

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ELABORACIÓN DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA,  
UTILIZANDO CEMENTOS PUZOLÁNICOS Y DESECHOS DE  
VIDRIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**EDWIN ESTUARDO VELÁSQUEZ SOLÍS**

ASESORADO POR: INGENIERO JOSÉ GABRIEL ORDÓÑEZ MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2004



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ELABORACIÓN DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA, UTILIZANDO CEMENTOS PUZOLÁNICOS Y DESECHOS DE VIDRIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 4 de marzo de 2002.

Edwin Estuardo Velásquez Solís



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO: Ing. Sydney Alexander Samuels Milson  
VOCAL I: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
VOCAL II: Lic. Amahán Sánchez Álvarez  
VOCAL III: Ing. Julio David Galicia Celada  
VOCAL IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz  
VOCAL V: Br. Elisa Yazminda Vides Leiva  
SECRETARIO: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO: Ing. Sydney Alexander Samuels Milson  
EXAMINADOR: Ing. Lionel Alfonso Barillas Romillo  
EXAMINADOR: Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón  
EXAMINADOR: Ing. José Gabriel Montenegro Paiz  
SECRETARIO: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco





**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ELABORACIÓN DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA,  
UTILIZANDO CEMENTOS PUZOLÁNICOS Y DESECHOS DE  
VIDRIO**

**EDWIN ESTUARDO VELÁSQUEZ SOLÍS**

**ASESORADO POR: INGENIERO JOSÉ GABRIEL ORDÓÑEZ MORALES**

**GUATEMALA, ENERO DE 2004**



## **ACTO QUE DEDICO**

A:

DIOS:

Creador de la vida, fuente de sabiduría que me capacitó y me condujo para alcanzar mi meta.

Mis padres Edwin David Velásquez Miranda y Ana Maria de Velásquez:  
Por su apoyo incondicional, por enseñarme a ser un hombre de bien, de trabajo honrado y de respeto a los demás.

Mis hermanas Sussan María y Ana Beatriz:  
Por su amor y apoyo.

Mi sobrino Adrián Esteban: con amor.

Wosbely y José Ramón: por apoyarme siempre.

Mis abuelitos.

Mis tíos y tías.

Toda mi familia, amigos y compañeros.

Todas aquellas persona que de una u otra forma colaboraron para llevar a cabo este trabajo.



## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	V
<b>GLOSARIO</b> .....	IX
<b>RESUMEN</b> .....	XIII
<b>OBJETIVOS</b> .....	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	XVII
<b>1 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Generalidades de los ladrillos de barro cocido.....	1
1.1.1 Breve historia de los ladrillos de barro cocido .....	1
1.1.2 Especificaciones físicas y mecánicas de los ladrillos .....	3
1.2 El vidrio. ....	9
1.2.1 Definición. ....	9
1.2.1.1 Breve historia del vidrio.....	9
1.2.2 Composición y características generales.....	10
1.2.2.1 Composición. ....	10
1.2.2.2 Características generales. ....	12
1.2.2.2.1 Características mecánicas.....	12
1.2.2.2.2 Características térmicas.....	14
1.2.2.2.3 Características químicas.....	15
1.2.2.2.4 Características ópticas.....	15
1.2.3 Proceso de fabricación del vidrio. ....	16
1.2.3.1 Mezcla y fusión. ....	16
1.2.3.2 Moldeado. ....	17
1.2.3.3 Transformaciones del vidrio. ....	18
1.2.4 Diferentes tipos de vidrio y sus usos.....	19
1.2.4.1 Vidrios de uso comercial. ....	19

1.2.4.2	Otros tipos de vidrio y sus usos.....	22
1.2.5	Eliminación y reciclaje del vidrio.....	23
1.3	Cemento puzolánico.....	27
1.3.1	Definición.....	27
1.3.2	Composición.....	27
1.3.2.1	Puzolana.....	28
1.3.2.1.1	Definición.....	28
1.3.2.1.2	Composición.....	30
1.3.2.1.3	Propiedades.....	31
1.3.2.2	Cal hidratada.....	32
1.3.2.2.1	Definición.....	32
1.3.2.2.2	Composición.....	33
1.3.2.2.3	Propiedades.....	34
1.3.3	Propiedades de los cementos puzolánicos.....	35
1.4	Ladrillos de ceniza y desechos de vidrio.....	37
1.4.1	Generalidades.....	37
1.4.2	Información general.....	38
1.4.3	Proporción de ceniza y vidrio.....	46
1.4.4	Proceso de elaboración del ladrillo.....	47
1.4.4.1	Preparación y mezclado de materiales.....	47
1.4.4.2	Contenido de humedad y presión de moldura.....	48
1.4.4.3	Secado.....	48
1.4.4.4	Colocado.....	49
1.4.4.5	Cocido.....	49
1.4.5	Características del ladrillo ceniza / vidrio.....	50
1.4.5.1	Resistencia a compresión.....	50
1.4.5.2	Densidad de masa.....	50
1.4.5.3	Porosidad.....	50

