



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Civil

FABRICACIÓN DE TABIQUE ROJO RECOCIDO CON AGREGADO DE CENIZA
VOLANTE

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título de
Ingeniero Civil

Presenta:

Álvaro Mendoza Sauza
Daniel Antonio Rangel Ochoa

Dirigido por:

M. en I. Rubén Ramírez Jiménez

SINODALES

M en I. Rubén Ramírez Jiménez
Director

Firma

Dr. José Luis Reyes Araiza
Sinodal

Firma

Dr. Enrique Rico García
Sinodal

Firma

Dr. Omar Chávez Alegría
Sinodal

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Dr. Omar Chávez Alegría
Coordinador de Ingeniería Civil

Centro Universitario, Querétaro, Qro; México
Noviembre del 2014

RESUMEN

El desarrollo de un tabique rojo recocido con agregado de ceniza volante en una proporción específica mejorará las propiedades físicas y mecánicas de la pieza, generando un elemento de mampostería eficiente y sustentable. Utilizando los métodos y materiales comunes regionales para la fabricación y cenizas volantes, residuo de plantas carboeléctricas que se encuentran únicamente en el norte de nuestro país.

SUMMARY

The development of a red brick with an aggregate of fly ashes in an specific proportion will improve the physical and mechanical properties of the piece, generating a masonry element efficient and sustainable. Using methods and materials common in the region, for the fabrication, and fly ashes residual waste of the carboelectric factories found only in the northern part of our country.

DEDICATORIAS

A mi familia y amigos

A Pedro (tabiquero)

A nuestro tutor y sinodales

Alvaro Mendoza Sauza

DEDICATORIAS

A mis Padres y mi hermano

A mi novia

A pedro

A nuestro director de tesis y sinodales

Daniel Antonio Rangel Ochoa

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Alvaro Mendoza Martínez y Teresa Sauza Vega, por darme la oportunidad de terminar mis estudios profesionales y ser ejemplares.

A mi compañero de tesis, por el esfuerzo y dedicación para que se lograra este proyecto de investigación.

Al M. en I. Rubén Ramírez Jiménez, por la orientación y seguimiento a través de todo el proyecto.

A los sinodales

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, ya que gracias a ellos logré concluir mis estudios profesionales, además de ser mi ejemplo a seguir.

A Álvaro, por el esfuerzo y dedicación empleados para concluir este proyecto.

A nuestro director de tesis el M. en I. Rubén Ramírez Jiménez, por apoyarnos y orientarnos durante este proyecto

A los sinodales

FABRICACIÓN DE TABIQUE ROJO RECOCIDO CON AGREGADO DE CENIZA VOLANTE

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	2
SUMMARY	3
ÍNDICE DE CUADROS	11
ÍNDICE DE FIGURAS	13
INTRODUCCIÓN.....	15
CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LITERATURA	17
1.1 Mampostería	17
1.1.1 Descripción y Origen	17
1.1.2 Normatividad	18
1.1.3 Propiedades	19
1.2 Tabique Rojo Recocido	21
1.2.1 Descripción y Origen	21
1.2.2 Propiedades	22
1.2.3 Normatividad	23
1.3 Cenizas Volantes.....	24
1.3.1 Descripción y Origen	24
1.3.2 Clasificación	27
1.3.3 Propiedades	27
1.3.4 Principales Aplicaciones	28
CAPITULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	30
CAPITULO 3. METODOLOGÍA.....	33
3.1 Proceso de Fabricación del Tabique Rojo Recocido.....	33
3.2 Caracterización del Suelo Utilizado para la Fabricación de Tabiques	40
3.2.1 Análisis Granulométrico Simple	40
3.2.2 Clasificación unificada de suelos (SUCS)	40
3.2.3 Procedimiento.....	43
3.2.4 Límites de Consistencia	46
3.2.5 Determinación del Límite Líquido	49
3.2.5 Determinación del Límite Plástico.....	52
3.2.6 Determinación del Límite de Contracción Lineal	54
3.2.7 Determinación del Límite de Contracción Volumétrica	56
3.2.8 Índice Plástico	58
3.3 Proceso de Fabricación de Tabique Rojo Recocido con Ceniza Volante	59
3.4 Pruebas Físicas y Mecánicas a Aplicar a los Tabiques Rojos Recocidos con Ceniza Volante	74
3.4.1 Introducción	74
3.4.2 Resistencia a la Compresión Simple (NMX-C-036)	75
3.4.3 Absorción de Agua (NMX-C-037)	77
3.4.4 Dimensiones de Tabiques (NMX-C-038).....	79
3.4.5 Determinación del Módulo de Ruptura	80
3.5 Análisis Estadístico de Resultados	81
3.5.1 Resumen Numérico de los Datos Estadísticos	83
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	85

4.1	Determinación del Módulo de Ruptura	85
4.2	Prueba de Absorción	98
4.3	Resistencia a la Compresión Simple (NMX-C-036)	104
4.4	Análisis Estadístico de los Especímenes	112
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL PROYECTO		122
REFERENCIAS		124

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1	Normas existentes aplicables a mampostería (NORMAS INFORMATIVAS) ..	18
Cuadro 1.2	Límite menor e inferior de diferentes propiedades de algunas piezas artificiales (Robles y otros, 1984).....	20
Cuadro 1.3	Propiedades de los tabiques rojos recocidos(Ficha técnica NMX-C-441-ONNCE-2005)	22
Cuadro 3.1	Simbología para clasificación de suelos finos en función del % de finos	42
Cuadro 3.2	Resultados obtenidos en la prueba	45
Cuadro 3.3	Clasificación SUCS probable	45
Cuadro 3.4	Resultados de Copa de Casagrande.....	49
Cuadro 3.5	Resultados de Límite Plástico.....	52
Cuadro 3.7	Resultados obtenidos de Límite de Contracción Volumétrica.....	57
Cuadro 4.1	Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 0% de Ceniza Volante .	94
Cuadro 4.2	Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 10% de Ceniza Volante.....	94
Cuadro 4.3	Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 20% de Ceniza Volante.....	95
Cuadro 4.4	Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 30% de Ceniza Volante.....	95
Cuadro 4.5	Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 40% de Ceniza Volante.....	96
Cuadro 4.6	Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 50% de Ceniza Volante.....	96
Cuadro 4.7	Resultados de Peso Saturado y Superficialmente Seco por Ebullición	101
Cuadro 4.8	Resultados de Peso Saturado y Superficialmente Seco por Inmersión	101
Cuadro 4.9	Resultados de Peso Seco	102
Cuadro 4.10	Resultados de Absorción	102
Cuadro 4.11	Resultados de Coeficiente de Saturación.....	103
Cuadro 4.12	Resultados de Áreas de Cara #1 en piezas.	108
Cuadro 4.13	Resultados de Áreas de Cara #2 en tabiques.	108
Cuadro 4.14	Resultados de Promedio de Áreas.	109

Cuadro 4.15	Resultados de Primer Falla en piezas	109
Cuadro 4.16	Resultados de Falla Ultima	110
Cuadro 4.17	Resultados de Resistencia a Compresión Simple en Primer Falla.....	110
Cuadro 4.18	Resultados de Resistencia a Compresión Simple en Falla Ultima	111
Cuadro 4.19	Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 0% de Ceniza Volante	113
Cuadro 4.20	Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 10% de Ceniza Volante	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.0	Información numérica de fabricación tabiques rojos con ceniza volante ...	16
Figura 1.1	Mampostería de Piedra	17
Figura 3.1	Proceso de fabricación de los tabiques rojos recocidos.....	33
Figura 3.2	Lugar de donde obtienen la mezcla para la realización de los tabiques.....	34
Figura 3.3	Moldeado de tabiques	35
Figura 3.4	Secado de Tabiques.....	36
Figura 3.5	Horno en el cual se queman los Tabiques.....	39
Figura 3.6	Saturación de flaneras por ebullición	44
Figura 3.7	Homogenización de la muestra.....	44
Figura 3.8	Cribado de la muestra por la malla No. 200	45
Figura 3.9	Gráfica de comportamiento de Límite Líquido	50
Figura 3.10	Vista lateral de Suelo seco obtenido para la determinación del Límite Líquido.....	51
Figura 3.11	Vista superior de Suelo seco obtenido para la determinación del Límite Líquido.....	51
Figura 3.11	Rollitos de suelo con grosor de 3.2 mm aproximadamente para determinar el Límite Plástico.....	53
Figura 3.12	Suelo contraído donde se muestra el 10.5% aproximadamente de Contracción Lineal	55
Figura 3.13	Demostración de altura de molde para tabique igual a 7 cm	60
Figura 3.14	Demostración de ancho de molde para tabique igual a 14 cm	61
Figura 3.15	Demostración de largo de molde para tabique igual a 27 cm	62
Figura 3.16	Proceso para fabricación de Tabique Rojo Recocido	63
Figura 3.17	Mezclado de los componentes básicos con ayuda de herramienta del fabricante.....	64
Figura 3.18	Mezclado de Ceniza Volante con mezcla común	65
Figura 3.19	Molde utilizado por el fabricante para la elaboración del tabique fresco	66
Figura 3.20	Mezcla de materiales comunes y ceniza volante en el molde	67
Figura 3.21	Clara identificación por color de tabiques con proporción 0-50% de ceniza volante.....	68
Figura 3.22	Identificación numérica de tabiques.....	69
Figura 3.23	Tabiques en proceso de secado	70

Figura 3.24	Tabiques y particular acomodo dentro del horno	71
Figura 3.25	Aplicación de mezcla de estiércol y aserrín a parte superior de horno para conservar la alta temperatura	72
Figura 3.26	Horno recién encendido dos días después de llenar el mismo	72
Figura 3.27	Tabiques recién salidos del horno	73
Figura 4.1	Medición y determinación de puntos de apoyo para prueba.....	86
Figura 4.2	Pieza en posición para ser ensayada mediante prueba de módulo de ruptura	87
Figura 4.3	Pieza ensayada, donde se muestra la falla originada por flexión	88
Figura 4.4	Piezas con 10% de ceniza volante ensayadas.....	89
Figura 4.5	Tabiques con 20% de ceniza volante ensayados a flexión	90
Figura 4.6	Tabiques con 30% de ceniza volante ensayados a flexión	91
Figura 4.7	Tabiques con 30% de ceniza volante ensayados a flexión	92
Figura 4.8	Tabiques con 50% de ceniza volante ensayados a flexión	92
Figura 4.9	Determinación del peso saturado superficialmente seco de pieza	98
Figura 4.10	Piezas colocadas a ebullición durante 5 horas.....	99
Figura 4.11	Pieza en posición para ser ensayada a compresión simple	106
Figura 4.12	Representación de prueba a compresión simple	107
Figura 4.13	Gráfica de Comportamiento de Media Resistencia a Compresión Simple a Falla Ultima por % de Ceniza Volante.....	119
Figura 4.14	Gráfica de Comportamiento de Media de Módulo de Ruptura por % de Ceniza Volante.....	120
Figura 4.15	Gráfica de Comportamiento de Media de Absorción por % de Ceniza Volante	121

INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta tesis es desarrollar piezas de tabique rojo recocido adicionadas con ceniza volante en diferentes porcentajes, determinar si hay un mejoramiento en las propiedades físicas y mecánicas de las piezas mediante pruebas técnicas a las que tendrán que ser expuestas, demostrar el porcentaje en el cual en los diferentes parámetros se encuentra un favorecimiento a la pieza con ceniza volante al compararlos con tabiques rojos recocidos comunes utilizando métodos estadísticos. Describir las características y propiedades resultantes que generaron tal mejora y exponer las recomendaciones para futuros proyectos.

El tabique rojo recocido es un elemento de construcción generalmente elaborado en fabricas locales donde no se tiene un control de la combustión de materiales residuales para el calentamiento del horno donde es efectuada la etapa más contaminante del proceso, la ceniza volante es un residuo debido a la combustión de carbón en las plantas carboeléctricas, este material tiene propiedades puzolánicas con composición silico-aluminosa. Unir la ceniza volante al tabique rojo recocido generará una pieza de construcción eficiente, sustentable y con mejores características físicas y mecánicas.

El proceso comienza con la fabricación de tabiques rojos recocidos con ceniza volante en el municipio de Apaseo el Alto, donde se encuentran un gran número de fabricantes de tabiques comunes, en hornos contruidos de tabiques y concreto y con una elaboración de tabiques artesanal. Los materiales utilizados en la zona para la mezcla son estiércol, aserrín, arcilla y agua.

La ceniza volante fue añadida desde un 0% hasta 50% del volumen total que representa un tabique, el volumen total promedio de un tabique rojo recocido es de $2,058 \text{ cm}^3$, por lo tanto el volumen correspondiente a un 10% es de 205.80 cm^3 , es lo que se fue sustituyendo por ceniza volante. Fabricando 6 piezas correspondientes a cada porcentaje a analizar como lo indica la tabla I. El proceso de elaboración, secado y horneado fue el utilizado comúnmente por el fabricante.

Figura 1.0 Información numérica de fabricación tabiques rojos con ceniza volante

% de Ceniza Volante	# de Piezas	Volumen Sustituido por Ceniza Volante en cada pieza (cm³)
0	6	0
10	5	205.80
20	6	411.60
30	6	617.40
40	6	823.20
50	5	1,029

Las piezas con mejoras notables físicas y mecánicas se presentaran cuando los tabiques contengan un 30 – 40 % de ceniza volante.

Los tabiques fueron sometidos a pruebas de compresión simple, módulo de ruptura y absorción. Obtenidos los resultados se pudo hacer el análisis correspondiente a cada serie de piezas y determinar en qué porcentaje se obtuvo una mejora de la pieza en cada uno de los parámetros que se analizó.

CÁPITULO 1. REVISIÓN DE LITERATURA

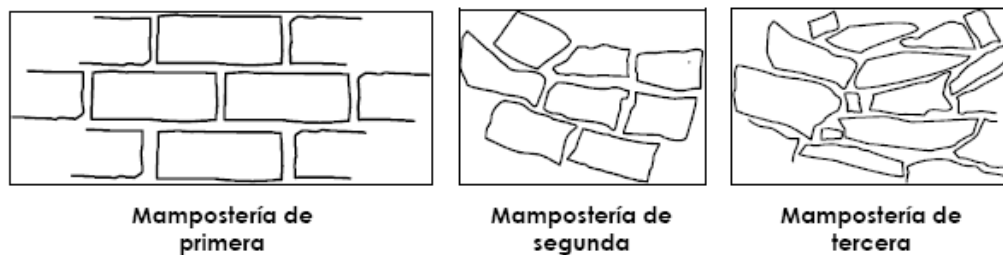
1.1 Mampostería

1.1.1 Descripción y Origen

El componente básico para la construcción de mampostería es la unidad o pieza que por su origen puede ser natural o artificial. Las unidades de piedra natural se utilizan sin labrar o labradas. En México suelen distinguirse los siguientes tipos de mampostería de acuerdo con la forma en que ha sido labrada la piedra natural (Fig. 1.1).

- I. Mampostería de primera. La piedra se labra en paralelepípedos regulares con su cara expuesta de forma rectangular. Las unidades de piedra de este tipo reciben el nombre de sillares.
- II. Mampostería de segunda. La piedra se labra en paralelepípedos de forma variable siguiendo la configuración natural con que llega de la cantera.
- III. Mampostería de tercera. La piedra se utiliza con la forma irregular con que llega de la cantera, aunque procurando que la cara expuesta sea aproximadamente plana.

