

# Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Química



*Líder en Ciencia y Tecnología*

## **Alternativa tecnológica para la producción artesanal de ladrillos de arcilla mediante reacciones de hidratación de mezclas de suelo – cemento.**

Protocolo de Investigación presentado por:

**Br. José Roberto López Muñoz**

Para optar al título de:

**Ingeniero Químico**

Tutor:

Msc. Rolando Guevara Arróliga

Asesor:

Msc. Léster Espinoza Pérez

Managua, Nicaragua | Julio 2012

## Tabla de Contenido

<b>I. Introducción.....</b>	<b>5</b>
<b>II. Antecedentes .....</b>	<b>7</b>
<b>III. Justificación .....</b>	<b>9</b>
<b>IV. Objetivos .....</b>	<b>10</b>
4.1    Objetivo General.....	10
4.2    Objetivos Específicos .....	10
<b>V. Marco Teórico .....</b>	<b>11</b>
5.1    Generalidades.....	11
5.2    Componentes del suelo – cemento.....	12
5.2.1 Suelo.....	12
5.2.2 Cemento .....	14
5.2.3 Agregados.....	16
5.3    Propiedades de la arcilla como aditivo en la mezcla de suelo – cemento.....	18
5.3.1 Composición de la arcilla.....	18
5.3.2 Características de la arcilla.....	18
5.3.3 Propiedades de la arcilla.....	20
5.4    Activación térmica de la arcilla .....	21
5.5    Proceso de Hidratación .....	22
5.5.1 Hidratación del cemento portland .....	22
5.5.2 Reacciones de Hidratación de cemento portland .....	25
5.6    Proceso general de Elaboración de Ladrillos.....	26
5.6.1 Extracción de la materia prima.....	26
5.6.2 Mezclado .....	26
5.6.3 Moldeado.....	26
5.6.4 Secado .....	27
5.6.5 Cocción.....	28
5.6.6 Almacenamiento o curado.....	28
5.7    Proceso de elaboración de ladrillos de suelo – cemento.....	29

5.7.1 Selección y extracción del suelo .....	29
5.7.2 Secado y tamizado.....	29
5.7.3 Mezclado de los componentes en seco.....	30
5.7.4 Adición de agua.....	30
5.7.5 Compactación y moldeo.....	31
5.7.6 Curado y acopio .....	31
<b>VI. Material y Método.....</b>	<b>32</b>
6.1 Material.....	32
6.1.1 Suelo y arcilla.....	32
6.1.2 Agua y cemento.....	32
6.2 Método.....	33
6.2.1 Condiciones experimentales.....	33
6.2.2 Diseño experimental.....	33
6.2.3 Descripción del diseño experimental .....	39
6.2.4 Evaluación de los experimentos.....	41
<b>VII. Cronograma de actividades.....</b>	<b>44</b>
<b>IX. Nomenclatura .....</b>	<b>45</b>
<b>X. Referencias.....</b>	<b>46</b>

## Lista de figuras y tablas

### Figuras

Figura 5.1: Diagrama Textural del suelo .....	12
Figura 5.2: Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado .....	16
Figura 5.3: Estructura de las arcillas .....	18
Figura 5.4: Esquema del proceso de hidratación de las partículas de cemento Portland .....	20
Figura 5.4: Representación esquemática de la hidratación de la pasta con una baja relación a/c y con una alta relación a/c, hecha con un cemento Portland .....	22
Figura A1: Análisis de difracción de rayos x de ettringita .....	35
Figura A2: Composición de la pasta de cemento fresca y endurecida en la máxima hidratación para varias relaciones a/c .....	35

### Tablas

Tabla 5.1: Componentes del cemento.....	15
Tabla 5.2: Tipos de silicatos .....	18
Tabla 6.1: Factores independientes .....	32
Tabla 6.2: Factores dependientes.....	32
Tabla 6.3: Diseño de experimento para la mezcla de suelo - cemento.....	34
Tabla 6.4: Factores independientes del segundo diseño.....	35
Tabla 6.5: Diseño de experimento para la activación térmica de la arcilla .....	36

## **I. Introducción**

Desde hace décadas el hombre ha implementado muchas técnicas de mejora en la construcción de edificios, casas, entre otras obras civiles de interés social. Hoy en día los avances tecnológicos han ayudado mucho en la mejora de los materiales de construcción buscando diversas formas de cómo resistir las adversidades de la naturaleza y a la vez proteger al medio ambiente de la contaminación. Algunos de los materiales más utilizados en la construcción son el cemento portland, la arcilla y la arenilla, los cuales son muy importantes en la elaboración de ladrillos cocidos.

Actualmente en Nicaragua existen fábricas industrializadas y artesanales, las cuales elaboran ladrillos para la construcción. Muchas de estas industrias principalmente las artesanales utilizan en el proceso de la elaboración de estos ladrillos una etapa que se le conoce como quemado en la que se utiliza como fuente de combustible leña, el aserrín entre otros materiales como llantas y carbón, que puedan generar una temperatura cercana a los 900°C, lo cual ocasiona un aumento en la densidad y mejora la resistencia mecánica de los ladrillos, sin embargo se incurre en un elevado consumo energético para poder obtener un ladrillo con los requerimientos de calidad que establecen las normas.

Sin embargo la forma de elaboración de estos ladrillos perjudica grandemente el medio ambiente con emisiones tóxicas a la atmósfera como dioxinas y furanos, que están presentes en el cemento además de otros aditivos, por otro lado se tiene el despale ocasionado por las industrias que requieren de los recursos de la madera como combustible en el proceso.

Es por esto que esta investigación se basará en buscar otra alternativa más amigable con el medio ambiente utilizando ladrillos a base de suelo – cemento, que a diferencia de los ladrillos cocidos este se realiza mediante la estabilización y el prensado del suelo, utilizando la tierra no fértil como materia prima, por lo que la tierra no se cuece sino que es estabilizada con la adición de cemento.

A este tipo de mezcla se le realizaran diversas pruebas de granulometría y composición de la mezcla suelo – cemento con el propósito de obtener una mejora en las propiedades físico-mecánicas de los ladrillos, variando las relaciones de proporción entre la arcilla y el cemento en el proceso de fabricación, con el objetivo de observar experimentalmente como varía la resistencia a la compresión mecánica en cada composición.

Con esto se pretende disminuir notablemente el uso de la madera como combustible, en cada una de las industrias que elaboran ladrillos en nuestro país, ya sea de forma artesanal o industrial. Esta investigación contribuirá no solo en reducir el costo energético sino que también se pretende optimizar el proceso de elaboración de ladrillos obteniendo una mejora en las propiedades físico-mecánicas de este material.

## II. Antecedentes

Con el desarrollo de la revolución industrial a principios del siglo XVIII hasta hoy en día, se han realizado diversos estudios de diferentes tipos de materiales de construcción con el propósito de mejorar algunas de las propiedades físico-mecánicas, además de prevenir la contaminación. A partir de este acontecimiento y con el objetivo de buscar otra alternativa para disminuir las emisiones de agentes tóxicos a la atmosfera en la elaboración de ladrillos, se emplea un material sostenible a base de suelo – cemento, con el cual se empezaron a realizar estudios relacionados a la caracterización y mejora de las propiedades de los ladrillos a base de este material.

Dentro de los estudios relacionados al uso del suelo – cemento están aquellos realizados por Natalini (Universidad de Nordeste, Republica de Argentina) [1], el cual basó su estudio en el análisis granulométrico de diferentes composiciones del suelo (arena, arcilla y limo) para definir si es apto para ser utilizado como suelo – cemento. Además realizó ensayos variando la proporción del volumen de cemento para determinar la estabilización de la mezcla.

El estudio elaborado por Gatani (2000) [2], estuvo orientado a la descripción de las características de los ladrillos de suelo – cemento, así como los componentes que se utilizaron para su fabricación, los cuales son las proporciones del suelo, el cemento y el agua. Además Gatani hace énfasis en su estudio de cada una de las etapas que componen la elaboración de los ladrillos a base de suelo – cemento, seguido del análisis granulométrico de los suelos que se emplearon en el proceso.

Begliardo (2004) [3], estudió la comparación de diferentes ensayos de laboratorio sobre tipos de ladrillos confeccionados a partir de suelos superficiales de naturaleza arcillosa y mezclas de suelos más profundos, de hasta 12m provenientes del secado de barro de excavación, los cuales usualmente son de naturaleza limosa. Sus investigaciones se centraron en lograr durabilidad, resistencia y un buen aspecto de los ladrillos elaborados a base de este material.

Toirac (2008) [4], realizó una reseña en la revista Ciencia y Sociedad en Republica Dominicana acerca del suelo – cemento como material de construcción, en el cual expone los diferentes tipos de suelos que son aptos para ser utilizados para una mezcla de suelo – cemento, además de las condiciones óptimas de mezclado de arena, limo, arcilla y materia orgánica que debe utilizarse para obtener buenos resultados en las propiedades físico mecánicas.

Méndez y cols., (2010) [5], realizaron un informe completo acerca de la mampostería de suelo – cemento confinada, el cual es desarrollado por un proyecto de cooperación técnica llamado Taishin, en este estudio se efectuaron una serie de programas experimentales en paredes elaboradas con suelo – cemento, los cuales se realizaron por medio de modelaciones matemáticas obteniendo como resultados comportamientos gráficos de la carga y distorsión de las paredes.

### **III. Justificación**

Actualmente en Nicaragua muchas de las industrias en todo el país generan gran parte de los gases invernaderos que dañan la capa de ozono, las cuales no son totalmente controladas por normas de protección contra las emisiones de gases tóxicos. Dentro de estas industrias están aquellas que elaboran ladrillos cocidos a base de arcilla, las cuales se les conoce también como Mampostería.

Dichas industrias utilizan hornos de cocimiento en las cuales usualmente usan como fuente de combustión leña y carbón, lo cual ocasiona grandes emisiones de dióxido de carbono, además de las emisiones ocasionadas por cada uno de los ladrillos, los cuales están compuestos de una porción de cemento que al evaporarse por el aumento de la temperatura a aproximadamente 900°C en el proceso de cocido, ocasiona emisiones tóxicas de compuestos de dioxinas y furanos.

El enfoque principal de esta investigación es implementar otra alternativa como el uso de la mezcla de suelo – cemento en la producción de ladrillos, la cual no necesita altas temperaturas para obtener una buena resistencia del material y evita las emisiones contaminantes. Actualmente en Nicaragua no se cuenta con un estudio actualizado acerca de la elaboración de ladrillos a base de una mezcla de suelo – cemento, además no se cuenta con un estudio especializado de la granulometría y las composiciones porcentuales de los suelos que se utilizan en las ladrilleras existentes en el país, por tanto este estudio realizará parte de estos análisis de industrias ladrilleras de Managua.

