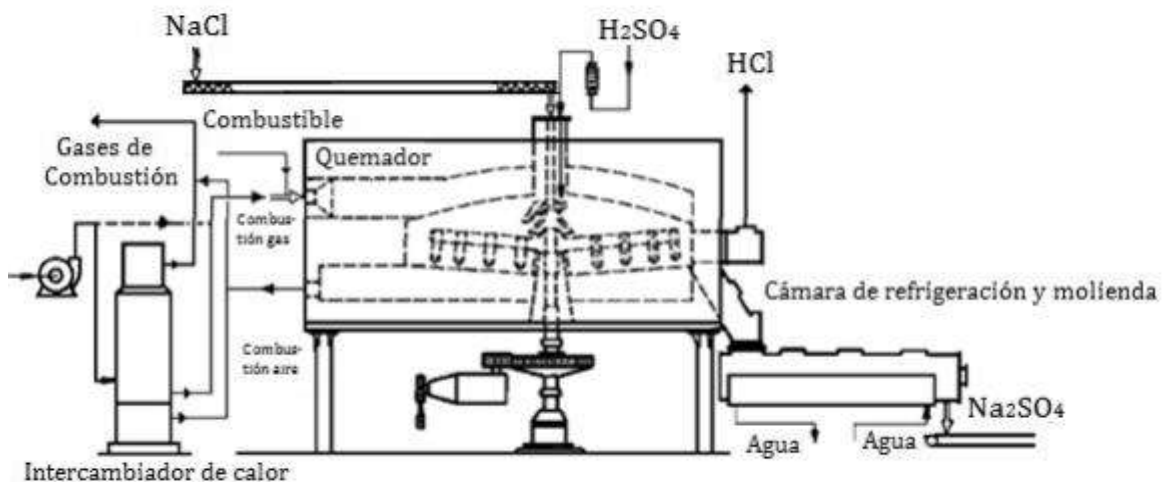
mundial de químicos, la mayor parte del sulfato de sodio es obtenido por la extracción minera de materiales ricos en sodio y sulfato como las sales naturales anteriormente mencionadas. Los materiales son extraídos por remoción directa o por disolución en caliente y posterior extracción mecánica. Después de un pre-tratamiento, las fuentes de sodio se purifican con ayuda de separaciones por gravedad, lavados continuos, evaporaciones y disoluciones-cristalizaciones. En algunos casos, para la extracción de estas sales minerales se necesitan solventes agresivos, los cuales son dañinos para el medio ambiente.

### **PROCESO MANNHEIM**

El proceso de Mannheim involucra la reacción directa entre cloruro de sodio y ácido sulfúrico como se muestra en la ecuación



Esta reacción se lleva a cabo en un horno rotatorio de diseño específico a una temperatura de 840°C como se observa en la ilustración 21. En este proceso, el producto principal es el ácido clorhídrico (lo anterior debido a su facilidad de obtención por este método). El cloruro de hidrógeno gaseoso se enfría y absorbe en agua hasta formar una solución de ácido al 32% másico. La torta o subproducto tiene un elevado porcentaje de sulfato de sodio (97-99.7%). (CARLOS, 2007)



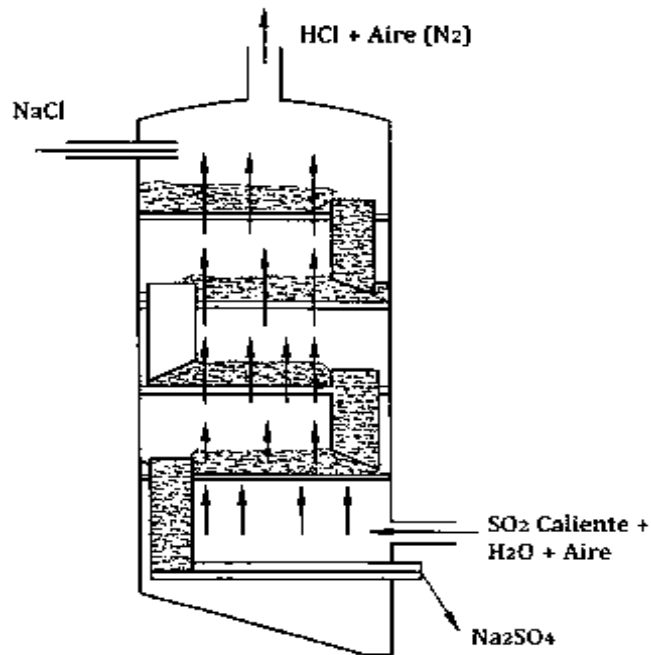
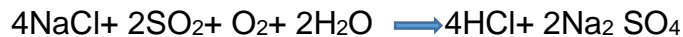
*Ilustración 21: Horno-reactor proceso Mannheim (CARLOS, 2007)*





## PROCESO HARGREAVES

El proceso de Hargreaves, utiliza como reactivos cloruro de sodio, dióxido de azufre, oxígeno y agua. Una mezcla de dióxido de azufre y aire (en presencia de agua) se hace pasar sobre briquetas (colocadas en forma de columna) de cloruro de sodio a muy altas temperaturas, produciendo sulfato de sodio y cloruro de hidrógeno (Kent y Riegel, 2007; Lenntech, 2014). Las etapas se calientan por fuera de la columna. En la ilustración 22 se muestra el esquema del proceso Hargreaves y en la ecuación (1.2) la reacción que se presenta. (CARLOS, 2007)



*Ilustración 22: Columna-reactor proceso hargreaves, (CARLOS, 2007)*

Para evitar reacciones secundarias entre el cloruro de hidrógeno y el oxígeno (para la formación de cloro) se utiliza un leve exceso de dióxido de azufre y vapor de agua. El sulfato de sodio se extrae por el fondo de la columna. Mientras que el cloruro de hidrogeno sale en forma gaseosa por la cima de columna (mezclado con nitrógeno). Como la reacción es lenta (descomposición) los gases deben mantenerse en contacto con la sal por un periodo de tiempo considerable. Para 40 toneladas de material se requieren de 15 a 20 días en acción continua para garantizar conversión completa. . (CARLOS, 2007)



## PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN

Un método regularmente aplicado en la preparación de sulfato de sodio a escala de laboratorio, consiste en hacer reaccionar ácido sulfúrico acuoso con hidróxido de sodio acuoso para formar sulfato de sodio acuoso y agua.



El principal problema, común a todos los métodos industriales anteriormente descritos, es el elevado consumo energético involucrado en las operaciones de reacción y separación. Adicionalmente, como en el proceso de Hargreaves, la velocidad de producción de sulfato de sodio es lenta y en la extracción minera se usan solventes agresivos con el medio ambiente (en algunos casos).

Sulfato de sodio como subproducto de la industria química

Soluciones de sulfato de sodio se producen en numerosas reacciones, compuestas por sodio y ácido sulfúrico o sodio, dióxido de azufre y oxígeno. El sulfato de sodio se obtiene a partir de estas por cristalización y calcinación. Las cantidades de sulfato de sodio producido (como subproducto) a partir de diversas fuentes dependen en gran medida del estado del mercado de los productos principales y el estado de la tecnología. Entre algunos de los ejemplos se tiene:

Baños de fibra viscosa:



Producción de dicromato de sodio:



Producción de ácido ascórbico, en una etapa intermedia del proceso Reichstein Grussner.

Estos procesos no tienen gran relevancia en el desarrollo de este proyecto debido a que uno de los propósitos principales es determinar la viabilidad (económica y técnica) que tiene la producción de sulfato de sodio como producto principal aplicando la técnica de cristalización reactiva y a partir de la reacción en fase líquida entre el cloruro de sodio y el ácido sulfúrico. (CARLOS, 2007)







## **PRODUCCIÓN DE SULFATO DE SODIO MEDIANTE CRISTALIZACIÓN REACTIVA**

Recientemente, se han estado desarrollando nuevas tecnologías e implementando algunas modificaciones en los métodos convencionales para optimizar su desempeño mediante la filosofía de la Intensificación de Procesos. Esta permite reducir los consumos energéticos, aprovechar de mejor manera los recursos no renovables, que cada vez son más escasos, y además mitigar el impacto ambiental. En este proyecto, se hace referencia al proceso de cristalización reactiva. Este involucra el uso de un agente antisolvente que permite modificar la solubilidad de la sal o producto deseado, ocasionando que este precipite y sea mucho más fácil de separar de la solución reactiva. En consecuencia, se disminuye el consumo energético, el tamaño y número de los equipos y los costos de operación y de servicio. A nivel micro, el antisolvente altera la polaridad de la solución, reduce las interacciones ion-dipolo e incrementa los puentes de hidrógeno. Estas alteraciones modifican el punto de saturación iónica con el cual se lleva a cabo la precipitación del producto (sulfato de sodio). (CARLOS, 2007)

### **2.6.3.1 ANTECEDENTES**

El sulfato de sodio se descubrió por primera vez en Austria. Es conocido también como "sal milagrosa" y se utilizó en la Europa del siglo XVIII como cura medicinal de una variedad de enfermedades. Desde entonces ha evolucionado para utilizarse en diversas formas. Durante mucho tiempo, fue un material importante en la fabricación de numerosos detergentes y papel. Sin embargo, cambios tanto en aplicaciones de uso final como de lineamientos normativos ha reducido la función del sulfato de sodio en estas industrias. Relativamente económico y útil como agente de llenado y nivelación, el sulfato de sodio ahora se emplea en la fabricación de vidrio y textiles, además se descubrió un nuevo uso como parte del proceso de recuperación de oro en los productos electrónicos. ( Flexicom Cop, 2006)





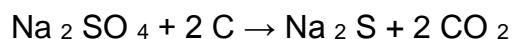
El sulfato sódico o de sodio, forma una parte esencial en los minerales que se encuentran en la mayoría de las aguas conocidas como aguas minerales, a las cuales aporta sus propiedades como astringente. El químico alemán Johann Rudolf Glauber, lo encontró en las aguas minerales en el siglo XVII, empezando su producción partiendo del cloruro de sodio (sal) y el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de tipo concentrado, entre la década de entre 1650-60. Este hecho, es bastante importante, pues es considerado como el comienzo de lo que hoy conocemos como la industria química. Por este procedimiento y comienzo de producción, a menudo al sulfato de sodio se le conoce como sal de Glauber.

En los análisis, podemos conocer la presencia de sodio a través de la luz amarilla que desprende cuando se produce llama. En cambio al sulfato lo podemos analizar a partir de la precipitación con el BaSO<sub>4</sub>. (GUIA-QUIMICA, 2013)

### 2.6.3.2 CARACTERÍSTICAS

El sulfato sodio o sulfato sódico (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) es una sustancia incolora, cristalina con buena solubilidad en el agua y mala solubilidad en la mayoría de los disolventes orgánicos con excepción de la glicerina. El sulfato de sodio anhidro tiene propiedades higroscópicas y por lo tanto es utilizado como desecante en el laboratorio la industria química; se utiliza en la fabricación de la celulosa y como aditivo en la fabricación del vidrio. También añade a los detergentes para mejorar su comportamiento mecánico y donde puede representar una parte importante del peso total. (DIEGO ALENCER RANGEL RENDON, 2009)

El sulfato de sodio es químicamente muy estable, siendo no reactivo hacia la mayor parte oxidantes o agentes reductores a temperaturas normales. A altas temperaturas, que se puede convertir en sulfuro de sodio por reducción carbotérmica:



El sulfato de sodio es una neutral sal, que forma soluciones acuosas con pH de 7. La neutralidad de tales soluciones refleja el hecho de que el sulfato se deriva, formalmente, a partir del ácido fuerte ácido sulfúrico . Además, el ion Na<sup>+</sup> con una





única carga positiva, sólo débilmente polariza sus ligados de agua. El sulfato de sodio reacciona con el ácido sulfúrico para dar la sal de ácido bisulfato de sodio:

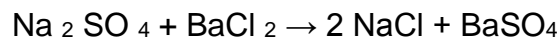


La constante de equilibrio para este proceso depende de concentración y temperatura.

Solución e intercambio iónico

Sulfato de sodio tiene características de solubilidad inusuales en el agua. Su solubilidad en agua se eleva más de diez veces entre 0 ° C a 32.384 ° C, donde alcanza un máximo de 497 g / L. En este punto, la curva de solubilidad cambia de pendiente, y la solubilidad llega a ser casi independiente de la temperatura. Esta temperatura a 32.384 ° C, correspondiente a la liberación de agua de cristalización y de fusión de la sal hidratada, sirve como una referencia precisa de la temperatura de termómetro de calibración.

Sulfato de sodio es un típico iónica sulfato, que contiene iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  iones. La existencia de sulfato en solución está indicada por la fácil formación de sulfatos insolubles cuando estas soluciones se tratan con  $\text{Ba}^{2+}$  o  $\text{Pb}^{2+}$  sales:



El sulfato de sodio muestra una tendencia moderada para formar sales dobles. Los únicos alumbres formados con metales trivalentes comunes son  $\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2$  (inestable por encima de 39 ° C) y  $\text{NaCr}(\text{SO}_4)_2$ , en contraste con sulfato de potasio y sulfato de amonio que forman muchos alumbres estables. Sales dobles con algunos otros sulfatos de metales alcalinos son conocidos, incluyendo  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{K}_2\text{SO}_4$ , que se produce naturalmente como el mineral glaserita. Formación de glaserita por reacción de sulfato de sodio con cloruro de potasio se ha utilizado como la base de un método para producir sulfato de potasio, un fertilizante. Otras sales dobles incluyen  $3\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$ ,  $3\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4$  (vanthoffite) y  $\text{NaF} \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Los cristales consisten en  $[\text{Na}(\text{OH})_2]_6^+$  iones con geometría molecular octaédrica, como se ve por muchos sales de sulfato metálico. Estos cationes están vinculados a los aniones de sulfato a través enlaces de hidrógeno. Las distancias Na-S son





240 pm. Dos moléculas de agua por unidad de fórmula no se coordinan para  $\text{Na}^+$ . Crystalline decahidrato de sulfato de sodio también es inusual entre sales hidratadas en tener un medible entropía residual (entropía en el cero absoluto) de  $6,32 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ . Esto se atribuye a su capacidad para distribuir el agua mucho más rápidamente en comparación a la mayoría de hidratos. (For-Eschool, 2010)

### 2.6.3.3 TIPOS Y USOS

Los tipos de sulfato de sodio dependen de la forma de extracción de dicho material así como también de los componentes químicos que contenga en campo antes de la extracción del material. Como lo antes mencionados hay diferentes formas de tratar y extraer sulfato de sodio dependiendo del lugar de origen de extracción son los compuestos químicos y minerales que este material contenga.

#### **Usos**

El sulfato de sodio se utiliza en numerosas aplicaciones, tales como las que se detallan a continuación:

- Detergentes en polvo: el sulfato de sodio, es una de las siete principales clases de constituyentes en detergentes.
- Papel y pulpa
- Vidrio: es uno de los constituyentes menores en la producción de vidrio.
- Teñido: el sulfato de sodio es usado para diluir tinturas.
- Manufactura de Químicos: es utilizado en la manufactura de numerosos químicos, incluyendo sulfato de potasio, sulfito de sodio, silicato de sodio, hiposulfito de sodio y sulfato de aluminio sodio. También se usa en la proceso solva y para producir carbonato de sodio.
- Celdas solares.
- Regeneración de desulfurización de fluidos de gas.
- Plantas de polvo de carbón quemado.
- Otros usos menores:
- Manufactura de esponjas viscosas
- Suplementos en alimentación
- Tratamientos de agua





- Medicinas veterinarias
- Aceites sulfonados
- Tintas de impresión
- Industria de la cerámica
- Industria fotográfica

Se utiliza en la fabricación de la celulosa y como aditivo en la fabricación del vidrio. También añade a los detergentes para mejorar su comportamiento mecánico y donde puede representar una parte importante del peso total. (CAMIMEX, 2013)  
Por las diferentes aplicaciones del sulfato de sodio se desarrolló la presente investigación implementando el sulfato de sodio en un cierto porcentaje del peso total como un material de estudio para el mejoramiento de las características físico-mecánicas y evaluar la durabilidad del mortero a base arcilla.

#### 2.6.3.4 SULFATO DE SODIO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN

En la ilustración 23 se muestra el sulfato de sodio que se utilizó para el desarrollo de esta investigación fue deshidratado, y obtenido de las empresas distribuidoras de este material y adquirido por el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.



Ilustración 23: Sulfato de Sodio de la investigación, (De Leon Ambrocio, 2016)



## 2.7 ADITIVOS

Los aditivos son productos que se adicionan en pequeña proporción al concreto durante el mezclado en porcentajes entre 0.1% y 5% (según el producto o el efecto deseado) de la masa o peso del cemento, con el propósito de producir una modificación en algunas de sus propiedades originales o en el comportamiento del concreto en su estado fresco y/o en condiciones de trabajo en una forma susceptible de ser prevista y controlada. Esta definición excluye, por ejemplo, a las fibras metálicas, las puzolanas y otros. En la actualidad los aditivos permiten la producción de concretos con características diferentes a los tradicionales, han dado un creciente impulso a la construcción y se consideran como un nuevo ingrediente, conjuntamente con el cemento, el agua y los agregados. Existen ciertas condiciones o tipos de obras que los hacen indispensables.

Tanto por el Comité 116R del ACI como por la Norma ASTM C 125 definen al aditivo como: “Un material distinto del agua, de los agregados y cemento hidráulico que se usa como componente del concreto o mortero. Las dosis en las que se utilizan los aditivos, están en relación a un pequeño porcentaje del peso de cemento, con las excepciones en las cuales se prefiere dosificar el aditivo en una proporción respecto al agua de amasado”.

### 2.7.1 TIPOS Y USOS

Debido a que sus efectos son muy variados, una clasificación así es muy extensa, además debido a que un solo aditivo modifica varias características del concreto, además de no cumplir todas las que especifica.

Según la norma técnica ASTM-C494 es:

- a) TIPO A: Reductor de agua
- b) TIPO B: Retardante
- c) TIPO C: Acelerante





- d) TIPO D: Reductor de agua retardante
- e) TIPO E: Reductor de agua acelerante
- f) TIPO F: Súper reductor de agua
- g) TIPO G: Súper reductor de agua retardante

#### 4.2. Según el comité 212 del ACI

Los clasifica según los tipos de materiales constituyentes o a los efectos característicos en su uso:

- a) Aditivos acelerantes.
- b) Aditivos reductores de agua y que controlan el fraguado.
- c) Aditivos para inyecciones.
- d) Aditivos incorporadores de aire.
- e) Aditivos extractores de aire.
- f) Aditivos formadores de gas.
- g) Aditivos productores de expansión o expansivos.
- h) Aditivos minerales finamente molidos.
- i) Aditivos impermeables y reductores de permeabilidad.
- j) Aditivos pegantes (también llamados epóxicos).
- k) Aditivos químicos para reducir la expansión debido a la reacción entre los agregados y los alcalices del cemento. Aditivos inhibidores de corrosión.
- l) Aditivos fungicidas, germicidas o insecticidas.
- m) Aditivos floculadores.
- n) Aditivos colorantes.





Según la norma francesa AFNOR P 18-123 “Betons: Definitions et Marquage des Adjuvants du Betons”

Establecen una clasificación más amplia:

Aditivos que modifican las propiedades reológicas del concreto fresco:

- Plastificantes – Reductores de agua.
- Incorporadores de aire.
- Polvos minerales Plastificantes
- Estabilizadores
- Aditivos que modifican el fraguado y endurecimiento:
- Aceleradores de fraguado y/o Endurecimiento.
- Retardadores de Fraguado.

Aditivos que modifican el contenido de aire:

- Incorporadores de Aire
- Antiespumantes.
- Agentes formadores de Gas.
- Agentes formadores de Espuma.

Aditivos que modifican la resistencia a las acciones físicas:

- Incorporadores de Aire.
- Anticongelantes.
- Impermeabilizantes.

Aditivos misceláneos

- Aditivos de cohesión – emulsiones
- Aditivos combinados
- Colorantes







- Agentes formadores de espuma (Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería - Perú, 2009).

### **Usos**

Algunas de las razones para el empleo de un aditivo son:

En el concreto fresco:

- Incrementar la trabajabilidad sin aumentar el contenido de agua.
- Disminuir el contenido de agua sin modificar su trabajabilidad.
- Reducir o prevenir asentamientos de la mezcla.
- Crear una ligera expansión.
- Modificar la velocidad y/o el volumen de exudación.
- Reducir la segregación.
- Facilitar el bombeo.
- Reducir la velocidad de pérdida de asentamiento. (Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería - Perú, 2009)

La interpretación que puede darse a esta definición es que un material sólo puede considerarse como aditivo cuando se incorpora individualmente al concreto, es decir, que se puede ejercer control sobre su dosificación. De esta manera, las puzolanas y las escorias solamente son aditivos si se les maneja y administra por separado del cemento portland. Lo cual no deja de ser más bien una cuestión de forma, ya que cualitativamente sus efectos son los mismos que si se administran por conducto del cemento.

Para complementar la definición anterior se añade que los aditivos para concreto y/o mortero se utilizan con el propósito fundamental de modificar convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco, y/o de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto. (Hernández S. d., 2012)





### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

##### 3.1.1 ARCILLA

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 mm. 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.

La arcilla utilizada en la investigación además de ser una arcilla local por haber sido extraída del banco de arcilla en la rivera del lago de Cuitzeo en Santiago Undameo, Michoacán, México, posee características que facilitan modificar sus propiedades adecuándolas a las necesidades concretas de la aplicación a la que son destinadas. Tales como la capacidad de absorción está completamente ligada con las características texturales (superficie específica y porosidad), hidratación e hinchamiento, plasticidad y mecánicas, esta última consisten en la estructura de la arcilla y en el acomodo de sus partículas las cuales son elementales en el comportamiento mecánico.