Figura 1.1 Mampostería de Piedra



Los procedimientos de construcción son muy variados: desde los artesanales, como el cocido en horno para los tabiques comunes, hasta los industrializados (vibro-compactación, para los bloques de concreto, y extrusión

para el bloque hueco de barro). La forma es prismática pero con distintas relaciones entre las dimensiones.

La mampostería ha evolucionado a través de los años, esto para dar resultado a nuevos materiales de mayor calidad tanto física como mecánica, los materiales usados comúnmente de mampostería son los naturales, aun así los artificiales han tenido un mayor crecimiento debido al control en su producción para la elaboración de un material de propiedades constantes en el ámbito de la construcción.

1.1.2 Normatividad

Es recomendable que las piezas usadas en los elementos estructurales de mampostería cumplan los requisitos de calidad para cada material especificados en las Normas Mexicanas (NMX) cuya declaratoria de vigencia se publica en el Diario Oficial de la Federación (Tabla 1). Cuando algún reglamento de construcción local haga referencia a una Norma Mexicana, ésta será obligatoria en dicha localidad. En particular deberán aplicarse las siguientes normas.

Cuadro 1.1 Normas existentes aplicables a mampostería (NORMAS INFORMATIVAS)

Norma	Descripción
NMX-C-006	Ladrillos, bloques cerámicos de barro, arcilla y/o similares.
NMX-C-010	Bloques, ladrillos o tabiques y tabicones de concreto.
NMX-C-404-ONNCCE	Bloques, tabiques, ladrillos y tabicones para uso estructural.
NMX-C-441-ONNCCE-2005	Bloques tabiques ó ladrillos para uso no estructural.

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004) proporcionan resistencias a

compresión (f_m^*) y a cortante (v_m^*) para el tabique de barro recocido (arcilla artesanal maciza) y establece que debe ser, $f_p^* > 60 \text{ kg/cm}^2$;

Si bien las NTCM-2004 proporcionan algunos valores índice, para los materiales más empleados, no limitan el uso de otros tipos de materiales o modalidad constructiva. En dichas normas se anota: *“Cualquier otro tipo de piezas, derefuerzo o de modalidad constructiva a base de mampostería, diferente de los aquí comprendidos, deberá ser evaluado según lo establece el Reglamento y el Apéndice Normativo A de estas Normas”*.

De acuerdo con la Norma Mexicana NMX-C-404 y con las NTCM (GDF, 2004), las piezas para uso estructural pueden ser macizas o huecas. Se define a las piezas macizas como aquellas cuya área neta sea igual o mayor al 75% de su área total (bruta) en la sección transversal más desfavorable. Para definir las piezas huecas la norma NMX-C-404 admite que posean huecos verticales u horizontales y con área neta no menor al 40% del área bruta. Sin embargo, las NTCM admiten solamente piezas con hueco vertical (ortogonal a la cara de apoyo que se colocará horizontal), y sólo acepta como huecas a las piezas con no menos del 50% de la relación de área neta a área bruta. Las piezas que no cumplan con alguna de las anteriores especificaciones no podrán ser empleadas para uso estructural, aunque sí para otros usos.

1.1.3 Propiedades

El cuadro 2.2, proporciona características representativas de las propiedades mecánicas de las piezas de uso más frecuente. La tabla da rangos de valores de pesos volumétricos medios, resistencias medias a compresión y coeficientes de variación de las resistencias obtenidas de muestras de piezas fabricadas por distintos productores (Robles y otros, 1984). Puede apreciarse que incluso para un tipo dado de piedra existen variaciones grandes en las resistencias promedio y en el control de calidad, reflejado por los coeficientes de variación, de los productos de diversa procedencia. Aún cuando estos datos se obtuvieron en la

década de los 70, es preocupante encontrar en la actualidad, para algunas piezas, valores similares o mayores de coeficientes de variación.

Cuadro 1.2 Límite menor e inferior de diferentes propiedades de algunas piezas artificiales (Robles y otros, 1984)

Material	Resistencia a Compresión,fp (kg/cm ²)	Coefficiente de variación, Cv	Peso volumétrico (t/m ³)
Tabique rojo de barro recocido	35 – 115	10 – 30	1.30 – 1.50
Tabique extruido	150 – 430	11 – 25	1.65 – 1.96
 perforado	310 – 570	15 - 20	1.61 - 2.06
 verticalmente	150 – 400	11 - 26	1.66 - 2.20
Tabique extruido macizo	375 – 900	5 – 16	1.73 – 2.05
Tabique extruido, huecos	75 – 80	13 - 18	1.25 - 1.32
 horizontales	50 – 80	16 – 30	1.69 – 1.78
Bloques de concreto	20 – 50	10 – 26	0.95 – 1.21
 Ligero	20 – 80	7 – 29	1.32 – 1.70
 Intermedio	70 – 145	7 – 28	1.79 – 2.15
 Pesado			
Tabicón	45 – 120	11 – 35	1.05 – 1.6
Silicio Calcáreo	175 – 200	11 – 15	1.79

1.2 Tabique Rojo Recocido

1.2.1 Descripción y Origen

Los tabiques son utilizados como elemento para la construcción desde hace unos 11,000 años. Los primeros en utilizarlos fueron los agricultores del neolítico pre cerámico del Levante hacia 9,500 a. c., ya que en las áreas donde levantaron sus ciudades apenas existía la madera y la piedra. Los sumerios y babilonios secaban sus ladrillos al sol; sin embargo, para reforzar sus muros y murallas, en las partes externas, los recubrían con ladrillos cocidos, por ser estos más resistentes. En ocasiones también los cubrían con esmaltes para conseguir efectos decorativos. Las dimensiones de los ladrillos fueron cambiando en el tiempo y según la zona en la que se utilizaron.

La arcilla con la que se elaboran los ladrillos es un material sedimentario de partículas muy pequeñas de silicatos hidratados de alúmina, además de otros minerales como el caolín, la montmorilonita y la illita. Se considera el adobe como el precursor del ladrillo, puesto que se basa en el concepto de utilización de barro arcilloso para la ejecución de muros, aunque el adobe no experimenta los cambios físico-químicos de la cocción. El ladrillo es la versión irreversible del adobe, producto de la cocción a altas temperaturas (600° aproximadamente).

El tabique rojo recocido es una pieza de construcción básica de resistencia media usada principalmente para la construcción de muros no estructurales, el tabique común tiene dimensiones de aproximadamente 7x14x28. Los materiales usados para su fabricación varían según la región, principalmente de arcilla, aserrín, estiércol y agua.

La ficha técnica de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones para uso no estructural especifica que los materiales para la fabricación del Tabique pueden ser los siguientes: Silicio calcáreo, barro extruido, arcilla recocida y otros.

En México el 86.3% de las paredes de las viviendas son de tabique, block, piedra o concreto (INEGI,2010). Por lo tanto el tabique es un material muy importante en la construcción de vivienda.

1.2.2 Propiedades

La Ficha Técnica para bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural, que es aplicada para la norma NMX-C-441-ONNCCE-2005, establece que las propiedades deben ser tal y como se muestran en la siguiente cuadro:

Cuadro 1.3 Propiedades de los tabiques rojos recocidos(Ficha técnica NMX-C-441-ONNCCE-2005)

Especificación		Tolerancias		
Dimensiones	Pieza	Ancho (cm)	Altura (cm)	Largo (cm)
	Tabique Rojo Recocido	10 a 30	hasta 15	hasta 30
	Las tolerancias en las dimensiones de las piezas son de +- 3mm en la altura y +- 2mm en el largo y en el ancho			
Resistencia a la Compresión	Tipo de Pieza	Resistencia mínima promedio N/mm ² (Kgf/cm ²)	Resistencia Mínima individual N/mm ² (kgf/cm ²)	
	Tabique Rojo Recocido	3,0 (30)	3,0 (25)	
Absorción	Tipo de Pieza	Absorción máxima de agua en % durante 24 h		
		Máxima Promedio	Máxima Individual	
	Tabique Rojo Recocido	22	25	

1.2.3 Normatividad

Las normas que serán utilizadas para la determinación de las propiedades mecánicas y físicas son las siguientes:

- I. **NMX-C-0360-ONNCE:** Norma que establece el método de prueba de resistencia a la compresión de bloques, tabiques, tabicones y adoquines.
- II. **NMX-C-037-ONNCE:** Norma que rige el método de prueba para la determinación de la absorción de agua para bloques, tabiques y tabicones de concreto.
- III. **NMX-C-038-ONNCE:** Norma para la determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción.

1.3 Cenizas Volantes

1.3.1 Descripción y Origen

Las cenizas volantes son residuos de carbón bituminoso ardiendo, principalmente de forma esférica y cristalina. Las cuales tienen propiedades puzolánicas y están compuestas principalmente de dióxido de silicio reactivo (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3).

Las puzolanas son sustancias de composición silicea, silico-aluminosa o combinación de ambas que le dan a los cementos mayor compacidad e impermeabilidad, menor calor de hidratación y también inhiben o contrarrestan las expansiones producidas por la presencia de cal libre y magnesia libre. Existen dos tipos de puzolanas, las naturales y las artificiales. Entre las primeras se encuentran las rocas volcánicas y las rocas o suelos en las que el constituyente silicio contiene ópalo. Dentro de la segunda clase están las cenizas volantes, las arcillas activadas, las escorias de fundición y las cenizas de residuos agrícolas.

Las cenizas volantes se constituyen en una de las puzolanas artificiales más empleadas actualmente en el sector de la construcción. Proviene de un tratamiento térmico que posteriormente será descrito. Según la norma ASTM C 618 05 la ceniza volante es el producto sólido y en estado de fina división procedente de carbón pulverizado en las centrales carboeléctricas y que es arrastrado por los gases de combustión.

Previamente a su combustión, el carbón se pulveriza mediante molinos, posteriormente se inyecta dentro del horno mediante una corriente de aire caliente a alta velocidad, y estando en suspensión se calienta a una temperatura de aproximadamente 1,500 C, que esta por encima del punto de fusión de la mayoría de los minerales presentes. Durante este proceso se producen las partículas de ceniza. Los principales productores de ceniza volante en México son las centrales carboeléctricas que emplean carbón como combustible, en nuestro país se

encuentran 2 carboeléctricas que son las principales productoras de la ceniza volante debido al proceso de combustión del carbón. Las cenizas volantes constituyen típicamente el 80% del total de la ceniza, correspondiendo el 20% restante a cenizas de hogar o de fondo que son partículas que tienen un tamaño mayor que las volantes, el peso total de las cenizas volantes producidas en centrales térmicas es aproximadamente del 30% de la masa de carbón consumida. (Ficha Técnica de Cenizas Volantes de Carbón y Cenizas de Hogar o Escorias, 2011)

En México, el 5.05% de la energía eléctrica es generada por centrales carboeléctricas (CFE, Junio 2012). Las centrales carboeléctricas mexicanas se encuentran en Nava, Coahuila y son las siguientes:

- I. Carbón II, desde 1993 generando 1400 MW
- II. José López Portillo, desde 1982 generando 1200 MW

Durante los últimos 60 años se ha ido incrementando el uso de la ceniza volante en aplicaciones de ingeniería en todo el mundo, con resultados cada vez más satisfactorios. Debido a los éxitos alcanzados y al hecho de que existe una gran diversidad de usos para este material que van desde la fabricación de concreto con cenizas volantes hasta el concreto pres forzado y el concreto resistente a sulfatos, también como estabilizador de suelos y material de relleno, entre otras, se ha logrado valorar la versatilidad de las cenizas volantes en obras de ingeniería civil, despertando así, confianza en un producto que de otra manera sería considerado un residuo.

Las cenizas volantes suelen presentarse como una arena o polvo muy fino, suave al tacto y de un color gris más o menos claro, la apariencia gris de la ceniza volante es resultado directo de la combustión del carbón bajo condiciones reducidas de oxígeno. El color de la ceniza puede tender al gris o negro,

dependiendo de la fuente, la tendencia clara usualmente indica altos contenidos de cal, y de gris a negro indica altos contenidos de carbón.

La granulometría es razonablemente constante, pero es afectada por la eficiencia de los molinos de carbón, por la fuente de procedencia del carbón y por la operación del horno. La granulometría es semejante a la de un suelo limoso, entre un 80 y 95% de partículas tienen tamaño limo. El porcentaje de partículas tamaño arcilla es muy pequeño o inexistente.

Carecen de plasticidad dada la ausencia de minerales arcillosos en su composición, lo que les confiere asimismo una sensibilidad al agua muy débil.

Una vez compactadas, una característica geotécnica ventajosa de las cenizas volantes es su menor compresibilidad en relación a otros suelos, lo cual es importante para reducir los asentamientos diferenciales.

En varios países en que tienen especificaciones para la ceniza volante, se ha aportado la prueba de material retenido en la malla de 45 micras para controlar el grado de fineza en la ceniza. Mientras mayor sea la cantidad de ceniza volante que pase por la malla de 45 micras, mayor será su efecto sobre la resistencia, aunque, es conveniente aclarar que este efecto no es una función de la superficie específica medida por la permeabilidad del aire, sino que es una función del tamaño de las partículas, de ahí el uso de las mallas.

La particular forma esférica de la mayoría de las partículas de ceniza volante de características únicas tiene un grosor aproximadamente de entre 300 a 45 micras de diámetro. El peso específico de las partículas oscila entre 2.0 y 2.9 g/cm³.

1.3.2 Clasificación

Las cenizas se pueden clasificar de acuerdo a su origen y composición en (García, 2003):

- I. Cenizas sílicoaluminosas: Se producen por medio del carbón bituminoso y poseen propiedades puzolánicas.
- II. Cenizas sulfa-cálcicas: Se producen a partir de lignitos, que es un tipo de carbón que contiene yeso y calcáreos, por lo tanto da como residuo de combustión.

De acuerdo con la norma ASTM C 618 05 las cenizas volantes se clasifican en tres grupos o clases: N, F y C.

- I. Clase N: Son puzolanas naturales, cenizas de origen volcánico.
- II. Clase F y C: Son un subproducto de combustión del carbón. La principal diferencia entre esta en que la clase F los principales constituyentes de este material (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) suman mas del 70% y en la clase C debe estar comprendida entre el 50% y 70%

1.3.3 Propiedades

Las cenizas volantes presentan las siguientes propiedades (M. C. Alonso et al. 1995):

- I. Puzolanicidad e hidraulicidad, aunque se necesita de un periodo más o menos largo de tiempo para que se manifieste su reactividad puzolánica.
- II. Las cenizas volantes aumentan la trabajabilidad del material en estado plástico, debido a un aumento en la dispersión de las partículas del sistema.
- III. La porosidad del sistema con ceniza volante será mayor debido a los espacios que este ocupa.

IV. Las resistencias mecánicas al utilizar cenizas volantes serán menores en las primeras edades, comparadas con las alcanzadas en con las alcanzadas en cementos Portland. Las cenizas actúan como un diluyente inerte. A edades largas se produce un refinamiento de la estructura porosa debido a la evolución de la actividad puzolánica.

1.3.4 Principales Aplicaciones

Las cenizas volantes son ligeramente utilizadas en materiales de construcción en Ingeniería Civil. Estos pueden ser usados en bruto o en forma aglomerada (Umaña, 2002):

- I. Forma Aglomerada: En la elaboración de diferentes tipos de cemento y concreto, también en fabricación de tabiques, áridos artificiales, materiales refractarios y como aditivo sustitutivo en la industria cerámica.
- II. En bruto: En la construcción de caminos y ferrovías, como material para pavimentos y materiales de relleno en minería.