Algunos de estos análisis se llevaran a cabo en el laboratorio de la FTC (Facultad de Tecnología de la Construcción), en el Recinto Universitario Pedro Araúz Palacios (RUPAP), en el que se realizaran pruebas de resistencia a la compresión mecánica de los ladrillos a los cuales se les variarán las relaciones de composición de la mezcla de acuerdo a las proporciones de arcilla y cemento, con el propósito de obtener una proporción óptima.

## **IV. Objetivos**

### **4.1 Objetivo General**

Estudio de las propiedades físico – mecánicas de los ladrillos a base de suelo – cemento y ladrillos de mezclas utilizadas por industrias artesanales de Nicaragua.

### **4.2 Objetivos Específicos**

1. Caracterizar la granulometría de la arcilla roja utilizada en la industria artesanal, en específico por Ladrillera Bella Vista.
2. Determinar la resistencia a la compresión, porcentaje de absorción de humedad y peso unitario de los ladrillos producidos artesanalmente y de las mezclas propuestas.
3. Determinar la influencia de la sustitución parcial de arcilla por cemento sobre las propiedades físico – mecánicas del material obtenido.
4. Comparar las propiedades físico – mecánicas obtenidas de los ladrillos artesanales y los ladrillos de suelo – cemento.
5. Determinar la influencia en la resistencia mecánica y porcentaje de absorción con el uso de dos marcas diferentes de cemento portland.
6. Determinar la influencia de la activación térmica de la arcilla a diferentes temperaturas de calcinación.
7. Comparar la influencia de la arcilla activada térmicamente a diferentes porcentajes de sustitución de cemento portland.

## V. Marco Teórico

### 5.1 Generalidades

En la industria de la construcción el suelo ha jugado un papel muy importante en la producción de materiales para construcción de edificios, carreteras, pistas, casas de vivienda social, entre otras edificaciones, y su importancia se debe a su composición mineralógica y orgánica que ésta posee. La capacidad del suelo de mezclarse con otros materiales o sustancias la hace capaz de ser un material apto para la construcción.

La forma tradicional de uso del suelo es como adobe o suelo apisonado, aunque con limitaciones: poca resistencia mecánica y muros de gran espesor, vulnerabilidad a los agentes atmosféricos y a la erosión por acción de agentes externos. Gatani (2000) [2].

Es por este tipo de limitaciones, que el suelo es mezclado con un estabilizante como el cemento y una porción de agua, que luego es comprimido para mejorar sus propiedades físico-mecánicas. A diferencia de los ladrillos elaborados a mano, que utilizan la capa fértil del suelo y se someten a un proceso de cocción a alta temperatura, requieren de un alto consumo de energía de combustión.

El suelo – cemento es una mezcla íntima de suelo, convenientemente pulverizado, con determinadas porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mayor densidad. Cuando el cemento se hidrata la mezcla se transforma en un material sólido, durable y rígido. Se le usa principalmente como base en los pavimentos de carreteras, calles y aeropuertos. Besoain (1995) [6].

En otras palabras podemos decir que la mezcla de suelo – cemento no es más que la mezcla de suelo no fértil con una porción de cemento y agua adicionados en proporciones adecuadas y compactadas. Lo que corresponde a las propiedades de los minerales que posee el suelo como la arcilla y la arenilla, los cuales son parte del comportamiento físico-mecánico que ha mejorado a través de la estabilización con aglomerantes minerales.

## 5.2 Componentes del suelo – cemento

### 5.2.1 Suelo

El suelo es uno de los componentes indispensables en la mezcla de suelo – cemento en la fabricación de ladrillos para construcción. El suelo ha sido utilizado desde hace siglos como materia prima para la elaboración de diferentes materiales de construcción ya que por su composición fisicoquímica la hace apta para este tipo de materiales.

El suelo desde el punto de vista físico, se le puede definir como un sistema de gran complejidad, heterogéneo, disperso y trifásico (líquido, sólido y gaseoso). El suelo como sistema físico ha implicado tradicionalmente el comportamiento mecánico del suelo. Sampat A. Gavande (1991) [7].

La composición heterogénea del suelo le brinda ciertas propiedades físicas como la plasticidad, rigidez, dureza entre otras propiedades, las cuales pueden tener cierta dependencia de las proporciones en la composición química del suelo. Según el estudio realizado por Toirac (2008) [4], el suelo esta caracterizado por dos grandes grupos que son los suelos finos compuestos por arcillas y limos, y los suelos gruesos que están compuestos por gravas y arenas.

Cada uno de estos grupos de suelos se les caracteriza por la granulometría que presentan. Los suelos finos se caracterizan por tener tamaños de partículas muy pequeños, los cuales al mezclarse con otros aditivos como el cemento les confieren fuertes uniones moleculares. En cambio los suelos gruesos que poseen partículas mayores son poco solubles en agua pero forman partículas más resistentes cuando son mezclados con otros aditivos.

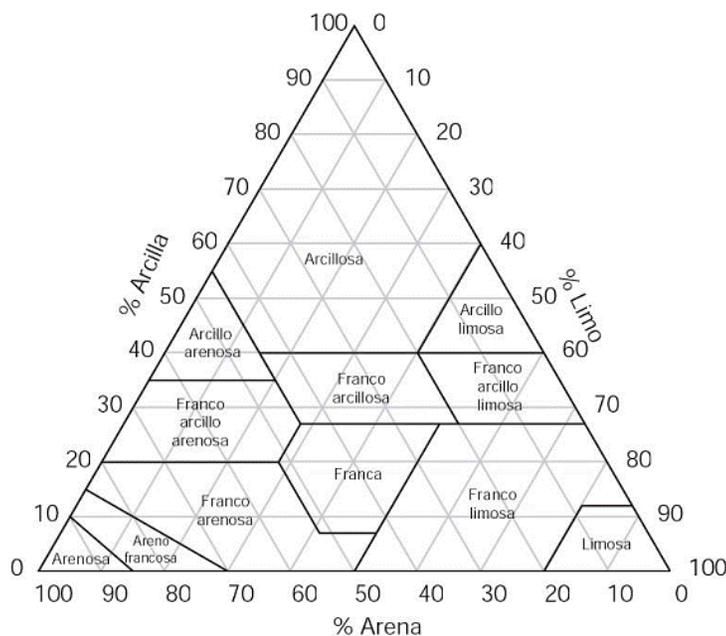
Estas propiedades son importantes en el empleo de materiales de construcción ya que nos brindan información indispensable para su manejo como ejemplo de esto, se conoce que los suelos que tienen un predominio de fracción gruesa requieren un consumo mucho menor de cemento que otro tipo de suelos.

- **Textura del suelo**

Una de las propiedades a tomar en cuenta en **el análisis del suelo** es la textura que predomina, es decir **la fracción o el porcentaje de arena, de arcilla y de limo que tiene la composición inorgánica del suelo.**

El término textura se usa para representar la composición granulométrica del suelo. Cada término textural corresponde con una determinada composición cuantitativa de arena, limo y arcilla. En los términos de textura se prescinde de los contenidos en gravas; se refieren a la fracción del suelo que se estudia en el laboratorio de análisis de suelos y que se conoce como tierra fina. Por ejemplo, un suelo que contiene un 25% de arena, 25% de limo y 50% de arcilla se dice que tiene una textura arcillosa. Los términos texturales se definen de una manera gráfica en un diagrama triangular que representa los valores de las tres fracciones. Jordán (2005) [8].

El diagrama triangular que se menciona anteriormente es muy útil para determinar los porcentajes presentes en el análisis del suelo que utilizan en la elaboración de ladrillos. El diagrama muestra los límites de arena, limo y arcilla que contienen las diferentes clases de suelos como se muestra en la Figura 5.1.



**Figura 5.1. Diagrama Textural del suelo**

Fuente: Manual de Edafología, Universidad de Sevilla

### 5.2.2 Cemento

Actualmente en Nicaragua existen dos grandes productoras de cemento que son CEMEX y Holcim S.A. Ambas fábricas producen cemento gris de tipo Portland GU (General Use, por sus siglas en inglés), también producen cemento hidráulico. A nivel nacional muchas de las fábricas o empresas de mampostería utilizan cemento producido por cualquiera de las empresas mencionadas, sin embargo algunas de estas empresas se inclinan por el producto que tiene un precio más bajo en el mercado.

Generalmente y de acuerdo a estudios previos ya realizados a cerca de las mezclas de suelo – cemento, es recomendable utilizar cemento de tipo Portland, el cual al ser mezclado con el suelo adquiere propiedades estabilizantes, las cuales una vez hecha la mezcla aumenta la resistencia mecánica.

Cuando el cemento portland es mezclado con el agua, se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adherentes que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su resistencia característica. Corneado (2000) [9].

El agregado de cemento mejora las condiciones del suelo a la acción de agentes como la humedad, dándole características de estabilidad y resistencia. Gatani (2000) [2].

El análisis del cemento es una parte importante de la investigación, ya que éste está compuesto de diferentes minerales los cuales actúan como aglomerantes en la mezcla de suelo – cemento, además son una parte indispensable en las reacciones de hidratación que se llevan a cabo cuando el suelo ha sido estabilizado con el cemento y se le adiciona una porción de agua.

- **Propiedades físicas del cemento**

Las propiedades físicas del cemento se pueden medir mediante ensayos que se pueden realizar en el cemento puro, en la pasta o en el mortero. Una de las propiedades físicas que se toman muy en cuenta en los ensayos es determinar el área superficial y el peso específico.

El área superficial o superficie específica de los granos de cemento son importantes ya que influyen mucho en la hidratación de la mezcla, es decir **si los granos de cemento son muy finos aumenta la velocidad de hidratación de la mezcla, tiende a endurecer con mayor rapidez y desarrolla una resistencia mecánica en un menor tiempo**. Sin embargo producir cemento con un nivel de finura muy alto aumenta los costos de producción y se acorta el tiempo de vida de cemento.

La densidad o peso específico se define como la relación de peso a volumen; su valor varía entre 3.08 a 3.20 gr/cm<sup>3</sup> para el cemento portland tipo 1, pero el cemento que tiene adiciones tiene un peso específico menor porque el contenido de clinker es menor. El peso específico del cemento no indica la calidad del cemento, pero se emplea en el diseño y control de mezclas de concreto. Corneado (2000) [9].