##### 3.1.1.1 DISGREGACIÓN DEL MATERIAL

Para esta caracterización del material (arcilla) se realizó a través de un método mecánico el cual consistió en extender el material sobre la una superficie plana y rígida como se observa en la ilustración 24 y a través de apisonamientos con un mazo de concreto hasta lograr disgregarlo como, ya que presentaba tamaños superiores que no cumplían con el tamaño adecuado para su clasificación. El procedimiento de referencia lo marca el Manual M.MMP.1.07 con el objetivo de lograr pulverizar el material, tomando el material que pasa la malla ASTM No. 40 para realizar las pruebas.





*Ilustración 24: Disgregación del material (De Leon Ambrocio, 2016)*

### 3.1.1.2 MATERIAL QUE PASA LA MALLA ASTM No 40

Esta caracterización del material nos sirve para homogenizarlo y así tener el tamaño de partícula adecuada para las pruebas a desarrollar. El procedimiento consistió en cribar el material con la malla ASTM No. 40 para estandarizar el tamaño de partícula a 0.425 mm como lo indica el Manual M.MMP.06, “*Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*”. Este procedimiento se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH como se muestra en la ilustración 25.



*Ilustración 25: homogenización del material, (De Leon Ambrocio, 2016)*

### 3.1.1.3 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO.

Esta prueba se realizó por medio del procedimiento estándar (S.U.C.S.), la cual fue la misma para la mezcla testigo y las adiciones. El procedimiento fue obtenido del libro, MMP. Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales, en la parte de Suelos y Materiales para Terracerías y de la norma (D-4318 ASTM). El cual se describe a continuación (D-4318 ASTM)

#### **EQUIPO Y MATERIALES**

El equipo necesario para efectuar esta prueba es: copa de Casagrande, balanza, horno, desecador, vaso o recipiente, cápsulas de porcelana, espátula, cuentagotas, vidrios de reloj y paño.

#### **PROCEDIMIENTO DE PRUEBA**

1.- De la fracción del material se toma una porción de aproximadamente 150 g que se coloca en la cápsula de porcelana donde se homogeniza utilizando la espátula.



2.- En la copa de Casagrande, previamente calibrada, se coloca una cantidad suficiente de material para que, una vez extendido con la espátula, se alcance un espesor de 8 a 10 mm en la parte central de la copa, considerando lo siguiente.

3.- Para evitar que el material colado sobre la copa sea insuficiente, es conveniente poner una cantidad ligeramente mayor y eliminar el sobrante enrasando la con la espátula.

4.- Para extender el material se produce del centro hacia los lados sin aplicar una presión excesiva y con el mínimo de pasadas sobre la copa ilustración 26.



*Ilustración 26: Colocación del material en la copa de Casagrande, (Ambrocio, 2016)*

5.- Mediante una pasada firme del ranurador se hace una abertura en la parte central del material contenido en la copa, para lo cual, el ranurador se mantendrá siempre normal a la superficie interior de la copa.

6.- La forma y dimensiones que tenga la ranura en su parte central de la copa.

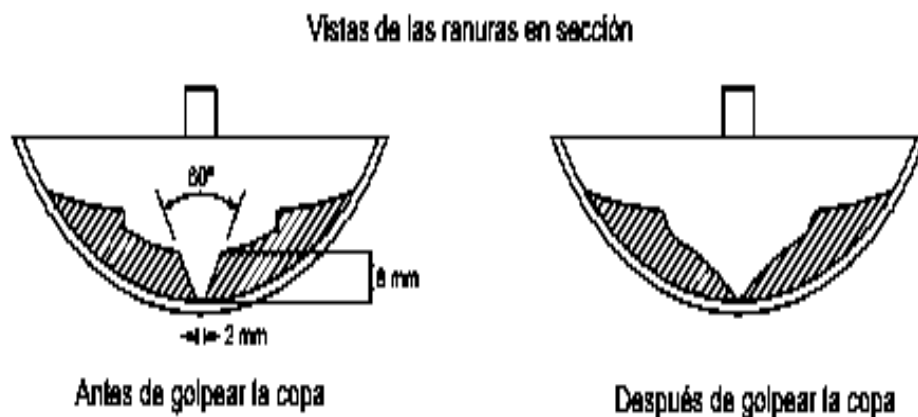
7.- Inmediatamente después de colado y ranurado el material, se acciona y nivela del aparato para hacer caer la copa a razón de dos golpes por segundo, y se registra el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm como se observa en la ilustración 27.



8.- Logrado lo anterior se toma con la espátula aproximadamente 10g de material de la porción cerrada de la ranura y para determinar su contenido de agua, de acuerdo con el procedimiento indicado con el manual M.MMP.1.04, Contenido de Agua, se colocan en un vidrio de reloj del que previamente se ha determinado su masa.

9.- Una vez que se ha tomado la porción requerida para la determinación del contenido de agua, el material restante se integra a la cápsula de mezclado, para lavar y secar la copa y el ranurador.

10.- Inmediatamente con el cuentagotas, se agrega agua al material en la cápsula y se homogeniza con la espátula; dicho material se prueba y se repite el paso anterior hasta completar cuatro determinaciones. La cantidad de agua que se adicione será tal que las cuatro determinaciones queden comprendidas entre 10 y 35 golpes en la copa de Casagrande, siendo necesario obtener dos valores por arriba y dos valores abajo de los 25 golpes, ya que para consistencias menores de 10 golpes es difícil identificar el momento de cierre de la ranura en la longitud especificada, y para más de 35 golpes se dificulta la ejecución de la prueba.



*Ilustración 27: Forma y dimensiones de la ranura, (Transporte, 2007)*

11.- Se grafican los puntos correspondientes a cada determinación, representando en el eje de las abscisas en escala logarítmica, el número de golpes  $n$  y en las ordenadas en escala aritmética, los respectivos contenidos de agua  $w_n$ . Se traza una línea recta que una aproximadamente los puntos graficados en esta recta se la llama, curva de fluidez. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2007)





### 3.1.1.4 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE PLÁSTICO.

Esta prueba nos sirve para conocer las características plásticas del material (arcilla que pasa la malla ASTM No. 40 (0.425 mm), cuyos resultados se utilizaron principalmente para identificar la clasificación del tipo de suelo. Las pruebas consisten en determinar el límite plástico o el contenido de agua para la cual un rollito se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm, este se considera como la frontera entre los estados plástico y semisólido. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico. Esta prueba se le realizó a la arcilla (testigo) como también, a la arcilla con sus adiciones en estudio yeso, fibra de nopal y sulfato de sodio. Para la evaluación y comparación de resultados con el testigo (De Leon Ambrocio, 2016).

#### **EQUIPOS Y MATERIALES**

El equipo necesario para efectuar esta prueba es la balanza, horno, desecador, cápsulas de porcelana, espátula, vidrios de reloj, placa de vidrio, y alambre de acero.

#### **PROCEDIMIENTO DE PRUEBA**

1.- De la fracción del material preparada de acuerdo con lo indicado en procedimiento de obtención del límite líquido, se toma una porción de tamaño tal que se pueda formar una pequeña esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro la que se moldea con los dedos para que pierda agua y se manipula sobre la palma de la mano para formar un cilindro.

2.- A continuación el cilindro se hace girar con los dedos sobre la placa de vidrio para reducir su diámetro, hasta que sea aproximadamente 3 mm en toda su longitud como se muestra en la ilustración 28. La velocidad será de 60 a 80 ciclos por minuto, entendiéndose por ciclo un movimiento de mano hacia adelante y hacia atrás, hasta volver a la posición de partida.





*Ilustración 28: Elaboración de cilindros del material en la determinación del límite plástico, (Ambrocio, 2016)*

3.- Si al alcanzar un diámetro de 3 mm no se rompe el cilindro en tres secciones simultáneamente, significa que su contenido de agua es superior al de límite plástico ( $w_p$ ). En tal caso se junta nuevamente el material para formar la pequeña esfera, manipulándola con los dedos para facilitar la pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma, repitiendo el procedimiento descrito en los dos pasos anteriores, hasta que el cilindro se rompa en tres segmentos precisamente en el momento de alcanzar dicho diámetro el cual se verifica comparando contra el alambre de referencia.

4.- Inmediatamente se colocan sobre un vidrio de reloj los fragmentos del cilindro y se determina el contenido de agua de este material, ( $w_i$ ), de acuerdo a la que especificado en el manual M.MMP.04, Contenido de agua. Para mayor seguridad de los resultados, la prueba se efectuara por triplicado, obteniendo para cada una de las determinaciones, el contenido de agua, ( $w_i$ ).

## **CALCULOS**

1.- Se reporta como resultado de esta prueba, el límite plástico ( $w_p$ ). Obtenido mediante la ecuación 1:





$$Wp = \frac{\sum w_i}{3}$$

Ecuación 1

Donde

$w_p$  = Límite plástico de la muestra; %, con aproximación a la unidad

$w_i$  = Contenido de agua para cada una de las tres determinaciones, %

2.- Si no es posible formar cilindros del diámetro especificado con ningún contenido de agua, se considera que el material no es plástico; se reporta como NP (no plástico). (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2007)

### **DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE PLÁSTICO ( $L_P$ )**

Una vez calculado el límite líquido y el límite plástico se determina el índice plástico mediante la ecuación 2:

$$L_P = W_L - W_p$$

Ecuación 2

Donde:

$L_P$  = índice plástico del material, %, con aproximación a la unidad.

$w_p$  = Límite pastico del material obtenido como se indica en el procedimiento de esta prueba, (%)

$w_L$  = Límite liquido del material obtenido como se indica en el procedimiento dela obtención de esta prueba. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2007)

#### **3.1.1.5 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN LINEAL Y VOLUMÉTRICA. ( $L_C$ Y $CL$ ).**

### **EQUIPO Y MATERIALES**

- Cápsula de evaporación de porcelana de 115 mm (4 1/2") y de 150 mm (6") de diámetro, aproximadamente.
- Espátula de 76 mm (3") de longitud y con 20 mm (3/4 ") de ancho.
- Recipiente para contracción o cápsula de porcelana o de metal monel (aleación de níquel y cobre) con una base plana y de 45 mm (1 3/4 ") de diámetro y 12.7 mm (1/2") de altura.





- Regla, de metal de 100 mm (4") o más de longitud.
- Recipiente de vidrio, con 50 mm (2 ") de diámetro y 25 mm (1") de altura, con bordes lisos y nivelados.
- Placa de vidrio, con tres patas metálicas salientes para sumergir la muestra de suelo en mercurio.
- Probeta, con capacidad de 25 ml y graduada cada 0.2 ml.
- Balanza, con precisión de 0.1 g.
- Mercurio, suficiente para llenar el recipiente de vidrio, hasta que rebose.
- Horno, termostáticamente controlado y que pueda conservar temperaturas constantes y uniformes hasta  $110 \pm 5$  °C ( $230 \pm 9$  °F), para secar la muestra. (Chavéz, 2000)
- Guantes de asbesto y caucho.

### **MUESTRA**

Tomar una muestra de 30 g aproximadamente de una porción de material completamente mezclado, que pase el tamiz ASTM No. 40 (0.425 mm).

### **PROCEDIMIENTO**

- La muestra se colocará y mezclará completamente con agua destilada en la vasija de evaporación de 115 mm de diámetro (4 1/2"), en forma suficiente para llenar completamente los vacíos del suelo y para hacerla lo suficientemente pastosa, de manera que sea fácilmente trabajable en la cápsula, evitando la formación de burbujas de aire. Para suelos friables, la cantidad de agua requerida para llegar a la consistencia deseada es igual o ligeramente mayor que el límite líquido; y para suelos plásticos, la cantidad de agua puede exceder en un 10% el límite líquido.
- El interior de la cápsula para contracción se revestirá con una capa delgada de cualquier grasa pesada, para evitar la adhesión del suelo al recipiente.
- Una cantidad de suelo húmedo igual o cercano a la tercera parte del volumen del recipiente de contracción será colocado en el centro de éste y se forzará a que fluya hacia los bordes siendo golpeado suavemente sobre una superficie firme, acolchonada por varias hojas de papel secante o un material similar como se observa en la ilustración 29. Una cantidad de suelo aproximadamente igual a la





primera porción, será agregada y el recipiente será golpeado hasta que el suelo esté completamente compactado y todo el aire incluido haya sido expulsado. Se agregará más suelo y se continuarán los golpes del recipiente hasta que éste se llene completamente y rebose por los lados. El exceso de suelo se quitará con la regla metálica y el suelo adherido a la superficie externa del recipiente se limpiará.

- Cuando se haya llenado el recipiente, se enrasa, se limpia y se pesa inmediatamente, se anota como peso del recipiente y del suelo húmedo (W1). Se dejará secar la masa de suelo en el aire, a temperatura ambiente, hasta que el color de la misma cambie de oscuro a claro. Luego ésta será secada en el horno a temperatura de  $110 \pm 5$  °C ( $230 \pm 9$  °F), hasta alcanzar peso constante; se pesará anotándose como peso del recipiente y del suelo seco (W2).

- Muestras que contengan materia orgánica o cuya constitución pueda alterarse a la temperatura especificada, se secarán a 60 °C (140 °F).

- La capacidad del recipiente de contracción, en  $\text{cm}^3$ , la cual es también el volumen de la masa de suelo húmedo, se determinará llenando el recipiente con mercurio hasta rebosar eliminando el exceso, haciendo presión con la placa de vidrio sobre la parte superior del recipiente o cápsula, y midiendo el volumen de mercurio retenido en este, con la probeta graduada. Se anotará como volumen de la masa de suelo húmedo.

El volumen de la masa de suelo seco será determinado de la siguiente manera:

- El recipiente de vidrio se llenará de mercurio hasta rebosar y el exceso de mercurio deberá removerse presionando firmemente la placa de vidrio con tres salientes sobre la parte superior del recipiente.

- Cualquier porción de mercurio que se derrame, la cual puede quedar adherida a la parte externa del recipiente se limpiará cuidadosamente. El recipiente lleno de mercurio se colocará en la vasija de evaporación de 150 mm (6") y la probeta de suelo se colocará sobre la superficie del mercurio. Esta será forzada cuidadosamente para sumergirla en el mercurio por medio de la placa de vidrio con las tres salientes, presionándola firmemente sobre el recipiente.





- Es esencial que no quede aire atrapado bajo la probeta de suelo. El volumen de mercurio que ha sido desplazado se medirá en la probeta graduada y se anotará como el volumen de suelo seco ( $V_0$ ).
- Después de ser limpiado, se pesará el recipiente de contracción y se anotará su peso ( $W_3$ ) (Chavéz, 2000).



*Ilustración 29: Llenado de la cápsula para la obtención de contracción volumétrica, y sumergido de la muestra seca en el mercurio para la obtención de su densidad. (Ambrocio, 2016)*

## **CÁLCULOS**

### **CÁLCULO DEL CONTENIDO DE AGUA**

El contenido de agua del suelo en el momento en que éste fue colocado en el recipiente, expresado como un porcentaje del peso seco del suelo, se calculó con la ecuación 3:

$$W = 100 \times \frac{W_1 - W_2}{W_2} \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo:

$W$  = Contenido de agua del suelo (g)



$W_1$  = masa de suelo húmedo y el recipiente (g).

$W_2$  = masa de suelo seco y el recipiente (g).

$W_3$  = masa del recipiente (g).

Se calculará el contenido de agua con una aproximación de 0.1 (en el porcentaje)

### **CÁLCULO DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA.**

El límite de contracción volumétrica (LC) se calculó con la ecuación 4:

$$L_c = W - \frac{(V_h - V_s)\gamma_w}{100} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

LC = Límite de contracción (%)

W = Contenido de agua en el momento que fue moldeada (%)

$V_h$  = Volumen de la pastilla de suelo húmedo,  $\text{cm}^3$  (ml)

$V_s$  = Volumen de la pastilla de suelo secada al horno,  $\text{cm}^3$ (ml)

$W_s$  = masa del suelo seco (g)

$\gamma_w$  = densidad del agua ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

El límite de contracción se calculará con una aproximación de 0.01 en el porcentaje.  
(Chavéz, 2000)

### **CÁLCULO DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN LIENAL.**

El límite de contracción de un suelo se define como el contenido mínimo de agua, por debajo del cual una reducción de la cantidad de agua, no causará una disminución de volumen de la muestra de suelo, pero al cual un aumento en el contenido de agua causará un aumento en el volumen de la masa de suelo. (Chavéz, 2000). En la ilustración 30 se muestra en llenado del molde y medición de le material en estado seco.





*Ilustración 30: Llenado de cápsula para obtención de la contracción lineal y medición final de la muestra seca que determinación la contracción del material. (Ambrocio, 2016)*

## CÁCULOS

Los resultados se obtuvieron con la ecuación 5

$$CL = \left( \frac{L_i - L_f}{L_i} \right) 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

DONDE:

CL= Contracción Lineal, en (%)

$L_i$ = Longitud Inicial de la barra del suelo húmedo, en (cm)

$L_f$ = Longitud Final, medida de la barra del suelo seco, en (cm)

### 3.1.2 YESO

El yeso utilizado en la investigación fue de la marca Tolteca el cual se compró en una distribuidora de materiales en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. El cual se utilizó como aditivo en un 6% en relación a la masa de la arcilla sin alterar sus características físicas, ni químicas, es decir, el yeso se utilizó tal como se adquirió de la empresa distribuidora. Las características se presentan en la siguiente ficha técnica (De Leon Ambrocio, 2016).



## DATOS TECNICOS DE USG YESO PARA LA CONSTRUCCIÓN

El yeso para construcción Supremo USG es ideal para el recubrimiento de superficies de ladrillo, concreto o block, cubre las imperfecciones y deja un acabado terso y uniforme. También puede usarse como base para recibir acabados texturizados, pintura o tapiz. Tiene un tiempo abierto de 45 minutos, esta característica permite al yesero cubrir lienzos más grandes y tener el tiempo suficiente para dar el acabado final de su obra, sin menoscabo en la calidad de su trabajo. (USG, 2008)

La finura del material asegura el tener superficies con acabados suaves sin necesidad de dar retoques por “rayaduras”. El color blanco del material permite aplicar pintura o recubrimientos en forma inmediata.

Debido a su baja absorción de humedad es recomendado para su uso en zonas con alto índice de humedad relativa.

### Ventajas

Es un yeso de fraguado medio, con tiempos abiertos y de plasticidad largos, que le dan una excelente manejabilidad y fácil instalación, permitiendo cubrir grandes áreas con una sola mezcla, ahorrando tiempo de aplicación. Su grano fino, permite dejar la superficie tersa y lisa, sin necesidad de retocar por ralladuras. Su color blanco le da una apariencia superior. Yeso Supremo es muy seguro al usarse, ya que no es tóxico, ni combustible y no requiere cuidados especiales para su preparación o manejo. (USG, 2008)

### Propiedades Físicas Típicas

#### Sulfato de Calcio Hemi Hidratado

Color:	Blanco
Granulometría en malla 100:	93.56%
Consistencia de uso (proporción de agua por bulto de yeso)	
Saco de 40 kg:	40 a 50 Lt.
Saco de 25 kg:	25 a 30 Lt.





Tiempo abierto:	45 min
Rendimiento a 1 cm de espesor:	8.5 kg/m <sup>2</sup>
Resistencia a la compresión (en seco):	41 kgf/cm <sup>2</sup>
Presentación:	40 kg y 25 kg

## YESO PARA CONSTRUCCIÓN

Instrucciones de Uso. Prepare la superficie sobre la que se aplicará el yeso. Si es block, ladrillo o mortero, humedezca la superficie y quite los excesos de material (rebabas).

Vacíe agua limpia en una cubeta o en un cajón de madera en proporción al yeso a usar.

Espolvoree el yeso sobre el agua hasta cubrirla totalmente.

Permita la hidratación del yeso y su asentamiento en el fondo de la cubeta o del cajón.

Dependiendo del tiempo de fraguado que se busque puede batir el producto (con “diablo” o con la mano), por 1 minuto aprox. En este caso, el tiempo para trabajar la mezcla será más corto, por lo que se recomienda preparar únicamente la cantidad que se vaya a aplicar en ese tiempo.

Otro procedimiento, es esperar a que el yeso se hidrate y adquiera una consistencia pastosa. Con una espátula tome esta pasta y dépositela sobre una llana o una talocha y aplíquela sobre el muro hasta adquirir el grosor deseado. En este caso, el tiempo para trabajar esta mezcla será de 45 min. Aproximadamente.

Después de unos minutos, aplique una capa adicional para dar el acabado fino.

Deje fraguar el yeso sobre la superficie. (USG, 2008)

## Precauciones

En climas fríos la temperatura mínima del agua a usar será de 15°C.







Una vez aplicado el yeso en la superficie a cubrir, deberá existir una apropiada ventilación para eliminar el exceso de humedad. La superficie no deberá pintarse, ni aplicarse un acabado hasta que el yeso esté totalmente seco.

No debe ser aplicado sobre superficies que pudieran estar falsas o que contengan sales (salitre), pintura vieja, yeso flojo o mal adherido o impermeabilizante.