1.5	Ensayos de laboratorio. ....	51
1.5.1	Determinación de las dimensiones y forma. (COGUANOR 41 024 (h1).....	51
1.5.2	Determinación del peso del ladrillo. ....	51
1.5.3	Resistencia a la compresión. (COGUANOR 41 024 h2) .....	51
1.5.4	Resistencia a la flexión. (Módulo de ruptura) .....	53
1.5.5	Ensayo de absorción de agua. (COGUANOR 41 024 h4) .....	54
1.5.6	Determinación de la densidad de masa. ....	55
<b>2</b>	<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>57</b>
2.1	Obtención de los materiales.....	57
2.1.1	Cemento puzolánico. ....	57
2.1.1.1	Selección del banco de puzolana.....	57
2.1.1.2	Ubicación del banco.....	58
2.1.1.3	Extracción del material.....	58
2.1.1.4	Secado.....	58
2.1.1.5	Mezclado y molido. ....	58
2.1.1.6	Caracterización del cemento puzolánico.....	59
2.1.2	Obtención del vidrio. ....	62
2.1.2.1	Recolección de botellas. ....	62
2.1.2.2	Quebrado de botellas y recipientes.....	62
2.1.2.3	Molido. ....	62
2.1.2.4	Caracterización del vidrio.....	63
2.2	Elaboración del ladrillo.....	65
2.2.1	Equipo de trabajo.....	65
2.2.2	Proceso de fabricación.....	65
2.2.2.1	Mezclado de materiales. ....	65
2.2.2.2	Moldeo. ....	66
2.2.2.3	Desencofrado.....	66
2.2.2.4	Secado.....	67

2.2.2.5	Cocido.....	68
2.3	Ensayos de laboratorio.....	69
2.3.1	Determinación de las dimensiones.....	69
2.3.2	Determinación del peso del ladrillo.....	69
2.3.3	Ensayo de resistencia a compresión.....	69
2.3.4	Ensayo de resistencia a la flexión.....	70
2.3.5	Ensayo de absorción.....	70
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
3.1	Dimensiones y pesos.....	71
3.2	Resistencia a compresión.....	77
3.3	Resistencia a la flexión.....	79
3.4	Absorción.....	81
3.5	Densidad de masa.....	83
3.6	Resultados promedio.....	86
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>87</b>
4.1	Análisis estadístico.....	87
4.2	Evaluación de resultados.....	91
4.2.1	Dimensiones.....	91
4.2.2	Peso.....	91
4.2.3	Resistencia a compresión.....	92
4.2.4	Resistencia a la flexión.....	93
4.2.5	Absorción.....	94
4.2.6	Densidad de masa.....	95
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>97</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>99</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>101</b>
	<b>APÉNDICE.....</b>	<b>103</b>



# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1 Generalidades de los ladrillos de barro cocido**

### **1.1.1 Breve historia de los ladrillos de barro cocido**

El ladrillo hizo su aparición en la antigüedad, en aquellos lugares donde hacía falta la piedra y en su lugar tenían grandes yacimientos de arcilla. Fueron los egipcios los primeros que se distinguieron por su uso, éstos llegaron a moldear ladrillos de diversas formas, piezas esmaltadas para revestimiento y baldosas para pisos. El ladrillo también se constituyó en el principal material de construcción de las antiguas Mesopotamia y Palestina, donde apenas se disponía de madera y piedras. Los habitantes de Jericó, en Palestina, fabricaban ladrillos hace unos 9,000 años. Los constructores sumerios y babilonios se distinguieron por levantar zigurats, palacios y ciudades amuralladas con ladrillos secados al sol, que eran recubiertos por otros ladrillos cocidos en hornos, más resistentes y con esmaltes brillantes que formaban frisos decorativos. Los persas también construían con ladrillos, al igual que los chinos que construyeron la gran muralla. Los romanos construyeron baños, anfiteatros y acueductos con ladrillos, recubiertos de mármol.

En la Edad Media, en el imperio bizantino, al norte de Italia, en los Países Bajos y en Alemania, se realizaron construcciones con ladrillos templados, rojos y sin brillo creando una amplia variedad de formas. Esta tradición continuó en el renacimiento y en la arquitectura georgiana británica, y fue llevada a América del Norte por los colonos. Pero fue en España donde, por influencia

musulmana, el uso del ladrillo alcanzó mayor difusión, sobre todo en Castilla, Aragón y Andalucía.

El ladrillo ya era conocido por los indígenas americanos de las civilizaciones prehispánicas. En regiones secas se construían casas de ladrillos de adobe secado al sol. Las grandes pirámides de los olmecas, mayas y otros pueblos eran construidas con ladrillos revestidos de piedra.

En Guatemala, fue en la época de la Colonia cuando se utilizó el ladrillo a gran escala, en las construcciones de templos y edificios públicos, algunos de los cuales aún se pueden apreciar en la ciudad de Antigua. Después de la Colonia, el ladrillo se utilizó en un porcentaje muy bajo. No fue sino hasta después del terremoto de 1917, cuando el ladrillo se empleó en gran cantidad en las construcciones y de esa época hasta nuestros días se ha incrementado enormemente su uso.

La industria ladrillera se vio beneficiada a partir de 1858, cuando fue construida la primera galletera a hélice, movida por rodos, la cual llegó a tener una producción de 10,000 ladrillos diarios. Más tarde, los equipos de preparación del material y los extrusores al vacío revolucionaron la industria llegando a tener producciones de hasta 10 veces la mencionada anteriormente.

En Guatemala, fue en 1956 que el ingeniero Arturo Paiz Bolaños fundó la primera ladrillera, utilizando maquinaria de alta tecnología y de gran producción y que se ha convertido en una tradición en el país, por más de 45 años.

### 1.1.2 Especificaciones físicas y mecánicas de los ladrillos

#### Clasificación, designación y usos de los ladrillos de barro cocido

Para identificar de mejor forma las diferentes clases de ladrillos y los diferentes usos que se le pueden dar, se ha hecho la siguiente clasificación que se muestra en la tabla I.