- **Propiedades químicas del cemento**

El cemento está compuesto por cuatro componentes principales que son: 67% CaO, 22% SiO<sub>2</sub>, 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y un 3% de otros compuestos. Estos componentes están presentes en cuatro minerales esenciales que componen el cemento los cuales son: **Alita** (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>) que compone entre el 50% - 70% del cemento Portland, la **Belita** (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) constituye entre el 15% - 30% del cemento Portland, el **Aluminato** (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) compone entre el 5% - 10% del cemento y la **Ferrita** (Ca<sub>2</sub>AlFeO<sub>5</sub>) que esta entre el 5% y el 15%.

En el estudio realizado por Corneado (2000) [9], detalla que los cuatro minerales mencionados anteriormente conforman un poco más del 90% en peso del cemento de tipo Portland que son el **silicato tricálcico**, **el silicato dicálcico**, **el aluminato tricalcico** y el **aluminio ferrito tetracálcico**.

Dichos componentes juegan un rol importante en las reacciones de hidratación del cemento, los cuales al reaccionar con el agua forman nuevos compuestos como el **hidróxido de calcio** y el **hidrato de silicato de calcio**, **siendo este último el principal componente cementante del concreto**, además algunas propiedades como la resistencia, el endurecimiento y la estabilidad dimensional dependen mucho del gel del hidrato de silicato de calcio.

Para representar de una forma un poco más detallada la composición química del cemento se hace referencia a la tabla 5.1, en la que se muestran los componentes del cemento más comunes en las industrias cementeras.

**Tabla 5.1: Componentes del cemento**

Nombre	Composición	Formula Empírica	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	$\text{C}_4\text{AF}$
Hidrato de silicato cálcico	$(\text{CaO})_x \cdot \text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$	Variable	SCH

Fuente: Marroquin, Universidad de San Carlos. Guatemala (2008)

### 5.2.3 Agregados

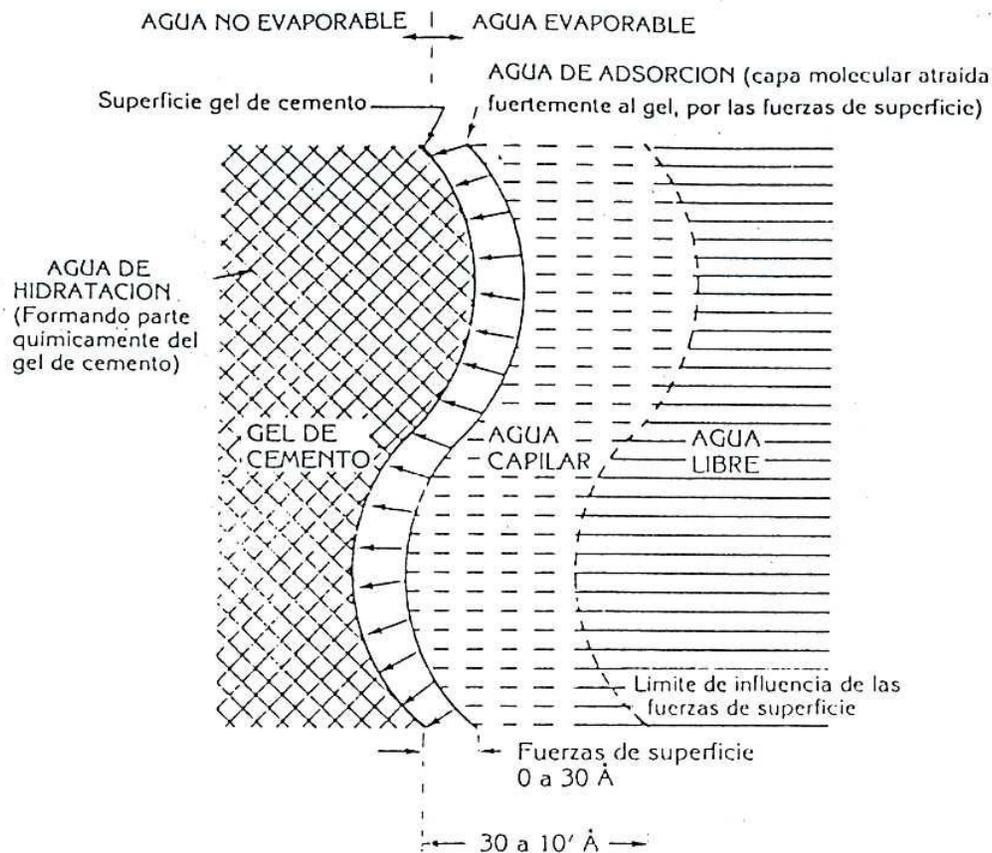
- **Agua**

El agua como aditivo en la mezcla de suelo – cemento es de vital importancia en la activación de las reacciones de hidratación. El uso del agua debe manejarse en proporciones adecuadas y libres de compuestos que entorpezcan las propiedades mecánicas de los ladrillos, como la resistencia mecánica a la compresión. El exceso de compuestos como cloruros, sulfatos o materias orgánicas, que estén presentes en el agua a utilizar en la mezcla, interviene en las reacciones de hidratación ocasionando la pérdida de la calidad del ladrillo y la formación de otros compuestos volátiles.

Es determinante el control de la calidad de agua de la mezcla, ya que esta actúa como lubricante de las partículas de la mezcla. Si resulta excesivamente húmeda o por el contrario, seca, ambos estados **se reflejan en la trabajabilidad del material** y posteriormente, en el acabado superficial de la resistencia y durabilidad del mismo. Gatani (2000) [2].

La interacción de agua y cemento son importantes en relación a las proporciones que se utilizan en la mezcla, ya que un exceso de agua daña el acabado, la durabilidad y la resistencia de compresión de los ladrillos, sin embargo si hay una escasez de agua aumenta la porosidad y la fragilidad lo que ocasiona que las propiedades físico mecánicas de los ladrillos también se vean afectadas.

En la interacción de la pasta de cemento con el agua, se puede apreciar microscópicamente que hay varias capas de agua que se encuentran presentes las cuales son: el agua evaporable, el agua de adsorción, el agua no evaporable, el agua capilar y el agua libre. Cada una de estas capas se ven representadas en la figura 5.2 del cemento hidratado.



**Figura 5.2: Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado.**

Fuente: Portugal. Tecnología del concreto de alto desempeño.

## 5.3 Propiedades de la arcilla como aditivo en la mezcla de suelo – cemento

### 5.3.1 Composición de la arcilla

La arcilla no es una composición única, es una mezcla heterogénea de diversos compuestos y de distintos elementos. La arcilla como fracción heterogénea **esta compuesta por aluminosilicatos** que a su vez están constituidos básicamente por **aluminio, silicio, oxígeno**, entre otros elementos como **sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro entre otros**.

Las arcillas son un conjunto de minerales de origen secundario, formado en el proceso de alteración química de las rocas, poseen un tamaño coloidal, con estructura cristalina bien definida y un gran desarrollo superficial, con propiedades físico-químicas responsables en gran parte de la actividad físico-química del suelo. Jordán (2005) [8].

En relación al tamaño de las partículas de los minerales de arcilla, varían de acuerdo al tamaño del grano, es decir que algunos de estos minerales tienen un determinado tamaño. **El tamaño del grano clasifica las arcillas en finas y gruesas**, como es el caso de las **fracciones gruesas presentes en la arcilla como el cuarzo y el feldespato que oscilan de 2 a 0.2 micras de diámetro**. **Por el contrario las fracciones de minerales en las arcillas finas son menores a 2 micras.**

El cuarzo es una fracción no arcillosa que se utiliza como material de relleno ya que los costos de este mineral son bajos y es relativamente duro y químicamente no reactivo. El feldespato es un fundente, entre los más comunes están algunos grupos de aluminosilicatos que contienen iones de potasio, sodio y calcio.

### 5.3.2 Características de la arcilla

Dentro de las características de la arcilla está su unidad estructural conformada por silicatos que forman un tetraedro de coordinación Si-O. En el escrito realizado por Jordán (2005) [8], Manual de edafología, detalla la forma estructural de las arcillas conformadas por tetraedros de Si-O, en el cual el silicio está situado en el centro del tetraedro de coordinación y está rodeado de cuatro oxígenos, los cuales están situados en los vértices. Estos tetraedros pueden unirse entre sí por la base formando hexaedros, de modo que la fórmula general de las arcillas se puede representar de esta manera:  $(\text{Si}_2\text{O}_4)_n^{2n-}$ .

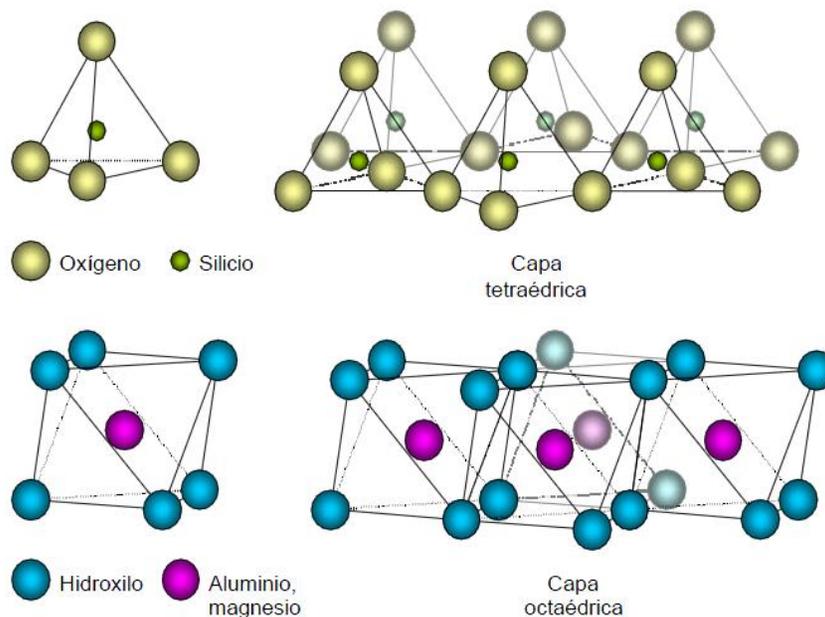
En la tabla 5.2 se representan los tipos de silicatos de acuerdo al número de oxígenos presentes por cada tetraedro.