Antes de ser utilizadas sobre superficies de concreto nuevo, éste debe tener 60 días mínimo de haber fraguado, removiendo partículas, protuberancias, grasas, aceite o eflorescencias. Se recomienda humedecer la pared para evitar que ésta absorba humedad de la mezcla y provoque cuarteaduras. (USG, 2008)

### 3.1.3 FIBRA DE NOPAL

La utilización de fibra de nopal en estado deshidratado para esta investigación fue de 0.5% con relación a la masa de la arcilla, esta fibra se implementó en forma de aditivo al mortero base arcilla con el objetivo de mejorar sus características físico-mecánicas, sin la modificación de sus características físicas, es decir, se usó tal cual se adquirió de la empresa distribuidora del producto, el cual fue adquirido por el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH. (De Leon Ambrocio, 2016)

#### **Alternativas de utilización**

Con el nombre de nopal, se asocian cultivos que no requieren de grandes cantidades de agua y desarrollan bajo condiciones que para los cultivos tradicionales sería imposible hacerlo, sin embargo, diversas especies de nopal (*Opuntia spp.*) desarrollan en forma óptima, de tal manera que puede ser aprovechado como verdura, forraje, tuna, y aprovechándose en sus diferentes formas como lo son: en escabeche, gelatina, dulces, tortillas, galletas, he incluso deshidratados y molidos en forma de harina, aparte su uso en la industria cosmetológica como crema, shampoo, mascarillas, etc, que por ser productos naturales y su inocuidad en salud pública pueden ser perfectamente aprovechados. (Hernández M. S., 2013)

#### **Maneras básicas de utilizar el nopal**

##### **Alimentos**





- Ensaladas.
- Sopas y cremas.
- Guisados.
- Bebidas.
- Postres.
- Otros

Industrialización (Elaboración de conservas)

- Conservación de alimentos.
- Proceso de esterilización.
- Alimentos.
- Cosméticos.
- Farmacia. (Hernández M. S., 2013)

### 3.1.4 SULFATO DE SODIO

El sulfato de sodio deshidratado que se utilizó para el desarrollo de esta investigación no se sometió a ninguna prueba de ningún tipo; cabe mencionar que el porcentaje requerido fue de 0.5 % en relación a la masa de la arcilla. El sulfato de sodio utilizado fue adquirido de empresas distribuidoras de este material en la ciudad de Morelia por el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH. Las principales características del este material se describen en la siguiente ficha técnica.

<b>SULFATO DE SODIO (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</b>	
Nombre Comercial	: Sulfato de Sodio
Sinónimos	: Sulfato disodio, sal disodio, Sulfato sódico
Formula Química	: (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
Peso Molecular	: 142.04 g/mol
Uso	: Utilizado como desecante en el laboratorio o la industria química. Se utiliza en la fabricación de la celulosa y como aditivo en la fabricación de vidrio.
Identificación de la	<a href="http://www.eindustria.com/archivos_empresa/3085ab8282c11e2">http://www.eindustria.com/archivos_empresa/3085ab8282c11e2</a>





Empresa	4d16615bfa9c8816b.pdf
Número Telefónico	: PBX. (572) 321 8200- 711: Emergencias Médicas 555: Servicios Generares

### identificación de los peligros

Identificación de Riesgos	: CRISTALES BLANCOS, INODORO. Este producto puede causar leve irritación el ser inhalado, ingerido y por contacto con la piel y ojos. Su principal efecto es diarreico, cuando es ingerido. La sustancia se descompone por sobrecalentamiento formado por gas toxico (Dióxido de Azufre).
síntomas relacionados con la explosión	
inhalación	: Irritación. No se espera que sea peligroso para la salud
contacto con los ojos	: puede causar irritación
Contacto con la piel	: Irritación. No se esperan efectos adversos
Ingestión	: Diarrea. Levemente tóxico.

### COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

Nombre del componente	porcentaje % molar	C.A.S
Sulfato de Sodio	99% mín	7757-82-6

### 3.1.5 AGUA

En este caso no se alteraron las características del agua ya que la utilizada para el desarrollo de la investigación fue agua potable, basándonos en la norma (NMX-C-122-ONNCCE, 2004) que nos establece los límites permisibles y condiciones que el agua debe de cumplir para poder ser utilizada. En este caso el agua usada proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

El agua se tomó tal y como llega a las instalaciones para así realizar las mezclas lo más apegado a las condiciones de campo. (De Leon Ambrocio, 2016)





## 3.2 PRUEBAS REALIZADAS A LAS MEZCLAS EN FRESCO

### 3.2.1 FLUIDEZ

Debido a que no existe una norma que nos especifique el desarrollo de la prueba de fluidez para las mezclas de arcilla, se toma como referencia la prueba de fluidez en morteros (NMX-C-144-ONNCCE, 2010) , para así obtener el objetivo principal de esta prueba que es: obtener la cantidad de agua necesaria para que la mezcla sea manejable y plástica. Cabe mencionar que esta prueba solo se realizó para la mezcla testigo (solamente arcilla), y las mezclas con los aditivos yeso fibra de nopal y sulfato de sodio fueron elaboradas con las mismas cantidades de agua resultantes en esta prueba. El procedimiento e indicaciones de la prueba se mencionan a continuación como lo marca la norma (NMX-C-144-ONNCCE, 2010). (De Leon Ambrocio, 2016).

“Esta norma es aplicable al equipo que se utiliza para la determinación de la trabajabilidad de las pastas y morteros cementantes hidráulicos, mediante la medición del incremento de diámetro de la mezcla sobre la mesa, después de que esta ha sido operada para dar un número determinado de caídas el cual está especificado en el método de ensayo aplicable” (NMX-C-144-ONNCCE, 2010)

#### **Definiciones**

Se establecen una serie de definiciones, las cuales se describen a continuación.

Marco: Soporte metálico de forma piramidal perpendicular a su base con un barreno en el centro que sirve para sostener y guiar la caída de la flecha de la mesa.

Mesa: Plato metálico circular con una flecha perpendicular atornillada al centro que sirve para expandir un cono de mortero mediante un número de caídas dadas sobre el marco.

Mesa de fluidez: Se refiere al conjunto de la mesa montada sobre el marco y con todos los accesorios para que la mesa pueda ser activada para elevarse y caer sobre el marco.





Pedestal: Monolito de concreto de forma de pirámide cuadrangular truncada, con una placa metálica que descansa anclada en su cara superior y sobre la cual se fija la mesa de fluidez.

### **Equipo**

Marco y mesa de fluidez: La mesa de fluidez consiste de un marco de acero vaciado de una sola pieza y un plato circular, las dimensiones de la mesa es de  $254 \text{ mm} \pm 2.5 \text{ mm}$  de diámetro que tiene una flecha atornillada perpendicularmente en la parte inferior y al centro. La flecha se atornilla en la mesa hasta que esta tope con el anillo de contacto de la flecha. La mesa y la flecha deben ser montadas sobre el marco de acero vaciado de tal manera que pueda levantarse y caer verticalmente por medio de una leva. La altura de caída de la mesa debe de ser de  $13 \text{ mm} \pm 0.13 \text{ mm}$  para mesas nuevas y de  $13 \text{ mm} \pm 0.39 \text{ mm}$  para mesas en uso. La superficie superior de la mesa debe tener un acabado terso libre de poros o imperfecciones y tener un grabado. La mesa debe de ser de bronce o latón vaciado con una dureza Rockwell no menor de 25 HRB y un espesor de 8 mm, así como 6 costillas radiales de refuerzo. La mesa con flecha debe tener un peso de  $4.2 \text{ kg} \pm 0.05 \text{ kg}$  distribuido uniformemente alrededor de la flecha.

La leva y la flecha de la mesa deben ser de acero al carbón para maquinaria. La flecha debe estar perfectamente recta y la diferencia entre el diámetro de la misma y el diámetro del orificio del marco no debe de ser menor de 0.05 mm ni mayor de 0.08 mm para mesas nuevas, o de 0.05 mm a 0.25 mm para mesas en uso. El extremo libre de la mesa no debe de caer sobre la leva cuando realice un ensayo, pero debe permanecer en contacto con ella no menos de  $120^\circ$  desde el punto de contacto hasta el punto de caída. La cara de la leva debe ser de una curva suave en espiral, la cual se incrementa uniformemente de un radio de 13 mm a 32 mm en  $360^\circ$ , cuando la flecha toque la leva en el proceso de una caída, no debe producirse un movimiento brusco. La leva debe de estar colocada de tal forma que el contacto con la flecha durante 25 caídas no produzca más de una vuelta de la mesa. Las superficies del marco y de la mesa que se ponen en contacto al final de cada caída, deben mantenerse suaves, planas, horizontales y paralelas con la superficie superior de la mesa, y deben hacer contacto completamente en los  $360^\circ$ .





El marco de la mesa debe ser de fierro vaciado de grano fino, reforzado con 3 costillas de soporte localizadas en la base circular del marco y separadas a  $120^\circ$  una de otra, cada costilla se debe de extender desde la base hasta lo alto del marco. La parte superior del marco debe ser templada con una profundidad de 6.4 mm, la cara debe ser esmerilada y plana de modo que quede en ángulo recto con el barreno para dar un contacto a  $360^\circ$  con el anillo de la flecha, el cual debe estar esmerilada para asegurar un contacto total entre ambas caras.

La mesa puede ser accionada de manera manual o por un motor, conectado a la flecha de la lleva a través de un reductor de velocidad y un cople flexible. La velocidad de la leva debe ser de aproximadamente 100 revoluciones por minuto, si es accionada por un motor, si es accionada de manera manual, debemos de cumplir 25 revoluciones en 15 segundos. El mecanismo de transmisión del movimiento del motor no debe ser sujetado o montado sobre la placa de acero de la base o sobre el marco. Ha sido encontrado que un motor de 0.3 W es adecuado para cumplir con esta función (NMX-C-144-ONNCCE, 2010), (ASTM-C-230, 2014).

Montaje de la mesa de fluidez: El marco de la mesa de fluidez debe fijarse a una placa cuadrada de acero o fierro vaciado de por lo menos 25 mm de espesor y 250 mm por lado. La superficie superior de esta placa debe ser maquinada para dar una superficie plana y lisa. La placa debe ser anclada en la parte superior de un pedestal de concreto por medio de 4 anclas de 13 mm de diámetro que atraviesan la placa y que son embebidas en el pedestal de concreto por lo menos 150 mm. El pedestal es vaciado en forma invertida sobre la placa. Debe haber un contacto total en todos los puntos de la placa base y el pedestal. No se deben usar objetos de ningún tipo entre la placa base y el pedestal. La nivelación de la mesa se realiza en la base del pedestal, utilizando los medios y objetos adecuados.

El pedestal se construye de concreto teniendo un peso volumétrico de  $2\ 240\ \text{kg/m}^3$  con una forma de pirámide truncada de base cuadrada con dimensiones de 375 mm a 400 mm de lado y en la parte superior de 250 mm a 275 mm de lado, debe contar con una altura de 625 mm a 750 mm. El pedestal se asienta en una hoja de corcho cuadrada con un espesor de 13 mm y del tamaño de la base de concreto o sobre 4 piezas cuadradas de corcho de un espesor de 13 mm y de 100 mm de lado colocadas en las esquinas de la base del pedestal.





El nivel del plato de la mesa de fluidez se verifica frecuentemente, así como la estabilidad del pedestal, el apriete de las tuercas en las anclas de la placa base y el apriete de los tornillos del marco sobre la placa base. Se recomienda un torque de 27 N-m cuando se aprietan estas tuercas y tornillos.

La parte superior del plato, después de que el marco ha sido montado sobre el pedestal, se nivela a lo largo de dos diámetros a 90° uno del otro, en ambas posiciones, con el plato levantado y en su posición de descanso (NMX-C-144-ONNCCE, 2010), (ASTM-C-230, 2014).

Lubricación de la mesa de fluidez: La flecha del plato se debe mantener limpia y ligeramente lubricado con un aceite ligero (SAE-10). No debe haber aceite entre las caras de contacto de la mesa y el marco. El poner aceite en la cara de contacto de la leva y el barreno del marco disminuye el desgaste y ayuda a una operación suave. A mesa debe activarse y dejar que de una docena de caídas antes de ser utilizada por primera vez o si esta no se ha utilizado por algún periodo largo de tiempo (NMX-C-144-ONNCCE, 2010), (ASTM-C-230, 2014).

Molde troncocónico: El molde debe ser de bronce o latón vaciado. La dureza Rockwell no debe ser menor de 25 HRB. La altura del molde debe ser de 50 mm  $\pm$  0.5 mm. El diámetro superior interno debe ser de 70 mm  $\pm$  0.5 mm para moldes nuevos y de 70 mm + 1.3 mm y - 0.5 mm para moldes en uso. El diámetro inferior interno debe ser de 100 mm  $\pm$  0.5 mm para moldes nuevos y de 100 mm + 1.3 mm y - 0.5 mm para moldes en uso. Las superficies de la base y de la parte superior del molde deben estar paralelas y en ángulo recto respecto al eje vertical del cono. El espesor mínimo de la pared del molde es de 5 mm. La parte externa superior del molde debe tener un collar formado durante el proceso de vaciado y maquinado del molde, este debe ser adecuado para permitir un levantamiento seguro del mismo. Todas las paredes deben ser maquinadas para que se tenga una superficie lisa final. Una lámina de forma de aro circular con un diámetro exterior aproximado de 250 mm e interior de 100 mm, elaborada de un material no absorbente ni atacable por el cemento, se puede utilizar con el molde para evitar que el norte caiga sobre la mesa cuando se está colocando (NMX-C-144-ONNCCE, 2010), (ASTM-C-230, 2014).





Vernier: Se utiliza para medir el diámetro del mortero cuando este ha sido extendido por el movimiento de la mesa de fluidez, Las líneas de la escala deben ser grabadas por maquinado de la superficie, la construcción y exactitud del instrumento debe ser tal que la distancia entre las tenazas sea de  $100 \text{ mm} \pm 0.25 \text{ mm}$  cuando el indicador se coloque en la lectura de cero. El Vernier está graduado para indicar un cuarto del dato correspondiente de la fluidez obtenida, de modo que la suma de cuatro mediciones es el resultado del valor del porcentaje de fluidez. No es necesaria ninguna otra operación (NMX-C-144-ONNCCE, 2010), (ASTM-C-230, 2014).

### **PROCEDIMIENTO DE PRUEBA**

La prueba consiste en llenar el molde troncocónico, sobre el plato circular, es decir sobre la mesa de fluidez, el llenado se hace en dos capas, agregando a cada una de estas la mitad del volumen del molde aproximadamente, después del llenado de la primera capa se le dan 25 golpes con el pisón a la mezcla distribuidos en toda la superficie. Después se procede a llenar la segunda capa teniendo cuidado en dejar un sobrante de mezcla sobre la parte superior, después se le dan a ésta capa otros 25 golpes con el pisón, posteriormente se enrasa el molde ayudándose de una espátula, cuchara de albañil o similar, se retira el molde, mediante el uso de la manivela el plato circular se levanta y se deja caer súbitamente, esta operación se repite varias veces, debe hacerse un total de 15 veces en un tiempo aproximado de 15 segundos. La medición del diámetro final se hace después de que la mesa ha sido sometida a una serie de caídas por medio de una hélice truncada que la levanta y la deja caer súbitamente. El diámetro final se mide con un vernier apropiado para realizar dicha operación.

### **3.2.2 POTENCIAL DE HIDRÓGENO**

La prueba de “potencial de Hidrógeno” (pH) se realizó por medio del PHmetro y tiras reactivas mientras la mezcla se encontraba en estado fresco como se muestra en la figura 31 y 32. Se sabe que los resultados de pH para las mezclas de mortero base cemento oscilan entre 12 a 13, como lo especifica la norma ASTM D 6276 (De Leon Ambrocio, 2016).







Ilustración 31: Determinación del potencial de hidrogeno (PH) con tiras reactivas, (De Leon Ambrocio, 2016)



Ilustración 32: Determinación del potencial de Hidrogeno (PH) con PHmetro, (De Leon Ambrocio, 2016)



### 3.2.3 TEMPERATURA

Esta prueba se realizó en estado fresco de las mezclas, para poder comparar los resultados con la mezcla testigo y observar los cambios de temperatura que sufre la arcilla al agregarle un aditivo de los analizados en esta investigación. Se utilizó un termómetro infrarrojo para realizar estas lecturas sin afectar la mezcla por el posible tiempo que tarda un termómetro normal de mercurio en registrar la temperatura. (De Leon Ambrocio, 2016)

### 3.2.4 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

Debido a que no existe una norma que contenga las especificaciones para la elaboración de especímenes de arcilla nos apegamos a las especificaciones de la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004) de la Industria de la construcción - Concreto - Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio. La cual se describe a continuación.

Los moldes y los accesorios para elaborar los especímenes de concreto deben ser de acero, fierro fundido, o de cualquier otro material no absorbente y no reactivo con el cemento Portland u otros cementantes hidráulicos. Los moldes deben cumplir con las dimensiones y tolerancias que se especifican en la norma y deben mantener las dimensiones y sus formas bajo condiciones de trabajo severas. Deben ser no permeables durante su empleo y si es necesario se puede usar materia de sello por la parte externa con el fin de evitar fugas de agua por las juntas, tal como grasa, plastilina o parafina. Deben estar provistos de los elementos necesarios para fijarlos firmemente en sus bases. A los moldes de uso repetitivo se les debe aplicar un desmoldante que facilite el trabajo. (NMX-C-159-ONNCCE, 2004)

### **VARILLAS PARA LA COMPACTACIÓN**

Según el tipo de prueba se especifican dos tamaños de varillas; cada una debe consistir en una barra lisa cilíndrica de acero, cuando menos con un extremo semiesférico, de diámetro igual al de la barra. Si se prefiere, los dos extremos pueden ser redondeados. (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).





- VARILLA LARGA: Consiste en una barra lisa de 16 mm  $\pm$  1.5 mm de diámetro y 600 mm  $\pm$  30 mm de longitud.
- VARILLA CORTA: Consiste en una barra lisa de 10 mm  $\pm$  1 mm de diámetro y aproximadamente 300 mm  $\pm$  15 mm de longitud.

### **HERRAMIENTA AUXILIAR**

Se debe contar con herramientas auxiliares, tales como palas, recipientes, llanas, enrasadores, cucharones, reglas, guantes de hule, mazo con cabeza de hule y charolas de lámina (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).

### **EDAD DE PRUEBA DE LOS ESPECÍMENES**

Las edades de prueba comúnmente empleadas son: 7 días y 28 días para las pruebas de resistencia a la compresión, o 14 días y 28 días para la de resistencia a la flexión. Los especímenes elaborados con cemento de resistencia rápida, se prueban frecuentemente a 1 día, 3 días, 7 días, 14 días y 28 días de edad. Para las pruebas de resistencia a la compresión y a la flexión de materiales elaborados con cemento convencional, las edades de prueba son mayores, realizándose las pruebas a edades de 3 meses, 6 meses y 12 meses. En este proyecto las edades de prueba fueron 150, 180 y 220 días. Para otros tipos de especímenes se pueden requerir otras edades (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).

### **CONDICIONES AMBIENTALES**

Este método de prueba se realiza de acuerdo a las condiciones ambientales del lugar en el que se ejecutan las pruebas, sin embargo se debe evitar la evaporación excesiva de agua y cumplir con lo que especifican los métodos de curado y descimbrado.

#### **3.2.4.1 CUBOS**

En el proceso de elaboración de los cubos de mortero a base de arcilla nos apegamos a la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004) haciendo referencia a “Industria de la construcción - Concreto - Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio”, se realizaron algunas modificaciones en la forma de vibrar el material para la expulsión de burbujas de aire. Se recubrieron los moldes con un desmoldante





(grasa), esto con la finalidad de evitar que el mortero se adhiera a las paredes del molde, y así tener una sencilla tarea al retirar el molde sin que sufran daños los especímenes. Para lograr esto se empleó aceite para transmisión mezclado con diésel en cantidad menor al aceite, para que la mezcla quedara en un punto balanceado de viscosidad.

Después de haber engrasado los moldes para la elaboración de los cubos, se debe tener preparada la mezcla para la elaboración de los mismos. El llenado se realiza en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM-C-109, 2016), en cada capa de mortero, y antes llenar la siguiente capa, se le dan seis pisones en la superficie, distribuyéndolos en diferente sentido. El pisón es de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5 cm x 1.25 cm, también se vibra golpeando el molde con la mesa de trabajo en 15 repeticiones para expulsar las burbujas de aire esto se hizo en cada capa, luego se le golpea con el martillo de goma en las caras laterales del molde, proporcionando 5, 4, 3 y 2 golpes para la primera, segunda, tercera y cuarta capa respectivamente, después de haberse realizado el llenado de la última capa se debe tener cuidado de dejar un exceso de mezcla en la superficie, esto para posteriormente engrasar el cubo utilizando una espátula o algo similar.

Después de haber elaborado los cubos, se dejan fraguar hasta las correspondientes edades de prueba; por la lenta pérdida de humedad de la arcilla se dejaron alrededor de 9 días para poder desmoldar los cubos, una vez hecho esto se realizaron las pruebas no destructivas. En la superficie de cada cubo (cara de colado) se marcó la nomenclatura correspondiente (esto se hizo con todos los especímenes, cubos, cilindros, prismas y briquetas); la nomenclatura se conforma por la fecha de colado y mezcla del espécimen (aditivo, porcentaje y material).

Al terminar el proceso descrito anteriormente, se limpiaron, armaron y engrasaron los moldes, esto nos permite elaborar nuevos especímenes de manera ipso facta; esto se realizó de manera cíclica hasta que se terminaron de elaborar el total de especímenes requeridos.





Se elaboraron 24 especímenes por cada mezcla, de los cuales se probaron 5 por edad para las pruebas físico-mecánicas y los restantes para la prueba de porosidad por absorción capilar (método de Fagerlund), la misma cantidad de especímenes fueron elaborados para cada mezcla: arcilla (testigo), arcilla con el 6% de yeso, fibra de nopal en un 0.5%, sulfato de sodio en un 0.5%, estos últimos utilizados como aditivos. Las edades de prueba tanto para las pruebas destructivas como no destructivas fueron 150,180 y 220 días. La prueba de porosidad por absorción capilar fue a los 250 días.

### 3.2.4.2 CILINDROS

De igual manera que para los cubos, para la elaboración de estos especímenes se siguieron las especificaciones de la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), "Industria de la construcción - Concreto - Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio". Se elaboraron 24 cilindros con dimensiones de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura para cada una de las mezclas, se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma para su fabricación (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).

Para la elaboración de cilindros se sigue el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de cubos, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de motero correspondiente.

El llenado de cilindros se realizó en tres capas de igual espesor (aproximadamente), se proporcionó a cada capa 25 golpes con una varilla punta de bala de 1/4" de diámetro. Después de haberles aplicado la segunda capa y haberlos llenado, se enrasaron utilizando la varilla punta de bala, en cada capa se vibró golpeando el molde con la mesa de trabajo en 15 repeticiones para expulsar las burbujas de aire retenidas.