**Tabla I. Clasificación, designación y usos de los ladrillos de barro cocido**

<b>Tipos</b>	<b>Grados</b>	<b>Clases</b>	<b>Usos</b>
<b>Tipo A</b> Ladrillos hechos a máquina.	<b>1</b>	Clase P, o perforado	Paredes con carga elevada, expuestas en sus dos caras, y clima lluvioso fuerte.
	<b>2</b>	Clase P, o perforado Clase T, o tubular	Paredes con carga moderada, expuestas en una cara, y clima con lluvia moderada.
	<b>3</b>	Clase P, o perforado Clase T, o tubular	Paredes con carga baja, expuestas en una cara, y clima con poca lluvia.
<b>Tipo B</b> Ladrillos hechos a mano.	<b>3</b>	Clase M, o macizo (Ladrillo tayuyo)	Paredes sin carga, clima con poca lluvia. No aptas para paredes expuestas.

Fuente: Miguel Ángel Juárez Sandoval. **Evaluación de las normas COGUANOR sobre ladrillos de barro cocido en relación a su aplicación local y propuesta de revisión de las mismas.** Página 31.

#### Tamaño

El tamaño del ladrillo varía de unas naciones a otras y aún dentro de cada nación según las regiones. Así, el ladrillo corriente de España es de 28 x 14 x 4.5 cm, pero en Barcelona el usual es de 29 x 14.5 x 4.5; el de Argentina es de 26 x 12 x 5.4 cm, y el de Cuba de 26 x 12 x 5.4 cm. En México al ladrillo corriente comúnmente se le llama *tabique*, y sus dimensiones oficiales son 28 x

14 x 7, aunque normalmente tiene 28 x 13 x 6 cm. El ladrillo corriente de Norteamérica es de 20.3 x 9.5 x 6.7 cm. En Guatemala, las dimensiones nominales de los ladrillos de barro cocido, que se hacen en el país (según norma COGUANOR 41 024 h1), se muestran en la tabla II.

**Tabla II. Dimensiones nominales de los ladrillos de barro cocido**

Tipo	Clase	Dimensiones, en cm		
		Largo	Ancho	Espesor
Tipo A. Ladrillos hechos a máquina	Clase P, o perforado	23	11	6.5(*)
		23	14	6.5(*)
	Clase T, o tubular	23	11	6.5(*)
		23	14	6.5(*)
		29	11	6.5(*)
		29	14	6.5(*)
		29	11	9
		29	14	9
		29	14	11
		23	11	11
		29	14	14
		23	23	11
Tipo B. Ladrillos hechos a mano.	Clase M, o macizo (tayuyo)	23	11	6.5(*)
		23	14	6.5(*)

(\*) Dimensiones más usadas. Las demás se fabrican a pedido especial, así como otras de uso menos frecuente que no se indican en la tabla.

Fuente: Miguel Ángel Juárez Sandoval. **Evaluación de las normas COGUANOR sobre ladrillos de barro cocido en relación a su aplicación local y propuesta de revisión de las mismas.** Página 32.

## Peso

En los Estados Unidos, el peso específico del ladrillo de construcción va desde 1.57 para el ladrillo de arcilla de superficie, prensado en seco y de cocido medio, a 2.32 para el ladrillo de arcilla esquistosa de barro duro y muy cocido.

En la tabla III se muestran los pesos en libras de las diferentes unidades de ladrillos que se utilizan más comúnmente en Guatemala.

**Tabla III. Peso de los ladrillos de barro cocido**

<b>Clase</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Peso en Lb. por unidad</b>
Clase P, o Perforado	6.5 x 11 x 23	6.00
	6.5 x 14 x 23	7.00
	6.5 x 14 x 29	8.00
Clase T, o Tubular	6.5 x 11 x 23	4.80
	6.5 x 14 x 23	6.00
	6.5 x 14 x 29	6.80
	9 x 14 x 29	9.00
	11 x 14 x 29	10.50
	14 x 14 x 29	13.50
Clase M, macizo o tayuyo	6.5 x 11 x 23	7.00

Fuente: Documento informativo de la ladrillera INMACO, sobre ladrillos de barro cocido.

### **Absorción**

Es el porcentaje de humedad que absorben los ladrillos, los valores máximos requeridos por la norma COGUANOR 41 024 h4, se muestran en la tabla IV.

### **Resistencia a la compresión**

Es un indicador de la durabilidad del ladrillo y del rendimiento potencial bajo ciertas condiciones ambientales. Los valores mínimos según la norma COGUANOR 41 024 h2, se muestran en la tabla IV.

## Resistencia a la flexión

Se considera como el módulo de ruptura del ladrillo ensayado sobre una luz simple, bajo una carga central. Actualmente, no es considerado por las normas COGUANOR, pero se considera para control de calidad. Puede considerársele, además, como ensayo opcional para la normalización de este material.

**Tabla IV. Requisitos físicos del ladrillo de barro cocido**

Requisitos	Tipo MQ, ladrillos hechos a máquina.					Tipo MA, hechos a mano.		
	Clase M, o macizo Clase P, o perforado			Clase T o tubular		Clase M, o macizo (tayuyo)		
	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 2	Grado 3	Grado 1	Grado 2	Grado 3
Resist. Compresión Mpa								
- Promedio de 5 unidades	12	8	4.5	8	4.5	12	8	4.5
- Individual	9	6	3.5	6	3.5	9	6	3.5
Absorción, (%) (máximo)								
- Promedio de 5 unidades	12	14	18	14	18	14	16	20
- Individual	14	16	20	16	20	16	18	24
Tolerancia en las dimensiones en mm. , máximo	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5

Fuente: Miguel Ángel Juárez Sandoval. **Evaluación de las normas COGUANOR sobre ladrillos de barro cocido en relación a su aplicación local y propuesta de revisión de las mismas.** Página 33.