En la Unión Europea, es de aproximadamente un 48% del total de cenizas volantes la industria que le da uso en la construcción. Para la fabricación de concretos 30%, como materia prima en producción de cementos 27% y mezclas de cemento (15%).

Las aplicaciones de las cenizas volantes, en cualquiera que sea su campo de utilización, estarán condicionadas por sus características y propiedades, las cuales dependen del tipo de carbón utilizado como combustible, de la composición del mismo, de su granulometría y de las instalaciones de la central donde se originen (M. C. Alonso et al; 1995).

En el año 2003, S Kute realizó experimentos que se llevaron a cabo en un laboratorio para reducir el consumo de suelo en la fabricación de Tabique Rojo

Recocido, y los resultados de esta prueba mostraron que la resistencia a la compresión de los ladrillos puede ser mejorada de 4 a 5 veces por cierta proporción de cenizas volantes y a una temperatura de cocción de entre 850°C y 1000°, además encontró como proporción óptima el 40% de ceniza volante en donde se observó que la adición de cenizas volantes en el suelo aumenta su límite plástico (LP), límite de contracción (Ls), índice de contracción (IC), y disminuye su límite líquido (LL), índice de plasticidad (IP) y el flujo de índice (SI). Sin embargo estas propiedades no afectan a la fuerza de compresión de los ladrillos directamente.

En el año 2009, Giuseppe Cultrone. A medida que la temperatura se eleva, se producen cambios mineralógicos y de textura, provocados por el desequilibrio de un proceso metamórfico. La porosidad del ladrillo depende directamente de la composición mineralógica de la materia prima y la temperatura de cocción, pero generalmente, los ladrillos cocidos a altas temperaturas son más vítreos y sufren mayores cambios en el tamaño y la porosidad.

E. Oti (2009) realizó pruebas de resistencia a la compresión en tabiques arcilla-cal sin cocer, en donde encontró que con solo 1.5% de cal se lograron tabiques que cumplen con requisitos mínimos del Reino Unido, sin embargo el mayor aporte de este trabajo fue disminuir la contaminación en hornos que queman al aire libre, no obstante se sigue utilizando tabique rojo recocido por cuestiones de estética.

CAPITULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Municipio de Apaseo el Alto, Guanajuato; una de las actividades principales a las que se dedica la población es a la elaboración artesanal del Tabique Rojo Recocido, en la zona existen varios pequeños productores, los cuales lo fabrican de forma artesanal, el proceso consiste en varios pasos que no están fundamentados en ninguna norma, por lo tanto los productos resultantes no son constantes en materiales usados, ni procedimiento de fabricación, así mismo no tienen unas propiedades mecánicas bien definidas.

Las condiciones geotécnicas, de ubicación y otras características de la región favorecen la producción de tabiques en Apaseo el Alto, esto debido a que el material principal para la producción es el suelo fino (arcilla de baja compresibilidad) y la localización de las pequeñas fabricas de tabiques esta dentro de una zona arcillosa. Las condiciones climatológicas son factibles para el proceso de fabricación, así mismo el aserrín es un material de desecho fácilmente de encontrar debido a la alta comercialización y trabajo de la madera en la región.

La fabricación de tabiques en Apaseo el Alto es muy conocida en la región debido a la gran cantidad de productores locales. Estos fabricantes llevan a cabo una técnica local para la producción de los mismos, no se rigen con ninguna norma ni ficha técnica.

El uso de un material de desecho en un material de construcción ya ha sido utilizado a través de los años, en México no se le da el uso aceptable que debería darse. La ceniza volante puede ser utilizada en la fabricación de tabiques rojos recocidos sustituyendo un volumen aceptable para la sustentabilidad del tabique y la aportación al cuidado del medio ambiente, esto haciendo uso de materiales residuales para la fabricación de un material básico de construcción (tabique rojo recocido).

En la actualidad, México cuenta con 2 plantas termoeléctricas las cuales generan calor mediante la combustión de fósiles para producir electricidad, para lo que se necesitan fuentes energéticas como el carbón. El Banco Mundial ha destacado la necesidad de utilizar métodos nuevos e innovadores para reducir el impacto que estos residuos que son altamente contaminantes para el medio ambiente.

Uno de los residuos descritos en el párrafo anterior, son las llamadas cenizas volantes, este material es generado como desecho por las plantas termoeléctricas debido a la combustión del carbón las cuales anualmente generan una gran cantidad de toneladas las cuales constituyen una amenaza para el medio ambiente, debido a que las plantas tienen una forma de deshacerse de estos materiales con poca importancia hacia la conservación del medio ambiente, por lo cual se propone utilizar este residuo contaminante en la elaboración de un material de mampostería sustituyendo alguno de los agregados que lleva o en su totalidad, en este caso el material de mampostería que se propone realizar es un tabique rojo recocido, que es un material básico en el área de la construcción para la elaboración de muros.

Las propiedades mecánicas del tabique rojo recocido son variables y difíciles de predecir a comparación de las de otros materiales estructurales como el concreto reforzado o el acero. Esto es debido al poco control que se tiene sobre las propiedades de los materiales componentes y sobre la fabricación de los mismos. Tanto como el proceso de fabricación de los tabiques ya que no se cuenta con una normatividad. Así, el comportamiento estructural de la mampostería y su construcción han sido objeto de una amplia gama de estudios experimentales y analíticos que han dado como resultado la elaboración de normas. Sin embargo, en tales normas no mencionan de manera específica el proporcionamiento de los constituyentes para obtener una mezcla adecuada para tabique rojo recocido, además, al involucrar material reciclable en la elaboración implica un estudio adicional del diseño de mezclas.

Hablando de la resistencia a compresión del tabique rojo recocido hay una gran variedad entre el límite inferior y el máximo, estamos hablando de 35-115 kg/cm² , esto debido a que como se explica anteriormente no se cuenta con normas que regulen la calidad ni la cantidad de los materiales utilizados, ya que el proceso de fabricación es generalmente artesanal.

Al agregar la ceniza volante el resultado que se espera obtener es mejorar las propiedades mecánicas y térmicas del material, y de otra forma adicionarle un material altamente contaminante al medio ambiente, generando un producto de construcción básico sustentable.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

La metodología consiste principalmente en tres etapas, descripción del proceso de fabricación del tabique rojo recocido común, caracterización del suelo utilizado para la fabricación de tabiques comunes, fabricación de tabiques rojos recocidos agregando ceniza volante y descripción de pruebas a realizar a tabiques con ceniza volante.

3.1 Proceso de Fabricación del Tabique Rojo Recocido

El proceso de fabricación del Tabique Rojo Recocido está basado principalmente 4 etapas que son:



Figura 3.1 Proceso de fabricación de los tabiques rojos recocidos

La fabricación artesanal de tabiques rojos recocidos es un proceso que no tiene un control específico tanto en la cantidad de materiales como en la calidad de los mismos, la mayoría de los fabricantes no tienen los recursos para manejar un control en el proceso de fabricación constante. Por lo tanto mientras no se invierta en establecer un sistema de control la elaboración seguirá siendo artesanal.

En función de los principales pasos para la fabricación del tabique de barro, y analizando los mismos se puede determinar lo siguiente:

La mezcla de los componentes para la elaboración debe ser homogénea tomando en cuenta que para 100 tabiques, se deben usar 3 carretillas de tierra, y

1 de una compuesta de $\frac{3}{4}$ partes de aserrín y $\frac{1}{4}$ parte de excremento, esto dejando reposar por aproximadamente 3 días todos los elementos en las remojaderas, después del reposo se agrega el agua para la conformación de la mezcla para los tabiques húmedos y debe tener una consistencia tal que pueda ser manejable con un cantidad de agua no excesiva para que el material no tenga tanta fluidez.



Figura 3.2 Lugar de donde obtienen la mezcla para la realización de los tabiques

Una vez obtenida la mezcla para la conformación de los tabiques húmedos se procede a la elaboración de los mismos, El moldeado consiste en darle forma a la mezcla sin agregarle o quitarle material. El proceso más utilizado en la región es el moldeado a mano, el cual consiste en llenar los moldes comerciales de madera aproximadamente de 7x14x28 cm, y con espacios para aproximadamente 6 tabiques. Para este proceso, el molde se debe utilizar sobre un terreno totalmente plano y húmedo, se agrega el material uno en uno y checando que no tenga rocas el mismo se corrige a mano, después con el uso de una regleta se produce una superficie superior lisa y se levanta el molde con cuidado para no disgregar el material húmedo, que en este estado tiene un color negro brillante, con apariencia consistente y húmeda.



Figura 3.3 Moldeado de tabiques

Después de la elaboración de los tabiques en estado húmedo estos se deben secar a temperatura ambiente a través de la energía calorífica, tienen un secado total y recomendable en aproximadamente una semana, después de esta semana pierden un 10% del peso inicial húmedo, lo cual corresponde al agua que contenía la pieza. Además de que el color que tienen es ahora negro grisáceo y tienen un aspecto seco, la dureza de la pieza en estado seco es notable, y una vez que el tabique está seco se procede al horneado de los mismos.



Figura 3.4 Secado de Tabiques

El horneado de los tabiques es junto con la generación de la mezcla húmeda los componentes principales del proceso de fabricación, ya que estos pasos le darán las características físicas y mecánicas a la pieza.

La quema de tabique consiste en colocar los tabiques en estado seco en el horno, organizándolos de tal forma que todos tengan una quema constante en todas las caras del ladrillo, el calor debe llegar preferencialmente hasta el núcleo del tabique para que le de una mayor consistencia, dureza y pierda humedad.

El horno tiene una se constituye de paredes de ladrillo y el piso es de tierra común. El proceso de combustión del horno es mediante leña por lo general se utiliza material sobrante de carpinterías y mueblerías, por lo tanto la madera utilizada es reciclada pero de una forma es contaminante ya que puede ser madera tratada y aserrín. Una vez encendido el horno expide humo gris, debido a la quema de la madera residual, el aserrín y por el proceso natural de la quema del tabique y sus componentes.

El calor en el horno debe estar controlado agregándole madera para que este no pierda temperatura durante la quema.

El proceso de horneado dura aproximadamente 36 horas, durante las cuales el horno debe mantener una temperatura de aproximadamente 600-800°C, de tal forma que el tabique no sea expuesto a cambios de temperatura críticos.

Los materiales utilizados para el proceso de horneado deben seguir la norma técnica ambiental NTA-IEE-001/2010 para el estado de Guanajuato, tanto como el Manual de Buenas Prácticas en Ladrilleras Artesanales del Instituto de Ecología del estado de Guanajuato.

Los tabiques que tienen una localización central en el horno tienen una mejor calidad, debido la constante alta temperatura la que se expone, tal que los

tabiques que se encuentran en la parte alta regularmente contienen una consistencia bofa debido a que no fueron calentados de forma regular teniendo cambios críticos de temperatura dentro del mismo.

Igualmente los tabiques que no tienen un buen procedimiento de secado no contienen las propiedades físicas y mecánicas que una pieza totalmente seca obtiene, aparentemente tienen mayor porosidad, su dureza es menor, y su facilidad a la disgregación incrementa.

Una vez que el proceso de horneado es finalizado, el horno se deja enfriar a temperatura ambiente unas 12 horas para después poder extraer los tabiques rojos recocidos.

Las paredes del horno se construyen con ladrillo y el piso es de tierra común. El llenado del horno de tabique previamente secado es a mano, el operador entra a la estructura y acomoda los tabiques de forma en que la radiación pueda distribuirse uniformemente sobre toda la superficie del tabique, este proceso es lento ya que el producto final esta basado principalmente en este procedimiento.

El proceso de combustión es mediante leña y carbón para alcanzar la temperatura deseada, en la región se ha llegado a observar que los fabricantes utilizan productos altamente contaminantes como lo son llantas, plásticos y otros materiales tóxicos. Posteriormente se agrega una capa superior de suelo arcilloso con aserrín y excremento para que el horno mantenga el calor deseado por el fabricante.



Figura 3.5 Horno en el cual se queman los Tabiques

3.2 Caracterización del Suelo Utilizado para la Fabricación de Tabiques

3.2.1 Análisis Granulométrico Simple

El análisis granulométrico simple, es un procedimiento, el cual se realiza para poder clasificar nuestro suelo siempre y cuando este se encuentre compuesto en forma primordial por finos, ya que la prueba se encuentra diseñada para éstos.

La granulometría se ha mantenido con fines de clasificación y selección de los materiales, este último sobre todo en la construcción de vías terrestres y si además el suelo contiene más del 12% de finos, entonces no es necesario encontrar la distribución completa de tamaños ya que el único interés en la granulometría sería conocer el porcentaje de gravas, arenas y finos, por lo cual no es necesario utilizar todas las mallas, ni realizar la prueba del hidrómetro en este caso (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2005).

3.2.2 Clasificación unificada de suelos (SUCS)

Este sistema fue propuesto por Arturo Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en el año 1942 para aeropuertos, la clasificación de los suelos se divide en:

- I. Suelos de grano grueso
- II. Suelos de grano fino
- III. Suelos orgánicos

Suelos Gruesos

Los suelos de gruesos corresponden a los retenidos por la malla No. 200 y los finos a los que la pasan, de esta forma se considera que un suelo es grueso si

más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz No. 200 y fino, si más del 50% de sus partículas son menores que dicho tamiz.

Estos suelos se dividen en gravas y arenas, y se separan con el tamiz No. 4, de manera que un suelo pertenece al grupo de grava si más del 50% retiene el tamiz No. 4 y pertenecerá al grupo arena en caso contrario.

Suelos Finos

El sistema unificado considera los suelos finos divididos en tres grupos: limos orgánicos (M), arcillas orgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es $LI = 50\%$. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (lowcompresibility ó baja compresibilidad). Si es mayor de 50 se añade la letra H (highcompresibility ó alta compresibilidad). Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

ML = Limos Inorgánicos de Baja

Compresibilidad

CL = Arcillas Inorgánicas de Baja

Compresibilidad

MH = Limos Inorgánicos de Alta

Compresibilidad

OL = Limos y Arcillas Inorgánicas

CH = Arcillas Inorgánicas de Alta Compresibilidad

OH = Arcillas y Limos Orgánicos de Alta

Compresibilidad

Cuadro 3.1 Simbología para clasificación de suelos finos en función del % de finos

% Finos	Simbología
Menor a 5%	No se usan los finos en la clasificación
5 - 12 %	Se usan dobles símbolos (SW – SC).- Arena bien graduada pero es arena con arcilla
Mayor a 12 %	Usamos el símbolo de los finos (SC o SM)
Mayor a 50%	Se usa solamente la carta de plasticidad

Para que el suelo sea una arena debe cumplirse lo siguiente: Retiene el tamiz No. 4 < 1/2 FG.

Las gravas con 5 – 12% de finos requieren el uso de símbolos dobles : GW – GM grava bien graduada con limo; GW – GC grava bien graduada con arcilla; GP – GM grava mal graduada con limo; GP – GC grava mal graduada con arcilla.

Las arenas con 5 – 12% de finos requieren el uso de símbolos dobles : SW – SM arena bien graduada con limo; SW – SC arena bien graduada con arcilla; SP – SM arena mal graduada con limo; SP – SC arena mal graduada con arcilla.

Si los límites de Atterberg se sitúan en el área sombreada de la carta de plasticidad, el suelo es una arcilla limosa CL – ML.