**Tabla 5.2: Tipos de silicatos**

Número de átomos de oxígeno compartidos por cada tetraedro	Tipo de agrupamiento de los tetraedros	Nombre del gran grupo de silicato
0	Aislados	Nesosilicatos
1	Parejas	Sorosilicatos
2	Anillos	Ciclosilicatos
2 y 3	Cadenas	Inosilicatos
3	Planos	Filosilicatos
4	Tridimensional	Tectosilicatos

Fuente: Manual de Edafología, Universidad de Sevilla

En la tabla que se detalla anteriormente, desde el punto de vista edáfico el grupo más importante de los silicatos son los **filosilicatos**, ya que en este grupo se encuentra la mayoría de los minerales de la fracción arcillosa. En la figura 5.3 se ve claramente la estructura tetraédrica de la estructura de las arcillas.



**Figura 5.3: Estructura de las arcillas**

Fuente: Manual de Edafología, Universidad de Sevilla

### 5.3.3 Propiedades de la arcilla

Como se mencionó anteriormente los minerales arcillosos tienen un tamaño de partícula muy reducido, en los cuales se encuentra una carga eléctrica debido a los iones que están presentes, otorgándole propiedades fisicoquímicas muy particulares como retención y liberación de moléculas orgánicas e inorgánicas, la capacidad para mantenerse dispersas o reunirse en agregados voluminosos, entre otros.

Las arcillas pueden clasificarse en dos grandes grupos de acuerdo a sus propiedades, las cuales son como productos estructurales y las porcelanas. En los productos estructurales se encuentran incluidos los ladrillos de construcción, entre otros materiales. En la elaboración de productos estructurales o porcelanas, las arcillas al estar en contacto con el agua se hacen muy plásticas, propiedad a la que se le domina como hidroplasticidad. Esta propiedad ocasiona que las pastas se vuelvan plásticas y flexibles, y puedan ser moldeadas sin fisuración, a consecuencia de esto se produce una alta resistencia la cual permite que una pieza conformada mantenga su forma durante la manipulación y el secado.

La influencia de la temperatura también ocasiona cambios en las propiedades de los minerales arcillosos. Estos cambios de temperatura se ven presentes en algunas etapas de secado y cocción de ladrillos a una temperatura elevada, estos cambios desencadenan reacciones complejas como la vitrificación, la cual no es más que la formación de un vidrio líquido que fluye hacia los poros y en parte llena su volumen.

El grado de vitrificación depende de la temperatura de cocción y del tiempo, así como de la composición del cuerpo. La temperatura a la cual se forma la fase líquida disminuye gracias a la adición de agentes fundentes tales como el feldespato. Esta fase fundida fluye alrededor de las partículas no fundidas y llena los poros gracias a las fuerzas de tensión superficial. Callister (1995) [10].

#### 5.4 Activación térmica de la arcilla

El proceso de activación térmica de la arcilla se realiza a elevadas temperaturas de calcinación que ocurren desde los 500°C hasta los 1000°C, sin embargo la temperatura óptima de activación puede depender de la pureza del material, es decir de la composición química que tenga la arcilla ya que una variación en la composición y de los minerales acompañantes que se encuentran presentes influye en la temperatura de calcinación. La temperatura de calcinación de la arcilla influye en las propiedades puzolánicas de ésta, debido a su composición química en la que predomina la sílice, el aluminio y el hierro.

En el estudio realizado por Castillo y cols. (2010) [11], hace énfasis en que la temperatura de activación óptima para el caso del caolín se encuentra en un rango de 630 a 800°C y que la mayor reactividad se alcanza en el proceso de calcinación cuando se da la deshidroxilación, que se caracteriza por el consumo de hidróxido de calcio (CH) por parte de la sílice o alúmina que se encuentra presente en la puzolanas, para la formación de los hidrosilicatos de calcio (CSH), los cuales son el contenido del gel que se forma como producto en la reacción de la hidratación del cemento.

El tratamiento térmico de la arcilla provoca una disminución considerable de la superficie específica debido a la aglomeración de las partículas y por el fenómeno de sinterización líquida, lo cual ocasiona un refinamiento de la estructura de los poros. Producto de esto la reactividad de la arcilla se ve afectada, tanto en su estado fresco como en su estado endurecido, influyendo en la resistencia a la compresión y la durabilidad de los materiales. Por tanto es necesario realizar un proceso de activación para revertir algún problema que se presente en la reactividad puzolánica, el cual se realiza en un proceso de molienda. En el estudio realizado por Castillo y cols. (2010) [11], se comprobó un incremento de la resistencia mecánica debido a la activación de las puzolanas a través de la molienda.

## 5.5 Proceso de Hidratación

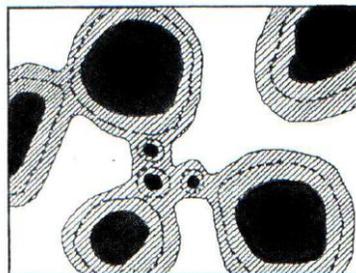
### 5.5.1 Hidratación del cemento portland

La hidratación del cemento es una de las etapas más importantes en la elaboración de ladrillos ya que se puede prever que compuestos se formarán de las reacciones de hidratación, es decir en presencia de agua los silicatos y aluminatos forman productos de hidratación, los cuales con el paso del tiempo producen una pasta firme y dura, a la que se le conoce como pasta de cemento endurecida.

La hidratación es un proceso exotérmico y al mismo tiempo altamente dependiente de condiciones experimentales tales como: agitación, temperatura, relación agua/sólidos (relación agua/producto hidráulicamente activo), **presencia de álcalis**, tiempo, reactividad del cemento (tamaño de partícula) y humedad relativa del ambiente. Rivas y cols. (2003) [12].

A parte de las condiciones que se mencionaron anteriormente hay que tomar muy en cuenta el tamaño de las partículas de la mezcla, ya que la hidratación comienza por los granos de cemento, y la velocidad de cada reacción será un factor importante, el cual dependerá del tamaño de los granos. Al entrar en contacto los granos con el agua una parte de estos se disuelve y la solución supersaturada sale de la superficie de reacción hacia los poros más grandes a través de los pequeños poros.

El proceso de hidratación empieza cuando las partículas del cemento entran en contacto con el agua, cada partícula tiene una capa de agua a su alrededor y a medida que transcurre el tiempo cada grano se va disolviendo en su capa externa. En la figura 5.4 se denota un esquema de hidratación de las partículas de cemento portland.



**Figura 5.4: Esquema del proceso de hidratación de las partículas de cemento Portland**

Fuente: Portugal. Tecnología del concreto de alto desempeño.

Como se detona en la figura 5.4, las líneas punteadas alrededor de cada partícula es el límite del tamaño original de cada grano, las áreas negras representan la porción de cemento no hidratada y el área rayada representa los productos de la hidratación, donde los espacios blancos son los poros capilares llenos con agua.

Realizando una esquematización de la reacción que ocurre en el proceso de hidratación de los silicatos presentes en el cemento, como se observa en la figura 5.4, se tiene lo siguiente:



Donde:

$C_nS$ : Silicatos de calcio.

$H_2O$ : Agua.

gel SCH: Silicatos de calcio hidratados (gel de cemento).

$Ca(OH)_2$ : Hidróxido de calcio.

Las propiedades físicas de los hidratos de silicato de calcio son los responsables del desarrollo de la resistencia, durabilidad y endurecimiento del cemento. En el proceso de hidratación se forman cristales hidratados a los que se les conoce como Ettringita, los cuales se forman entre las partículas de cemento, además de cristales de SCH (compuestos silico - calcáreos hidratados), como se muestra en la figura A1 del apéndice.

De la reacción que se describe anteriormente también se ve como producto hidróxido de calcio, el cual es liberado por la hidrólisis de los silicatos de calcio, éste forma placas hexagonales muy delgadas las cuales posteriormente se fusionan en un depósito entre los granos de cemento hidratado.

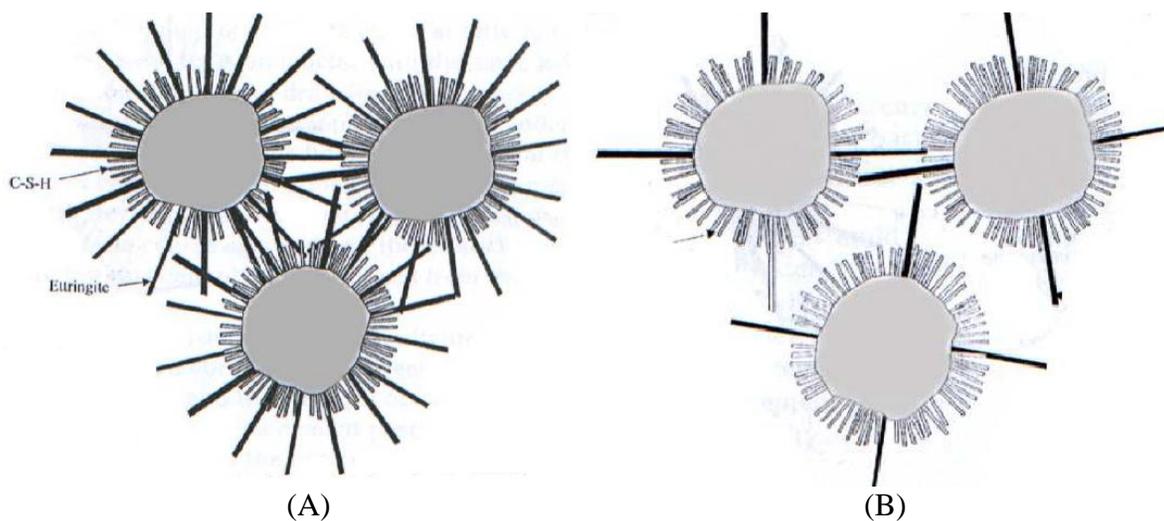
---

<sup>1</sup> Marroquin, (2008). Efecto de la activación química, con un aditivo, de las puzolanas en morteros endurecidos de cemento.

Estos compuestos o cristales son los responsables de la formación de la resistencia en la pasta de cemento, el cual depende mucho de la relación que existe entre la porción de agua y cemento que se mezclan. Es decir, cuando se utiliza una baja relación agua/cemento (a/c) se espera que la resistencia sea mucho mayor en la pasta que cuando se utiliza una alta relación agua/cemento.

La edad o el tiempo en días que tiene la mezcla hidratada es un factor claro que incide en la formación de la resistencia mecánica. Esto se debe a que cada partícula de cemento que tiene formados cristales de Ettringita y SCH, interactúan entre sí. Por tanto si se tiene una relación de a/c alta, las partículas estarán más alejadas unas de otras, por el contrario cuando se tiene una relación a/c baja, las partículas estarán más cerca unas de otras lo cual quiere decir que la interrelación es más estrecha, por consiguiente es de esperar que la resistencia sea superior a medida que pasa el tiempo.