## **Aspecto**

La clase de arcilla, la manera de moldearla o conformarla, la forma y grado de cocción, influyen en el aspecto del ladrillo. La escala de colores en texturas lisas o rugosas va desde los tonos severos gris perla o crema, pasando por los colores oro y bronce y las tintas descendentes de la escala de rojos, hasta los púrpuras, marrones y aun el de bronce oscuro de cañón. Esto aplicado para los ladrillos conocidos como corrientes.

Además deben estar libres de piedrecillas expuestas y guijarros que puedan dar origen a exfoliaciones, y también estar libres de partículas de cal y otras sustancias. No se aceptarán grietas, incrustaciones, saltaduras, ampolladuras y otros defectos superficiales que afecten su resistencia a compresión o su durabilidad.



## **1.2 El vidrio**

### **1.2.1 Definición**

El vidrio se puede definir como una sustancia dura, frágil, comúnmente transparente, que se forma por la combinación de sílice con potasa o sosa y pequeñas cantidades de otras bases. Se fabrican en hornos y en crisoles. Tiene un brillo especial, es insoluble en casi todos los cuerpos conocidos y es fusible a elevadas temperaturas. La coloración puede ser permanente, pero varía con la inclusión de diferentes compuestos dentro de la mezcla.

#### **1.2.1.1 Breve historia del vidrio**

Los historiadores coinciden en considerar que el vidrio fue descubierto aproximadamente 2,500 años a.C, en Egipto y Mesopotamia. Primero fue utilizado como adorno, luego aparecieron los primeros objetos de vidrio destinados a contener alimentos.

El descubrimiento del soplado fue la primera gran innovación vidriera. Fue a principios de nuestra era, en Palestina y Siria. Esta técnica se difundió en todo el occidente y se utilizó hasta la era moderna.

A partir del siglo XI, Venecia se convirtió en la capital europea de la fabricación del vidrio. En el siglo XIV se descubrió la técnica del vidrio plano en Normandía (Francia). La primera industria vidriera se desarrolló en el siglo XVIII.

Con la revolución industrial, en el siglo XIX, numerosos progresos fueron realizados en la industria vidriera. La utilización de carbón, para calentar los hornos, mejoró el funcionamiento de éstos. Las primeras máquinas de automatización de la producción fueron introducidas en las fábricas. El soplado con la boca fue progresivamente sustituido por el chorro de aire comprimido en moldes metálicos.

En el siglo XX se convirtió en una industria de masa, por medio de la instalación de hornos de fuego continuo y de los progresos realizados en el campo de la automatización de la producción. A lo largo del siglo, no cesará de integrar los avances tecnológicos y en particular, desde hace ya bastantes años, las técnicas de procesamiento automatizado.

## 1.2.2 Composición y características generales

### 1.2.2.1 Composición

El vidrio está formado por sílice que tiene disuelto por lo menos dos silicatos, uno alcalino y otro alcalinotérreo. El vidrio debe contener materiales:

**Fundentes:** para facilitar la fusión de la masa silícea.

**Estabilizantes:** para aumentar la estabilidad.

**Vitrificantes:** como por ejemplo, la sílice, cuarzo o arena cuarzosa.

El vidrio común o vidrio base, que también se conoce como vidrio de silicato sodocálcico, muestra la siguiente composición:

- Sílice ( $\text{SiO}_2$ ), material vitrificante..... 69 a 74%
- Óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), fundente..... 12 a 16%
- Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), estabilizante..... 5 a 12 %
- Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ )..... 0 a 6 %

- Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )..... 0 a 3 %

Además de estos componentes, también se le pueden añadir pequeñas cantidades de otras sustancias, que le confieren al vidrio ciertas propiedades y coloración. Por ejemplo:

- *Vidrio soluble y vidrio sodocálcico.*

Es un vidrio con un gran contenido sódico, puede disolverse en agua convirtiéndose en un fluido espeso, y es utilizado como material ignífugo y como cemento de sellado. Es utilizado para hacer botellas, vajillas, bombillas, focos, ventanas y lunas.

- *Vidrio al plomo.*

El cristal utilizado en las vajillas es el resultado de fórmulas que combinan sílice y potasio con óxido de plomo. Este vidrio es pesado y presenta un elevado índice de refracción a la luz, lo que lo hace un material apropiado para fabricar lentes y prismas.

- *Vidrio de boro silicato.*

Presenta una predominancia de bórax, además de sílice y álcali. Es de larga durabilidad y muy resistente a elementos químicos y al fuego, es utilizado como material de cocina, laboratorio y como equipo para procesos químicos.

- *Color.*

Este se ve afectado por las impurezas en la materia prima. El vidrio se puede colorear usando óxidos metálicos, sulfuros o seleniuros. Por ejemplo: se obtiene **vidrio amarillo**, con óxido de plata; **vidrio amarillo canario**, óxido de uranio; **amatista brillante**, con peróxido de manganeso; **amatista sombrío**, con óxido de níquel; **azul celeste**, con bióxido de cobre; **azul de zafiro**, con óxido de cobalto; **azul verdoso**, con protóxido de hierro; **blanco y opaco**, con antimoniuro de plomo; **rojo y rosado**, con óxido de oro; **rojo purpúreo**, con protóxido de cobre; **verde amarillento**, con óxido de cromo y **verde botella**, con peróxido de hierro.