Se elaboraron 20 especímenes de los cuales se probaron 5 por edad, fue la misma cantidad de especímenes elaborados para cada mezcla arcilla (testigo), arcilla con el 6% de yeso, fibra de nopal en un 0.5%, sulfato de sodio en un 0.5%, estos últimos utilizados como aditivos. Las edades de prueba tanto para las pruebas destructivas como no destructivas fueron 150,180 y 220 días.





### 3.2.4.3 PRISMAS

De igual manera que los cubos para la elaboración de los especímenes prismáticos se siguieron las especificaciones de la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004) de la Industria de la construcción - Concreto - Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio. Se elaboraron 24 prismas con dimensiones de 4 cm x 4 cm x 16 cm para cada una de las mezclas, se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma para su fabricación (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).

El procedimiento para la elaboración de prismas se describió en la elaboración de cubos, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de motero correspondiente.

El llenado de prismas se hace en dos capas de igual espesor (aproximadamente), a cada capa se le proporcionaron de 12 golpes con el mismo pisón (de acrílico) que se utiliza para la elaboración de especímenes cúbicos, al igual que en el procedimiento de los cubos, los golpes se dieron en diferente sentido a cada capa y en cada capa se vibró golpeando el molde con la mesa de trabajo en 15 repeticiones.

Después de haber elaborado los prismas con la mezcla correspondiente, se dejan a temperatura ambiente para que pierdan humedad, se espera 9 días para poder llevar acabo el desmoldado de los primas. En la superficie de cada prisma (cara de colado) se marcaron con una pluma la nomenclatura correspondiente, la nomenclatura contiene la fecha de colado, mezcla del espécimen (aditivo, porcentaje y material); se realizan las pruebas no destructivas (medición de lados, humedad, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad) posteriormente se colocan en lugar limpio y a temperatura ambiente para realizar las pruebas destructivas correspondientes.

### 3.2.4.4 BRIQUETAS

Se elaboraron 24 muestras (briquetas), para cada una de las mezclas. El procedimiento de elaboración consiste en colocar el molde de bronce que se utiliza para la elaboración de briquetas en una superficie de cristal previamente engrasada





para evitar que la mezcla se adhiera; el llenado consiste en llenar el molde en dos capas, comprimiendo la mezcla con las dedos pulgares, procurando que sean 25 compresiones por lado de la briqueta como se observa en la ilustración 33, y enrasando con la ayuda de una espátula. El desmoldado es inmediato, una vez elaborado las briquetas para las mezclas correspondientes de deja fraguar a temperatura ambiente durante tres días para que pierda la humedad necesaria y así poder retirarlas del cristal para marcarlas con la nomenclatura correspondiente y esperar las fechas de pruebas especificadas, las cuales fueron 150, 180 y 220 días. Cabe mencionar que estas muestras son sometidas solo a pruebas destructivas (tensión directa).



*Ilustración 33: Elaboración de briquetas, (De Leon Ambrocio, 2017)*

### 3.3 PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO ENDURECIDO

Estas pruebas se realizaron a todos los especímenes de cada mezcla, las cuales podemos clasificar en dos pruebas: no destructivas y destructivas. La primera se realizó dos veces, a los especímenes en húmedo es decir, cuando se desmoldaron y en la fecha de prueba establecida. Las pruebas destructivas se realizaron a las edades de 150,180 y 220 días.



### 3.3.1 NO DESTRUCTIVAS

Las pruebas no destructivas realizadas son: Resistividad eléctrica, Velocidad de Pulso Ultrasónico y humedad actual, dichas pruebas se hacen a los especímenes endurecidos. Una vez terminada estas pruebas los especímenes están listos para pasar a la siguiente prueba que son las pruebas destructivas.

#### 3.3.1.1 OBTENCIÓN DE DIMENSIONES

Este procedimiento se realiza antes de efectuar toda prueba, ya que con esto observamos las contracciones que van sufriendo los especímenes, también es dato importante para la obtención de parámetros futuros realizados con las pruebas tanto destructivas como no destructivas. Este procedimiento consiste en medir con el vernier las caras laterales de los especímenes como se observa en la ilustración 34, registrando posteriormente las medidas obtenidas.



*Ilustración 34: Obtención de medidas de las caras laterales de los especímenes, (Ambrocio, 2016)*





### 3.3.1.2 HUMEDAD

La obtención de humedad de los especímenes se obtuvo con el equipo del laboratorio de materiales con el propósito de saber el porcentaje de humedad que contenían los especímenes en la fecha de prueba, y así poder comparar los resultados obtenidos de las pruebas no destructivas y destructivas en las diferentes condiciones de humedad. El procedimiento de la obtención del porcentaje de humedad en los especímenes consistió en colocar, ejerciendo presión, las extremidades del equipo en los especímenes, operar el equipo y registrar los resultados obtenidos como se observa en la ilustración 35. Esta prueba se realizó a cada uno de los especímenes de las mezclas, a la misma edad en que se realizaron las pruebas destructivas y no destructivas.



*Ilustración 35: Obtención del porcentaje de humedad de los especímenes, (De Leon Ambrocio, 2016)*

### 3.3.1.3 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La resistividad eléctrica se clasifica como una prueba no destructiva que se realiza a los especímenes cúbicos, cilíndricos y prismáticos, de las diferentes mezclas. Las



mediciones de esta prueba se llevaron a cabo con un equipo llamado “Resistómetro” que nos proporciona el Laboratorio de Materiales lugar donde se realizó el proceso experimental de esta investigación; dicho equipo mide la resistencia eléctrica en suelos y materiales porosos.

### **Procedimiento**

- Se toman las medidas de los especímenes previamente
- Se monta la muestra en el Resistómetro.
- Se colocan las caras laterales del espécimen entre dos placas de cobre y entre estas unas esponjas húmedas que cubran todo la superficie de la cara en contacto (para crear continuidad). Sobre la placa de cobre superior se coloca un contrapeso para conseguir que la placa no sea movida durante la prueba.
- Mediante la fuente y a través de las placas de cobre se hace circular una corriente eléctrica.



*Ilustración 36: prueba de Resistividad eléctrica, (Ambrocio, 2016)*

El equipo de la ilustración 36 proporciona una resistencia eléctrica, pero se requiere del cálculo de la resistividad, para la cual se utiliza la siguiente fórmula:



$$\rho = R_e \left( \frac{A}{L} \right)$$

En donde:

$\rho$ : es la resistividad eléctrica, en  $k\Omega\text{-cm}$  (ohm-m)

$R_e$ : es la resistencia eléctrica, en  $k\Omega$

$A$ : es el área del espécimen, en  $\text{cm}^2$

$L$ : es el espesor del espécimen, en cm

### 3.3.1.4 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)

Esta es la última prueba realizada a los especímenes, ya que para poderla realizar se requiere de colocar una capa de melaza que cubra la superficie de contacto con el objetivo de uniformizar el área de contacto; a todos los especímenes de forma cúbica, cilíndrica y prismática de las diferentes mezclas se les determinó el tiempo de tránsito de pulso ultrasónico.

El equipo empleado para esta prueba es una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, es decir, un medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, con una escala de frecuencia de 24 a 150 kHz; impedancia de entrada del receptor 1M; salida RS 232; con una medición de la velocidad de pulso que arroja de manera directa, sólo se requiere de ingresarle el dato del espesor del espécimen (separación entre transductores), con una salida del transmisor hasta 1500 V; funciona con batería propia recargable a la corriente de luz.

El equipo cuenta con dos transductores, un emisor y un receptor, estos deben de tener un buen contacto con la superficie en prueba, para lo cual se requiere de un medio conductor (melaza), el fabricante nos proporciona un gel con el equipo, pero se hicieron las mediciones con melaza ya que es un material natural como se muestra en la ilustración 37 ya que se busca que no reaccione con los aditivos en estudio fueron incorporados a la arcilla, fue por eso que se decidió utilizar melaza para realizar las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico. En este caso para las arcillas no se tiene parámetros de calidad en base a la velocidad de pulso se trabajó





como si el material fuese concreto y así correlacionar con las pruebas destructivas la resistencia de la arcilla con la velocidad obtenida.



*Ilustración 37: Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasonico, (Ambrocio, 2016)*

### 3.3.2 DESTRUCTIVAS

Estas pruebas destructivas son las últimas realizadas a los especímenes ya que como su nombre lo dice destruyen las muestras por causa de los diferentes esfuerzos que les aplica tales como compresión simple, tensión por flexión y tensión directa; estas evalúan la resistencia mecánica del mortero y nos indica la capacidad de soporte de diferentes tipos de esfuerzos. Las pruebas destructivas se clasifican en resistencia a la compresión simple, resistencia a la tensión por flexión y resistencia a la tensión directa, los cuales se describen a continuación.

#### 3.3.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

La prueba de compresión simple se realizó a especímenes cúbicos a edades de 150,180 y 220 días. Se probaron 5 especímenes por edad de cada una de las mezclas, dicha prueba se llevó a cabo en la máquina universal para ensayos, bajo las especificaciones de la norma (ASTM-C-109, 2016), esta prueba también se le realizó





a los especímenes cilíndricos, solo que a estos también se les tomó la deformación con el micrómetro durante la aplicación de carga como se muestra en las ilustraciones 38,39 y 40; al último espécimen cilíndrico se le tomó el deformación. En este caso se cabeceó a los cubos con el mismo material para lograr una mejor superficie de contacto y la aplicación del esfuerzo fuera uniforme, mientras que a los cilindros se les lijó la parte de contacto con la máquina. Antes de empezar a tomar las deformaciones se le aplicó una precarga para confinar el espécimen y poder obtener lecturas de deformación aceptables.

La máquina nos registra la carga de falla, pero se debe obtener el esfuerzo de compresión, para el cual se utilizó la ecuación 6:

$$\sigma = \frac{P_u}{A} \quad \text{Ecuación 6}$$

En donde:

$\sigma$ : es el esfuerzo a compresión, en kgf/cm<sup>2</sup>

$P_u$ : es la carga a la que se presentó la falla, en kgf

$A$ : es el área transversal del cubo (L1 x L2), en cm<sup>2</sup>



Ilustración 38: Prueba a compresión simple en especímenes cúbicos, (Ambrocio, 2016)



Ilustración 39: Especímenes probados por edad y por mezcla, (De León Ambrocio, 2016):



Ilustración 40: Prueba de compresión simple en cilindros, (De León Ambrocio, 2016)



### 3.3.2.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN

Los especímenes en forma de prisma (4 cm x 4 cm x 16 cm) son los que se someten a este tipo de esfuerzo, la prueba se realizó a 5 especímenes por cada edad y cada mezcla. Para poder realizar esta prueba se dejó un claro de 10 cm en el centro del espécimen; en la ilustración 41 y 42 se muestra el colocado del espécimen en la máquina de ensayos y el total de especímenes probados, se les hicieron marcas con tinta indeleble en el punto donde se aplica la carga. En este caso no existe una norma que nos especifique la forma de obtención del módulo de ruptura de una muestra de arcilla por lo cual basamos en las especificaciones de la norma (ASTM-C-293, 2016) Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading).

Esta prueba consiste en montar el espécimen sobre dos apoyos (varillas), con una separación de 10 cm entre ellos, y colocar una tercer varilla en parte superior y en punto medio de la muestra para luego aplicar la carga, la velocidad de aplicación de la carga debe de ser constante sin que sea muy grande para que no falle por impacto.

Al igual que la prueba a compresión simple, obtenemos una carga máxima en la cual ocurre la falla del prisma, con los resultados obtenemos el módulo de ruptura con la ecuación 7 (ASTM-C-293, 2016). (De Leon Ambrocio, 2016)

$$MR = \frac{3Wl}{2bd^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

En donde:

MR: es el módulo de ruptura, en kgf/cm<sup>2</sup>

W: es la carga máxima aplicada, en kgf

l: es la longitud entre apoyos de la muestra, en cm

b: es el ancho promedio de la muestra, en cm

d: es el espesor promedio de la muestra, cm

Si la falla se produce en la superficie a tensión fuera del tercio medio de la longitud del tramo, y en no más del 5% de la longitud del tramo, el módulo de ruptura se calcula con la expresión 8 (ASTM-C-293, 2016):





$$MR = \frac{3Wa}{bd^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde:

MR: es el módulo de ruptura, en kgf/cm<sup>2</sup>

W: es la carga máxima aplicada, en kgf

a: es la distancia media entre la línea de fractura y el soporte más cercano, medido en la superficie de tensión del espécimen, en cm

b: es el ancho promedio de la muestra, en cm

d: es el espesor promedio de la muestra, cm



*Ilustración 41: Prueba de tensión por flexión en especímenes prismáticos, (De León Ambrocio, 2016)*





Ilustración 42: Especímenes prismáticos probados a tensión por flexión por edad y por mezcla, (De Leon Ambrocio, 2016)

### 3.3.2.3 RESISTENCIA A LA TENSIÓN DIRECTA

La prueba de resistencia a tensión directa es realizada en briquetas, 5 por cada edad y por tipo de mezcla, dichos especímenes de arcilla se probaron en la máquina de prueba para tensión de mortero tipo Michaelis, en las ilustraciones 43 y 44 se muestra la colocación de la briqueta en la máquina de prueba y el total de muestras probadas. Una vez tomada y registradas las medidas de la sección transversal de la parte media de la briqueta (ya que es la parte más vulnerable para que suceda la falla) se prosigue con el siguiente procedimiento:

- 1.- Se coloca la briqueta en la máquina, e la cual debe quedar perfectamente nivelada.
- 2.- Se aplica la carga en velocidad constante, lenta para esta prueba, por medio de municiones de plomo hasta que se dé la falla del espécimen.
- 3.- Después de que el espécimen haya fallado, se retiran las municiones y se procede a tomar la lectura de su masa, con una balanza o báscula que tenga una aproximación de 0.1 g.



Para conocer la resistencia a tensión se emplea la ecuación 9:

$$R_t = P_m \times \frac{50}{S_m} \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde:

$R_t$ : es la resistencia a la tensión, en  $\text{kgf/cm}^2$

$P_m$ : es el peso de las municiones que generó la carga de ruptura, en kg

$S_m$ : es la sección media de la briqueta, en  $\text{cm}^2$

50: constante de la máquina Michaelis.



Ilustración 43: Colocación de briqueta en la máquina, para llevar a cabo la prueba de Tensión Directa, (De Leon Ambrocio, 2016)



Ilustración 44: Muestras probadas por edad y mezcla a Tensión Directa, (De Leon Ambrocio, 2016)



### 3.3.2.4 ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Esta prueba se llevó a cabo con los resultados obtenidos del esfuerzo a compresión aplicados a los cilindros de las diferentes mezclas y a las edades correspondientes. La carga se obtuvo de la máquina de ensayos y la deformación fue medida con el micrómetro como se observa en la ilustración 45. Con esta prueba se determinará el módulo de elasticidad del material.

Todo cuerpo a soportar una fuerza aplicada trata de deformarse en el sentido de la fuerza. La fuerza de tracción aplicada en el eje de ella se le denomina axial, aunque el esfuerzo y la denominación ocurren simultáneamente en el ensayo, de dos conceptos que son completamente distintos. La curva esfuerzo deformación (también llamada convencional, tecnológica de ingeniería o nominal) expresa tanto el esfuerzo como la deformación en términos de las dimensiones originales utilizadas, un procedimiento muy útil cuando se está interesado en determinar los datos de resistencia y ductilidad para propósitos de ingeniería.



*Ilustración 45: Determinación de Esfuerzo-Deformación en los cilindros, (De Leon Ambrocio, 2017)*



### 3.3.2.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO

El módulo de elasticidad se determinó a partir de pruebas a la compresión simple de cilindros y de la deformación medida con el micrómetro. El procedimiento para la determinación del Módulo de Elasticidad Estático consistió en realizar la prueba Esfuerzo-Deformación a 5 cilindros de cada mezcla de los resultados obtenidos se obtuvo un promedio y fueron graficados. De la curva Esfuerzo-Deformación de los resultados promediados se eligieron dos puntos los cuales formaran una recta, de dicha recta se obtuvo la pendiente que es Módulo de Elasticidad Estático.

### 3.3.3 PRUEBAS POR DURABILIDAD

Estas pruebas nos permiten conocer la vida útil del mortero, así como también obtener la cantidad de poros y fisuras que contenga la matriz del mortero. Ya que durante el diseño de mezcla solo se considera el estado de servicio, por capacidad de carga y lograr una buena estabilidad de la mezcla, no tomando en cuenta la cantidad de poros que puede llegar a tener las muestras del material. En este se evalúa la mezcla testigo (arcilla), al igual que las mezclas con los aditivos yeso, fibra de nopal y sulfato de sodio. Esta prueba se llevó a cabo a los 250 días de edad.

#### 3.3.3.1 ABSORCIÓN CAPILAR

Esta prueba se considera como la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los espacios capilares cuando el concreto se encuentra en estado sólido y en contacto con el agua. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua, y por tanto a los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente. (RED DURAR, 1998 )

Este método describe la cinética de la absorción del agua en el concreto por medio de tres coeficientes: ( $\epsilon_e$ ) porosidad efectiva; (k) absorción capilar; y (m) resistencia a la penetración del agua; el valor de m está únicamente en función de la estructura del poro, pero no de la porosidad total, estos tres coeficientes nos dan el valor de la absorción capilar.





Los poros dependiendo de su tamaño y características se subdividen en:

Poros de gel. Son de menor tamaño ( $<15-25 \text{ \AA}$ ) y corresponden a espacios intersticiales del gel de la cal apagada. Estos poros sólo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades relativas  $< 20\%$ . Estos poros de tamaño reducido impiden el transporte capilar del agua, que sólo puede atravesarlo en estado gaseoso. Los materiales de microporosidad alta son, por lo tanto, casi impermeables a nivel capilar.

Poros capilares. Son de forma variable y tamaño del orden de  $2 \text{ nm}$  a  $1 \text{ \mu m}$ . Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cal apagada endurecida, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad. Permiten el transporte capilar de agua; en estos casos, la cantidad absorbida depende de la capilaridad del material.

Poros de aire. Son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto, en el proceso de manipulación tecnológica. No suelen estar interconectados entre sí y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores de  $0.05 \text{ mm}$ . Aunque afectan a la resistencia mecánica, en cuanto a la durabilidad pueden, según el caso, inducir efectos benéficos, este tipo de poro grande tampoco favorece el transporte capilar de agua, al igual que los poros de gel. Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando la cal apagada se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agentes agresivos ambientales. (RED DURAR, 1998 )

La propuesta de la metodología de ensayo se debe a Gören Fagerlund y describe la cinética de la absorción capilar de concretos y morteros a través de tres coeficientes:

$m$ = Resistencia a la penetración del agua.

$k$ = Coeficiente de absorción capilar.

$\epsilon_0$ =Porosidad efectiva





Esta prueba se realizó en especímenes de forma cúbica (5 cm x 5 cm x 5 cm) para los cuales, primero se deben de someter a un proceso de secado hasta que adquieran masa constante, después de esto se cubren las caras laterales (cuatro caras) con un espesor aproximado de 3 a 4 mm, con parafina y brea, esta composición fue de 80 y 20 % respectivamente, esto se hace para evitar que absorban agua por estas caras y sólo sea por la cara inferior, se toma lectura de los especímenes con parafina y esta se conoce como lectura de masa seca inicial, para después sumergirlos en un recipiente sobre una esponja, con un tirante de agua aproximado de 3 a 5 mm, referenciado desde la base de los especímenes.

En este caso por ser las muestras de arcilla y la porosidad es grande se procedió a tomar las lecturas a rangos de tiempo cortos los cuales los primeros fueron a los 2, 6, 9, 15, 30, 45 minutos luego fueron a cada media hora hasta llegar a las 6 horas luego las muestras restantes se dejaron hasta las 23 horas. Siendo 5 especímenes para cada mezcla y edad. En las ilustraciones 46 y 47 se muestra el acomodo de los especímenes en el recipiente y la obtención de masa después de un cierto tiempo.

Esta prueba aún no se encuentra normada, pero se tomó como referencia de prueba de durabilidad de la, (RED DURAR, 1998 ) y el (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 1998).

## CÁLCULOS

Los coeficientes se calculan con base en las ecuaciones 10 y 11:

Coeficiente de la resistencia a la penetración del agua (m).

$$m = \frac{t}{z^2}, (s/m^2) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

z = representa la profundidad de penetración del agua en el tiempo "t".

Coeficiente de absorción capilar (k):

$$k = \frac{(W_t - W_0)/A}{\sqrt{t}} / (Kg/m^2 s^{1/2}) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$W_0$  = Masa inicial de la probeta (Kg o g).

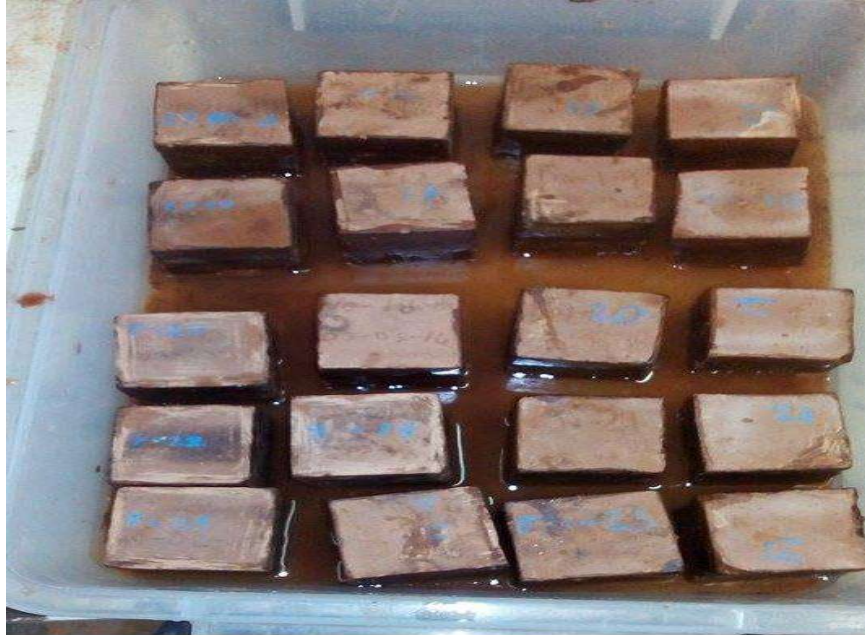




$W_t$  = Masa final de la probeta (Kg o g).