Si el suelo contiene >= 15% de arena, añada “con arena” al nombre del grupo

Si el suelo contiene >= 15% de grava, añada “con grava” al nombre del grupo

Si el suelo contiene 15 – 29% mayor de la malla No. 200, añada “con arena” o “con grava” dependiendo cual sea el predominante.

Si el suelo contiene $\geq 30\%$ mayor de la malla No. 200, predominantemente arena, añada “arenoso” al nombre del grupo.

Si el suelo contiene $\geq 30\%$ mayor de la malla No. 200, predominantemente grava, añada “gravoso” al nombre del grupo.

3.2.3 Procedimiento

Para realizar el análisis granulométrico, debemos de utilizar la muestra inalterada y ponerla a secar 24 horas en el horno el cual se encuentra a $\pm 100^{\circ}\text{C}$, posteriormente se toman 100 gramos de suelo seco ponerlos en una flanera la cual satura por medio de ebullición.

Ya teniendo nuestro suelo saturado, debemos homogeneizar la mezcla, por lo cual la pasamos a un vaso de aluminio en el cual realizaremos movimientos en forma de 8 con una varilla punta de bala, la muestra resultante, se encuentra alterada, por lo cual debemos pasarla por la malla No. 200 con ayuda de una piseta, para que puedan pasar todos los finos, el material retenido en la malla No.200 debe ponerse en una flanera y meterlo al horno ($\pm 100^{\circ}\text{C}$) por 24 horas. Después de las 24 horas, el material se saca del horno y se pesa. (ASTM D 1140-00, 2006).



Figura 3.6 Saturación de flanelas por ebullición



Figura 3.7 Homogenización de la muestra



Figura 3.8 Cribado de la muestra por la malla No. 200

Cuadro 3.2 Resultados obtenidos en la prueba

	Retenido	Retenido Parcial (%)	Material que Pasa (%)	Material	Porcentaje Porciones
Malla 200	18.2	18.2	81.8	Gravas	0%
Material Decantado	81.8	81.8	0	Arenas	18.20%
TOTAL	100	100		Finos	81.80%

Cuadro 3.3 Clasificación SUCS probable

Clasificación SUCS
Finos
Probable: CH, MH, CL ó ML

Para poder conocer con exactitud la clasificación del suelo, debe de utilizar forzosamente la carta de plasticidad ya que nuestros finos representan el 81.80% de nuestra muestra, y para esto debemos determinar los límites de consistencia de nuestro suelo.

3.2.4 Límites de Consistencia

La determinación del límite líquido, plástico, límite de contracción y contracción lineal del suelo nos permitirá conocer las características de plasticidad del material y así mismo para la identificación y clasificación del suelo.

La plasticidad es una propiedad útil para clasificar suelos y tiene relación con las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas. Es una propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse. (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1989).

La plasticidad no es una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con una plasticidad nula, con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o de una suspensión líquida. Entre ambos extremos existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente.

Dependiendo de la cantidad de agua se pueden distinguir los siguientes estados de consistencia para un suelo (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1989):

- **Estado líquido.** Cuenta con la apariencia y propiedades de una suspensión, se comporta como un fluido.

- **Estado semilíquido.** Cuenta con la apariencia de un gel que se adhiere fácilmente a otras superficies, no es moldeable y no toma la forma del recipiente que lo contiene.
- **Estado plástico.** El suelo se comporta plásticamente de acuerdo a la definición de plasticidad.
- **Estado semisólido.** El suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
- **Estado sólido.** El volumen del suelo no varía con el secado.

Existen además las siguientes fronteras convencionales entre los estados de consistencia anteriormente mencionados:

Límite líquido. Es la frontera entre el estado semilíquido y plástico, corresponde a una resistencia al corte de 25 g/cm^2 .

Límite plástico. Frontera entre el estado plástico y semisólido.

Al límite líquido y el límite plástico, de manera conjunta se les denomina límites de plasticidad.

Otro parámetro que es muy importante para la clasificación de suelos es el Índice de plasticidad, el cual se define como la diferencia del límite líquido y el límite plástico.

El índice de plasticidad es el parámetro que representa el intervalo de cantidad de humedad en el cual un suelo se comporta plásticamente, es decir acepta deformaciones de manera tolerable.

El suelo tiene un color aparente gris oscuro, se nota su gran cantidad de finos y se observa una ligera cantidad de humedad. Fue extraído del viaje de material del distribuidor del fabricante.

El proceso para determinar los límites de consistencia del suelo está dividido en las siguientes etapas:

- Determinación del Límite líquido
- Límite de contracción lineal
- Determinación del límite de contracción lineal
- Límite plástico
- Índice de plasticidad

De las siguientes etapas se explicará la metodología para llegar a cada uno de los parámetros.

3.2.5 Determinación del Límite Líquido

Del material extraído que es utilizado para la fabricación de tabiques rojos recocidos se debe que tomar una porción. La cual será tamizada por la malla #4 hasta obtener aproximadamente unos 500 g, a esta mezcla se le tiene que agregar agua para saturar y dejar 24 horas en un vaso de aluminio.

De la pasta homogénea que se dejó saturando se toman unos 150 gramos y en una cápsula de porcelana se mezcla para posteriormente agregar a la copa de Casagrande, el material es agregado en capas de aproximadamente 4 milímetros de espesor teniendo cuidado de no dejar burbujas, posteriormente se usa el ranurador para establecer el espacio intermedio de 4 cm.

El límite líquido se define como el contenido de agua que tiene un suelo si al ser colocado sobre la copa de Casagrande la ranura que se hace en el suelo se cierra aproximadamente una longitud de 13 mm, esto a 25 golpes. Con estos datos se hacen las pruebas necesarias para identificar el límite, luego haciendo uso de un gráfico semilogarítmico en función del número de golpes y la humedad.

Cuadro 3.4 Resultados de Copa de Casagrande

# Flanera	W_f (g)	W_m (g)	W_s (g)	Contenido de agua (%)	# golpes
5	126.2	180.71	163.14	32.23	26
20	125.7	156.38	146.45	32.37	22

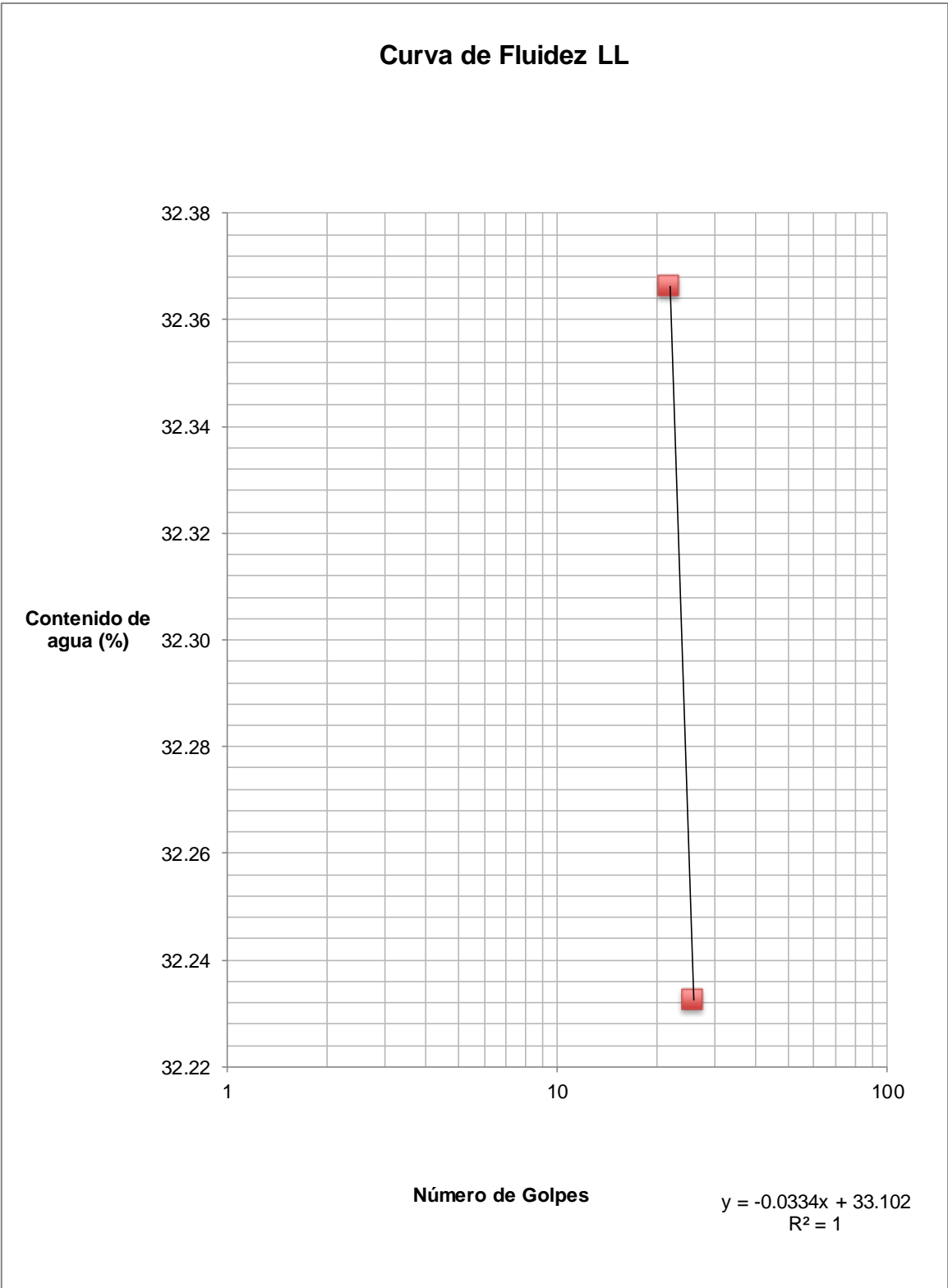


Figura 3.9 Gráfica de comportamiento de Límite Líquido

El límite líquido está dado a los 25 golpes por lo tanto utilizando la ecuación nos resulta una humedad de 32.27%



Figura 3.10 Vista lateral de Suelo seco obtenido para la determinación del Límite Líquido



Figura 3.11 Vista superior de Suelo seco obtenido para la determinación del Límite Líquido

3.2.5 Determinación del Límite Plástico

Del material usado para determinar el límite líquido se toman unos 20 gramos, se extienden sobre la mesa y se deja reposar para que pierda humedad, hasta el momento en que se pueda manipular con las manos y hacer esferas con el mismo.

El material se hace rodar con la mano sobre la mesa de trabajo totalmente plana y limpia, formando rollitos de aproximadamente 3.2 mm de diámetro. Este proceso se repite hasta que el suelo haya perdido suficiente humedad que los rollitos al momento de estar en ese diámetro presenten algunas grietas. Estos rollitos se ponen en un vidrio de reloj y cuando se tengan 6 g se ingresan al horno para conocer su contenido de agua, la cual corresponderá al límite de plástico del suelo.

Cuadro 3.5 Resultados de Límite Plástico

$W_{\text{molde}}(\text{g})$	$W_{\text{m}}(\text{g})$	$W_{\text{s}}(\text{g})$	Contenido de agua (%)
90.64	101.7	99.45	25.54



Figura 3.11 Rollitos de suelo con grosor de 3.2 mm aproximadamente para determinar el Límite Plástico.

3.2.6 Determinación del Límite de Contracción Lineal

Este procedimiento debe realizarse mientras el material esta en el límite líquido, por lo tanto debe ser del material de la copa de Casagrande directamente a los 25 golpes. Es necesario tener un molde de contracción lineal, del cual tenemos que obtener la longitud inicial (L_0), después es pesado y engrasado para que la muestra pueda salir perfectamente del molde.

El molde es llenado en tres capas, esto dando unos ligeros golpes en la parte baja para el acomodo del material y eliminar las burbujas que se encuentran en el material. Una vez llenado el molde se engrasa y se pesa. Posteriormente se deja secar al aire libre con una franela húmeda en la parte superior para que el cambio de temperatura no provoque fracturas en el material, el secado es de aproximadamente 24 horas. Después se determina la longitud final (L_f) y se calcula la contracción lineal (CL).

Para determinar este parámetro podemos hacer uso de la siguiente expresión:

$$CL = \frac{L_0 - L_f}{L_0} * 100$$

Cuadro 3.6 Resultados obtenidos de Contracción Lineal

# Prueba	L_0 (mm)	L_{f1} (mm)	L_{f2} (mm)	L_{f3} (mm)	L_{fprom} (mm)	CL (%)
1	99.7	88.91	88.2	88.04	88.38	11.35
2	98.7	88.31	88.03	88.18	88.17	10.67



Figura 3.12 Suelo contraído donde se muestra el 10.5% aproximadamente de Contracción Lineal

3.2.7 Determinación del Límite de Contracción Volumétrica

Este procedimiento igualmente se elabora mientras el suelo se encuentra en su límite líquido, es decir a la humedad efectiva a los 25 golpes de la copa de Casagrande.

Para esto es necesario engrasar la caja petri similar a lo que se hizo con el molde de contracción lineal, esto para que el suelo no se adhiera a la caja y de esa forma no tenga fracturas ni se desmorone.

Se toma porción del suelo y se llena el molde igualmente en tres capas, de tal forma que en cada capa se den golpes en la parte inferior de la caja para que este no tenga burbujas de aire y se acomode el suelo. Una vez llenado se procede a pesar la caja con el material (W_m) y se deja secando al aire libre cubierto con una franela húmeda, de esta forma el material no será afectado con el cambio climático.

Cuando el material haya pasado de un color oscuro a uno claro se colocara en el horno aproximadamente 24 horas. Después de esto la muestra se pesa (W_s) y se obtienen los volúmenes correspondientes con ayuda de mercurio, son determinados el volumen inicial (V_o) que es igual al volumen de la caja petri, el volumen final (V_f) que es el volumen inicial menos el sobrante cuando se ingresa el suelo a la caja con mercurio, una vez determinados estos parámetros se puede calcular la contracción volumétrica (CV).

El límite de contracción puede ser obtenido mediante la siguientes expresión:

$$LC = \left[\frac{W_m - W_s - \gamma(V_2 - V_1)}{W_s} \right] * 100$$

$$V_1 = \frac{W_{Hg} - W_{molde}}{13.56}$$

$$V_2 = \frac{W_{Hg} - W_{ms}}{13.56}$$

Cuadro 3.7 Resultados obtenidos de Límite de Contracción Volumétrica

W_{molde} (g)	W_m (g)	W_s (g)	W_{Hg} (g)	W_{sobranante} (g)	V₁ (cm²)	V₂ (cm²)	LC (%)
4.1	47.6	36.14	360.6	109.82	26.29	18.49	10.14

3.2.8 Índice Plástico

El índice plástico se puede definir como los intervalos de humedad en los que el material puede comportarse plásticamente, es decir que tenga variaciones volumétricas sin provocar daños estructurales.

Este parámetro sirve para la clasificación con ayuda de la carta de plasticidad que a continuación será presentada, esta gráfica esta en función del Índice de Plasticidad y el Límite Líquido previamente determinado.

Así mismo el Índice Plástico es determinado mediante la siguiente expresión:

$$I_p = 0.7333(LL - 20)$$

Con un Límite Líquido igual a 32.7% y un Índice Plástico de 9 %, el punto obtenido se encuentra en la siguiente gráfica.

Dando como resultado una **arcilla de baja compresibilidad**.