## 1.2.2.2 Características generales

### 1.2.2.2.1 Características mecánicas

Durante su uso el vidrio puede estar sometido a esfuerzos mecánicos de diferente tipo: tracción, compresión, torsión, impacto y penetración. El comportamiento bajo estos esfuerzos depende de la rigidez de los enlaces entre las moléculas que lo constituyen y, el estado de su superficie. En la superficie hay ciertas fisuras microscópicas donde se concentran las tensiones mecánicas y actúan como centro de iniciación de posibles fracturas. Debido a estas micro fisuras se observa que la resistencia a la compresión es mucho mayor que la resistencia a la tracción, por lo que el vidrio rompe siempre a tracción.

Los ensayos proporcionan los siguientes resultados:

**Resistencia a la compresión.** Es muy elevada (1,000 Mpa) por lo que, en sus aplicaciones normales, es prácticamente imposible la rotura del vidrio por compresión.

**Resistencia a la tracción.** Normalmente presentan una resistencia a la tracción entre 30Mpa y 55 Mpa, aunque al ser especialmente tratado puede alcanzar los 700 Mpa. Para el vidrio recocido la tracción es alrededor de 40 Mpa.

Otras propiedades mecánicas que caracterizan a los vidrios son:

1. **Densidad.** La densidad del vidrio varía de acuerdo al tipo de vidrio, por lo que se tiene:

- Vidrio cristal:  $2.95 \text{ g/cm}^3$
- Vidrio de botella:  $2.62 \text{ g/cm}^3$
- Vidrio de espejo:  $2.58 \text{ g/cm}^3$
- Vidrio de ventana:  $2.50 \text{ g/cm}^3$
- Vidrio flint:  $3.52 \text{ g/cm}^3$
- 

2. **Dureza.** La resistencia al rayado del vidrio es de 6.5 en la escala de MOHS, que representa una dureza ligeramente inferior a la del cuarzo.

3. **Elasticidad.**

**Modulo de Young “E”.** Coeficiente que relaciona el alargamiento  $\Delta l$  de una barra de vidrio de longitud  $l$  y sección  $S$  sometida a una fuerza de tracción  $F$ .

$$F/S = E \times (\Delta L/L)$$

Por lo tanto, el E para el vidrio común es de  $7 \times 10^{10} \text{ Pa}$ .

**Coefficiente de Poisson “μ”.** Es la relación entre la deformación lateral (contracción) y la longitud (alargamiento) cuando se aplica al vidrio un esfuerzo de tracción. En el vidrio común  $\mu = 0.22$ .

#### 1.2.2.2.2 Características térmicas

Las propiedades térmicas del vidrio se pueden describir por tres constantes intrínsecas al material:

1. **Calor específico “C”.** Cantidad de calor necesaria para elevar  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de 1Kg de material. Para el vidrio el calor específico es:  $0.150 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ .
2. **Conductividad térmica “λ”.** Cantidad de calor que atraviesa una pared de caras paralelas y de un metro de espesor cuando entre sus caras se establece una diferencia de temperaturas de  $1^{\circ}\text{C}$ . Para el vidrio es de:  $0.002 \text{ cal/cm}^{\circ}\text{seg}^{\circ}\text{C}$ .
3. **Coefficiente de dilatación lineal “α”.** Es el alargamiento por unidad de longitud que experimenta un material cuando aumenta  $1^{\circ}\text{C}$  su temperatura.

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta t_1 \cdot l_0$$

Para el vidrio en el intervalo de 20 a  $200^{\circ}\text{C}$  el coeficiente de dilatación lineal es:

$$\alpha = 9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

### 1.2.2.3 Características químicas

**Resistencia al agua.** Este elemento ataca al vidrio disolviendo algunos de sus componentes, lo cual se manifiesta por pequeñas pérdidas de masa. La intensidad del ataque depende de varios factores: la temperatura, tiempo de contacto, composición del vidrio, la agitación y el estado de la superficie. A temperatura ambiente, la pérdida de masa es prácticamente inapreciable. Al ser aumentada la temperatura, la intensidad del ataque crece exponencialmente.

**Resistencia a los agentes atmosféricos.** Pueden ocasionar la aparición en su superficie de manchas y desescamaciones. El principal agente de dicho ataque es el agua contenida en la atmósfera que se condensa frecuentemente sobre la superficie fría del vidrio. El resto de gases atmosféricos no atacan al vidrio.

### 1.2.2.4 Características ópticas

El sol tiene una temperatura superficial de 5,700 K, emitiendo una radiación cuyo máximo se encuentra en una longitud de onda de 500 nm (zona central de radiación visible), esta radiación es parcialmente absorbida al atravesar la atmósfera terrestre. De esta radiación un 1% es ultravioleta, 53% es luz visible (380 a 780 nm) y un 46% a infrarrojo. Cuando esta energía incide en un material puede ser reflejada, transmitida o absorbida. La reflexión se produce siempre que existe un cambio de medio, la cantidad de luz reflejada depende del ángulo de incidencia y de los índices de refracción de los dos medios.