A = Área expuesta de la probeta (m o cm).

k es evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico  $(W_t - W_0)/A$  como función respecto de la raíz del tiempo  $t^{1/2}$ .



*Ilustración 46: Colocación de especímenes en el recipiente con el tirante de agua, (De Leon Ambrocio, 2017)*



*Ilustración 47: Obtención y pérdida de masa en el minuto 30, (De Leon Ambrocio, 2017)*



## 4. RESULTADOS Y DESCRIPCIONES

### 4.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

#### 4.1.1 ARCILLA

A continuación se presentarán los resultados de las pruebas de caracterización, no destructivas y destructivas de la arcilla utilizada en la investigación, junto con los parámetros que establecen la normativa vigente

##### 4.1.1.1 DISGRECIÓN DEL MATERIAL

Con esta caracterización del suelo logró tener el tamaño de la partícula que se necesitaba, dicho tamaño fue el que pasó por la malla ASTM No. 40 (0.425 mm).

##### 4.1.1.2 MATERIAL QUE PASA LA MALLA ASTM No. 40

Esta caracterización del material (arcilla) nos sirve para la homogenización y separación del material, en este caso al pasar el material por la malla numero 40 como lo marca el Manual M.MMP.06, "Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías", se obtuvo un tamaño de partícula de 0.425 mm como máximo. Cabe mencionar que la arcilla tiene diámetros menores.

##### 4.1.1.3 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO.

Es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso. Y con este identificamos y clasificamos el suelo. En la tabla 3 se muestran los resultados del límite líquido de las mezclas. La mezcla testigo es la que más contenido de agua presentó, comparando los resultados de la mezcla que contienen aditivos podemos concluir que la fibra de nopal retiene mayor cantidad de humedad, siendo el sulfato de Sodio el que menor cantidad de humedad presentó.







Tabla 3: Resultados de Límite Líquido en las mezclas, (De Leon Ambrocio, 2016)

DETERMINACIÓN DEL LL	
MEZCLA	LÍMITE LÍQUIDO %
Testigo (arcilla)	49.828
Arcilla-Yeso	48.574
Arcilla-Fibra de Nopal	49.383
Arcilla-Sulfato de Sodio	46.147

#### 4.1.1.4 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 mm de diámetro se fractura o agrieta. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. Los resultados de esta prueba fueron calculados con la ecuación 12 para todas las mezclas como se muestra en la tabla 4.

$$Lp = \left( \frac{Ws}{Ww} \right) * (100) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

Lp = Límite Plástico

Ww = Masa de la muestra húmeda (g).

Ws = Masa de la muestra seca (g).

Tabla 4: Determinación del Límite Plástico de la mezcla testigo, (De Leon Ambrocio, 2016)

DETERMINACIÓN DEL LP	
MEZCLA	LÍMITE PLÁSTICO %
Testigo (arcilla)	19.873
Arcilla-Yeso	18.523
Arcilla-Fibra de Nopal	25.080
Arcilla-Sulfato de Sodio	21.609





Se realizaron tres muestras para cada mezcla de las cuales se obtuvo un promedio. Se observa que el contenido de agua es diferente para cada aditivo agregado. En comparación con la mezcla testigo las adiciones de fibra de nopal y sulfato de sodio tienen un porcentaje de agua más grande y la mezcla con el aditivo yeso menos cantidad de agua que la mezcla Testigo, por lo que puede concluir que la mezcla que más se asemeja al testigo, es la mezcla arcilla-yeso en 6%.

### **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 utilizó la ecuación 13:

$$I_p = LL - L_p \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

IP= índice plástico.

LL= Límite líquido.

LP=Límite plástico.

*Tabla 5: Resultados del Índice Plástico de las mezclas elaboradas, (De Leon Ambrocio, 2016)*

DETERMINACIÓN DEL IP	
MEZCLA	INDICE PLÁSTICO %
Testigo (arcilla)	29.955
Arcilla-Yeso	29.567
Arcilla-Fibra de Nopal	24.536
Arcilla-Sulfato de Sodio	24.538

El Índice Plástico define el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que deben tener las arcillas para conservarse en estado plástico. Este valor permite determinar los parámetros de asentamiento de un suelo y su





expansividad potencial. Como se observa en la tabla 5 las mezclas Testigo y Arcilla-Yeso presentaron mayores porcentajes de índice plástico y las mezclas Arcilla-Fibra de Nopal y Arcilla-Sulfato de Sodio estuvieron un poco debajo de la mezcla Testigo.

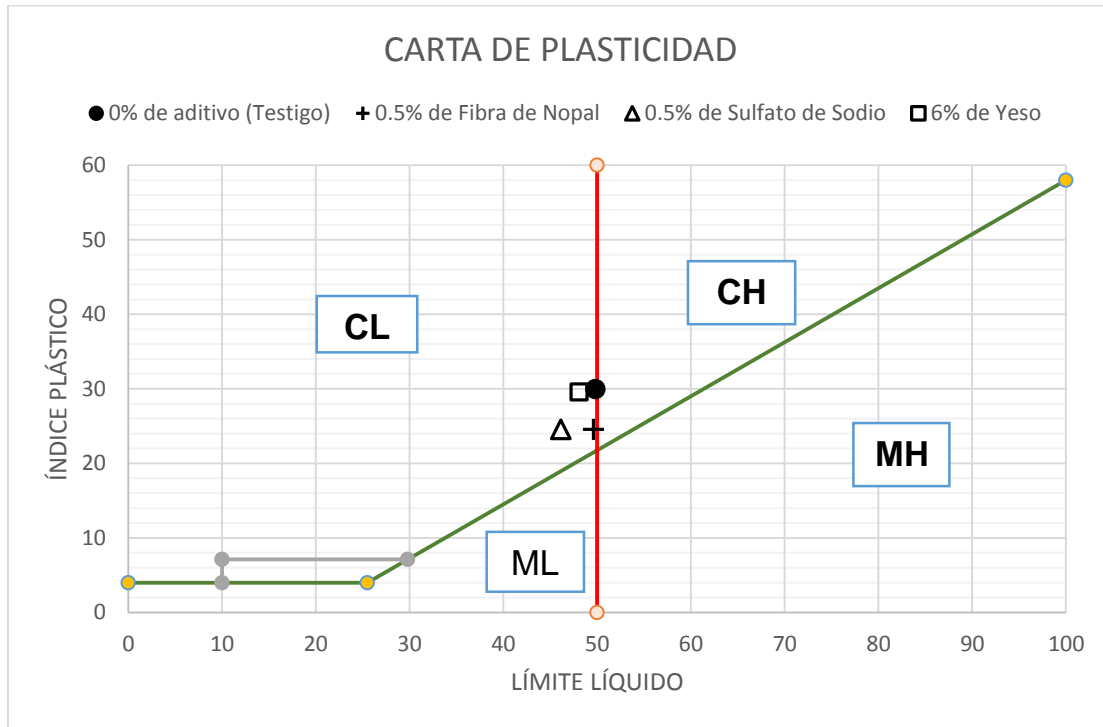


Ilustración 48: Clasificación del suelo con la Carta de Plasticidad, (De Leon Ambrocio, 2016)

En la ilustración 48 se muestra el resultado de la clasificación por SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.) de las mezclas elaboradas, donde se observa que en promedio la clasificación fue de una arcilla de baja plasticidad (CL). Las mezclas testigo y Arcilla-Fibra de Nopal están en el límite con (CH) “arcilla de alta plasticidad”. Por lo que se puede concluir que es una arcilla arenosa con plasticidad media.





#### 4.1.1.5 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN. (LC Y CL).

### DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA (LC)

Tabla 6: Resultados de Contracción Volumétrica en las mezclas elaboradas, (De Leon Ambrocio, 2016)

DETERMINACIÓN LC	
MEZCLA	CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA%
Testigo (arcilla)	42.268
Arcilla-Yeso	47.735
Arcilla-Fibra de Nopal	54.902
Arcilla-Sulfato de Sodio	41.305

Tabla 7: Determinación de la Contracción Lineal de la mezcla testigo, (De Leon Ambrocio, 2016)

DETERMINACIÓN CL	
MEZCLA	CONTRACCIÓN LENEAL %
Testigo (arcilla)	12.926
Arcilla-Yeso	12.501
Arcilla-Fibra de Nopal	14.859
Arcilla-Sulfato de Sodio	10.566

Como se observa en los resultados de las tablas 6 y 7, la contracción lineal y contracción volumétrica es mayor en las mezclas de fibra de nopal y yeso. Esto se debe a que estas mezclas fibra de nopal y yeso absorben más agua y cuando esta se evapora su contracción lineal tiende a ser mayor en comparación de las mezclas que absorben menos agua, en este caso la mezcla testigo (arcilla) y arcilla-sulfato de sodio.





#### 4.1.2 YESO

Una vez realizadas las pruebas de caracterización a la mezcla, se procede a realizar las pruebas destructivas y no destructivas a los especímenes a las edades de 150, 180 y 220 días. Los resultados obtenidos se muestran en gráficas a continuación.

#### 4.1.3 FIBRA DE NOPAL

Las pruebas realizadas a la mezcla de arcilla con fibra de nopal como aditivo en 0.5%, tanto destructivas como no destructivas, fueron a las edades especificadas, los resultados de dichas pruebas se muestran a continuación.

#### 4.1.4 SULFATO DE SODIO

A esta mezcla como a las anteriores se le realizó las mismas pruebas: caracterización y diseño de la mezcla y las pruebas destructivas, así como las no destructivas a los especímenes a las edades de 150, 180 y 220 días. Los resultados obtenidos se muestran en gráficas a continuación.

#### 4.1.5 AGUA

En la tabla 8 se muestra los resultados del análisis realizado a la calidad del agua que llega a la toma del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas

Agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Muestra: Laboratorio de Materiales

Sitio de muestreo: Laboratorio de Materiales

Fecha de muestreo: 18 de mayo de 2014

Norma de referencia: NMX-C-122-ONNCCE-2004

Parámetro	Resultado	Límite Permisible (NMX-C-122-ONNCCE-2004)	Unidades	Método Utilizado
pH	7.86	>6	U pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Temperatura	29.8	-	°C	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	456	-	ns/cm	NMX-AA-093-SCFI-2000





Sólidos Disueltos Totales	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
Oxígeno Disuelto	3.37	-	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza Cálctica	21	-	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Volumétrico
Sales de Magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico

Tabla 8: Límites permisibles, (Bernabe Reyes, 2015)

## 4.2 PRUEBAS REALIZADAS A LAS MEZCLAS EN FRESCO

### 4.2.1 FLUIDEZ

Los resultados obtenidos en la prueba de fluidez para la mezcla testigo como para la mezcla con los aditivos se presentan en la tabla 9. Esta prueba nos permite conocer la trabajabilidad que tendrá la mezcla, es decir, una mezcla fluida nos brinda un acomodo homogéneo, pero si tiene una fluidez mayor se pueden presentar efectos negativos, como la exudación.

Tabla 9: Resultados de la Prueba de Fluidez, (De Leon Ambrocio, 2017)

Mezcla	Fluidez	Fluidez (NMX-C-111-2004)
Testigo (arcilla)	107	100 ± 5
Arcilla-Yeso	108	
Arcilla-Fibra de Nopal	108	
Arcilla-Sulfato de Sodio	105	

La fluidez de las mezclas está dentro del rango que nos marca la norma (NMX-C-111-2004).





#### 4.2.2 DISEÑO DE MEZCLA

Tabla 10: Resultados del contenido de agua para las mezclas en estudio, (De Leon Ambrocio, 2016)

ADITIVO	ARCILLA (g)	% ADITIVO (g)	AGUA ml
TESTIGO	1,000	-----	526
YESO	1,000	6% (60)	540
FIBRA DE NOPAL	1,000	0.5% (5)	560
SULFATO DE SODIO	1,000	0.5% (5)	540

En la tabla 10 se muestran a los resultados óptimos obtenidos durante el diseño de mezcla con los cuales las diferentes mezclas presentaron buena trabajabilidad y por ende fueron elaboradas con estas las cantidades de material.

#### 4.2.3 POTENCIAL DE HIDRÓGENO

En la tabla 11 se muestran los resultados del pH de las mezclas elaboradas. El valor del potencial de Hidrógeno de la mezcla de mortero fresco se debe de encontrar entre valores de 12 a 13 para mezclas de cemento, según el valor que especifica la norma ASTM D 6276 para verificar la alcalinidad de la mezcla.

Tabla 11: Resultados de PH en las mezclas en fresco, (De Leon Ambrocio, 2016)

Mezcla	Lectura de Ph	
	Tira reactiva	PHmetro
Testigo (arcilla)	6	6.24
Arcilla-Yeso	6	6.07
Arcilla-Fibra de Nopal	6	6.25
Arcilla-Sulfato de Sodio	6	6.25

En los resultados obtenidos en las lecturas de pH, como se observa en la tabla 11 los valores obtenidos con la tira reactiva y con el PHmetro no difieren en mucho. De igual forma podemos decir que están fuera del rango que nos marca la norma y por ende no es una mezcla alcalina.





#### 4.2.4 TEMPERATURA

Tabla 12: Resultados de temperatura en las mezclas en fresco, (De Leon Ambrocio, 2016)

Mezcla	Temperatura (°C)
Testigo (arcilla)	19.8
Arcilla-Yeso	22.1
Arcilla-Fibra de Nopal	20
Arcilla-Sulfato de Sodio	24.7

En tabla 12 se muestra los resultados de temperatura de las mezclas elaboradas, de los cuales encontramos que todas se encuentran con muy poca variación respecto a la temperatura ambiental, por lo que se considera como un resultado aceptable.

#### 4.3 PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO ENDURECIDO

##### 4.3.1 NO DESTRUCTIVAS

##### 4.3.1.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

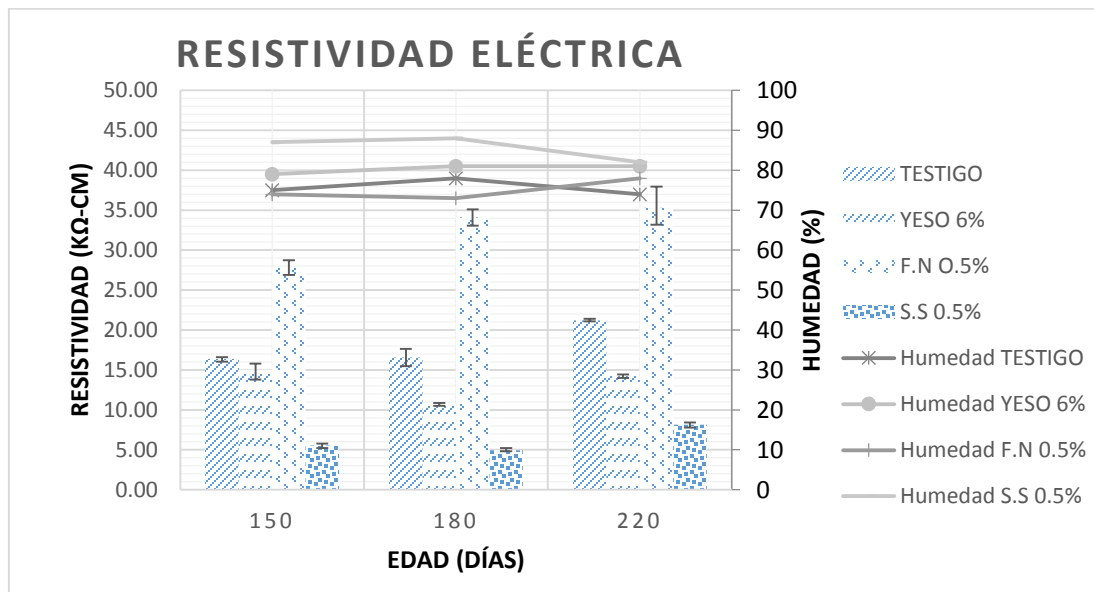


Ilustración 49: Resistividad Eléctrica en cubos de la mezcla testigo, (De Leon Ambrocio, 2017)





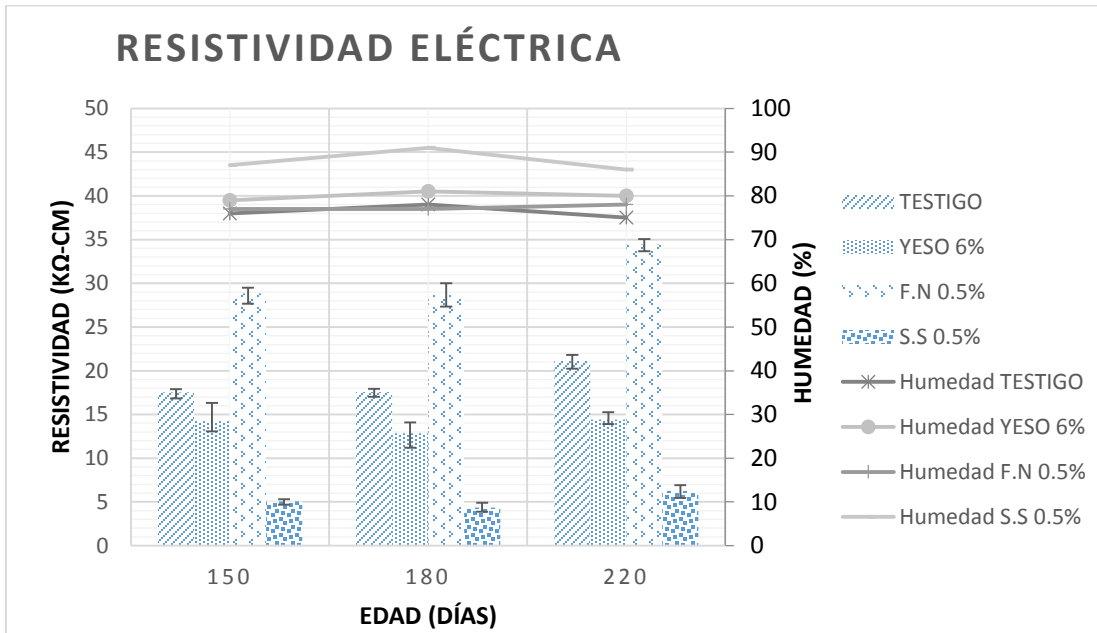


Ilustración 50: Resistividad Eléctrica en prismas (arcilla), (Ambrocio, 2017)

En las ilustraciones 49 y 50 observamos los resultados de la resistividad eléctrica, la cual está referida como un parámetro de durabilidad, no existe un acuerdo de carácter general. La práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio de general, los parámetros de resistividad eléctrica ( $\rho$ ),  $\rho < 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  alto riesgo de corrosión,  $10 \text{ k}\Omega\text{-cm} < \rho < 200 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  riesgo moderado y  $\rho > 200 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  poco riesgo, haciendo referencia a muestras de concreto. De lo anterior referido a la corrosión podemos decir que en las edades de prueba y en los diferentes especímenes (cubos, prismas y cilindros) de la mezcla testigo (arcilla) como las que contienen los aditivos Yeso y Fibra de Nopal, el riesgo a la corrosión es moderado, mientras que la de Sulfato de Sodio está en un alto riesgo a la corrosión en las edades de prueba y en los diferentes especímenes





### 4.3.1.2 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)

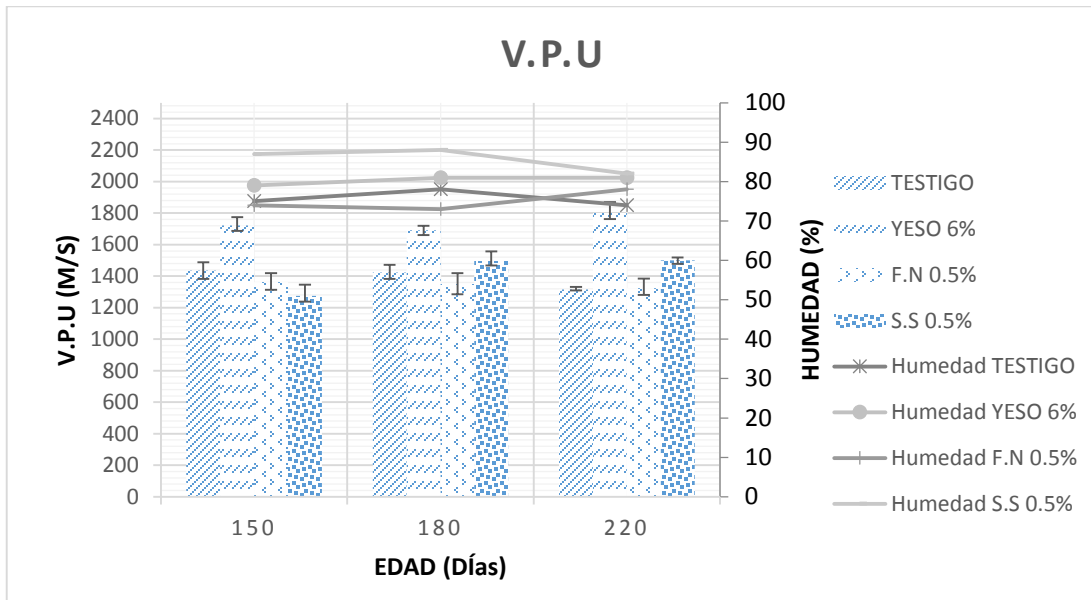


Ilustración 51: Velocidad de Pulso Ultrasónico en cubos, (De Leon Ambrocio, 2017)