En la figura 5.5 se representa gráficamente como cada partícula interactúa entre sí cuando hay una baja y alta relación de a/c en la mezcla.



**Figura 5.5: Representación esquemática de la hidratación de la pasta con una baja relación a/c (A) y con una alta relación a/c (B), hecha con un cemento Portland.**

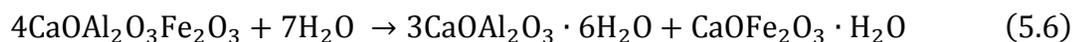
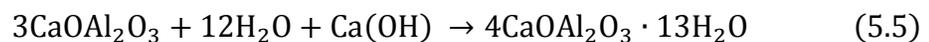
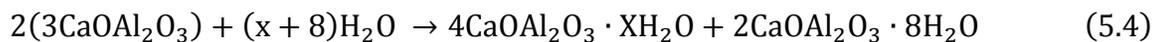
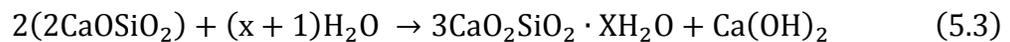
Fuente: Portugal. Tecnología del concreto de alto desempeño.

Como se observa en la figura 5.5, las partículas que están más alejadas unas de otras ocasionan un bajo crecimiento de cristales de Ettringita y SCH, los cuales causan una débil rigidez de la mezcla, sin embargo cuando se presencia un crecimiento más prolongado de largos cristales de Ettringita hay una más alta resistencia. Dicho proceso se puede ver con mucho más detalle en la figura A2 del apéndice.

### 5.5.2 Reacciones de Hidratación de cemento portland

Las reacciones químicas que describen los procesos de hidratación del cemento son muy complejas, las cuales son las que determinan el proceso de fraguado del cemento. El **fraguado es uno de los términos que se utilizan para describir la rigidez de la pasta del cemento, el fraguado no es más que el cambio del estado fluido a un estado rígido de la pasta de cemento**, en el cual éste adquiere cierta resistencia, además va acompañado por los cambios de temperatura.

Las reacciones de hidratación que forman parte de este proceso de fraguado del cemento portland son:



Todas las reacciones que se muestran son exotérmicas, sin embargo una de las reacciones que genera más liberación de calor es la reacción de hidratación de  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ , también conocida como **aluminato tricálcico**, seguida de  $3\text{CaOSiO}_2$ ,  $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y por último  $2\text{CaOSiO}_2$ . Cada una de las reacciones se debe a que son los componentes presentes en el cemento portland como se muestra en la tabla 5.1.

## **5.6 Proceso general de Elaboración de Ladrillos**

### **5.6.1 Extracción de la materia prima**

Para la elaboración de ladrillos se utiliza como materia prima la tierra con un contenido de arcilla, la cual debe ser extraída a un aproximado de 2m de profundidad evitando así el uso de la capa vegetal que se encuentra sobre la superficie del suelo, la cual tiene un alto contenido de material orgánico.

Las propiedades de la mezcla van a depender del contenido granulométrico del suelo, es decir si es muy arcilloso, limoso o arenoso. En algunos casos algunos de los productores de ladrillos agregan arcilla excavada de algunos depósitos y la mezclan con el suelo para aumentar el porcentaje arcilloso en la mezcla.

### **5.6.2 Mezclado**

En la etapa de mezclado se adiciona la porción de agua requerida para obtener una humedad óptima, la cual deberá ser amasada constantemente ya sea por vía mecánica o manual, hasta obtener una pasta homogénea. En distintos lugares de producción de ladrillos, los métodos pueden variar al agregarle algunos aditivos en esta etapa de mezclado como aglutinantes, y diferentes tipos de arcillas.

Para evitar la formación de grumos en la mezcla, en algunas ocasiones se recomienda agregar el agua en forma de lluvia, lo que proporciona una mejor distribución del agua en toda la mezcla.

### **5.6.3 Moldeado**

Esta etapa debe continuarse de forma inmediata de la etapa anterior ya que la mezcla puede ganar humedad o perderla, dependiendo de las condiciones climáticas con las que se opera, además la distancia de operación entre estas etapas no debe ser muy alejada por las condiciones mencionadas anteriormente.

Los métodos de moldeo pueden variar de acuerdo a las condiciones con las que se cuenta para la producción de los ladrillos. El moldeo puede realizarse de forma manual, vertiendo la mezcla en moldes llamados gradillas o graveras y presionándolos manualmente, también puede realizarse por maquinas o prensas que tienen relieves.

Es importante e independientemente del método que se utilice para el moldeo de los ladrillos, que no queden poros o espacios vacíos, ya que estos facilitarán el agrietamiento o las fisuras de los ladrillos una vez terminados, además deben de realizarse sobre una base plana para evitar deformaciones en los ladrillos.

#### **5.6.4 Secado**

Una vez concluida la etapa anterior los moldes son retirados después de cierto tiempo para no deformar los ladrillos recién moldeados. En esta etapa los ladrillos deben secarse lo suficiente para poder ser manipulados con más facilidad sin ocasionar fisuras o agrietamientos.

Los ladrillos deben colocarse de forma que las dos caras que tienen el área superficial más grande estén expuestas al aire y al calor para evaporar la mayor cantidad de humedad posible. Esta etapa tarda alrededor de 24 horas, luego se forman muros de secado colocando hileras sobre otras hileras dejando espacio suficiente para la entrada de aire seco, estos permanecen en el muro de 15 a 30 días para evaporar el restante de humedad.

Cabe mencionar que esta etapa debe prever las condiciones climáticas con las que se trabaja, ya que en temporada de invierno los ladrillos deben colocarse bajo techo y en condiciones en las que no aumente la humedad de los mismos. En algunos procesos se utilizan secadores a cierta altura para aumentar la velocidad de secado.

### **5.6.5 Cocción**

En esta etapa se someten a temperaturas elevadas los ladrillos secados, esto se lleva a cabo en hornos fabricados de forma artesanal o en hornos industriales. En algunos procesos se utilizan los mismos ladrillos elaborados para fabricar los hornos de forma piramidal con base rectangular, donde se colocan los quemadores donde se lleva a cabo la combustión. Usualmente se utiliza leña u otros materiales que generen la combustión necesaria para generar la temperatura deseada.

Esta es una de las etapas más complejas en la elaboración de ladrillos ya que su propósito es llevar a cabo la **sinterización y vitrificación de los ladrillos de forma adecuada. La sinterización provoca un creciente cambio en las estructuras cristalinas presentes en la arcilla, dichos cambios constituyen una serie de procesos fisicoquímicos que inician con las reacciones en estado sólido en contacto con el agua.**

Durante el proceso de cocción, el material, ya bastante seco como para no agrietarse al ser sometido al fuego, adquiere la resistencia necesaria para ser empleado como material de construcción, de lo que se deduce que esta etapa es la más compleja del proceso de elaboración de los ladrillos de cerámica roja. Toctaquiza (2008) [13].

Los ladrillos sometidos al tratamiento térmico en el horno adquieren la resistencia mecánica por el proceso de sinterización mencionado anteriormente, éste proceso comienza con una temperatura cercana a los 800°C y continua hasta alcanzar una temperatura alrededor de los 1200°C en el que se da lugar a la fusión y recristalización de los materiales.

### **5.6.6 Almacenamiento o curado**

El almacenamiento de los ladrillos cocidos usualmente se hace bajo techo para evitar los posibles cambios climáticos en épocas lluviosas. En algunos casos se dejan en áreas abiertas cubiertos con capotes de plástico. Estos ladrillos están aptos para ser utilizados en la construcción después de haber tenido como mínimo 21 días de edad.

## **5.7 Proceso de elaboración de ladrillos de suelo – cemento**

En la elaboración de ladrillos a base de suelo - cemento, el proceso de producción es un poco diferente al de ladrillos cocidos. El proceso de elaboración de este tipo de ladrillos se encuentra en el estudio realizado por Gatani (2000) [2], en Argentina como una alternativa ecológica para la construcción.

### **5.7.1 Selección y extracción del suelo**

Para la elaboración de los ladrillos es necesario conocer la composición porcentual que posee el suelo de arcilla y composición limosa en una muestra de arena, en el estudio realizado por Gatani (2000) [2], se utiliza el método de la botella o probeta, en el que se hace precipitar una muestra de suelo, para identificar el contenido que esta posee.

En algunos casos si se observa que la cantidad de arcilla presente en la muestra es muy baja se requiere adicionar más porcentaje de arcilla como aditivo en la mezcla. Esta materia prima puede ser comprada o extraída en un área cercana a la fábrica de producción, además la profundidad de extracción se determinará de acuerdo a la densidad de las rocas y las herramientas con las que se cuente.

### **5.7.2 Secado y tamizado**

El proceso de secado en esta etapa se realiza debido a que una vez que se extrae la materia prima, esta puede contener un alto porcentaje de humedad, por lo que es necesario utilizar métodos de secado como la exposición al sol en capas, lo cual facilita el proceso de tamizado, ya que entre más seco y granular se encuentre la materia prima al realizar el mezclado con el cemento ésta será homogénea, favoreciendo así la estabilización.

El tamizado se realiza con el propósito de eliminar partículas superiores a 5mm que puedan entorpecer el proceso de mezclado. Esta etapa puede realizarse de forma manual o mecánica, además es posible utilizar una trituradora que facilite esta etapa evitando la separación de las partículas y homogenice la materia prima.

### **5.7.3 Mezclado de los componentes en seco**

En la etapa de mezclado el componente estabilizante, en este caso es el cemento de tipo Portland y la cantidad que se adiciona depende de las características de la materia prima y de los métodos de compactación. En el estudio de Gatani (2000) [2], los porcentajes de la materia prima que se utiliza para elaborar los ladrillos se componen de un 75% de arena, un 25% de arcilla y limo, y el porcentaje de cemento está entre el 5% y el 15% de la cantidad total del suelo.

El suelo o la materia prima en este caso se mezclan con el cemento en seco, hasta obtener una mezcla homogénea, es decir con una sola tonalidad (color uniforme). Para este tipo de mezclado es conveniente utilizar equipo mecánico que ayude a la uniformidad y a la agilización del proceso. Además el mismo equipo es utilizado en la etapa de adición de agua para evitar la formación de grumos, los cuales dificultan el proceso de compactación.

### **5.7.4 Adición de agua**

La incorporación de agua es necesaria porque activa la acción cohesiva de las arcillas. Actúa como lubricante para mejorar la compresión y activa la reacción con el cemento. Gatani (2000) [2].