Para describir el comportamiento óptico de un acristalamiento se utilizan los siguientes parámetros:

- **Factor de transmisión luminosa:** cociente entre el flujo de radiación visible transmitida al atravesar un medio y la radiación visible incidente.
- **Factor de reflexión luminosa:** Cociente entre el flujo luminoso reflejado y el flujo incidente, medido para una incidencia casi normal.
- **Transmisión de energía directa:** Porcentaje de energía solar que atraviesa el vidrio con relación a la energía solar incidente.
- **Absorción energética:** Parte del flujo de energía solar incidente absorbida por el vidrio. Repercute en un aumento de su temperatura y en la reemisión de esta energía absorbida hacia el exterior y hacia el interior.
- **Factor solar:** Cociente entre la energía total que pasa a través de un acristalamiento y la energía solar incidente. Consiste en transferencias térmicas por convección y por radiación en el infrarrojo lejano de la parte de radiación solar incidente que es absorbida por el vidrio.

### 1.2.3 Proceso de fabricación del vidrio

#### 1.2.3.1 Mezcla y fusión

Luego de hacerse una minuciosa preparación y medición, se mezclan las materias primas y se someten a una fusión inicial antes de pasar a las altas temperaturas requeridas para la vitrificación. La fusión dura aproximadamente 10 horas; durante la primera fase se usan temperaturas de entre 1200 y 1400C, luego viene la fase de homogenización donde la temperatura se aumenta entre 100 a 150 grados más que en la primera fase; después de esta fase se deja en

reposo, donde la temperatura disminuye lentamente y la masa vítrea pueda trabajarse, luego se moldea.

### 1.2.3.2 Moldeado

A lo largo de la historia del vidrio han sido varios los métodos utilizados para el trabajo del vidrio en su estado plástico, los cuales producen una variedad ilimitada de formas, entre estos métodos están los siguientes:

1. **Colado.** Este proceso consiste en verter la pasta vítrea en moldes y dejarla enfriar y solidificar. Actualmente, se han desarrollado procesos de colado por centrifugado en los que la pasta vítrea es propulsada contra las caras de un molde que rota a gran velocidad. Este proceso moldea formas precisas y ligeras, por lo que se usa en la producción de los tubos de imagen de la televisión.
2. **Soplado a boca.** Consistía en tomar una pequeña cantidad de la pasta vítrea con el extremo de una caña de soplar y se le daba una forma más o menos cilíndrica haciéndola girar sobre una plancha de hierro colado que, a su vez, la enfría un poco. Luego se soplaba a través de la caña para formar una burbuja con la masa vítrea y a partir de allí se obtenían la forma y el espesor deseados.
3. **Soplado mecánico.** Consiste básicamente en la mecanización del proceso anterior; en 1903 se inventó una máquina de soplado totalmente automática.
4. **Prensado.** En 1820, se patentaron los primeros sistemas de prensado totalmente mecánico. Consistían en el vertido en un molde, del vidrio fundido que, prensado con un émbolo, adquiriría su forma final. Tanto el

molde como el émbolo podían tener diseños que quedaban grabados en la pieza.

5. **Estirado mecánico.** La idea de este sistema es la de conseguir extraer verticalmente, a partir de un baño de vidrio fundido, una lámina rectangular continua de vidrio que, inmediatamente después de emerger, fuese cuidadosamente enfriada.
  
6. **Laminado continuo.** Consiste en que el vidrio fundido contenido en una balsa se le hace rebosar por uno de los extremos del horno y se desliza hasta llegar a los rodillos laminadores. La lámina de vidrio avanza horizontalmente mientras se produce su enfriamiento.
  
7. **Vidrio flotado.** Procedimiento usado para la fabricación de vidrio plano. Fue desarrollado en 1959. Consiste en fundir el vidrio en un horno balsa, para luego hacerlo pasar por una cámara en la que existe un baño de estaño fundido, de manera que el vidrio flota sobre él, se extiende y avanza horizontalmente, al salir de la cámara pasa por un túnel de recocido y finalmente se corta.

### 1.2.3.3 Transformaciones del vidrio

Luego de darle forma a las piezas de vidrio, se pasa por algunos procesos, para suprimir las tensiones que hayan podido originarse durante el enfriado, entre estos tenemos:

1. **Vidrio templado.** Consiste en calentar los vidrios hasta una temperatura algo más baja a la de su reblandecimiento y a continuación enfriarlos bruscamente, haciendo incidir sobre su superficie multitud de chorros de aire

frío. El templado completo da una mejor resistencia mecánica y hace del vidrio un producto de seguridad, puesto que en caso de rotura los trozos son muy pequeños y los riesgos de producir accidentes son prácticamente nulos.

2. **Vidrios termoendurecidos.** Nos llevan a un refuerzo de la resistencia mecánica. El proceso de fabricación es parecido al del vidrio templado, pero varía la forma de enfriamiento, siendo éste más lento, por lo que las tensiones superficiales son inferiores y por tanto tiene una resistencia mecánica más baja.

3. **Temple químico.** Existen dos procedimientos diferentes:

- Creación de capas superficiales de menor coeficiente de dilatación que el vidrio base. El recubrimiento se lleva a cabo a temperaturas superiores a la relajación del vidrio; cuando éste se enfría la parte inferior se contrae más que la superficie quedando ésta sometida a compresión.
- Intercambio superficial de iones del vidrio por otros de mayor tamaño. La compresión se produce por la sustitución de iones alcalinos de la superficie por otros más voluminosos, este proceso se debe producir a temperaturas inferiores a la de reblandecimiento del vidrio.

#### **1.2.4 Diferentes tipos de vidrio y sus usos**

##### **1.2.4.1 Vidrios de uso comercial**

#### **Vidrio de ventanas**

Inicialmente se hacía por colado o soplado de cilindros huecos que luego se cortaban y apisonaban formando una lámina. En el procedimiento de

Foucault, la lámina de vidrio se estira a través de un cilindro refractario encajado por debajo de la superficie de la cuba de vidrio y después se pasa a una cámara de recocido vertical, para finalmente emerger en un piso superior donde se corta en hojas.