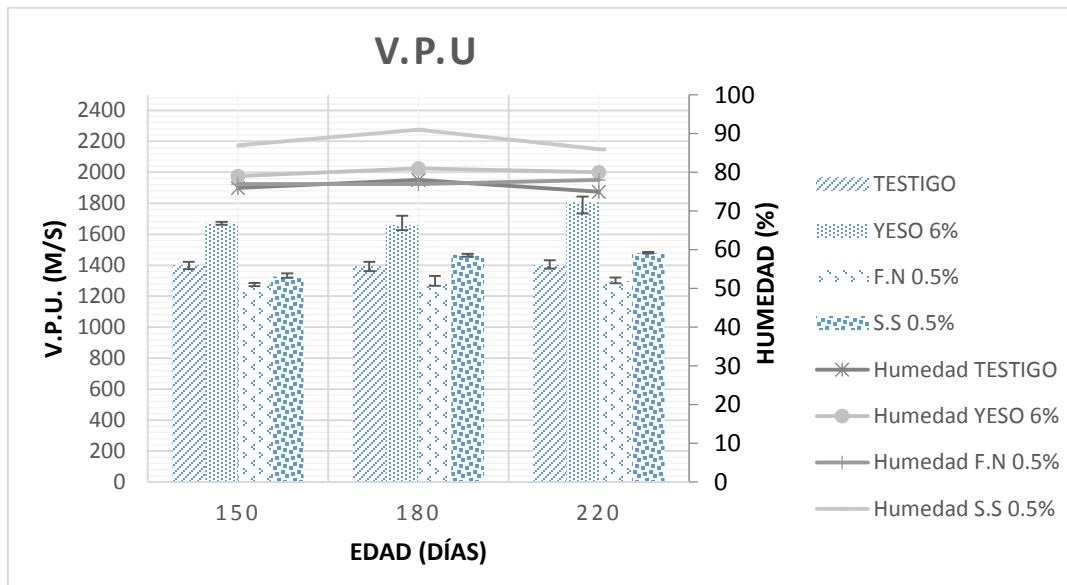


Ilustración 52: Velocidad de Pulso Ultrasónico en prismas, (De Leon Ambrocio, 2017)



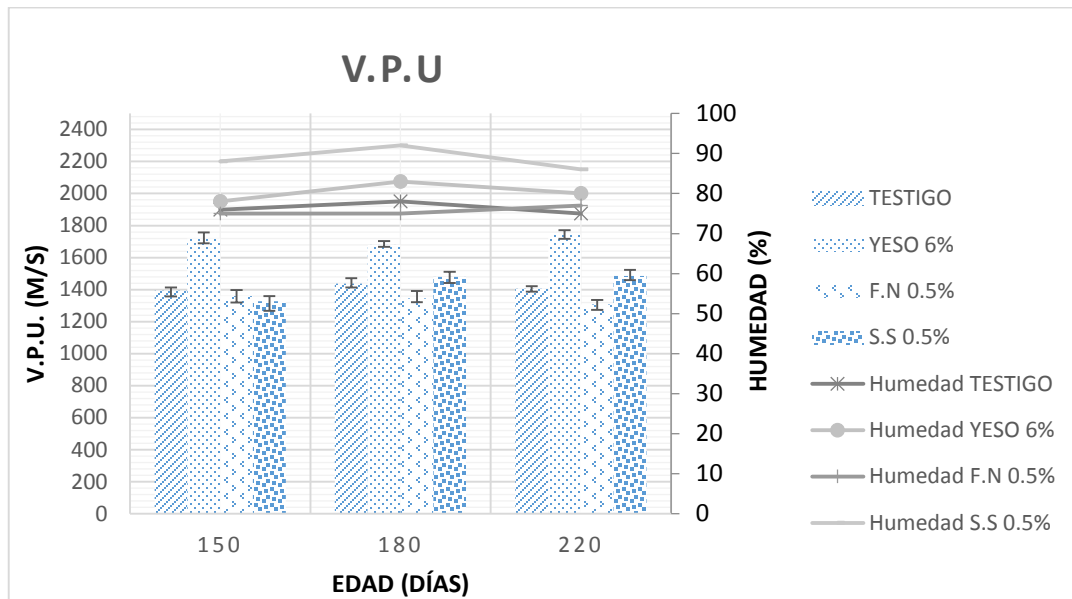


Ilustración 53: Velocidad de Pulso Ultrasonico en cilindros, (De Leon Ambrocio, 2017)

Para el caso de arcillas no se tiene parámetros de calidad en base a la velocidad de pulso; se trabajó como si el material fuese concreto y así correlacionar de alguna forma con las pruebas destructivas. De lo anterior como lo especifica la “Red Durar” encontramos que la velocidad de pulso ultrasónico ( $v$ ) depende de manera proporcional en la calidad del concreto, y las clasifica como, calidad deficiente  $v < 2000$  m/s, calidad normal  $2001 < v < 3000$  m/s, calidad alta  $3001 < v < 4000$  m/s y como durable  $v > 4000$  m/s. En nuestro caso las pruebas realizadas a los especímenes de arcilla, la catalogan como material de calidad deficiente ya que los resultados de las velocidades dieron menos de 2,000 m/s como se observan en las ilustraciones 51, 52 y 53.





### 4.3.2 DESTRUCTIVAS

#### 4.3.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

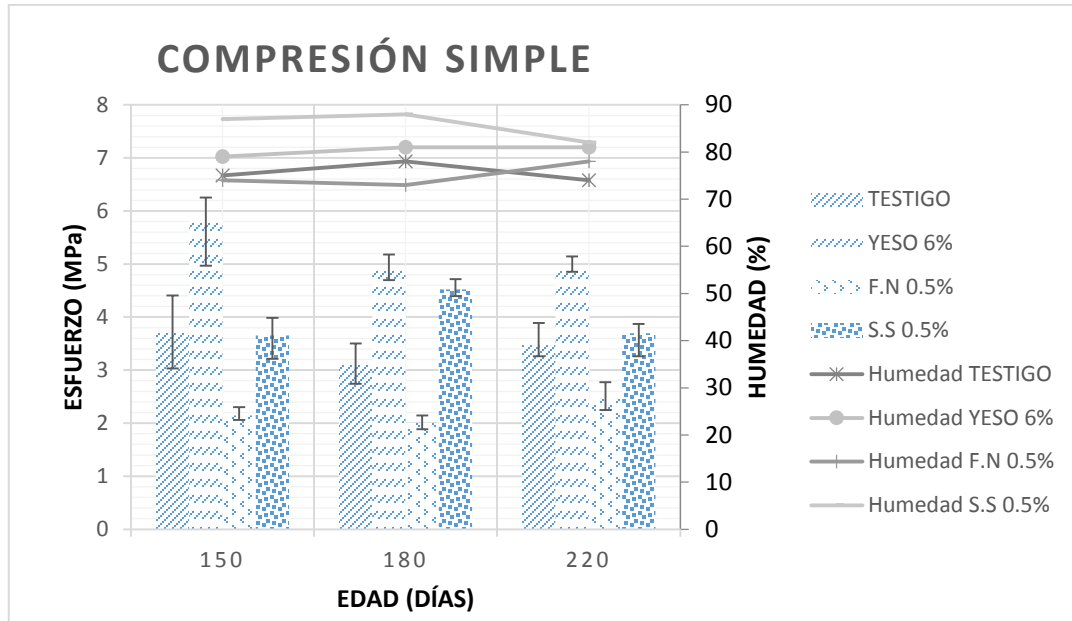
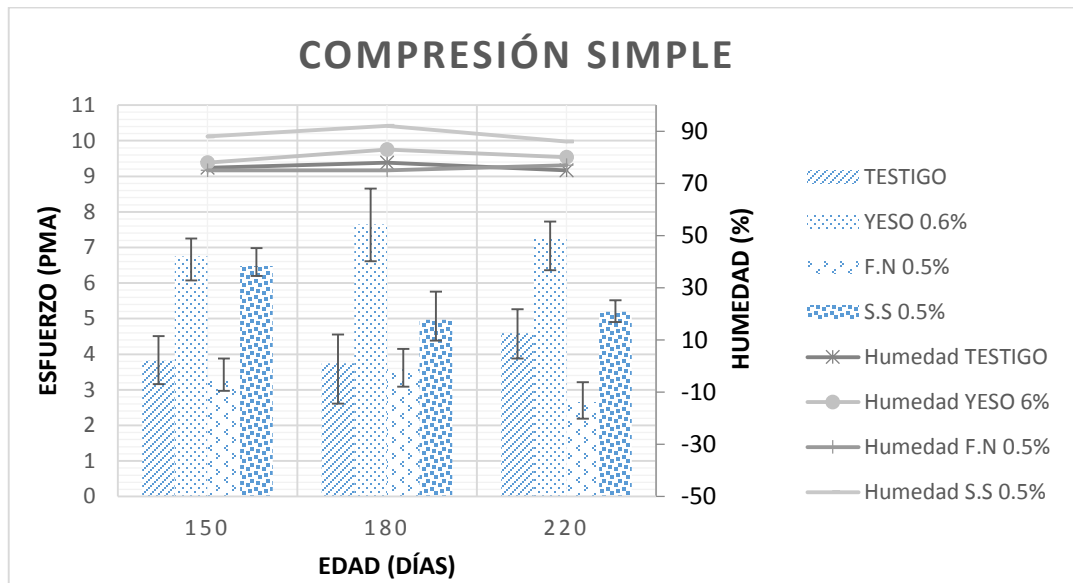


Ilustración 54: Compresión Simple en cubos de las diferentes mezclas, (Ambrocio, 2017)

Como se observa en la gráfica anterior los resultados de Compresión Simple en los especímenes cúbicos nos dan resultados un poco variados ya que en comparación con la mezcla Testigo (arcilla), las mezclas con aditivo Yeso y Sulfato de sodio mejoraron la resistencia mecánica donde valores mayores en el esfuerzo aplicado. La mezcla Arcilla-Fibra de nopal presentó resultados por debajo de la mezcla testigo como se muestra en la ilustración 54.





*Ilustración 55: Compresión Simple en cilindros de las diferentes mezclas, (Ambrocio, 2017)*

En la ilustración 55 se muestran los resultados de la Compresión Simple en especímenes cilíndricos los cuales fueron parecidos a los de los cubos ya que de igual manera, las mezclas de arcilla con los aditivos Yeso y Sulfato de Sodio resistieron mayores cargas que la mezcla Testigo, no fue así con la mezcla Arcilla-Fibra de Nopal ya que sus resultados fueron ligeramente menores que la mezcla testigo.





#### 4.3.2.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN

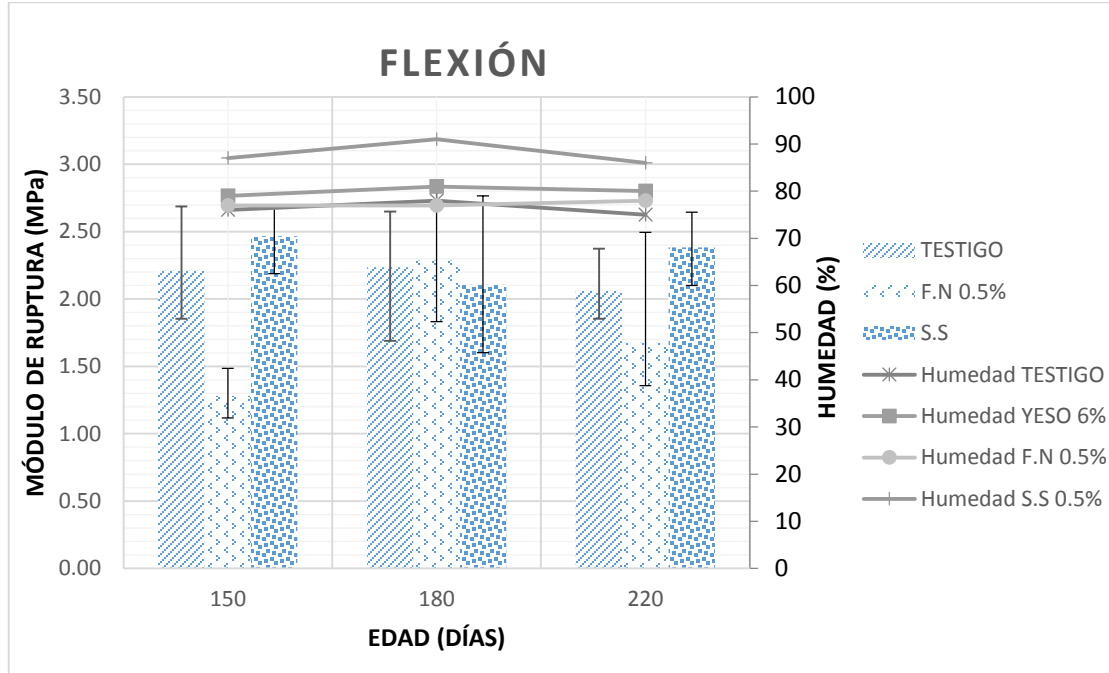


Ilustración 56: Tensión por Flexión en prismas, (Ambrocio, 2017)

La prueba de tensión por flexión se realizó a los especímenes prismáticos, en la ilustración 56 se observa como los especímenes de las diferentes mezclas tuvieron comportamientos distintos. En comparación con los especímenes de la mezcla Testigo (arcilla), los de la mezcla Arcilla-Yeso mantuvieron un aumento en cuanto a resistencia en cada edad de prueba y los resultados fueron mayor que los del testigo. Los especímenes de la mezcla con el aditivo Fibra de Nopal presentaron una baja en cuanto a resistencia en la primera edad de prueba (150 días) y en las otras edades de prueba mantuvieron resultados más parecidos, y en comparación con la mezcla Testigo los resultados fueron muy semejantes. Los especímenes de Arcilla-sulfato de Sodio mostraron resultados muy parecidos en las diferentes edades de prueba y fueron mayores que los de la mezcla Testigo





#### 4.3.2.3 RESISTENCIA A LA TENSIÓN DIRECTA

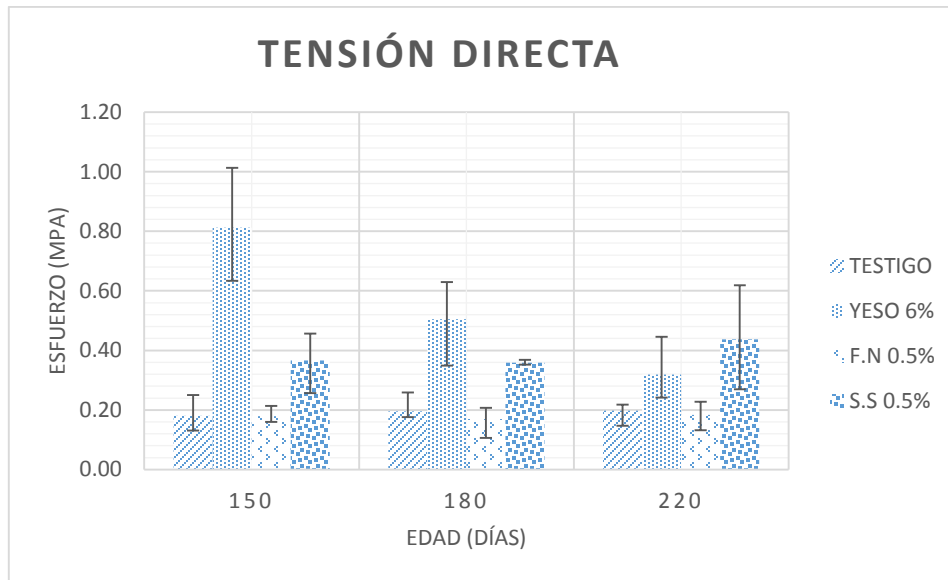


Ilustración 57: Tensión Directa en briquetas de la mezcla Testigo (arcilla), (Ambrocio, 2017)

La prueba de Tensión Directa se le realizó en briquetas, en la ilustración 57 se observa como las muestras con los aditivos Yeso y Sulfato de Sodio resistieron más que las muestras de la mezcla testigo aunque las muestras de Yeso resistieron menos en cada edad de prueba y la de Sulfato de Sodio se mantuvo constante en su resistencia. Las muestras de la mezcla Fibra de Nopal resistieron igual que el testigo pero con una resistencia constante en las edades de prueba.



#### 4.3.2.4 ESFUERZO DEFORMACIÓN

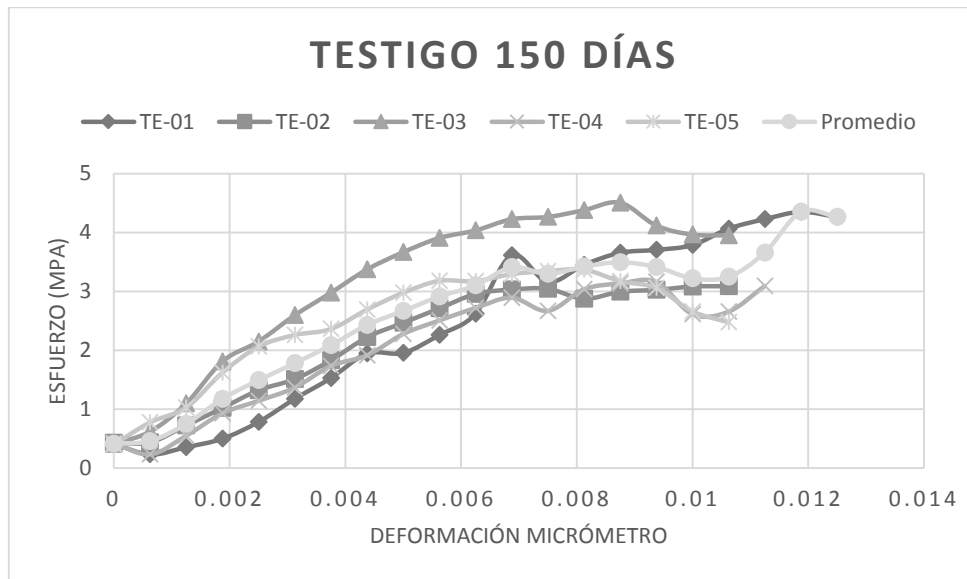


Ilustración 58: Esfuerzo-Deformación en especímenes de la mezcla Testigo, (De Leon Ambrocio, 2017)

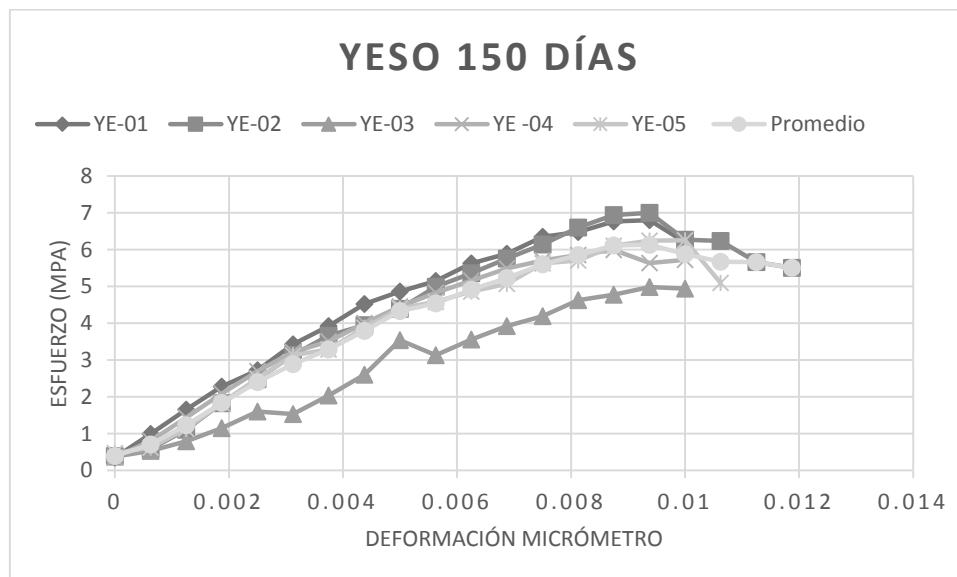


Ilustración 59: Esfuerzo-Deformación en especímenes de la mezcla Arcilla-Yeso, (De Leon Ambrocio, 2017)





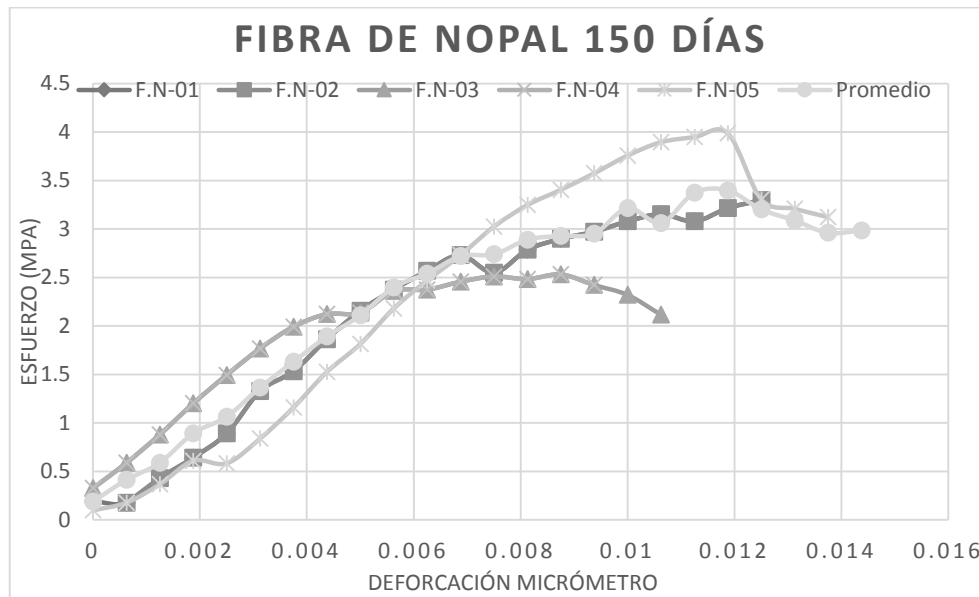


Ilustración 60: Esfuerzo-Deformación en especímenes de la mezcla Arcilla-Fibra de Nopal, (De Leon Ambrocio, 2017)