3.3 Proceso de Fabricación de Tabique Rojo Recocido con Ceniza Volante

El proceso de elaboración de los tabiques será de la misma forma que lo hace el fabricante ya mencionado anteriormente, pero se le añadirá la ceniza volante a la mezcla resultante de homogeneizar los componentes básicos, por lo tanto una vez obtenida la mezcla se le agregara la ceniza volante en diferentes proporciones en función del volumen que es ocupado por la mezcla en el molde.

Las proporciones establecidas para este proyecto son de agregar ceniza volante en cantidades del 10%, 20%, 30%, 40% y 50% del volumen total por cada tabique.

Se identificaron las medidas que ocupa cada tabique en el molde para determinar el volumen total y así conocer el valor que ocupara la ceniza volante.

Los moldes de los tabiques como se muestra en las figuras 3.13, 3.14 y 3.15



Figura 3.13 Demostración de altura de molde para tabique igual a 7 cm



Figura 3.14 Demostración de ancho de molde para tabique igual a 14 cm



Figura 3.15 Demostración de largo de molde para tabique igual a 27 cm

Una vez determinados los volúmenes necesarios para cada una de las proporciones se procede a la elaboración de los tabiques.

El proceso de fabricación del tabique rojo recocido con ceniza volante esta igualmente basado en las cuatro etapas principales que en el proceso básico, las cuales son las siguientes:



Figura 3.16 Proceso para fabricación de Tabique Rojo Recocido

El procedimiento inicia con el mezclado de los materiales básicos para crear una composición homogénea, en esta etapa se agregan las proporciones apropiadas en los “remojaderos”, estos son excavaciones de aproximadamente 0.50 m de profundidad y 3 metros de cada lado. En estos remojaderos se hace la mezcla de los materiales, esto es logrado agregando aproximadamente tomando en cuenta que para 100 tabiques, se debe de utilizar 3 carretillas de tierra, y 1 una compuesta de $\frac{3}{4}$ partes de aserrín y $\frac{1}{4}$ parte de estiércol, a esto se le agrega agua hasta que la mezcla quede con la consistencia deseada por el fabricante, la cual debe tener la cantidad de agua necesaria para poder ser moldeado con una consistencia no tan rígida ni tan suave.

En una cubeta de 20 litros se agrego el peso correspondiente a cada una de las proporciones de mezcla y ceniza establecidas. Después se coloco en una carretilla para que se mezclaran los dos componentes hasta homogeneizar como se muestra en las imágenes siguientes.



Figura 3.17 Mezclado de los componentes básicos con ayuda de herramienta del fabricante



Figura 3.18 Mezclado de Ceniza Volante con mezcla común

El proceso de moldeado con la nueva mezcla adicionada con ceniza volante se recomienda que sea efectuado por el fabricante debido a que el conoce la cantidad de material necesaria para los seis tabiques que se pueden elaborar por molde. El molde de madera tiene espacio para seis tabiques con medidas aproximadamente de 7x14x27 cm como se muestra en las imágenes



Figura 3.19 Molde utilizado por el fabricante para la elaboración del tabique fresco

La mezcla se agrega en el molde de tal forma que pueda ocupar los seis espacios quedando totalmente llenos para después levantar con cuidado el molde y los tabiques relativamente frescos queden en ese mismo lugar. (Figura 3.20)



Figura 3.20 Mezcla de materiales comunes y ceniza volante en el molde

En la figura 3.20 se observa como el molde le va dando forma a la fila de tabiques frescos que en este caso ya tienen un particular color grisáceo. Este ejercicio se va realizando hasta completar una fila con longitud que el fabricante decida.

Una vez que los diferentes tabiques con proporciones variadas fueron terminados, se notaba la clara diferencia entre los mismos ya que los de 10% tenían una mayor rugosidad tanto que los de 50% tenían una textura mas lisa y un aspecto más grisáceo, esto por el alto contenido de ceniza volante. Así mismo el

peso de los tabiques con menos cantidad de ceniza era menor notablemente que los que contenían el 50% de ceniza volante. (Figura 3.21)



Figura 3.21 Clara identificación por color de tabiques con proporción 0-50% de ceniza volante



Figura 3.22 Identificación numérica de tabiques

Para reconocer los tabiques de diferentes proporciones los marcamos y de esta forma tener un orden al momento de acomodarlos en el proceso siguiente que es el secado y no tener ningún problema para el proceso de horneado. (Figura 3.22)

En la etapa del secado se elimina aproximadamente el 10% del peso del tabique fresco, el cual era ocupado por agua en la mezcla y/o tabique, esto le da un mejor manejo y resistencia, el proceso de secado es llevado a cabo al aire libre mediante radiación solar y un particular acomodo de los tabiques que proporciona una mejor ventilación entre cada tabique como se muestra en la figura 3.23.

En el secado no hubo problema alguno de fisuramiento en ninguno de las piezas y el tiempo de secado fue de aproximadamente tres semanas, debido a

que se tienen que juntar de 15,000 a 20,000 tabiques para llenar el horno, y se elaboran aproximadamente de 1,500 a 2,000 diarios.



Figura 3.23 Tabiques en proceso de secado

Posteriormente se introducen los ladrillos al horno para la producción por lotes, este horno tiene capacidad aproximadamente de 30 m³, donde se cuecen alrededor de 15,000 ladrillos. El proceso de cocción de los ladrillos es lento, del orden de 20 a 40 horas a una temperatura aproximada de 700°C.

Los tabiques fueron introducidos al horno en un lugar donde pudiesen ser localizados posteriormente cuando termine el proceso de quemado, estos fueron acomodados en un lugar estratégico donde los tabiques tienen una mejor quema, que es el centro.



Figura 3.24 Tabiques y particular acomodo dentro del horno

El horno es encendido por la noche de tal forma que hasta el siguiente día por la mañana se le agrega más leña o material para combustión para que el calor se mantenga constante por toda la tarde y se le aplica una capa de estiércol por la parte superior para conservar el calor como se muestra en la Figura 3.25

La capa aplicada a la parte superior del horno es mediante herramientas manuales como se muestra en la figura siguiente donde el fabricante expande la mezcla de estiércol y aserrín por toda la superficie manteniendo así una temperatura constante dentro del horno.



Figura 3.25 Aplicación de mezcla de estiércol y aserrín a parte superior de horno para conservar la alta temperatura



Figura 3.26 Horno recién encendido dos días después de llenar el mismo

Los tabiques se extraen al tercer día de haber comenzado el proceso de quemado, ya que el horno se enfrió y los tabiques pueden ser desplazados fuera del horno.

Una vez extraídos los tabiques del horno se observó que solo uno tenía una fisura por la parte media, este tabique fue uno de proporción del 50%.

A primer vista los tabiques de proporción 30-40% son los que presentan una mayor rigidez y menos porosidad que los demás tabiques incluyendo los que no contienen ceniza volante.



Figura 3.27 Tabiques recién salidos del horno

3.4 Pruebas Físicas y Mecánicas a Aplicar a los Tabiques Rojos Recocidos con Ceniza Volante

3.4.1 Introducción

La norma NMX-C-006 establece que para los ladrillos bloques cerámicos de barro, arcilla y/o similares se deben cumplir distintos lineamientos, la norma especifica que pueden ser tabiques hechos a máquina o a mano, para este caso son tabiques hechos a mano tipo (Mn): “Son ladrillos hechos a mano que no llegan a tener liga cerámica y deben ser solamente macizos. Son de un solo tipo y un solo grado de calidad. En la norma NMX-C-006 se indica que las normas a consultar para las pruebas a tabiques hechos a mano son las siguientes:

- **NMX-C-036:** Determinación a la Resistencia a la Compresión de Ladrillos y Bloques para la Construcción.
- **NMX-C-037:** Determinación del Agua Absorbida por los Ladrillos y Bloques para la Construcción.
- **NMX-C-038:** Determinación de las Dimensiones de Ladrillos y Bloques para la Construcción.
- **Determinación del Módulo de Ruptura:** Análisis a flexión de las piezas elaboradas.

Por lo tanto para los tabiques rojos recocidos elaborados con ceniza volante se tomaron en cuenta estas normas para las pruebas físicas y mecánicas que serán descritas a continuación.

3.4.2 Resistencia a la Compresión Simple (NMX-C-036)

En esta norma son incluidos todos los ladrillos fabricados con cualquier material. Para cualquier uso, el caso para tabiques para muros de relleno o estructurales. Esta norma mexicana establece el método de prueba para la determinación de la resistencia a la compresión de bloques tabiques o ladrillos fabricados de concreto, cerámica, arcilla y otros materiales para la construcción.

El equipo, aparatos e instrumentos son los siguientes:

- Horno Eléctrico: Horno eléctrico provisto con termostato que permita regular la temperatura a $(105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C})$.
- Máquina de Prueba: La máquina de prueba debe estar equipada con dos bloques de acero, cuya dureza Rockwell C, no sea menor de 60 y de dureza Brinell N 620; uno de los cuales tiene asiento esférico que transmite la carga a la superficie de la probeta y el otro a un block plano rígido en el cual descansa la probeta. Cuando el área de aplicación de la carga de los bloques de acero no es suficiente para cubrir el área que se va a cargar en la probeta deben colocarse placas adicionales de acero que cumplan con los requisitos que se anotan en el párrafo siguiente, y se colocan entre los bloques de carga y la probeta cabeceada de modo que el centroide de la superficie a la cual se le va a aplicar la carga se alinea con el centro de los bloques de la máquina.
- Placas y bloques de acero: Las superficies de los bloques y placas de carga no deben diferir en más de 0.025 mm en cualquiera de las dimensiones en 152.4 mm.

El muestreo consiste en determinar la resistencia de los tabiques de manera aleatoria tomando 5 especímenes de cada lote de 10 000 piezas o fracción si es en planta, en obra se puede tomar una muestra de 5 especímenes por cada entrega, de acuerdo con el cliente, se recomienda una muestra por cada 10 000 a 40000 piezas suministradas.

Para el caso de los tabiques se deben probar las unidades sin fallas ni fisuras y con sus caras razonablemente paralelas, que representan el lote de entrega debidamente marcados para su identificación.

La resistencia a compresión de una probeta es expresada como la carga máxima de N (kgf) dividida entre el área transversal de la probeta o sea el área total de una sección perpendicular a la dirección de la carga incluyendo aquellas que estén en los espacios huecos, mediante la siguiente expresión.

$$R = \frac{F}{A}$$

donde:

$$R = \text{Resistencia a la compresion en MPa} \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)$$

$$F = \text{Carga máxima en N (kgf)}$$

$$A = \text{Area transversal del espécimen (cm}^2\text{)}$$

3.4.3 Absorción de Agua (NMX-C-037)

Esta norma establece el método de prueba para la determinación de la cantidad de agua que absorben los bloques, ladrillos o tabiques y tabicones de concreto para la construcción en las condiciones que se especifican.

Los aparatos y equipo necesarios son los siguientes:

- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad no menor de 0.1% de la masa de la pieza que se ensaye, provista de un sistema que permita la determinación de la masa del espécimen sumergido.
- Horno con control de temperatura capaz de mantenerse entre 100 y 110°C

El muestreo debe ser aleatorio, y de ellos debe destinarse un mínimo de 5 piezas elegidas para la determinación de agua absorbida.

La preparación de los especímenes consiste en secar las probetas en el horno a temperaturas de entre 100 y 110°C y se determina su peso, la diferencia en masa no sea mayor de 0.2% de la masa de las piezas.

Una vez determinados los pesos de los especímenes ya secos, se sumergen en agua a temperatura de entre 17 y 23°C por un periodo de 24 horas, terminado este periodo se sacan y se elimina el agua superficial con un paño o papel absorbente; se seca también el interior de las celdas, y se vuelve a determinar su masa.

El espécimen se ata con un alambre de poco diámetro, cuya masa no sea mayor del 0.5% de la masa de una pieza; se coloca en una canastilla adecuada y se cuelga de la horquilla del brazo de la balanza.

Se registra la masa del espécimen sumergido en agua sin que roce las paredes y el fondo del recipiente.

Los cálculos son determinados mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - P_a} * 1000$$

donde:

A

= Volumen de agua absorbida referido al volumen aparente del espécimen en (dm³ /m³)

M_s = Masa seca del espécimen en kg

M_{sss} = Masa saturada y superficialmente seca en kg

P_a = Peso ahogado en kg

Los resultados obtenidos por este método no deben exceder los límites establecidos en las normas NMX-C-006 y NMX-C-010 de acuerdo a la clasificación de la pieza.

3.4.4 Dimensiones de Tabiques (NMX-C-038)

Esta norma establece el método de prueba para la determinación de las dimensiones de los ladrillos y bloques para la construcción por medio de una escuadra provista de una regla con cursor.

Para la preparación del espécimen se preparan cinco elementos para la prueba, deben de ser representativos del lote de entrega y mantenerse a la temperatura ambiente durante las mediciones. No deben tener ningún material extraño o depositado en sus caras: en este caso se deben eliminar.

El espécimen se coloca en una superficie plana, que puede ser una mesa, descansando en la cara conveniente para usar la escuadra en posición horizontal.

De cada una de las dimensiones se hacen dos determinaciones una colocando la escuadra longitudinalmente y otra transversalmente. Se justan en los brazos y la regla de esta escuadra procurando que hagan el mejor contacto posible con las caras del ladrillo o bloque. Se toma la lectura en el brazo menor graduado, hasta aproximación de 1 mm.

Esta norma se utilizó para la determinación de las áreas para las pruebas mecánicas de los especímenes.

3.4.5 Determinación del Módulo de Ruptura

El módulo de ruptura es una prueba que mide la resistencia a la flexión de los tabiques, y para determinarlo es mediante las siguientes indicaciones:

- Se marca el punto medio en lo largo por las dos caras anchas.
- En la cara inferior se marcan 9 cm a cada lado, partiendo del centro hacia los extremos de cada uno de los tabiques.
- Con ayuda de tres perfiles de acero angulares colocados en los puntos marcados del tabique y debidamente concentrados en la máquina, se aplica carga hasta que exista ruptura.
- Posteriormente se registran las cargas máximas y mediante la expresión siguiente es calculado el modulo de ruptura.

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2}$$

donde:

MR = Módulo de Ruptura (kg/cm²)

P = Carga máxima (kg)

L = Distancia entre los puntos de apoyo (18 cm)

b = Ancho (cm)

d = Peralte (cm)

3.5 Análisis Estadístico de Resultados

Recordemos que la estadística es la ciencia del análisis de datos y de la deducción de las conclusiones a partir de dicho análisis de datos, tomando en cuenta las variaciones de los mismos, el ordenamiento de esos datos según su magnitud se conoce como distribución de frecuencias, y es en una distribución de frecuencias donde se puede detectar un patrón en la variabilidad de los datos.

Una herramienta de la estadística es la estimación de parámetros de un proceso cualquiera, donde a partir de un cúmulo de datos muestrales de una variable aleatoria y técnicas y procedimientos se estiman los parámetros que describen o caracterizan la distribución de probabilidades de esa variable.

Como por lo regular se desconocen los parámetros, es necesario disponer de procedimientos para estimarlos a partir de datos muestrales.

Se conoce como estimación a un valor numérico calculado a partir de datos muestrales, dentro de los estimadores se encuentran los puntuales (estadísticos que producen un solo valor numérico, como estimador de parámetro desconocido). y los estimadores por intervalos (intervalos aleatorios que incluyen el valor real del parámetro con cierto nivel de probabilidad o intervalo de confianza).