### **Vidrio de luna**

Se produjo por primera vez en Francia en 1668, vertiendo vidrio fundido sobre una mesa de hierro y alisándolo luego con un rodillo. Después de una recocción se le daba el acabado final puliendo ambas caras. Hoy se fabrican mediante un alisado continuo con un doble rodillo laminador situado al final de un horno de cuba. Al salir de la galería de recocido ambas caras se someten a un acabado continuo y simultáneo.

### **Botellas y frascos**

Se producen con un proceso automático que combina el prensado (para la formación de la abertura del recipiente) y el soplado (formación del interior del recipiente). Primero, se vierte un poco de vidrio fundido en un molde estrecho e invertido y se presiona con aire contra el fondo del molde, esto será el cuello de la botella. Después se aplica un deflector sobre la parte superior del molde y una inyección de aire que entra por la parte inferior a través del cuello, forma parte de la botella. La botella a medio formar, llamada esbozo, es transportada por el cuello, luego se la da la vuelta y se deposita en otro molde donde se le aplica un soplado que le da la forma definitiva.

## **Vidrio óptico**

Es utilizado en la mayor parte de lentes de gafas, microscopios, telescopios, cámaras e instrumentos ópticos. Se diferencia por el modo en que refracta la luz. La fabricación es una operación delicada que requiere gran exactitud. La materia prima tiene que ser de la máxima pureza y debe manipularse con gran cuidado para que no exista ninguna imperfección durante el proceso.

La fabricación continua de este tipo de vidrio se da en crisoles recubiertos de **platino** que se remueven con varillas recubiertas con el mismo metal en las cámaras cilíndricas de acabado. Mediante este proceso se obtiene mayor cantidad de vidrio óptico, más barato y de alta calidad.

## **Vidrio fotosensible**

Es similar a la película fotográfica en la que los iones de oro o plata del material reaccionan ante la luz. Se utiliza en procesos de impresión y reproducción.

El vidrio fotocromático se oscurece por exposición a la luz, pero recupera su claridad original cuando la luz desaparece, esto debido a la existencia de pequeños cristales de cloruro o bromuro de plata. Se utiliza para fabricar lentes o gafas que se oscurecen o aclaran y también en el campo de la electrónica.

## **Cerámica de vidrio**

Los vidrios que contienen algunos metales se utilizan para cocinar, para las cabezas de los cohetes y como piezas de protección térmicas de los

transbordadores espaciales. Otros vidrios metálicos pueden magnetizarse, son fuertes y flexibles y resultan de gran utilidad en los transformadores eléctricos de gran rendimiento.

### **Fibras de vidrio**

Con estas se pueden tejer telas para ropa y tapicería excelentes por su estabilidad química, fuerza y resistencia al fuego y al agua. Por sí mismas o combinadas con resinas son excelentes aislantes eléctricos. Al impregnarlas con plástico, se consigue un compuesto en el que se combina la resistencia y la inercia del vidrio con la resistencia al impacto del plástico.

#### **1.2.4.2 Otros tipos de vidrio y sus usos**

El pavés de vidrio o baldosa prensada son bloques de construcción con caras acanaladas o con otros diseños y se utilizan para paredes exteriores y tabiques interiores de edificios. La espuma de vidrio, utilizada en flotadores o como aislante.

La fibra óptica, son filamentos de vidrio de alto índice refractario, dispuestos paralelamente y separados por delgadas capas de cristal de bajo índice refractario, pueden someterse a técnicas ópticas para la obtención de lentes. También ha sido importante en el desarrollo de las comunicaciones, la investigación científica, la medicina y la industria.

El vidrio de halógeno, útil en el campo de la comunicación. Compuesto por un halógeno, como el flúor, combinado con un metal pesado, como el circonio, el bario o el hafnio.

El vidrio láser tiene un alto porcentaje de óxido neodimio y es capaz de emitir luz láser si el vidrio se introduce y se ensambla dentro de un dispositivo apropiado.

### **1.2.5 Eliminación y reciclaje del vidrio**

Hoy en día la protección del medio ambiente lleva implícita las palabras “**recuperación**” y/o “**reciclado**”. El vidrio es un material que por sus características es fácilmente recuperable. El envase de vidrio es 100% reciclable, ya que a partir de un envase utilizado, puede fabricarse uno nuevo que puede tener las mismas características del primero. Al ser sometidas al proceso de recuperación las pérdidas son mínimas por lo que el uso generalizado de envases reciclados favorecerá la no-sobreexplotación de cientos de miles de canteras en todo el mundo.

La fácil reutilización del vidrio abre un amplio abanico de posibilidades para que la sociedad y las administraciones afectadas puedan autogestionarse de una manera fácil su medioambiente. Si a esta acción se une el reciclado de papel, cartones, materia orgánica, aceites, etc., se puede reducir considerablemente el impacto que el hombre produce en la tierra.

Antes de entrar plenamente en el tema concreto de la recuperación del vidrio, es importante clasificar el vidrio, desde el punto de vista de su aplicación:

1. **Industrial.** Es el vidrio que no es utilizado como envase para productos alimenticios (almacenamiento de productos químicos, biológicos, vidrio plano: ventanas, cristales blindados, fibra óptica, bombillas, etc).
2. **Doméstico.** Se emplea para almacenar productos alimenticios (conservas, vinos, yogures, etc).