La adición de agua en esta etapa debe realizarse de forma que el agua sea distribuida en toda la mezcla, por lo que hace en forma de regadera. El contacto del agua con toda la mezcla es muy importante ya que en ella interactúan los granos de cemento y la arcilla ocasionando una serie de cambios fisicoquímicos.

La cantidad de agua también es un factor importante a tomarse en cuenta ya que un exceso de agua puede entorpecer el proceso de moldeo de los ladrillos y cambiar las propiedades mecánicas. En el estudio de Gatani (2000) [2], se detalla el uso de la prueba de la muñeca, el cual consiste en tomar una muestra de la mezcla con la muñeca y dejarla caer al suelo, si la mezcla contiene mucha humedad parte de la mezcla queda en la muñeca, si la mezcla contiene poca humedad esta se desmorona fácilmente, de lo contrario a estas dos opciones la mezcla esta en condiciones óptimas.

### **5.7.5 Compactación y moldeo**

Una vez que se ha realizado la etapa de mezclado y adición del agua, se procede a realizar la compactación y el moldeo de la mezcla de suelo – cemento. La realización de la compactación se puede realizar por varias vías, una de ellas es utilizar moldes manuales y otra puede ser el uso de equipo mecánico, como puede ser el caso de moldeadoras mecánicas con pistón.

En el estudio realizado por Gatani (2000) [2], se optó por utilizar una maquina colocadora de bloques y modificando el sistema añadiendo un pistón que aplique una fuerza de compresión necesaria para evitar dejar espacios vacíos o poros en los ladrillos. Este tipo de mecanismo agiliza el proceso de elaboración y mejora la calidad de los ladrillos.

### **5.7.6 Curado y acopio**

A diferencia del proceso de elaboración de ladrillos cocidos, los ladrillos de suelo – cemento, deben ser colocados y almacenados de forma que se evite perder de forma brusca el porcentaje de humedad, los cuales deben ser controlados de forma ocular durante las siguientes 24 horas. Además deben ser almacenados de forma que se protejan del sol y la temporada lluviosa. Como protección es recomendable el uso de mantos hechos de polietileno para evitar la infiltración de aire por los bordes.

Los ladrillos almacenados deben ser humedecidos con un sistema de riego hasta mantener los ocho días de edad, con el propósito de que los cambios fisicoquímicos se mantengan para aumentar la resistencia mecánica. Los ladrillos serán aptos para el uso en la construcción una vez que cumplan por lo menos 21 días de edad, el cual es el tiempo suficiente para haber alcanzado una resistencia máxima.

## **VI. Material y Método**

### **6.1 Material**

#### **6.1.1 Suelo y arcilla**

El suelo o la materia prima que serán utilizados para la elaboración de los ladrillos se **caracterizarán de forma granulométrica, utilizando tamices ASTM en** el laboratorio. La materia prima será aportada por la industria ladrillera que nos permita realizar el estudio de las propiedades de los ladrillos ya elaborados.

Al igual que el suelo la arcilla que se adicionará a la mezcla para elaborar la pasta será aportada por la industria, sin embargo dado el caso que se necesite otro tipo de arcilla u otras especificaciones esta será comprada para realizar el estudio.

#### **6.1.2 Agua y cemento**

El agua que será utilizada como solvente para elaborar la mezcla durante la etapa experimental se tomará directamente de alguna de las llaves de suministro del laboratorio o del lugar donde se realice la pasta.

En el caso del cemento se utilizará el Portland, además como se mencionó en el acápite a cerca de las propiedades del cemento, los dos grandes distribuidores de cemento en el país son Cemex y Holcim S. A., y para la realización de diseño experimental se tomará para el estudio el uso del cemento Canal y el Holcim.

## **6.2 Método**

### **6.2.1 Condiciones experimentales**

Dentro de las consideraciones experimentales está la granulometría de la arcilla, la cual se realizará por medio de un análisis granulométrico tomando muestras de las arcillas que se usan en la industria para la elaboración de los ladrillos cocidos y de suelo – cemento. El análisis se llevará a cabo en tamices en el laboratorio en condiciones normales de temperatura y humedad.

Los ladrillos elaborados en la industria se tomarán de muestra a las condiciones de operación en la fábrica una vez que hayan cumplido el periodo de curado y alcancen la resistencia máxima. Los ladrillos de suelo – cemento se elaborarán en el laboratorio de la FTC o en el laboratorio de operaciones unitarias en el RUSB.

La mezcla en seco de la arcilla y el cemento se realiza en condiciones bajas de humedad y a temperatura ambiente alrededor de los 31°C. El agua que se adicionará a la mezcla será tomada de la llave de suministro como se mencionó anteriormente a temperatura ambiente, a aproximadamente 25°C.

Una vez elaborados los ladrillos de suelo – cemento se separarán en lotes de acuerdo a los cambios realizados en cada variable estudiada. Además se almacenarán bajo techo a condiciones normales de temperatura y humedad, con revisiones oculares frecuentes, pruebas de resistencia mecánica y porcentajes de absorción.

### **6.2.2 Diseño experimental**

Durante la realización de esta tesis se estudiarán los cambios físico-mecánicos de los ladrillos de suelo – cemento debido al efecto de las relaciones de arcilla/cemento, agua/cemento, la marca de cemento, el peso unitario de los ladrillos y la actividad térmica de la arcilla. El tipo de diseño experimental que se utilizará es de tipo Factorial, en el que se tomará en cuenta las variables o factores que serán estudiados.

Para la creación de los diseños experimentales cuando se pretende estudiar el efecto de varios factores al mismo tiempo es necesario introducir o conocer cuáles serán los factores independientes y sus niveles, y los factores dependientes o las variables respuesta, los cuales se presentan en las tablas 6.1 y 6.2.

**Tabla 6.1: Factores independientes**

Factores	Niveles	Unidades
Relación cemento/arcilla	3	-
Relación agua/cemento	3	-
Marca de cemento	2	-

**Tabla 6.2: Factores dependientes**

Variable Respuesta	Unidades
Resistencia mecánica	Mega Pascales
Porcentaje de Absorción	% en peso
Peso unitario	Kg/m <sup>3</sup>

El diseño de experimento para este estudio es de tipo factorial, como se presenta en las tablas anteriores, en el que se tienen dos factores a tres niveles ( $3^2$ ) y un factor a dos niveles ( $2^1$ ) y tres variables verdad o respuesta. El diseño de experimento se detallará en el siguiente esquema con los factores y niveles a utilizar:

<u>Factores</u>	<u>Niveles</u>
C/Ar: relación cemento/arcilla	(C/Ar) <sub>1</sub> : 1/4    (C/Ar) <sub>2</sub> : 1/7    (C/Ar) <sub>3</sub> : 1/10
Ag/C: relación agua/cemento	(Ag/C) <sub>1</sub> : 0.4    (Ag/C) <sub>2</sub> : 0.425    (Ag/C) <sub>3</sub> : 0.45
Mc: marca de cemento	Mc <sub>1</sub> : Canal    Mc <sub>2</sub> : Holcim

El diseño de experimento fue diseñado con los datos del esquema mostrado anteriormente utilizando el software Minitab 16 V. Inglés. El programa permite elegir el tipo de diseño experimental que será utilizado tomando en consideración la cantidad de factores o variables que serán estudiados, además de ingresar la cantidad de niveles por cada factor.

Luego de haber introducido los datos utilizando el software y analizando la cantidad de datos disponibles, se brinda la información siguiente:

- Número de factores experimentales: 3
- Número de variables verdad o respuesta: 3
- Número de corridas: 18
- Número de réplicas: 1

En la tabla 6.3 se muestra la combinación de los factores por cada nivel que origina cada una de las corridas experimentales que deberá realizarse de acuerdo a la respuesta del software.

**Tabla 6.3: Diseño de experimento para la mezcla de suelo – cemento**

<b>Corrida</b>	<b>Ag/C</b>	<b>C/Ar</b>	<b>Mc</b>	<b>RMC*</b>	<b>%Absorción</b>	<b>Peso Unitario</b>
1	0.45	1/7	Canal			
2	0.4	1/7	Holcim			
3	0.45	1/7	Holcim			
4	0.4	1/10	Holcim			
5	0.425	1/7	Canal			
6	0.45	1/4	Holcim			
7	0.45	1/10	Canal			
8	0.4	1/7	Canal			
9	0.425	1/10	Holcim			
10	0.425	1/4	Holcim			
11	0.4	1/4	Canal			
12	0.425	1/7	Holcim			
13	0.425	1/10	Canal			
14	0.4	1/4	Holcim			
15	0.45	1/10	Holcim			
16	0.425	1/4	Canal			
17	0.4	1/10	Canal			
18	0.45	1/4	Canal			

RMC\*: Resistencia Mecánica a la Compresión

Como segundo diseño de experimento se tomará como variables la activación térmica de la arcilla y el porcentaje de sustitución del cemento portland en la mezcla aplicando el mismo diseño factorial de  $4^2$ , utilizando Minitab v16. En la tabla 6.4 se presentan las variables independientes y como variables respuestas serán las mismas de la tabla 6.2.

**Tabla 6.4: Factores independientes segundo diseño**

<b>Factores</b>	<b>Niveles</b>	<b>Unidades</b>
Activación térmica de la arcilla	4	°C
Porcentaje de sustitución de cemento portland	4	% en peso

El segundo diseño de experimento se detallará en el siguiente esquema con los factores y niveles a utilizar:

<u>Factores</u>	<u>Niveles</u>			
AT: Activación térmica	(AT) <sub>1</sub> : 25°C	(AT) <sub>2</sub> : 700°C	(AT) <sub>3</sub> : 800°C	(AT) <sub>4</sub> : 900°C
%S: sustitución de cemento	(%S) <sub>1</sub> : 0%	(%S) <sub>2</sub> : 20%	(%S) <sub>3</sub> : 30%	(%S) <sub>4</sub> : 40%

Utilizando el software y analizando la cantidad de datos disponibles, se brinda la información siguiente:

- Número de factores experimentales: 2
- Número de variables verdad o respuesta: 3
- Número de corridas: 16
- Número de réplicas: 1

En la tabla 6.5 se muestra la combinación de los factores por cada nivel que origina cada una de las corridas experimentales que deberá realizarse de acuerdo a la respuesta del programa utilizado.