Dentro de una estimación puntual, para una variable aleatoria X , a la que se le aplica una función de probabilidad $f(x)$, con media (μ) y varianza (σ^2) conocidas, se toma un número de observaciones n (tamaño de la muestra), de la que se obtienen media y varianza muestrales.

Si la distribución fuera del tipo Poisson, la media y la varianza muestrales se calculan como se muestra a continuación.

$$\mu = \sigma^2 = \lambda \quad (4.1)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = x \quad (4.2)$$

Si la distribución fuera del tipo Binomial, la media y la varianza muestrales se calculan como se muestra a continuación.

$$\hat{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = x \quad (4.3)$$

Una estimación por intervalo de un parámetro es el intervalo limitado por dos estadísticos de manera que incluye el verdadero valor del parámetro probabilidad.

$$P\{L \leq \mu \leq U\} = 1 - \alpha \quad (4.4)$$

Los intervalos de confianza unilaterales, son valores uno superior y otro inferior que limitan el intervalo donde se encuentra el valor real.

Cuando se cuenta con una sola restricción inferior sólo se tiene un intervalo, que indica que el valor real es mayor o igual a dicho límite ($L \leq \mu$). Su valor de probabilidad se calcula de la siguiente manera:

$$P(L \leq \mu) = 1 - \alpha \quad (4.5)$$

análogamente para cuando el límite es superior $C \leq U$

$$P\{\mu \leq U\} = 1 - \alpha \quad (4.6)$$

3.5.1 Resumen Numérico de los Datos Estadísticos

Supongamos que X_1, X_2, \dots, X_n son las observaciones de una muestra, la medida más importante para la tendencia central es la media muestral.

$$\bar{x} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (4.7)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n} \quad (4.8)$$

La media muestral representa “El centro de masa” de los datos muestrales.

La dispersión o variabilidad de los datos muestrales se mide con la varianza de la muestra.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (4.8)$$

Observe que la varianza de muestra es exactamente la suma de los cuadrados de las desviaciones o diferencias de las observaciones respecto a la media muestral \bar{x} , dividida entre el tamaño de la muestra menos uno.

Si no hay variabilidad de la muestra, entonces para cada observación muestral $X_i = \bar{x}$ y la varianza muestral $s^2 = 0$.

Cuanto más grande sea la varianza, más grande será la dispersión de los datos.

La desviación estándar muestral S , es la medida de dispersión más fácil de interpretar ya que se expresa en la unidad original de las mediciones.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.10)$$

Por otro lado, para conocer el grado de dispersión de los datos y determinar así que características deben observarse con mayor detenimiento, se utiliza el coeficiente de variación, entre más cercanos estén los valores de cero, la variable aleatoria tiene muy baja dispersión o una alta certidumbre de encontrarse cerca de la media; el coeficiente de variación se calcula como sigue:

$$Cv = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad (4.11)$$

donde: σ_i es la desviación estándar

μ_i es la media de la población

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en base a las normas vistas anteriormente serán descritos a continuación, tomando en cuenta que se fabricaron 30 piezas, 6 de cada proporción,

Porcentaje de ceniza volante (%)	0	10	20	30	40	50
Número de piezas elaboradas	6	5	6	6	6	5

4.1 Determinación del Módulo de Ruptura

Para la determinación del módulo de ruptura se analizaron los tabiques rojos recocidos fabricados, en proporción y número de piezas presentadas anteriormente.

El tabique es medido y se marcan las mediciones previamente expuestas y se acomoda como se muestra en la siguiente imagen con ayuda de la máquina universal, los ángulos de acero y los diferentes instrumentos como se muestra en las figuras 4.1, y 4.2.



Figura 4.1 Medición y determinación de puntos de apoyo para prueba



Figura 4.2 Pieza en posición para ser ensayada mediante prueba de módulo de ruptura

Para el acomodo de la pieza como es muestra en la figura 3.28 se noto que la pieza contaba con irregularidades en sus caras de tal forma que la carga en algunas de estas no era constante sobre toda la cara, de tal forma que eso pudo averiar el resultado.

Una vez que la pieza estuviese acomodada se aplico la carga hasta la ruptura del espécimen, de tal forma que se registraba la carga máxima para posteriormente hacer el cálculo correspondiente.

A continuación se muestran algunas imágenes de las piezas fragmentada aproximadamente a la mitad.



Figura 4.3 Pieza ensayada, donde se muestra la falla originada por flexión



Figura 4.4 Piezas con 10% de ceniza volante ensayadas



Figura 4.5 Tabiques con 20% de ceniza volante ensayados a flexión



Figura 4.6 Tabiques con 30% de ceniza volante ensayados a flexión



Figura 4.7 Tabiques con 30% de ceniza volante ensayados a flexión



Figura 4.8 Tabiques con 50% de ceniza volante ensayados a flexión

Una vez ensayados todos los tabiques se procede a determinar el módulo de ruptura mediante la expresión vista anteriormente, y en las imágenes anteriores se puede hacer una comparación de líneas de falla según la proporción de ceniza volante, donde claramente se muestra una mayor uniformidad en la línea de falla en las piezas que contenían el 30% de ceniza volante.

La expresión y las variables empleadas para la determinación del módulo son las siguientes:

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2}$$

donde:

MR = Módulo de Ruptura (kg/cm²)

P = Carga máxima al momento de ruptura (kg)

L = Distancia entre los puntos de apoyo (18 cm)

b = Ancho (cm)

d = Peralte (cm)

En las hojas siguientes se mostraran los resultados obtenidos mediante esta prueba, tomando en cuenta todas las variables de la expresión anterior.

Cuadro 4.1 Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 0% de Ceniza Volante

Proporción 0%						
Muestra #	Ruptura (kg)	Distancia entre puntos de apoyo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Módulo de Ruptura (kg/cm ²)	Módulo de Ruptura Promedio (kg/cm ²)
1	200	18	12.5	6.5	10.22	17.00
2	150	18	13.5	6.8	6.49	
3	370	18	12.6	6.3	19.98	
4	125	18	13.4	6.5	5.96	
5	650	18	12.5	6.4	34.28	
6	450	18	12.6	6.2	25.09	

Cuadro 4.2 Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 10% de Ceniza Volante

Proporción 10%						
Muestra #	Ruptura (kg)	Distancia entre puntos de apoyo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Módulo de Ruptura (kg/cm ²)	Módulo de Ruptura Promedio (kg/cm ²)
1	200	18	12.3	6.3	11.06	22.665
2	625	18	12.5	6.1	36.28	
3	275	18	12.4	6.1	16.09	
4	275	18	12	6.6	14.20	
5	600	18	12.2	6.1	35.69	

Cuadro 4.3 Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 20% de Ceniza Volante

Proporción 20%						
Muestra #	Ruptura (kg)	Distancia entre puntos de apoyo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Módulo de Ruptura (kg/cm ²)	Módulo de Ruptura Promedio (kg/cm ²)
1	850	18	12.5	6.2	47.76	37.78
2	850	18	12.5	6.3	46.26	
3	750	18	12.4	6.6	37.49	
4	550	18	12.4	6.8	25.90	
5	600	18	12.4	6.4	31.90	
6	725	18	12.4	6.5	37.36	

Cuadro 4.4 Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 30% de Ceniza Volante

Proporción 30%						
Muestra #	Ruptura (kg)	Distancia entre puntos de apoyo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Módulo de Ruptura (kg/cm ²)	Módulo de Ruptura Promedio (kg/cm ²)
1	1100	18	12.5	6.7	52.93	51.411
2	1150	18	12.9	6.6	55.26	
3	850	18	12.6	6.5	43.11	
4	1175	18	12.6	6.8	54.45	
5	1070	18	12.5	6.8	49.98	
6	1225	18	12.8	7	52.73	

Cuadro 4.5 Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 40% de Ceniza Volante

Proporción 40%						
Muestra #	Ruptura (kg)	Distancia entre puntos de apoyo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Módulo de Ruptura (kg/cm ²)	Módulo de Ruptura Promedio (kg/cm ²)
1	1050	18	13	6.4	53.24	51.88
2	1100	18	13	6.6	52.45	
3	975	18	13	6.6	46.49	
4	1100	18	12.8	6.8	50.18	
5	1125	18	12.9	6.7	52.45	
6	1175	18	12.9	6.6	56.46	

Cuadro 4.6 Resultados de Módulo de Ruptura para tabiques con 50% de Ceniza Volante

Proporción 50%						
Muestra #	Ruptura (kg)	Distancia entre puntos de apoyo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Módulo de Ruptura (kg/cm ²)	Módulo de Ruptura Promedio (kg/cm ²)
1	900	18	13.4	6.9	38.089	35.743
2	900	18	13.5	7.2	34.72	
3	250	18	13.2	6.5	12.10	
4	1300	18	13.5	6.8	56.23	
5	900	18	13.2	7	37.57	

En la tabla anterior se muestran todos los resultados obtenidos de módulo de ruptura promedio para cada uno de los equipos de tabiques con porcentajes iguales, por lo tanto es claro que el grupo de tabiques que tiene mayor resistencia a la flexión en cuanto al módulo de ruptura fueron los elaborados con 30 y 40% de ceniza volante, incrementando notablemente en comparación con los tabiques que no contienen ceniza volante.

Sin embargo los tabiques elaborados con 50% de ceniza volante contienen un exceso de la misma dando como resultado una disminución en la resistencia a la flexión en comparación con los fabricados con 30 y 40%.

Por lo tanto se puede determinar que en esta prueba nuestra hipótesis de incrementar la resistencia a la flexión del tabique es totalmente aprobada, esto con justificación en las tablas anteriores de resultados al módulo de ruptura promedio por cada grupo de tabiques con porcentajes similares.

4.2 Prueba de Absorción

La absorción está limitada en un intervalo del 13 – 21% para tabiques rojos recocidos, según la norma: NOM-000-SCFI-1994.

El procedimiento a seguir es el que se indica en las normas ASTM C67-91, NOM-000-SCFI-1994.

Primero se toman las mitades restantes de la prueba de módulo de ruptura, se colocan en un recipiente con agua y se saturarán por inmersión durante 24 hrs. Al término de este tiempo se deben secar superficialmente con papel o tela absorbente y así se determina el peso saturado y superficialmente seco, P_{ss2}.



Figura 4.9 Determinación del peso saturado superficialmente seco de pieza

Después se debe secar hasta peso constante. Para luego saturarlos por ebullición durante 5 hrs. Para realizar este procedimiento, debemos colocar los tabiques en un recipiente con agua el cual se coloca sobre una parrilla para poder lograr la ebullición en un mínimo de 1 hora y un máximo de 2 horas. A partir de esto la ebullición continua durante un lapso de 5 horas.



Figura 4.10 Piezas colocadas a ebullición durante 5 horas.

Después de que se termina el tiempo de ebullición, se deja que los fragmentos se enfríen en un lapso de 14 a 24 horas, al cabo de las cuales, siguiendo el método anterior, se determina el peso saturado y superficialmente seco P_{ss1}.

Para el cálculo de la absorción y del coeficiente de saturación se procede de la siguiente manera:

$$\text{Absorción} = \frac{P_{SS_2} - P_S}{P_S} \times 100$$

$$CS = \frac{P_{SS_2} - P_S}{P_{SS_1} - P_S}$$

Donde:

CS = Coeficiente de Saturación.

P_{SS_1} = Peso saturado y superficialmente seco por ebullición.

P_{SS_2} = Peso saturado y superficialmente seco por inmersión.

P_S = Peso seco

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Cuadro 4.7 Resultados de Peso Saturado y Superficialmente Seco por Ebullición

Peso Saturado y Superficialmente Seco por Ebullición (g)

Número de Tabique

		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	1469.9	1648.17	1705.1	1500.1	1735.8	1819.07
	10	1281.2	1122.3	1448.6	1311.2	1049.4	1222.5
	20	1617.72	1800.75	1459.6	1757.15	1594.75	1635.4
	30	1616.35	1603.3	1499.6	1966.8	1878.52	1872.3
	40	1506.8	1640.4	1585.6	1920.05	1690.3	1623.8
	50	1809.1	1573.4	1852.6	1760.2	1721.9	

Cuadro 4.8 Resultados de Peso Saturado y Superficialmente Seco por Inmersión

Peso Saturado y Superficialmente Seco por Inmersión (g)

Número de Tabique

		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	1479.53	1666.49	1731.59	1508	1758.1	1841.12
	10	1314.14	1154.09	1479.66	1339.6	1086.67	1256.53
	20	1659.13	1841.98	1493.01	1800.4	1634.01	1669.4
	30	1647.37	1633.16	1549.1	2003.36	1923	1895.76
	40	1542.62	1678.02	1620.48	1970.87	1730.69	1662.24
	50	1868.27	1612.07	1904.12	1820.63	1771.39	

Cuadro 4.9 Resultados de Peso Seco

		Peso Seco (g)					
		Número de Tabique					
		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	1133.62	1255.8	1364.97	1097.93	1389.3	1424.08
	10	938.96	869.39	1052.83	991.2	805.75	957.2
	20	1303.53	1452.76	1171.68	1422.03	1268.96	1285.25
	30	1303.48	1305.59	1268.09	1572.76	1544.62	1513.97
	40	1235.33	1336.85	1269.66	1586.1	1360.36	1309.89
	50	1475.62	1234.44	1493.1	1433.63	1367.01	

Cuadro 4.10 Resultados de Absorción

		Absorción (%)					
		Número de Tabique					
		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	30.51	32.70	26.86	37.35	26.55	29.28
	10	39.96	32.75	40.54	35.15	34.86	31.27
	20	27.28	26.79	27.42	26.61	28.77	29.89
	30	26.38	25.09	22.16	27.38	24.50	25.22
	40	24.88	25.52	27.63	24.26	27.22	26.90
	50	26.61	30.59	27.53	26.99	29.58	

Cuadro 4.11 Resultados de Coeficiente de Saturación

		Coeficiente de Saturación					
		Número de Tabique					
		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	1.0286	1.0467	1.0779	1.0196	1.0644	1.0558
	10	1.0962	1.1257	1.0785	1.0888	1.1530	1.1283
	20	1.1318	1.1185	1.1160	1.1291	1.1205	1.0971
	30	1.0991	1.1003	1.2138	1.0928	1.1332	1.0655
	40	1.1319	1.1239	1.1104	1.1522	1.1224	1.1225
	50	1.1774	1.1141	1.1433	1.1850	1.1395	NA

4.3 Resistencia a la Compresión Simple (NMX-C-036)

Esta prueba establece el método de prueba para la determinación de la resistencia a la compresión de bloques tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines fabricados de concreto, cerámica, arcilla y otros materiales para la construcción.

Los equipos e instrumentos necesarios para la prueba constan de una máquina de prueba, que debe estar equipada con dos bloques de acuerdo, cuya dureza Rockwell C, no sea menor de 60 y de dureza Brinnell N 620; uno de los cuales tiene asiento esférico que transmite la carga a la superficie superior de la probeta y el otro de un block plano rígido en el cual descansa la probeta. Cuando el área de la aplicación de la carga de los bloques de acero no es suficiente para cubrir el área que se va a cargar en el probeta deben colocarse placas adicionales de acero que cumplan con los requisitos que se anotan en el párrafo siguiente, y se colocan entre los bloques de carga y la probeta cabeceada de modo que el centroide de la superficie a la cual se le va a aplicar la carga se alinea con el centro de los bloques de la máquina.