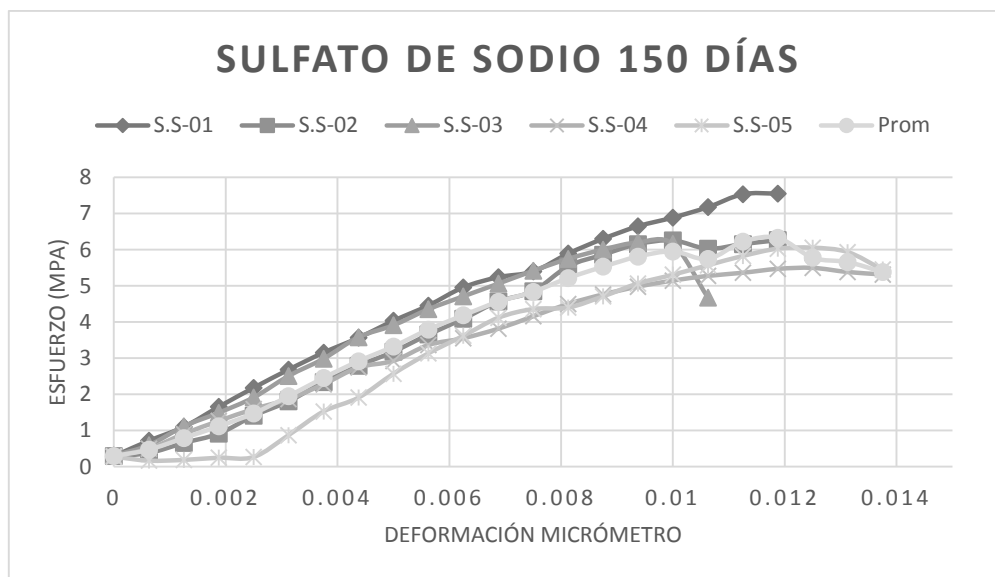


Ilustración 61: Esfuerzo-Deformación en especímenes de la mezcla Arcilla-Sulfato de Sodio, (De Leon Ambrocio, 2017)



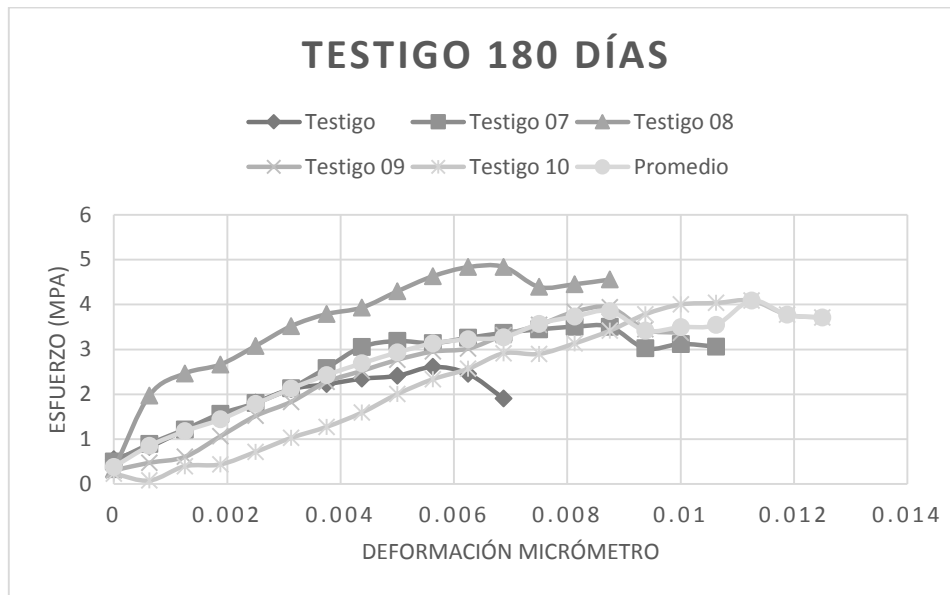


Ilustración 62: Esfuerzo-Deformación en especímenes de la mezcla Testigo (Arcilla), (De Leon Ambrocio, 2017)

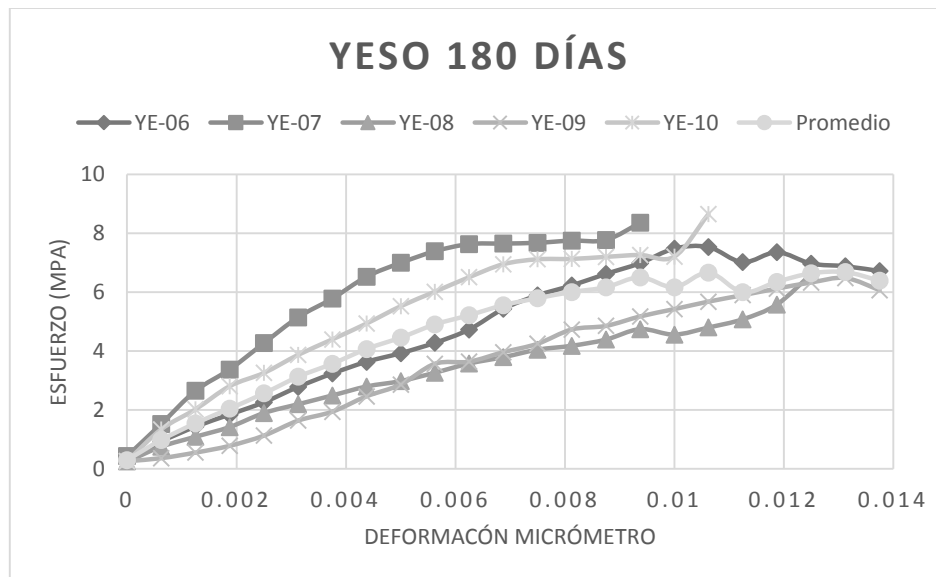


Ilustración 63: Esfuerzo-Deformación en especímenes de la mezcla Arcilla-Yeso, (De Leon Ambrocio, 2017)



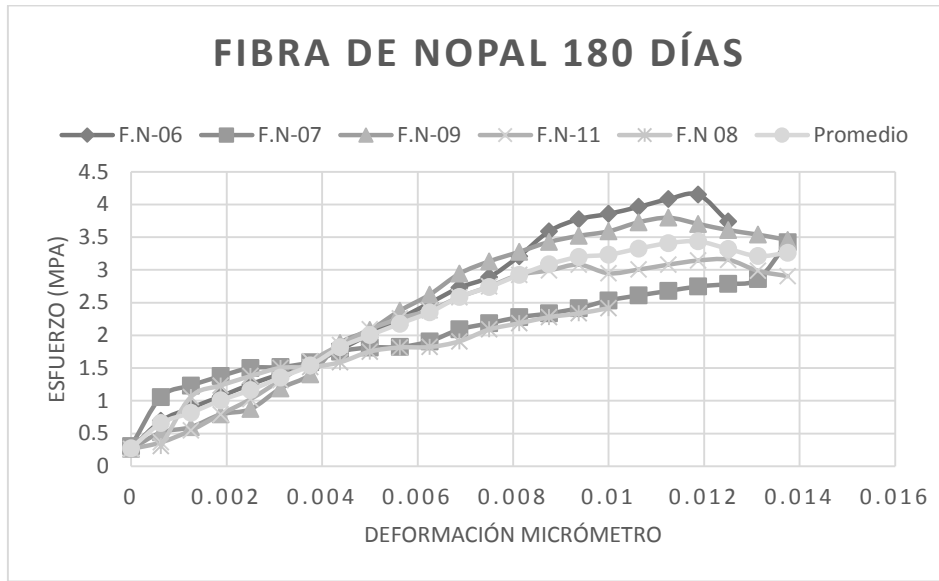


Ilustración 64: Esfuerzo-Deformación en especímenes de la mezcla Arcilla-fibra de Nopal, (De Leon Ambrocio, 2017)

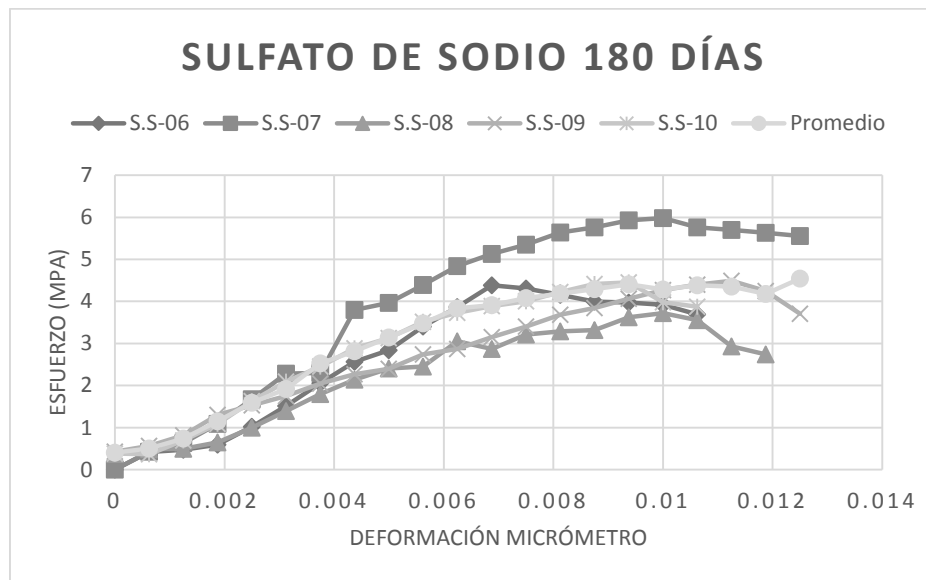


Ilustración 65: Esfuerzo-Deformación en especímenes de la mezcla Arcilla-Sulfato de Sodio, (De Leon Ambrocio, 2017)



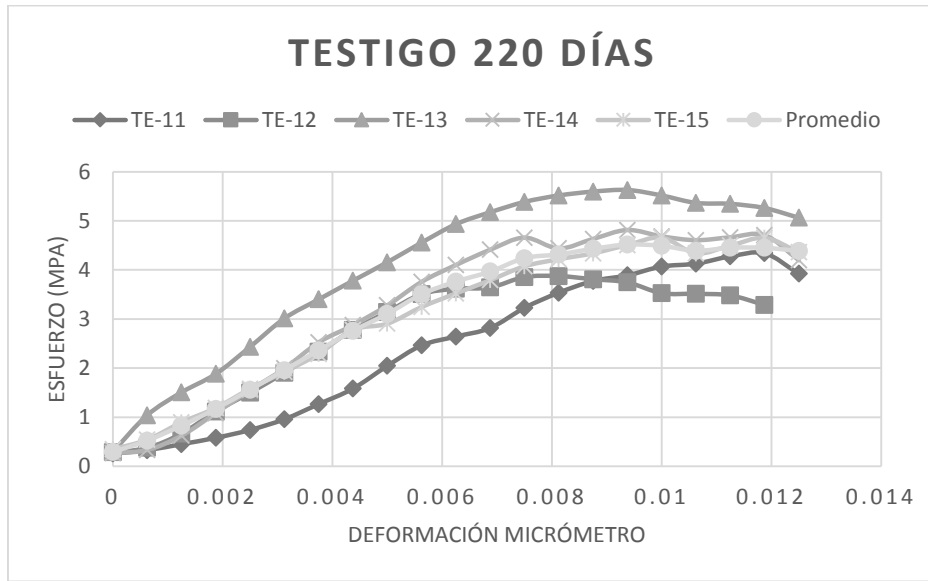


Ilustración 66: Esfuerzo-Deformación en especímenes de la mezcla Testigo (Arcilla), (De Leon Ambrocio, 2017)

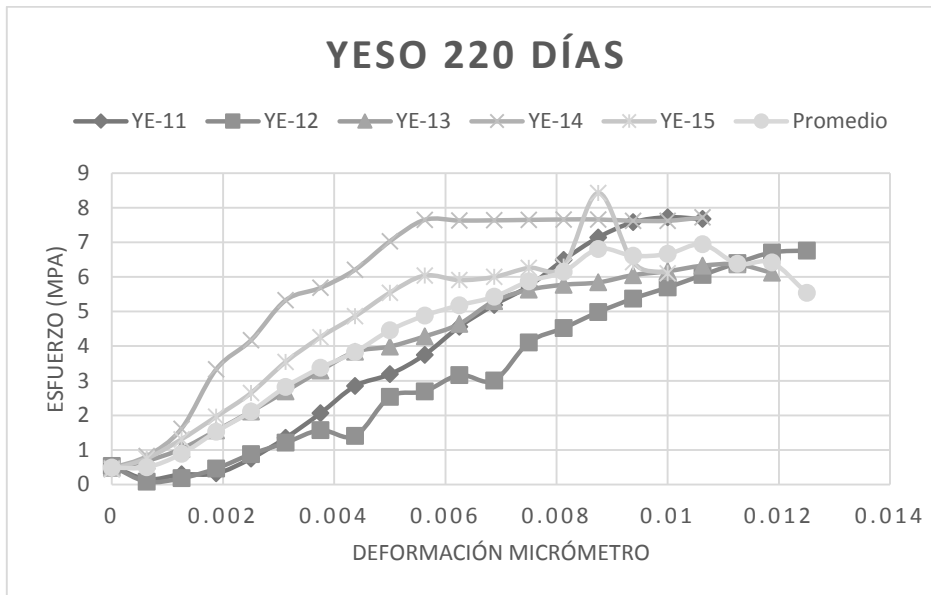


Ilustración 67: : Esfuerzo-Deformación en especímenes de la mezcla Arcilla-Yeso, (De Leon Ambrocio, 2017)



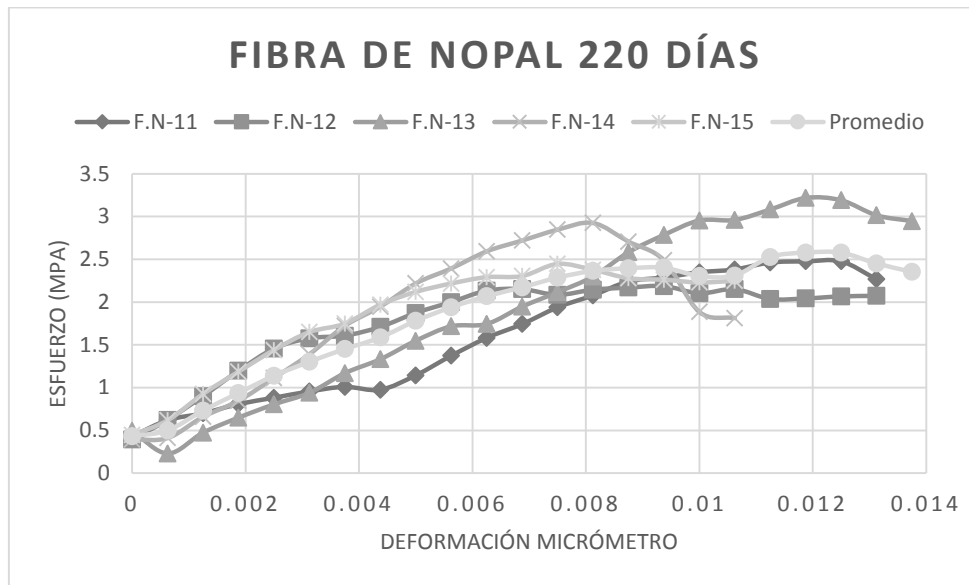


Ilustración 68: Esfuerzo-Deformación en la mezcla Arcilla-Fibra de Nopal, (De Leon Ambrocio, 2017)

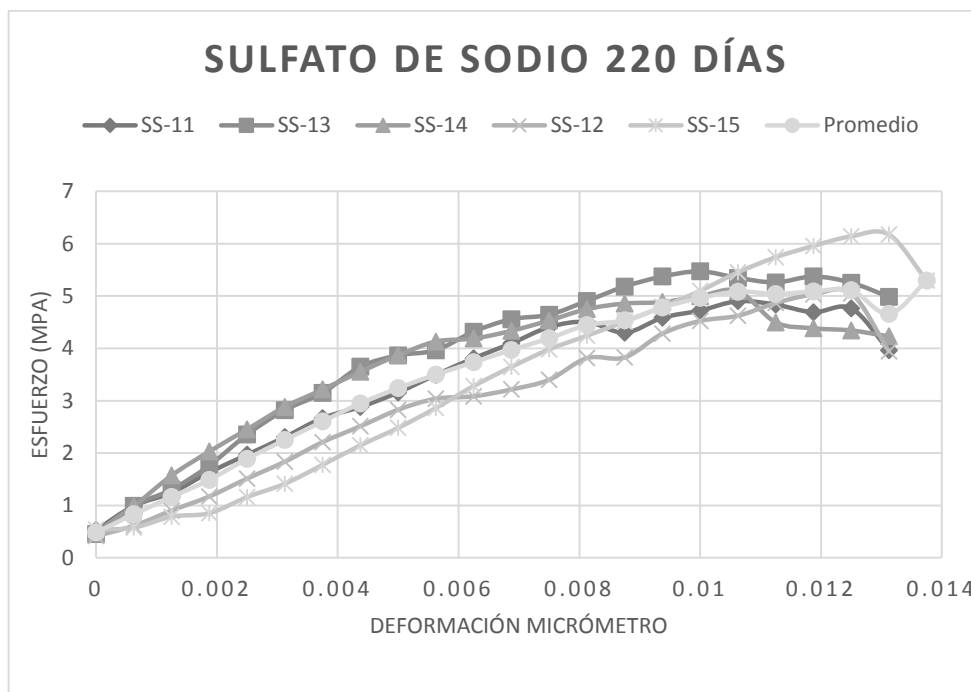


Ilustración 69: Esfuerzo-Deformación en la mezcla Arcilla-Sulfato de sodio, (De Leon Ambrocio, 2017)

Los resultados de esfuerzo deformación de los especímenes cilíndricos de cada una de las mezclas se observan en las ilustraciones de 58 a 69, el comportamiento de los especímenes tienen la misma tendencia en las diferentes edades de prueba. Siendo las mezclas Arcilla-Yeso y Arcilla-Sulfato de Sodio las que presentaron mayor





resistencia a la compresión en comparación de la mezcla Testigo; la mezcla con el aditivo Fibra de nopal fue la que menos resistencia a la compresión presentó. La deformación de los especímenes fue constante hasta llega al punto de fractura, las mezclas con los aditivos yeso y sulfato de Sodio presentaron una deformación máxima entre 0.9 a 1 mm y las mezclas Arcilla-Fibra Nopal y Testigo entre 0.8 y 0.9 mm.

#### 4.3.2.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO

Es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar sometida la muestra a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico. Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación, dentro de esta zona elástica.

Tabla 13: Resultados del Módulo de Elasticidad Estáticos, (De Leon Ambrocio, 2017)

MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO		
EDAD (DÍAS)	MEZCLA	Ed (MPa)
150	Testigo (arcilla)	463.6205
	Arcilla-Yeso	828.0554
	Arcilla-Fibra de Nopal	429.9917
	Arcilla-Sulfato de Sodio	661.4930
180	Testigo (arcilla)	456.7814
	Arcilla-Yeso	733.7696
	Arcilla-Fibra de Nopal	315.9950
	Arcilla-Sulfato de Sodio	613.9092
220	Testigo (arcilla)	612.1640
	Arcilla-Yeso	913.7807
	Arcilla-Fibra de Nopal	276.2101
	Arcilla-Sulfato de Sodio	481.6299

En la tabla 13 se presentan los resultados del Módulo de Elasticidad estático obtenidos de la las gráficas Esfuerzo Deformación del apartado 4.3.2.4. Como se puede observar los aditivos Yeso y sulfato de sodio mejoraron el módulo de Elasticidad de la arcilla en estudio ya que presentaron mayores resultados que el Testigo. No se puede decir lo mismo de la mezcla con el aditivo Fibra de Nopal ya que los resultados fueron un poco abajo del Testigo.





### 4.3.3 PRUEBAS POR DURABILIDAD

#### 4.3.3.1 FAGERLUD

Esta prueba se realizó a los 250 días de edad en los especímenes cúbicos. En la tabla 14 se muestra una serie de datos calculados para la prueba de Fagerlund, los cuales corresponden a una muestra de la mezcla Sulfato de Sodio, cabe mencionar que se obtuvo un promedio de 5 muestras para cada mezcla.

Tabla 14: Serie de datos para la determinación de la absorción capilar y porosidad efectiva, (De Leon Ambrocio, 2017)

Sulfato de Sodio espécimen #21				
Wo (kg) =	0.1412	Área (m2) =	0.0017917	
Tiempo (s)	Raíz Tiempo	Altura	Wt (kg)	(W <sub>t</sub> -W <sub>o</sub> )/A <sub>o</sub>
0	0.00	0.0424	0.1412	0.00
120	10.95	0.0424	0.1420	0.45
360	18.97	0.0424	0.1423	0.61
540	23.24	0.0424	0.1424	0.67
900	30.00	0.0424	0.1427	0.84
1200	34.64	0.0424	0.1429	0.95
1800	42.43	0.0424	0.1433	1.17
3000	54.77	0.0424	0.1440	1.56
4200	64.81	0.0424	0.1448	2.01
6000	77.46	0.0424	0.1480	3.80
8400	91.65	0.0424	0.1520	6.03
10800	103.92	0.0424	0.1487	4.19
14400	120.00	0.0424	0.1509	5.41
18000	134.16	0.0424	0.1509	5.41

Con las columnas 2 y 5 mostradas en la tabla 14 se elaboró la gráfica de la ilustración 70, colocando los valores de la raíz cuadrada del tiempo en el eje de las abscisas contra el valor de la columna (W<sub>t</sub>-W<sub>o</sub>)/A<sub>o</sub> en el eje de las ordenadas. En el gráfico se presenta una serie de puntos que no tienen un crecimiento continuo por lo que se puede decir que los primeros puntos representan la absorción del agua por la muestra y los demás puntos que tienen un comportamiento variado representan la saturación del mismo así como también la pérdida de material que presentaron los especímenes después de un cierto tiempo de estar saturado en este ejemplo la





pérdida del material se presenta a partir del punto marcado en la columna 5. Por lo cual se interpreta que el material se satura con rapidez y presenta poca resistencia a la penetración del agua y cualquier agente disuelto en ella, por lo tanto un alto porcentaje de porosidad efectiva. El cálculo del coeficiente m (resistencia a la penetración) se realiza con los datos de la tabla de cálculo correspondientes al tiempo y altura (cuando z es igual a H, el espesor de la probeta) del punto de quiebre, donde se intersectan ambas pendientes.