**Tabla 6.5: Diseño de experimento para la activación térmica de la arcilla**

<b>Corrida</b>	<b>AT</b>	<b>%S</b>	<b>RMC*</b>	<b>%Absorción</b>	<b>Peso Unitario</b>
1	800	0			
2	800	30			
3	900	30			
4	25	20			
5	25	40			
6	700	20			
7	900	0			
8	700	0			
9	700	30			
10	800	40			
11	900	40			
12	25	0			
13	900	20			
14	700	40			
15	25	30			
16	800	20			

RMC\*: Resistencia Mecánica a la Compresión

### 6.2.3 Descripción del diseño experimental

La relación de agua/cemento es uno de los factores principales para el estudio dado que la cantidad de agua que se adicione a la pasta de cemento será un punto clave en el proceso de fraguado como se menciona en el acápite de las reacciones de hidratación. La variación de las proporciones de agua que se adicionarán en la pasta, se verá reflejada en el ladrillo una vez que cumpla cierta edad y se realicen los ensayos de resistencia. Por otro lado la relación de cemento/arcilla es uno de los factores más importantes en el que se basa el estudio, ya que uno de los propósitos es sustituir parcialmente la arcilla roja utilizada para la elaboración de los ladrillos por una porción de cemento con el fin de eliminar una de las etapas del proceso que es la cocción, la cual es la que genera el mayor grado de contaminación por emisiones de gases.

El propósito de agregar como variable la marca de cemento al diseño de experimento es debido a la diferencia en composiciones que posee cada marca de cemento y observar como éstas afectarán las propiedades fisicoquímicas de los ladrillos, así como el peso unitario y el porcentaje de absorción, las cuales no son más que ensayos que se realizarán para hacer las comparaciones en los resultados obtenidos por los ladrillos cocidos elaborados de forma artesanal y los ladrillos de suelo – cemento, además se verificará que se cumplan las normas de calidad establecidas por la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense.

La resistencia mecánica a la compresión será una de las variables respuesta esenciales en el estudio, ya que se podrá determinar si la alternativa de los ladrillos de suelo – cemento son viables para el uso como materiales de construcción, como una alternativa tecnológica para reducir el grado de contaminación y los costos de producción de viviendas de interés social.

En el segundo diseño de experimento en el que se tiene como variable independiente principal la activación térmica, se desarrollara mediante ensayos realizados en el laboratorio de química general de la FIQ en el RUSB.

Para este experimento se tomarán muestras de arcilla a las cuales se les activará térmicamente utilizando una mufla. Las muestras se realizarán como se muestra en el diseño de experimento de la tabla 6.5 a temperatura de 25°C como muestra de referencia y a temperaturas de 700 y 900°C respectivamente, los ensayos de activación térmica se realizarán en tiempos de una hora como máximo y a condiciones normales dentro del laboratorio.

El porcentaje de sustitución del cemento por la arcilla se realizara de acuerdo a los porcentajes que se describieron en el esquema anterior a 20%, 30% y 40% tomando como blanco 0%. En el experimento se tendrán cuatro blancos según la combinación que da como resultado el software, los cuales son a una temperatura de 25°C (temperatura ambiente) a los cuatro niveles de porcentaje de sustitución. Cabe mencionar que una vez que se termine de realizar los ensayos de activación térmica estos **deben de ser sometidos a un proceso de molienda**, los cuales se realizarán en el laboratorio de la FTC en el RUPAP, en un molino de bolas a condiciones normales de temperatura y presión.

## 6.2.4 Evaluación de los experimentos

- **Resistencia Mecánica a la Compresión**

El ensayo de resistencia a la compresión de suelo - cemento es de gran importancia en el ámbito de las construcciones de obras, específicamente en las pruebas de control de calidad a la mezcla utilizada en la estabilización de los suelos. **El método de ensayo permite conocer las características mecánicas de la mezcla**, lo cual le sirve al diseñador para verificar el cumplimiento del resultado esperado en la utilización de dicha mezcla. Amaya & Díaz (2011) [14].

Los ensayos para determinar la resistencia mecánica en cada ladrillo de suelo - cemento, deben cumplir las normas establecidas por la RCN - 07- 55 (Reglamento Nacional de la Construcción de Nicaragua) [15], en el Título V, Normas Mínimas de Diseño Generales para la Mampostería, sin embargo cabe mencionar que las normas de la RCN son para bloques de concreto las cuales se tomaron como referencia en la elaboración de los ladrillos de arcilla roja ya que estos no están regidos actualmente por una norma.

Los ladrillos elaborados serán escogidos como señala la norma, se deberán escoger unidades al azar para ser ensayadas de acuerdo ASTM C-140 y ASTM C-67, según se trate de piezas de concreto o arcillas y revisadas para el cumplimiento de las especificaciones.

La resistencia a la compresión se realiza cuando los ladrillos cumplan 7 y 28 días de edad, siendo esta última la edad nominal en la que se puede estimar la resistencia estándar de los ladrillos. En algunos casos es necesario realizar ensayos a edades menores que la nominal para poder estimar la resistencia estándar y su comportamiento para el cual se establecen valores de corrección.

El procedimiento para realizar los ensayos de compresión se realizan por medio de una máquina, la pieza o el ladrillo se colocará en un asiento de manera que la mayor área superficial del ladrillo reciba la carga que se aplicará. La velocidad de la prueba deberá ajustarse a los controles de la máquina, en el que se aplique la mitad de la carga máxima esperada y el restante de la carga se mantenga de manera uniforme, en no menos de uno a dos minutos.

El cálculo que se empleará para determinar la fuerza de compresión en cada una de las muestras está dado por la siguiente ecuación:

$$C = \frac{W}{A} \quad (6.1)$$

En el estudio realizado por Amaya & Díaz (2011) [14], en el que realizan un método estándar para la compresión de suelo – cemento compactado basado en ASTM D1633-00, determinan la resistencia por medio de muestras cilíndricas de suelo – cemento utilizando la siguiente ecuación:

$$C = \frac{4P}{\pi D^2} \quad (6.2)$$

- **Porcentaje de absorción**

El porcentaje de absorción se realiza con el propósito de determinar la cantidad o el porcentaje de agua contenida en una unidad de mampostería, en este caso en ladrillos de suelo – cemento, la cual se determina por medio de las condiciones de saturación y condiciones secas.

Los ensayos de absorción se realizarán de acuerdo a la Norma ASTM C-67, Norma de Métodos de Prueba de Ensayo y Prueba de Ladrillos de Arcilla Estructurales. En esta Norma se establecen dos procedimientos para determinar el porcentaje de absorción y el coeficiente de saturación.

*Prueba de sumersión de 5 a 24 horas:* En esta prueba los ladrillos o las piezas deben estar secas y frías, ésta debe ser previamente pesada a la sumersión en agua. Luego se sumerge la muestra en agua limpia a una temperatura de 15 a 30°C por el tiempo especificado de 24 horas, posteriormente se remueve la muestra y se limpia el agua superficial con una franela húmeda y se pesa la muestra. Las otras muestras deben ser pesadas cinco minutos después de haber sacado la muestra anterior.

El cálculo para determinar el porcentaje de absorción en la muestra está determinado por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Absorción} = \left[ \frac{(W_s - W_d)}{W_d} \right] \times 100 \quad (6.3)$$

*Prueba de hervir de 1.2 y 5 horas:* Las muestras para esta prueba deben ser las mismas que se utilizaron para la prueba anterior, usadas en estado de saturación. Las muestras deben ser sumergidas y sujetadas en agua limpia de manera que circule libremente, el agua se calienta hasta llegar a su punto de ebullición dentro de una hora y continuar hasta que se cumpla el periodo de 5 horas. Luego se deja enfriar de 15 a 30°C por pérdida de calor natural, de igual manera se limpia el área superficial de la muestra con una franela y se realiza el pesado.

El cálculo del porcentaje de absorción en esta prueba se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Absorción} = \left[ \frac{(W_b - W_d)}{W_d} \right] \times 100 \quad (6.4)$$

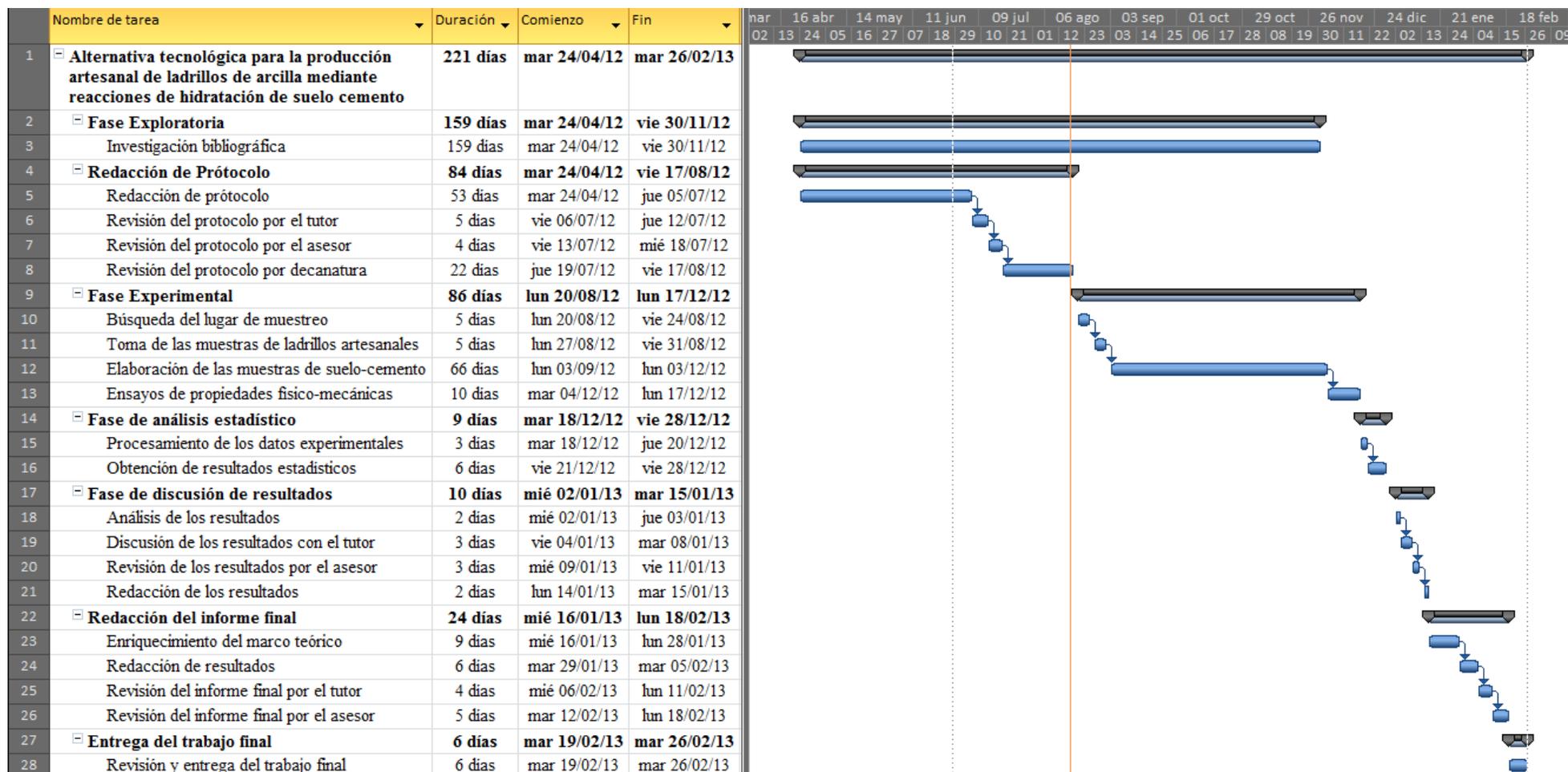
Para determinar el coeficiente de saturación de cada muestra se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Coeficiente de saturación} = \left[ \frac{(W_{s2} - W_d)}{W_{bs} - W_d} \right] \quad (6.5)$$

- **Peso Unitario**

El pesaje de cada ladrillo ya sea en estado de saturación de agua o en estado seco corresponde al peso unitario, el cual se determina para conocer cómo las variaciones en los factores experimentales influyen en el peso de los ladrillos.