Las placas y bloques de acero cuyas superficies de carga no deben diferir de un plano en más de 0.025 mm en cualquiera de las dimensiones en 152.4 mm. El centro de la esfera del bloque superior debe coincidir con el centro de su carga. Si se usa una placa de carga el centro de las esferas debe caer en una línea que pasa verticalmente en el centroide de la carga de la probeta. El bloque con asiento esférico debe mantenerse fijo en su sitio, pero debe girar libremente en cualquier dirección. El diámetro de la cara de la carga de los bloques, estos deben tener un espesor igual, cuando menos a la tercera parte de la distancia de la orilla del bloque de carga a la esquina más distante de la probeta.

En ningún caso el espesor de la placa debe ser menor de 13 mm como se muestra en la figura.

Preparación y acondicionamiento de las muestras

La prueba para hacer las determinaciones de resistencia de los productos a que se refiere este método se obtuvieron los especímenes que en forma de mitades restaron de la prueba de modulo de ruptura, la pieza fue colocada en posición con ayuda de las placas y una ligera capa de arena de 8 mm aproximadamente para regularizar la superficie y que la carga se aplicada constantemente sobre toda la cara superior y posteriormente se le aplico la carga a una velocidad lenta.

Los resultados obtenidos por pieza fueron dos, a primer falla, en donde en algunas de las caras laterales se presentaba una falla y el segundo resultado que es hasta que todas las caras de la pieza mostraran alguna falla notable.

La forma para calcular la resistencia a la compresión de una probeta como la carga máxima de N (kgf) dividida entre el área transversal de la probeta o sea el área total de una sección perpendicular a la dirección de la carga incluyendo aquellas que estén en los espacios huecos, esto mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{F}{A}$$

Donde:

$$R = \text{Resistencia a la compresión} \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)$$

$$F = \text{Carga máxima en primer y segunda falla (kgf)}$$

$$A = \text{Área transversal del espécimen (cm}^2\text{)}$$

Para lo cual se determinó el área transversal de cada una de las caras superior e inferior de cada pieza, para después calcular el promedio de las dos áreas y utilizarla como área transversal del espécimen.

En las siguientes imágenes se muestra como se colocaron las piezas en la maquina universal para ensayarlas.



Figura 4.11 Pieza en posición para ser ensayada a compresión simple



Figura 4.12 Representación de prueba a compresión simple

A continuación se presentan las tablas de resultados:

Cuadro 4.12 Resultados de Áreas de Cara #1 en piezas.

		Áreas de Cara #1 (cm ²)					
		Número de Tabique					
		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	153.75	162.5	148.75	156.25	146.25	134.2
	10	147.6	153.6	138	142.8	147.56	146.25
	20	140.4	155.62	144	146.32	143.91	158.75
	30	153.75	155	156.25	156.25	147.5	153.75
	40	156.25	157.44	158.75	148.68	157.5	158.75
	50	162.5	171.6	159.9	168.91	162.5	NA

Cuadro 4.13 Resultados de Áreas de Cara #2 en tabiques.

		Áreas de Cara #2 (cm ²)					
		Número de Tabique					
		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	162.5	176.64	146.25	138	135	127
	10	153.75	175	138	159.72	180	156
	20	130.2	102.925	168.75	120	141.45	150
	30	153.75	157.5	160	132.5	118.75	146.05
	40	175.5	160	168.96	114.3	147.42	159.9
	50	156	204.1	145.92	162.5	171.6	NA

Cuadro 4.14 Resultados de Promedio de Áreas.

Resultado de Promediar Áreas Caras 1 y 2 (cm²)

Número de Tabique

		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	158.13	169.57	147.50	147.13	140.63	130.60
	10	150.68	164.30	138.00	151.26	163.78	151.13
	20	135.30	129.27	156.38	133.16	142.68	154.38
	30	153.75	156.25	158.13	144.38	133.13	149.90
	40	165.88	158.72	163.86	131.49	152.46	159.33
	50	159.25	187.85	152.91	165.71	167.05	

Cuadro 4.15 Resultados de Primer Falla en piezas

Primer Falla (kg)

Número de Tabique

		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	2000	950	1950	1100	1150	1900
	10	1300	2500	1020	1050	1100	1200
	20	2500	2100	3550	3000	1500	1600
	30	3200	4100	3500	2600	3100	3800
	40	3500	7000	4500	5000	4600	5000
	50	6500	4900	3100	3900	2500	NA

Cuadro 4.16 Resultados de Falla Última

Falla Última en piezas (kg)
Número de Tabique

		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	2300	1070	2521	1600	1700	2080
	10	1800	3250	1269	1200	1700	3000
	20	3750	2940	3790	4500	2000	1730
	30	5200	4900	4300	2924	3930	4370
	40	4100	11500	5400	5900	5700	6000
	50	7300	6200	4200	4600	2800	NA

Cuadro 4.17 Resultados de Resistencia a Compresión Simple en Primer Falla

Resistencia a Compresión Simple en Primer Falla (Kg/cm²)
Número de Tabique

		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	12.65	5.60	13.22	7.48	8.18	14.55
	10	8.63	15.22	7.39	1150.00	6.72	7.94
	20	18.48	16.24	22.70	22.53	10.51	10.36
	30	20.81	26.24	22.13	18.01	23.29	25.35
	40	21.10	44.10	27.46	38.03	30.17	31.38
	50	40.82	26.08	20.27	23.54	14.97	NA

Cuadro 4.18 Resultados de Resistencia a Compresión Simple en Falla Ultima

Resistencia a Compresión Simple para Falla Ultima (Kg/cm²)

Número de Tabique

		1	2	3	4	5	6
% de Ceniza Volante	0	14.55	6.31	17.09	10.88	12.09	15.93
	10	11.95	19.78	9.20	7.93	10.38	19.85
	20	27.72	22.74	24.24	33.79	14.02	11.21
	30	33.82	31.36	27.19	20.25	29.52	29.15
	40	24.72	72.45	32.96	44.87	37.39	37.66
	50	45.84	33.01	27.47	27.76	16.76	NA

4.4 Análisis Estadístico de los Especímenes

A continuación se presenta el análisis estadístico en base al resumen numérico visto en el capítulo anterior, se elaboró con el fin de presentar la variabilidad de los resultados entre cada grupo de especímenes de mismo porcentaje de ceniza volante.

De todos los grupos se obtuvo la media, la varianza y la desviación estándar y así poder demostrar que tan variables son los resultados y sus valores promedios por cada propiedad.

Cuadro 4.19 Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 0% de Ceniza Volante

Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 0% de Ceniza Volante								
Especimen #	Dimensiones			Absorción (%)	Coeficiente de Saturación	Modulo de Ruptura (kg/cm ²)	Resistencia a la Compresión a Primer Falla (kg/cm ²)	Resistencia a la Compresión a la Falla Ultima (kg/cm ²)
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)					
1	25.9	12.5	6.5	30.51	1.0286	10.22	12.65	14.55
2	26.1	13.5	6.8	32.7	1.0467	6.49	5.6	6.31
3	26.13	12.6	6.3	26.86	1.0779	19.98	13.22	17.09
4	25.85	13.4	6.5	37.35	1.0196	5.96	7.48	10.88
5	25.9	12.5	6.4	26.55	1.0644	34.28	8.18	12.09
6	26.1	12.6	6.2	29.28	1.0558	25.09	14.55	15.93
Suma=	155.98	77.10	38.70	183.25	6.29	102.01	61.68	76.85
Media=	26.00	12.85	6.45	30.54	1.05	17.00	10.28	12.81
Varianza=	0.02	0.22	0.04	16.42	0.00	130.20	13.33	15.51
Desv. Estandar=	0.13	0.47	0.21	4.05	0.02	11.41	3.65	3.94

Cuadro 4.20 Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 10% de Ceniza Volante

Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 10% de Ceniza Volante								
Espécimen #	Dimensiones			Absorción (%)	Coeficiente de Saturación	Modulo de Ruptura (kg/cm ²)	Resistencia a la Compresión a Primer Falla (kg/cm ²)	Resistencia a la Compresión a la Falla Ultima (kg/cm ²)
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)					
1	26.3	12.3	6.3	39.96	1.0962	11.06	8.63	11.95
2	26.2	12.5	6.1	32.75	1.1257	36.28	15.22	19.78
3	26.1	12.4	6.1	40.54	1.0785	16.09	7.39	9.2
4	26.1	12	6.6	35.15	1.0888	14.20	6.94	7.93
5	25.9	12.2	6.1	34.86	1.153	35.69	6.72	10.38
6	25.8	12.1	6.2	31.27	1.1283	30.20	7.94	19.85
Suma=	156.40	73.50	37.40	214.53	6.67	143.52	52.84	79.09
Media=	26.07	12.25	6.23	35.76	1.11	23.92	8.81	13.18
Varianza=	0.03	0.04	0.04	14.18	0.00	130.33	10.35	28.16
Desv. Estandar=	0.19	0.19	0.20	3.77	0.03	11.42	3.22	5.31

Cuadro 4.21

Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 20% de Ceniza Volante

Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 20% de Ceniza Volante								
Espécimen #	Dimensiones			Absorción (%)	Coeficiente de Saturación	Modulo de Ruptura (kg/cm ²)	Resistencia a la Compresión a Primer Falla (kg/cm ²)	Resistencia a la Compresión a la Falla Última (kg/cm ²)
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)					
1	26.10	12.50	6.20	27.28	1.13	47.76	18.48	27.72
2	25.80	12.50	6.30	26.79	1.12	46.26	16.24	22.74
3	25.90	12.40	6.60	27.42	1.12	37.49	22.70	24.24
4	25.80	12.40	6.80	26.61	1.13	25.90	22.53	33.79
5	26.20	12.40	6.40	28.77	1.12	31.90	10.51	14.02
6	26.00	12.40	6.50	29.89	1.10	37.36	10.36	11.21
Suma=	155.80	74.60	38.80	166.76	6.71	226.67	100.82	133.72
Media=	25.97	12.43	6.47	27.79	1.12	37.78	16.80	22.29
Varianza=	0.03	0.00	0.05	1.63	0.00	69.51	30.36	71.38
Desv. Estandar=	0.16	0.05	0.22	1.28	0.01	8.34	5.51	8.45

Cuadro 4.22

Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 30% de Ceniza Volante

Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 30% de Ceniza Volante								
Espécimen #	Dimensiones			Absorción (%)	Coeficiente de Saturación	Modulo de Ruptura (kg/cm ²)	Resistencia a	Resistencia a
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)				la Compresión a Primer Falla (kg/cm ²)	la Compresión a la Falla Ultima (kg/cm ²)
1	26.15	12.50	6.70	26.38	1.10	52.93	20.81	33.82
2	25.98	12.90	6.60	25.09	1.10	55.26	26.24	31.36
3	26.30	12.60	6.50	22.16	1.21	43.11	22.13	27.19
4	25.80	12.60	6.80	27.38	1.09	54.45	18.01	20.25
5	26.00	12.50	6.80	24.50	1.13	49.98	23.29	29.52
6	26.10	12.80	7.00	25.22	1.07	52.73	25.35	29.15
Suma=	156.33	75.90	40.40	150.73	6.70	308.47	135.83	171.29
Media=	26.06	12.65	6.73	25.12	1.12	51.41	22.64	28.55
Varianza=	0.03	0.03	0.03	3.17	0.00	19.81	9.15	21.54
Desv. Estandar=	0.17	0.16	0.18	1.78	0.05	4.45	3.03	4.64

Cuadro 4.23

Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 40% de Ceniza Volante

Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 40% de Ceniza Volante								
Espécimen #	Dimensiones				Coeficiente de Saturación	Modulo de Ruptura (kg/cm ²)	Resistencia a la Compresión a Primer Falla (kg/cm ²)	Resistencia a la Compresión a la Falla Última (kg/cm ²)
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Absorción (%)				
1	26.10	13.00	6.40	24.88	1.13	53.24	21.10	24.72
2	26.20	13.00	6.60	25.52	1.12	52.45	44.10	72.45
3	25.90	13.00	6.60	27.63	1.11	46.49	27.46	32.96
4	25.80	12.80	6.80	24.26	1.15	50.18	38.03	44.87
5	26.00	12.90	6.70	27.22	1.12	52.45	30.17	37.39
6	26.10	12.90	6.60	26.90	1.12	56.46	31.38	37.66
Suma=	156.10	77.60	39.70	156.41	6.76	311.27	192.24	250.05
Media=	26.02	12.93	6.62	26.07	1.13	51.88	32.04	41.68
Varianza=	0.02	0.01	0.02	1.89	0.00	11.09	65.18	271.04
Desv. Estandar=	0.15	0.08	0.13	1.37	0.01	3.33	8.07	16.46

Cuadro 4.24

Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 50% de Ceniza Volante

Análisis de Resultados para Tabiques Rojos Recocidos con 50% de Ceniza Volante								
Espécimen #	Dimensiones				Coeficiente de Saturación	Modulo de Ruptura (kg/cm ²)	Resistencia a	Resistencia a
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Absorción (%)			la Compresión a Primer Falla (kg/cm ²)	la Compresión a la Falla Última (kg/cm ²)
1	26.15	13.40	6.90	26.61	1.18	38.09	40.82	45.84
2	25.98	13.50	7.20	30.59	1.11	34.72	26.08	33.01
3	26.30	13.20	6.50	27.53	1.14	12.10	20.27	27.47
4	25.80	13.50	6.80	26.99	1.19	56.23	23.54	27.76
5	26.00	13.20	7.00	29.58	1.14	37.57	14.97	16.76
Suma=	130.23	66.80	34.40	141.30	5.76	178.71	125.68	150.84
Media=	26.05	13.36	6.88	28.26	1.15	35.74	25.14	30.17
Varianza=	0.04	0.02	0.07	3.01	0.00	247.09	94.11	111.64
Desv. Estandar=	0.19	0.15	0.26	1.73	0.03	15.72	9.70	10.57