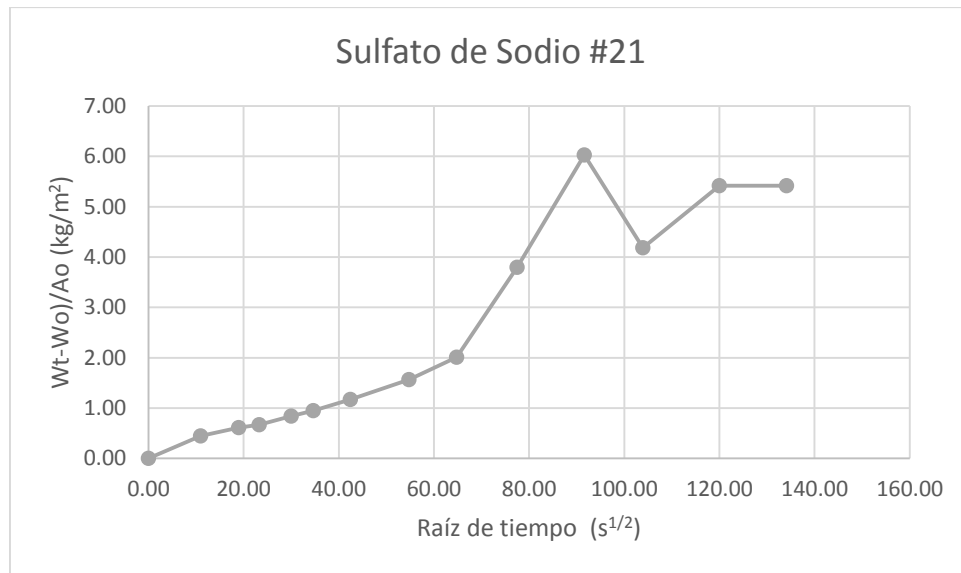


Ilustración 70: Ensayo de absorción capilar para una muestra de la mezcla Sulfato de Sodio, (De Leon Ambrocio, 2017)

Tabla 15: Resultados de sorción capilar (S), (De Leon Ambrocio, 2017)

Mezcla	Sorción Capilar, (S). m/s <sup>1/2</sup>
Testigo (arcilla)	0.000869
Arcilla-yeso	0.000637
Arcilla-Fibra de Nopal	0.000454
Arcilla-Sulfato de Sodio	0.000388

En la tabla 15 se presentan los resultados promedios de Sorción Capilar, como se observa es mayor en la mezcla Testigo. De acuerdo a la literatura (Red DURAR), un valor de Sorción de  $5 \times 10^{-5}$  m/s<sup>1/2</sup> es apto para exposiciones severas, y para condiciones menos severas se aceptan valores de  $10^{-4}$  m/s<sup>1/2</sup>, por lo que se concluye que las mezclas elaboradas con arcilla están dentro del rango.







Tabla 16: Resultados del coeficiente de absorción capilar, (k) (De Leon Ambrocio, 2017).

Mezcla	Coeficiente de Absorción Capilar, (k). $\text{kg/m}^2 \text{s}^{1/2}$
Testigo (arcilla)	0.0209
Arcilla-yeso	0.0386
Arcilla-Fibra de Nopal	0.0646
Arcilla-Sulfato de Sodio	0.0155

Los resultados de la tabla 16 muestran los resultados del coeficiente de Absorción Capilar (k) obtenidos de los especímenes de las diferentes mezclas. De los cuales se observa que la mezcla Arcilla-Sulfato de Sodio presentó menor valor de coeficiente que la mezcla testigo, en caso contrario las mezclas Arcilla-Yeso y Arcilla-Fibra de Nopal los resultados fueron mayores, es decir las últimas dos mezclas absorben mayor cantidad de agua.

Tabla 17: Resistencia a la penetración del agua, (m). (De Leon Ambrocio, 2017)

Mezcla	Resistencia a la Penetración del Agua, (m). $\text{m/s}^2$
Testigo (arcilla)	1492548.51
Arcilla-yeso	4280276.59
Arcilla-Fibra de Nopal	5023257.15
Arcilla-Sulfato de Sodio	6464925.67

En la tabla 17 se puede ver los resultados de la Resistencia a la Penetración de Agua de las mezclas, aunque son valores muy grandes se observa que la mezcla Testigo fue la que menos resistencia presentó.

Tabla 18: Resultados de la porosidad efectiva, ( $\epsilon_e$ ), (De Leon Ambrocio, 2017)

Mezcla	Porosidad Efectiva, ( $\epsilon_e$ ). %
Testigo (arcilla)	2.63
Arcilla-yeso	2.22
Arcilla-Fibra de Nopal	13.04
Arcilla-Sulfato de Sodio	4.35





La porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ) de las mezclas, promedio de 5 especímenes se muestran en la tabla 18. Como no existe una normativa de esta prueba para morteros de arcillas, nos basamos en los reglamentos de la Red DURAR, la cual indica que valores menores al 10% de porosidad indican un concreto de buena calidad y compacidad, valores comprendidos entre el 10% y 15% indican un concreto de calidad moderada, y un concreto  $>15\%$  de porosidad indican un concreto de durabilidad inadecuada. Con base en estas referencias se puede concluir que los morteros elaborados con las mezclas con los aditivos Yeso y Sulfato de Sodio junto con el Testigo son de alta durabilidad por criterio de absorción. La mezcla Arcilla-Fibra de Nopal es de calidad moderada.





## 5 CONCLUSIONES

El objetivo de implementar yeso, Fibra de Nopal y Sulfato de Sodio como aditivos a la mezcla arcilla-agua fue estabilizar el material “arcilla” para mejorar sus propiedades volumétricas, físicas y mecánicas. Se determinó el pH de las mezclas con la norma ASTM D 6276, la cual establece que el valor del “potencial de Hidrógeno” está entre 12 y 13 para las mezclas de cemento; las mezclas de este estudio presentaron resultados de pH entre 6 y 7, por ende concluimos que estas mezclas no presentan una alcalinidad igual a la arcilla estabilizada con el cemento, sino que tienden a ser mezclas neutras. La clasificación del suelo se hizo por el SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.) por medio del cual se determinó que es un suelo CL “arcilla de baja compresibilidad”; un aspecto importante es que los valores en la carta de plasticidad quedaron entre los límites de CL y CH (arcillas de alta y baja plasticidad) por lo que se concluyó que es una arcilla de plasticidad media.

En las pruebas no destructivas los resultados de Resistividad Eléctrica indican un comportamiento similar en las diferentes edades de prueba, siendo los especímenes de la mezcla Arcilla-Fibra de Nopal, los que tuvieron un aumento de 70,105 y 66 % a las edades de 150,180 y 220 días respectivamente, en comparación con los resultados de la mezcla Testigo. De los especímenes Arcilla-Yeso y Arcilla-Sulfato de Sodio se obtuvieron resultados más bajos que el Testigo. Los resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico variaron para cada edad de prueba, a los 150 días los especímenes de la mezcla Arcilla-Yeso presentaron resultados mayores que el Testigo en un 20%, 19% y 23%, en especímenes cúbicos, prismáticos y cilíndricos respectivamente. A los 180 y 220 días los diferentes especímenes de las mezclas de arcilla con los aditivos Yeso y sulfato de Sodio presentaron resultados mayores que los especímenes testigo. Los valores de los resultados de esta prueba fueron aumentando conforme a la edad de prueba. Por lo que se puede decir que los aditivos Yeso y sulfato de sodio disminuyeron la porosidad del material.

En la prueba de Resistencia a la Compresión Simple los resultados de los especímenes de las mezclas Arcilla-Yeso y Arcilla-Sulfato de Sodio fueron mayores en las diferentes edades de prueba en comparativa con los resultados de la mezcla





Testigo. La mezcla Arcilla-Yeso fue la que mejores resultados presentó, superando al testigo en un 59.57% a los 150 días en especímenes cúbicos y en un 80.3% a los 180 días en especímenes cilíndricos. Los resultados de la prueba de Resistencia a la Tensión por Flexión tuvieron variación en las edades de prueba sin embargo los resultados de los especímenes de la mezclas Arcilla-Yeso y arcilla-Sulfato de sodio superaron al testigo en las edades de 180 y 220 días. Respecto a la resistencia a la Tensión Directa los resultados de los especímenes de Acilla-Yeso y Arcilla-Sulfato de Sodio fueron mayores que los de Testigo, sin embargo los valores de los especímenes de Arcilla-Yeso fueron decreciendo, mientras que los de Arcilla-Sulfato de Sodio se mantuvieron estables en las subsecuentes edades de prueba; los especímenes de Arcilla-Fibra de Nopal presentaron resultados similares a los del Testigo en esta prueba. La mezcla con el aditivo fibra de nopal aunque presentó resultados ligeramente menores que el testigo en las pruebas mecánicas, fue la mezcla que más se estabilizó mecánicamente en las diferentes edades de prueba.

En lo que respecta a la prueba de absorción capilar, siguiendo los parámetros de la Red DURAR, se concluyó que los morteros elaborados con las mezclas adicionadas con Yeso y Sulfato de Sodio, y al igual que el Testigo son de alta durabilidad utilizando el criterio por absorción, y la mezcla Arcilla-Fibra de Nopal de calidad moderada y una sorción capilar apta para ambientes no tan severos. Con estos valores se clasifica el material como de buena calidad y alta compacidad, haciendo notar que estos parámetros son para concreto.

Ya que el porcentaje de humedad en los especímenes repercutió en los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas, es de suponer que las resistencias mecánicas de los especímenes mejorarían controlando la temperatura de secado.

Las mezclas Arcilla-Yeso y Arcilla-Sulfato de Sodio presentaron valores en forma creciente en las edades de prueba por lo que se recomienda evaluar las propiedades físico-mecánicas a edades más tardías y evaluar diferentes porcentajes de adición para encontrar el óptimo.

Se recomienda tener cuidado en la forma de elaborar los especímenes, vibrando más los moldes con la mezcla para un mejor acomodo de las partículas del material y por ende obtener mejores resultados en el desarrollo de las pruebas.





Finalmente se cumplió con el objetivo principal de esta investigación, logrando la estabilización volumétrica de la arcilla y mejorando las propiedades físico-mecánicas con las adiciones Yeso y Sulfato de Sodio.





## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ENGINEERING TOMORROW. (29 de octubre de 2008).  
<http://ideasparaconstruir.com/n/5000/caracteristicas-y-usos-del-yeso-en-construccion.html>.  
Obtenido de <http://ideasparaconstruir.com/n/5000/caracteristicas-y-usos-del-yeso-en-construccion.html>.
- Flexicom Cop. (2006). *EQUIPOS Y SISTEMAS DE MANEJO DE MATERIALES A GRANEL*. Estados Unidos.
- LAS ARCILLAS Y SUS PROPIEDADES*. (2002).
- Andrés Antonio Torres Acosta, C. E. (2010). *Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactaseas*. Obtenido de *Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactaseas*.
- ASTM-C-109. (2016). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM.
- ASTM-C-230. (2014). *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. ASTM.
- ASTM-C28M, & C22M. (2014). *Especificación para pastas de yeso*. USA.
- ASTM-C-293. (2016). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. ASTM.
- ASTM-C-511. (2013). *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. ASTM.
- ASTM-D-75. (2003). *Standard Practice for Sampling Aggregates*. USA.
- Bernabe Reyes, C. (2015). *EVALUACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO SUSTITUIDOS CON SENIZAS PUZOLÁNICAS PARA MITEIGAR EL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN REHAVILITACIÓN*. Morelia.
- Bibliotecadigital. (2008).  
[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec\\_6.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec_6.html).  
Obtenido de  
[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec\\_6.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec_6.html).
- CAMIMEX. (03 de Diciembre de 2013). <https://camimex.org.mx/index.php/secciones1/sala-de-prensa/uso-de-los-metales/sulfato-de-sodio/>. Obtenido de <https://camimex.org.mx/index.php/secciones1/sala-de-prensa/uso-de-los-metales/sulfato-de-sodio/>.
- CARLOS, O. T. (2007). *PRODUCCIÓN DE SULFATO DE SODIO MEDIANTE CRISTALIZACIÓN REACTIVA*. COLOMBIA.
- Chavéz, D. C. (2000). *Mecánica de Suelos 1*. Morelia Mich.: UMSNH.





- COSMOS. (1995). <https://www.cosmos.com.mx/wiki/4dvd/sulfato-de-sodio>. Obtenido de <https://www.cosmos.com.mx/wiki/4dvd/sulfato-de-sodio>.
- CV, G. O. (2008). <http://www.grupoocci.com/>. Obtenido de <http://www.grupoocci.com/>.
- D-4318 ASTM. (s.f.). *métodos de ensayo que son para la determinación del límite líquido, límite plástico, y el índice de plasticidad de los suelos*.
- Das., B. M. (1998). *fundamentos de la ingeniería geotécnica*. THOMSON LEARNING.
- Das., B. M. (1999). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*||. THOMSON.
- De Leon Ambrocio, B. (2016). Morelia.
- De Leon Ambrocio, B. (2017). Morelia, Mich.
- definiciónABC. (2010). <http://www.definicionabc.com/general/agua.php>. Obtenido de <http://www.definicionabc.com/general/agua.php>.
- DIEGO ALENCER RANGEL RENDON, G. O. (2009). *PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL SULFATO DE SODIO*.
- EF HANSEN, C. R. (2001).  
<https://scholar.google.com.mx/scholar?hl=es&q=investigaciones+sobre+arcilla+con+aditivos&btnG=&lr=>. Obtenido de <https://scholar.google.com.mx/scholar?hl=es&q=investigaciones+sobre+arcilla+con+aditivos&btnG=&lr=>.
- Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería - Perú. (julio de 2009).  
<http://ingecivilcusco.blogspot.mx/2009/07/aditivos-aspectos-generales.html>. Obtenido de <http://ingecivilcusco.blogspot.mx/2009/07/aditivos-aspectos-generales.html>.
- Flores, A. (2010). *La norma ASTM D 6276 como instrumento de estabilización de suelos para fines patrimoniales*. Morelia .
- For-Eschool. (2010). [http://rachel.golearn.us/modules/\\_for\\_schools/wp/s/Sodium\\_sulfate.htm](http://rachel.golearn.us/modules/_for_schools/wp/s/Sodium_sulfate.htm). Obtenido de [http://rachel.golearn.us/modules/\\_for\\_schools/wp/s/Sodium\\_sulfate.htm](http://rachel.golearn.us/modules/_for_schools/wp/s/Sodium_sulfate.htm).
- Gonzalez, V. L. (1 de junio de 2012). <http://slidessahre.net/vialetalaraGonzales/la-tierra-y-sus-componentes>. Obtenido de <http://slidessahre.net/vialetalaraGonzales/la-tierra-y-sus-componentes>.
- GUIA-QUIMICA, L. (03 de Diciembre de 2013). <http://quimica.laguia2000.com/quimica-inorganica/sulfato-de-sodio>. Obtenido de <http://quimica.laguia2000.com/quimica-inorganica/sulfato-de-sodio>.
- Hernández, M. S. (2013). <https://es.scribd.com/doc/125562521/Ficha-Tecnica-Nopal-2013>. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/125562521/Ficha-Tecnica-Nopal-2013>.
- Hernández, S. d. (2012). *ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS NO*. morelia.
- Hidalgo, U. A. (agosto de 2011).  
[https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P\\_Lectura/icbi/assignatura/MecaSuelosI.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Lectura/icbi/assignatura/MecaSuelosI.pdf). Obtenido de [https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P\\_Lectura/icbi/assignatura/MecaSuelosI.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Lectura/icbi/assignatura/MecaSuelosI.pdf).





- III., W. H. (1997). *Geology made simple*. New York: Services company.
- impermeable, m. c. (05 de octubre de 2015). <http://www.mastiposde.com/yeso.html>. Obtenido de <http://www.mastiposde.com/yeso.html>.
- INSTITUTO DEL CONCRETO. (2014). <http://www.revistacyt.com.mx/>. Obtenido de <http://www.revistacyt.com.mx/>.
- Jiménez, R. I. (2000). <http://www.arqhys.com/construccion/morteros-construccion.html>. Obtenido de <http://www.arqhys.com/construccion/morteros-construccion.html>.
- Júarez Baldillo, E. y. (206). *Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México: noriega limusa.
- Las. (2002). A.
- M.MMP.06. (s.f.). *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*.
- Merino, P. P. (2010). <http://definicion.de/yeso/>. Obtenido de <http://definicion.de/yeso/>.
- NMX-C-011. (1974). *Yeso calcinado para la construcción*. México.
- NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción, Agregados. Muestreo*. México.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción, Agua para concreto. Especificaciones*. México.
- NMX-C-144-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Requisitos para el aparato usado en la determinación de la fluidez de morteros*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-144-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Requisitos para el aparato usado en la determinación de la fluidez de morteros*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción - Concreto - Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-170-ONNCCE. (1997). *Agregados, Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo requerido de las pruebas*. México.
- NMX-C-177-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción - Concreto - Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto, mediante la resistencia a la penetración*. CDMX: ONNCE.
- NoPalmix. (2010).  
[https://www.google.com.mx/search?q=fibra+de+nopal&rlz=1C1NDCM\\_esMX722MX722&espv=2&biw=1366&bih=662&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiln8SRwbjSAhUW-mMKHReIDk0Q\\_AUIBigB#tbn=isch&q=polvo+de+fibra+de+nopal&\\*&imgrc=0E\\_oL7KoMdG6GM:](https://www.google.com.mx/search?q=fibra+de+nopal&rlz=1C1NDCM_esMX722MX722&espv=2&biw=1366&bih=662&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiln8SRwbjSAhUW-mMKHReIDk0Q_AUIBigB#tbn=isch&q=polvo+de+fibra+de+nopal&*&imgrc=0E_oL7KoMdG6GM:)
- Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. (1998). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED.
- proinsa, y. (s.f.). <http://www.yesosproinsa.com/Yeso.html#Historia>. Obtenido de <http://www.yesosproinsa.com/Yeso.html#Historia>.







Química Orgánica. (21 de Octubre de 2012). <http://nutricioncuv.blogspot.mx/2012/10/propiedades-fisicoquimicas-del-agua.html>. Obtenido de <http://nutricioncuv.blogspot.mx/2012/10/propiedades-fisicoquimicas-del-agua.html>.

Quiminet. (20 de junio de 2006). <https://www.quiminet.com/articulos/clasificacion-de-las-arcillas-2561507.htm>. Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/clasificacion-de-las-arcillas-2561507.htm>.

QUIMITET. (12 de MARZO de 2012). <https://www.quiminet.com/articulos/el-analisis-de-color-colorimetria-y-colorimetro-2704601.htm>. Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/el-analisis-de-color-colorimetria-y-colorimetro-2704601.htm>.

RED DURAR. (1998 ). *Manual de Inspeccion, Evaluación y Diagnostico de Corrosion en Estructuras de Hormigin Armado*.

Rivera, I. G. (2002).

<ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%202%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%2020PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2002%20-%20Agregados%20para%20mortero%20y%20concreto.pdf>. Obtenido de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%202%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%2020PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2002%20-%20Agregados%20para%20mortero%20y%20concreto.pdf>.

Schiffer, D. J. (2000). *Las arcillas el barro noblel*. México: c.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2007). Límites de Consistencia. En S. d. transporte, *Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales*.

Simbasica, J. G. (06 de marzo de 2014).

[http://www.academia.edu/6386237/PROPIEDADES\\_FISICAS\\_Y\\_MECANICAS\\_DE\\_LOS\\_SUELOS](http://www.academia.edu/6386237/PROPIEDADES_FISICAS_Y_MECANICAS_DE_LOS_SUELOS). Obtenido de [http://www.academia.edu/6386237/PROPIEDADES\\_FISICAS\\_Y\\_MECANICAS\\_DE\\_LOS\\_SUELOS](http://www.academia.edu/6386237/PROPIEDADES_FISICAS_Y_MECANICAS_DE_LOS_SUELOS).

TUSALUDENCORTO. (01 de JUNIO de 2015). <https://tusaludencorto.wordpress.com/tag/tipos-de-fibra/>. Obtenido de <https://tusaludencorto.wordpress.com/tag/tipos-de-fibra/>.

universia. (30 de septiembre de 2010). <http://noticias.universia.net.mx/ciencia-nn-tt/noticia/2010/09/13/472052/investigadores-registran-50-tipos-nopal.html>. Obtenido de <http://noticias.universia.net.mx/ciencia-nn-tt/noticia/2010/09/13/472052/investigadores-registran-50-tipos-nopal.html>.

USG, y. S. (10 de Marzo de 2008). <http://materialesvite.com.mx/files/USGUSOS.pdf>. Obtenido de <http://materialesvite.com.mx/files/USGUSOS.pdf>.

Villanueva Guzmán, M. A. (2016).





yeso.com. (julio de 2010). <http://www.textoscientificos.com/química/cales/usos-obtención-yeso-cal>.  
Obtenido de <http://www.textoscientificos.com/química/cales/usos-obtención-yeso-cal>.