## VII. Cronograma de actividades



Proyecto: Monografía Fecha: vie 29/06/12	Tarea		Hito externo		Informe de resumen manual	
	División		Tarea inactiva		Resumen manual	
	Hito		Hito inactivo		Sólo el comienzo	
	Resumen		Resumen inactivo		Sólo fin	
	Resumen del proyecto		Tarea manual		Fecha límite	
	Tareas externas		Sólo duración		Progreso	

## IX. Nomenclatura

### Letras Latinas

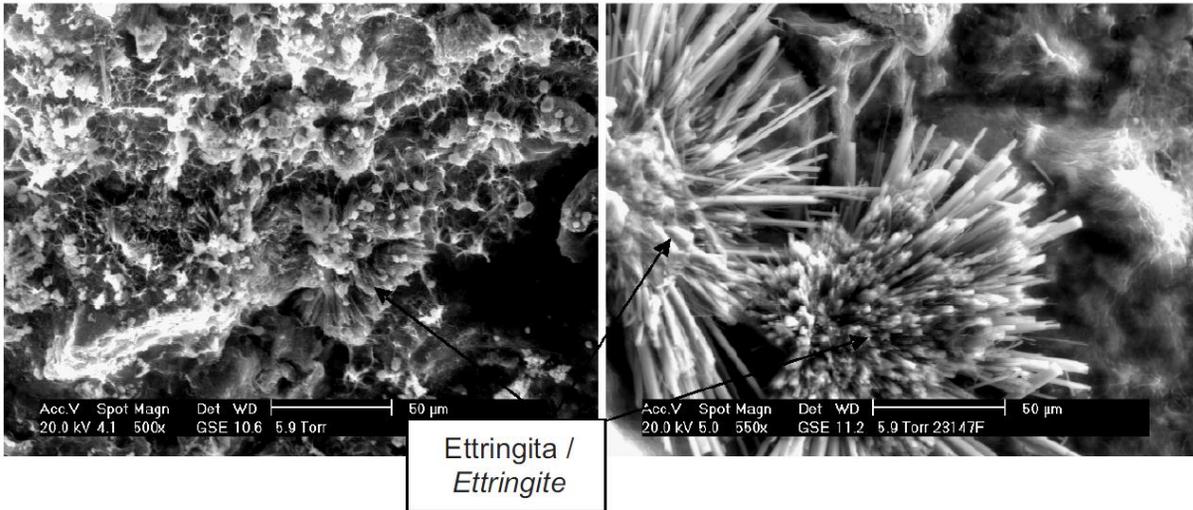
A	Área de la superficie superior de la muestra.	[cm <sup>2</sup> ]
C	Resistencia a la compresión de la muestra.	[Kg/cm <sup>2</sup> ]
D	Diámetro nominal del cilindro.	[mm]
P	Carga máxima de la máquina.	[N]
W	Carga máxima de la máquina.	[Kgf]
W <sub>s</sub>	Peso saturado de la muestra con agua fría.	[Kg]
W <sub>d</sub>	Peso de la muestra seca.	[Kg]
W <sub>b</sub>	Peso saturado de la muestra con agua hirviendo.	[Kg]
W <sub>s2</sub>	Peso saturado de la muestra después de 24 horas sumergida en agua fría.	[Kg]
W <sub>bs</sub>	Peso saturado de la muestra después de 5 horas sumergida en agua caliente.	[Kg]

## X. Referencias

1. Natalini, Mario B., Klees, Delia R., Fabricación de Componentes Modulares para la construcción de Viviendas de Bajo Costo utilizando Suelo – Cemento. Universidad Nacional del Nordeste, Chaco, Republica de Argentina.
2. Gatani, Mariana, (2000) Ladrillos de Suelo – Cemento: Mampuesto Tradicional en Base a un Material Sostenible. Arquitecta – CONICET. Vol. 51. Argentina
3. Begliardo, H., Sánchez, M., Panigatti, C., Ladrillos de Suelo – Cemento Elaborados con Suelos Superficiales y Baratos de Excavación para Pilotes. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina
4. Toirac Corral, José. (2008) El Suelo – Cemento como Material de Construcción. Instituto Tecnológico de Santo Domingo. Republica Dominicana. Revista Ciencia y Sociedad. Volumen XXXIII. pp. 520-571
5. Méndez y cols., (2010) Mampostería de suelo – cemento confinada. Proyecto de cooperación técnica. Informe de resultados. Taishin
6. Besoain, Eduardo. (1985). Mineralogía de arcillas de suelos. San José. Costa Rica. pp. 9-25
7. Sampat A. Gavande (1991). Física de suelos: principios y aplicaciones. Editorial Limusa-Wiley. México
8. Jordán L., Antonio. (2005-2006) Manual de Edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química. Agrícola de la Universidad de Sevilla. pp. 17-24. CURSO
9. Corneado Moreno, Alicia., (2010) Estudio técnico – económico de una fabrica de cemento portland para la obtención de 1.000.000 de TM al año.
10. Callister, William D Jr., (1995). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. ed. Reverté S. A.
11. Castillo, Rancés., Fernández, Rodrigo., Antoni, Mathieu., Scrivener Karen., Alujas, Adrán., Martirena., (2010) Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. Universidad central de Las Villas, Santa Clara. Cuba
12. Rivas, Mercury J. M., y cols. (2003). Hidratación de los cementos de aluminatos de calcio (Parte I). Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC. Madrid, España.

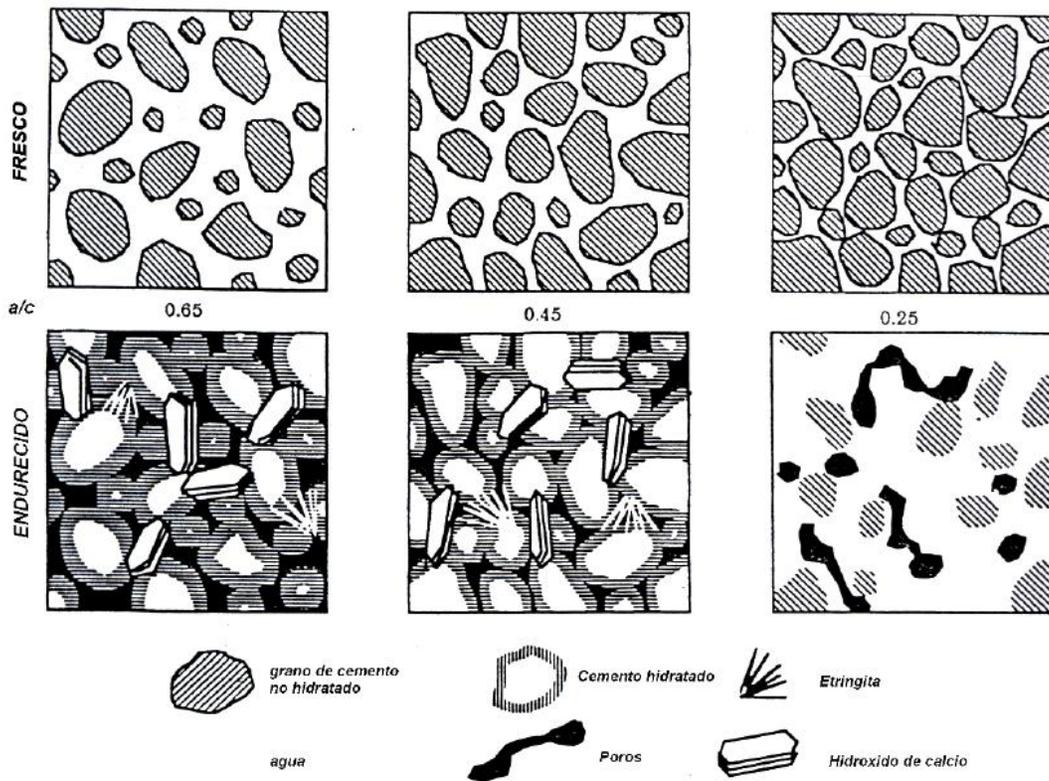
13. Toctaquiza Naranjo, Olga Isabel., (2008) Optimización del proceso de cocción en la producción de ladrillos de cerámica roja en el cantón Chambo. Tesis de grado. Riobamba – Ecuador.
14. Amaya, Mauricio Alfredo., Díaz, Carlos Ernesto. (2011) Manual de Guías de laboratorio enfocado al control de calidad de materiales para las asignaturas: "Ingeniería de materiales" y "Tecnología del concreto". Tesis de grado. Universidad de El Salvador
15. Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI). (2007) Reglamento Nacional de Construcción RNC- 07. Managua, Nicaragua

# Apéndices



**Figura A1: Análisis de difracción de rayos x de ettringita.**

Fuente: Gómez y Escalante. Hydration and microstructure of Portland cement partially substituted with ultrafine silica.



**Figura A2: Composición de la pasta de cemento fresca y endurecida en la máxima hidratación para varias relaciones a/c.**

Fuente: Portugal. Tecnología del concreto de alto desempeño.