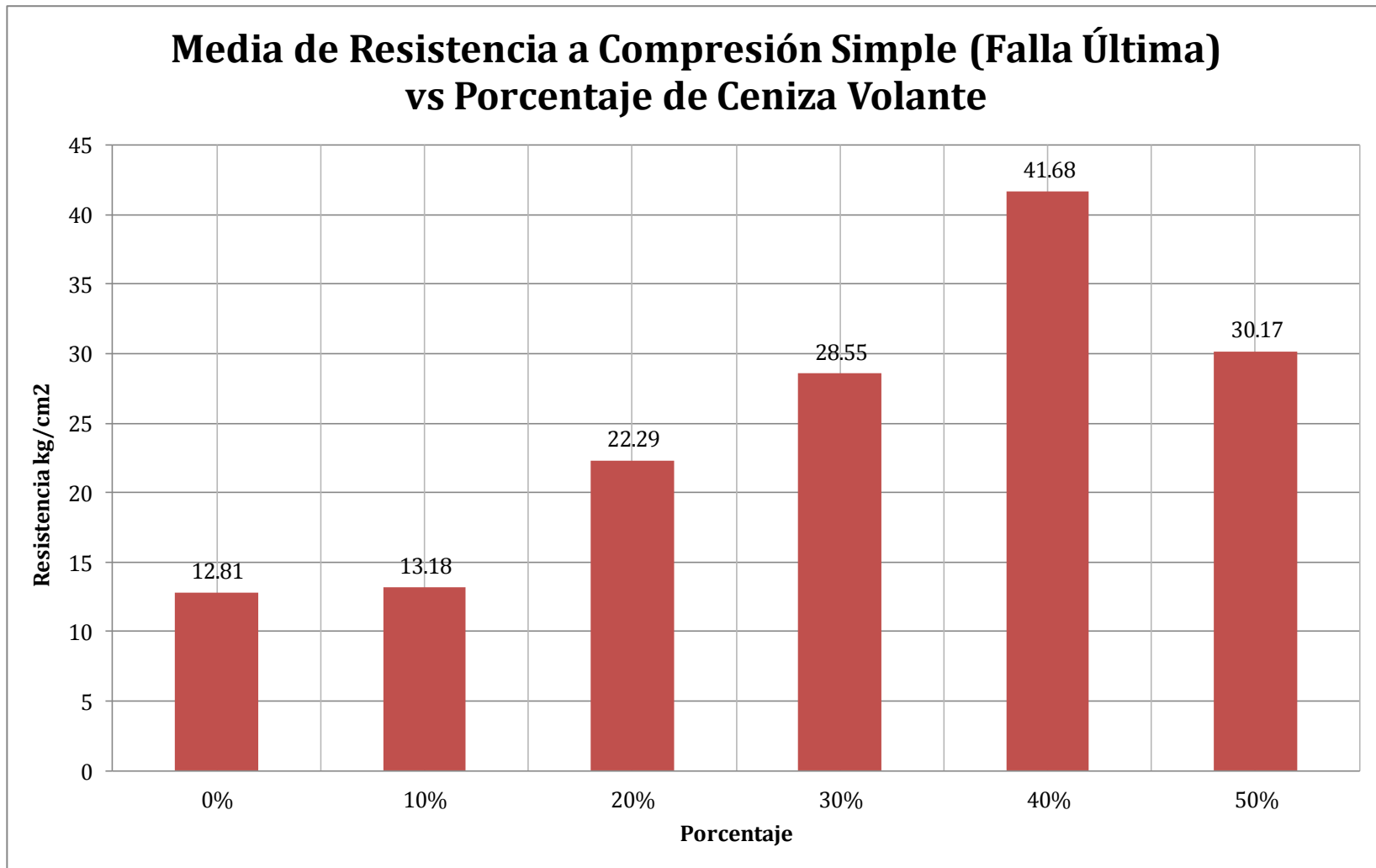


Figura 4.13 Gráfica de Comportamiento de Media Resistencia a Compresión Simple a Falla Última por % de Ceniza Volante

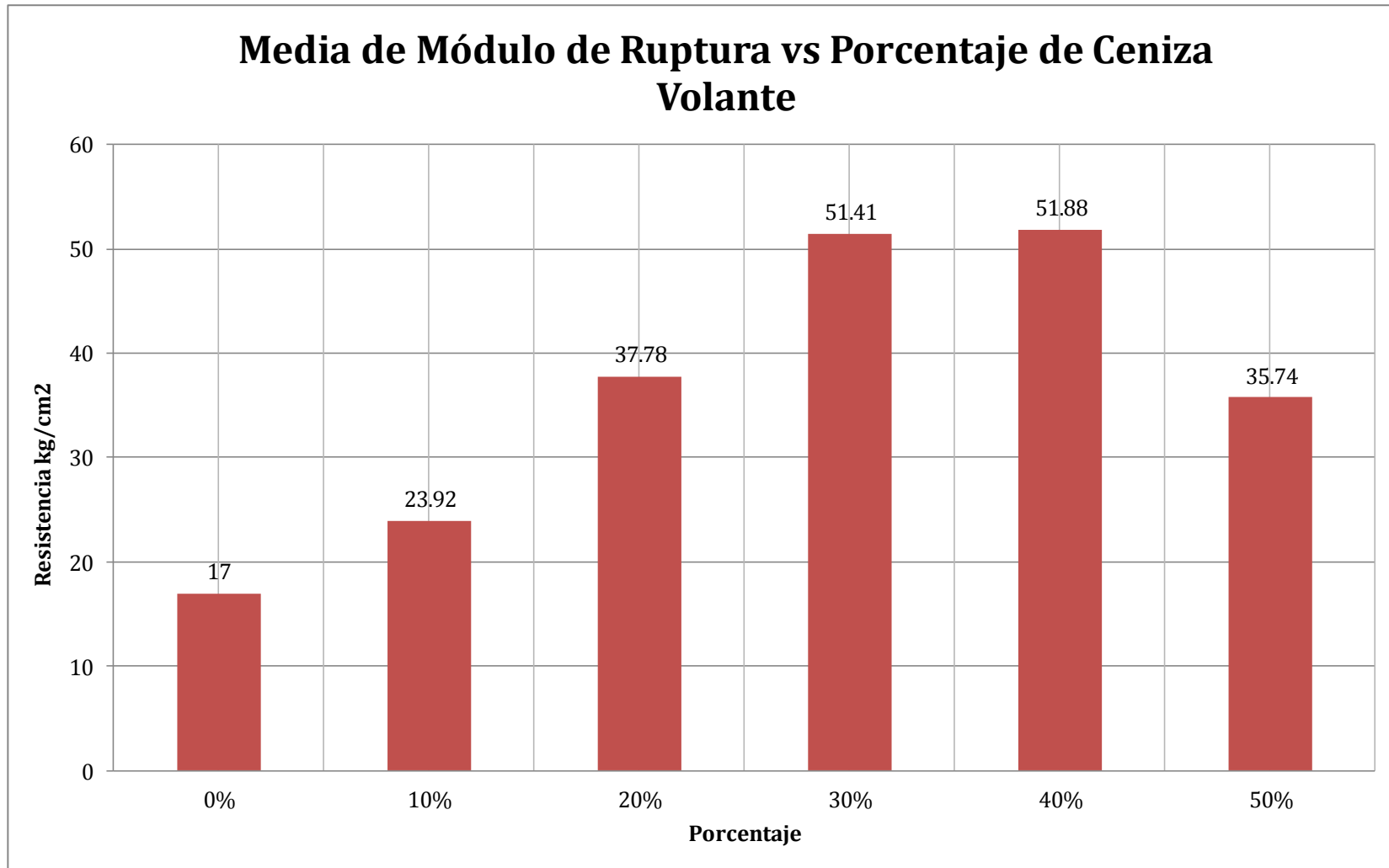


Figura 4.14

Gráfica de Comportamiento de Media de Módulo de Ruptura por % de Ceniza Volante

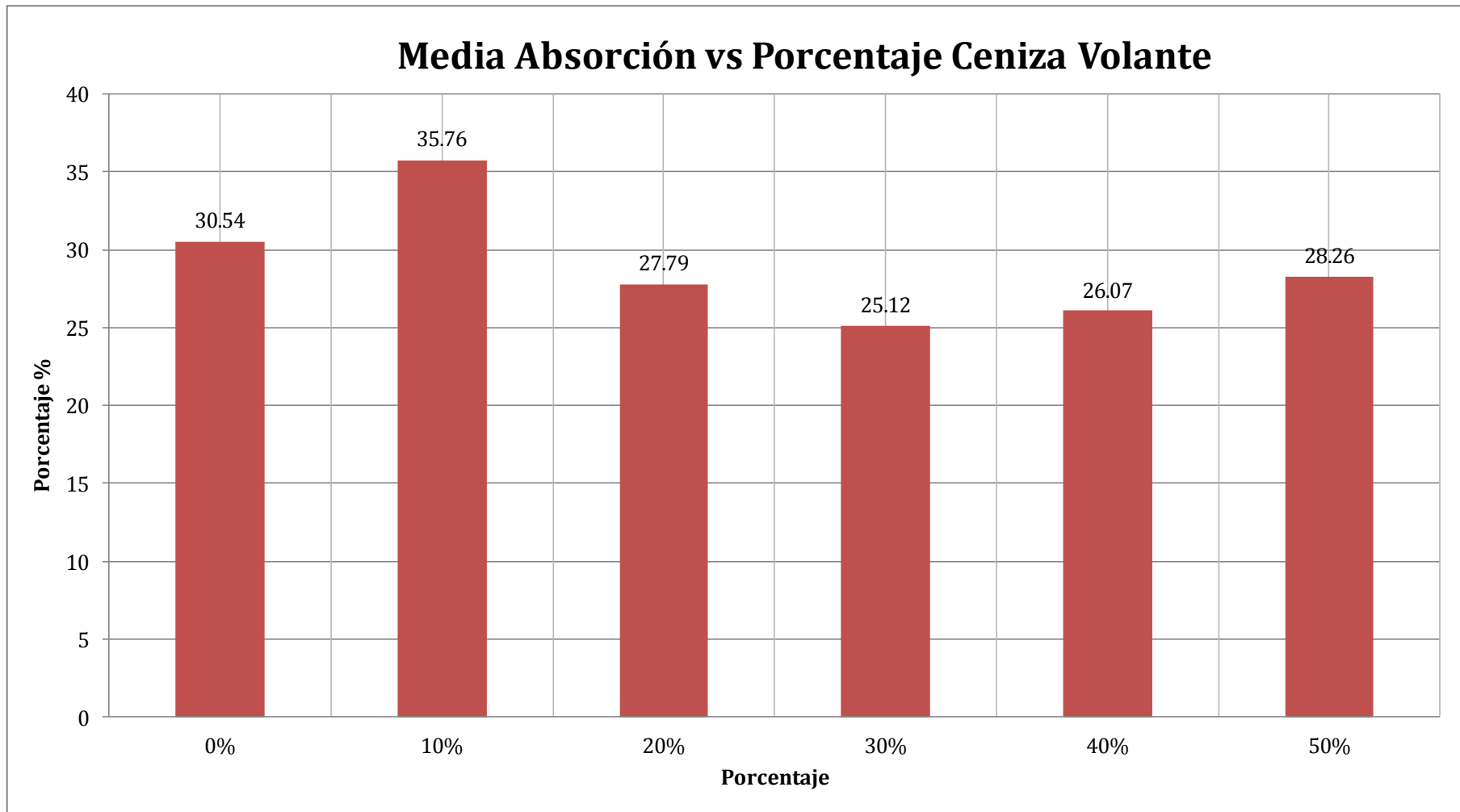


Figura 4.15

Gráfica de Comportamiento de Media de Absorción por % de Ceniza Volante

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL PROYECTO

El uso de este material en tabiques rojos recocidos mejoró las propiedades físicas y mecánicas notablemente, esto sustituyendo entre 30 y 40% de mezcla homogénea para elaborar tabiques por ceniza volante de clase F o C según la norma ASTM C 618 05, para la mezcla común para tabiques rojos recocidos mencionada al principio de este proyecto.

La diferencia de las propiedades mecánicas favorece a las que contienen ceniza volante con una proporción 30 y 40% ya que se notaron las siguientes observaciones, el promedio de resistencia a compresión simple de piezas con ceniza volante mejoró en un 500% en comparación con los especímenes comunes utilizados en la región mencionados en este proyecto como tabiques con 0% de ceniza volante.

En cuanto al modulo de ruptura, los resultados indican que en las piezas con ceniza volante de proporción 30-40% obtuvieron una mejora de hasta un 100% de resistencia máxima a flexión, referente a las propiedades físicas de los especímenes, la apariencia del tabique se mejoró debido a que se muestra más rígido, más homogéneo y con mayor dureza, lo cual le dio una mayor constancia en las medidas de la pieza.

La absorción mejoró disminuyendo el porcentaje de absorción en el promedio de las piezas con ceniza volante en comparación con las piezas comunes regionales.

Estos resultados demuestran que la ceniza volante agregada en la proporción ya definida le adicionó a los tabiques recocidos mayor dureza y rigidez.

Además el uso de este contaminante para las piezas cerámicas favorecería la relación costo-eficiencia debido a la sustitución de los materiales por un residuo contaminante.

Por lo tanto, esta investigación puede ser el inicio a nuevos proyectos donde intervengan mas variables, ya tomando en cuenta las siguientes observaciones, la

proporción 30-40% de ceniza volante es la más eficiente, realizar pruebas mecánicas a un número mayor de especímenes con esta proporción para obtener un resultado más significativo y descriptivo del comportamiento de la pieza, elaborar combinaciones de los otros materiales para que se pueda obtener una menor absorción de agua.

Para la fabricación de tabiques rojos recocidos comunes y con agregado de ceniza volante se considera ideal tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- I. Los fabricantes de tabiques deben estar regulados bajo un control de calidad de las dimensiones y materiales para que se ofrezca la resistencia mínima que la norma NMX-C-441-ONNCE-2005
- II. El suelo debe ser arcilla de baja compresibilidad debido al cambio volumétrico que la misma pieza puede adquirir
- III. El suelo no debe contener rocas ya que estas proporcionan fallas de cortante al tabique
- IV. Los tabiques en estado húmedo deben secarse a temperatura ambiente y totalmente expuestos al sol por una semana

REFERENCIAS

IMCYC, “*Organo Oficial del Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto*”, 1965 – 1988

NTC-RC-DF (2001), “*Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*”, México.

REGLAMENTO GENERAL DE CONSTRUCCIONES DEL ESTADO DE QUERÉTARO. La Sombra de Arteaga TOMO CXXIV, 1990.

NTCM-2004, “*Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*”, México.

NMX-C-006, “*Ladrillos Bloques Ceramicos de Barro, Arcilla y/o Similares*”

NMX-C-010, “*Industria de la Construcción – Bloques, Tabiques ó Ladrillos y Adoquines de Concreto – Resistencia a la Compresión*”

NMX-C-441-ONNCCE-2005, “*Industria de la Construcción Bloques Tabiques ó Ladrillos para Uso no Estructural-Especificaciones*”

NMX-C-036-ONNCCE, “*Industria de la Construcción – Bloques, Tabiques ó Ladrillos y Tabicones para Uso Estructural – Especificaciones y Métodos de Prueba*”

NMX-C-037-ONNCCE, “*Industria de la Construcción – Mampostería – Determinación de la Absorción Total y la Absorción Inicial de Agua en Bloques, Tabiques ó Ladrillos y Tabicones – Método de Ensayo*”

NMX-C-038-ONNCCE, “*Industria de la Construcción – Mampostería – Determinación de las Dimensiones de Bloques, Tabiques ó Ladrillos y Tabicones – Método de Ensayo*”

NMX-C-404-ONNCCE, *“Industria de la construcción-bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural-especificaciones y métodos de prueba”*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 9 pp.

ASTM C 618 05 *“Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan and pozzolans.”*

ASTM E 519, *“Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages”*.

ASTM C 404, *“Standard specification for aggregate for masonry grout”*.

ASTM C 67, *“Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile”*.

Fundación ICA. (2003). *Edificaciones de mampostería para vivienda*, ISBN-968 5520 00-3.

ONNCCE (2002), *“Anteproyecto de Norma Mexicana para la determinación de la resistencia a compresión diagonal y de la rigidez a cortante de muretes de mampostería de barro y de concreto”*, Organismo Nacional

INEGI, XV Censo Industrial, Censos Económicos 1999. Industrias Manufactureras, subsector 31. Producción de Alimentos, Bebidas y Tabaco.

Roberto Meli., *“Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos”*, Fundación ICA, 1ra edición, México DF., 2003.

Vasconcelos, G, Laurencio P.B. (2009). *“Experimental characterization of stone masonry in shear and compression”*, pag. 1-9.

NTA-IEE-001/2010, *“Norma Técnica Ambiental para el estado de Guanajuato, Establece las condiciones para la ubicación y operación de fuentes fijas con actividad artesanal para la producción de piezas elaboradas con arcillas.”*

Mecánica de Suelos, Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2005