Desde el punto de vista del color, los más empleados son:

- **El verde** (60%). Utilizado masivamente en botellas de vino, cava, licores y cerveza, aunque en menor cantidad este último.
- **El blanco** (25%). Usado en bebidas gaseosas, zumos y alimentación en general.
- **El extraclaro** (10%). Empleado esencialmente en aguas minerales, tarros y botellas de decoración.
- **El opaco** (5%). Aplicado en cervezas y algunas botellas de laboratorio.

Más del 42% del vidrio reciclado procede del doméstico, siendo el sector principal de producción de vidrio recuperable.

La recuperación del vidrio se atribuye inicialmente a Alemania y Suiza, aunque fueron los daneses los pioneros en este campo comenzando en 1962. Resulta evidente el progresivo ascenso que ha tenido el reciclado del vidrio desde entonces hasta nuestros días, por ejemplo, en Europa, según los datos de 1998 de la UE, los ciudadanos europeos depositaron para su recuperación algo más de ocho millones de toneladas de envases de vidrio. En España 567,000 toneladas fueron depositadas por los ciudadanos para ser recicladas. En Guatemala no existen datos exactos de la cantidad de vidrio que se deposita para reciclaje, ya que en la actualidad sólo una empresa se dedica al reciclaje de dicho material.

Las ventajas del reciclado del vidrio son numerosas:

- Se reduce considerablemente la energía necesaria para su fabricación, el ahorro en los hornos de fusión es de 130 Kg de combustible (fuel) por tonelada de vidrio reciclado.
- Se disminuye el volumen de los residuos sólidos. Por cada tonelada de casco reciclado se reducen 1,000 Kg de basuras.
- Por cada tonelada de vidrio reciclado, se genera un ahorro de 1,200 Kg de materias primas.
- De 1Kg de envase de vidrio reciclado se obtiene un kilogramo de nuevos envases.
- Se reduce la erosión producida en la búsqueda y extracción de materias primas, así como hace disminuir la dependencia del petróleo.
- Otra ventaja difícil de cuantificar, es la mejora medioambiental que supone el poder reciclar envases que muchas veces, son tirados o descampados sin ninguna consideración.

### **Proceso de reciclado**

**Reciclar** significa **volver al ciclo**; así, para que el reciclado de un material sea verdaderamente ecológico y garantice la protección del entorno, debe cumplir con:

- Que el material obtenido pueda ser reutilizado de nuevo íntegramente.
- Que el nuevo material mantenga al 100% sus cualidades.
- Que el material resultante se utilice para fabricar el mismo producto del que proviene.

El procedimiento consiste en separar los elementos extraños que suelen acompañar al vidrio (papel, plásticos, corchos, piedras, metales, porcelana, etc). La separación se realiza manualmente y/o con equipos específicos: imanes fijos

para el hierro, ciclones para papeles y plásticos, detector de metales no férricos por impulsos mecánicos “trimetau”, captadores de cerámicas y piedras “sistema trioptic”. Actualmente ya se está usando equipo láser para separar todas las impurezas.

Además de la extracción de estos elementos, el vidrio es inicialmente triturado y lavado. El producto de esta operación es llevado a las fábricas donde se utiliza como materia prima para la nueva elaboración del vidrio. Este producto se denomina “calcin” en la industria vidriera, donde se volverá a utilizar como si fuera materia prima nueva.

El calcin se mezcla con arena, sosa, caliza y otros componentes y se funde a 1500°C. Después el vidrio es homogeneizado hasta obtener una masa en estado líquido: la gota de vidrio. Esta gota se lleva al molde, que dará forma al nuevo envase. Estos envases tienen las mismas características que los originales.

## **1.3 Cemento puzolánico**

### **1.3.1 Definición**

El cemento puzolánico es un aglomerante hidráulico, producido por la mezcla íntima de puzolana y cal, finamente molidos. Es un aglomerante que alcanza baja resistencia mecánica, y su fraguado es algo más lento que el del cemento Portland. Por lo que se puede considerar como un cemento para aplicaciones de albañilería. Los aglomerantes cal-puzolana tienen su origen reconocido en las construcciones hechas por los romanos. Hoy en día se conservan aún las ruinas de los grandes edificios construidos con este material.

### **1.3.2 Composición**

La composición del cemento puzolánico se produce a partir de mezclar íntimamente y moler hasta fino polvo una mezcla de cal y puzolana, con una proporción promedio de 70% de puzolana y 30% de cal, aunque ésta puede variar de acuerdo a las características del cemento que se quiere obtener. Además, por economía se busca utilizar el menor porcentaje posible de cal. Una mezcla que ha dado buenos resultados según estudios hechos por el Ing. Zeceña Girón, es la de 80% puzolana y 20% de cal. El material producido requiere tener una finura similar a la del cemento Portland ordinario (250-300 m<sup>2</sup>/kg ensayo Blaine). A continuación se hace una referencia sobre los componentes del cemento puzolánico.

### **1.3.2.1 Puzolana**

#### **1.3.2.1.1 Definición**

La norma ASTM 618-78, nos define lo que son las puzolanas: "son materiales síliceos o aluminio-síliceos que por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes".

Las puzolanas son usadas en morteros cal-puzolana, en la fabricación de cementos puzolánicos y como adiciones directas a las mezclas de concreto.

Las puzolanas por su origen se pueden dividir en dos grupos: "naturales y artificiales".

#### **Puzolanas naturales**

En su mayoría, son materiales de origen volcánico, aunque hay otros materiales de diferente origen con propiedades puzolánicas. Se pueden sub-dividir en "inorgánicas y orgánicas".

#### **Puzolanas de origen inorgánico.**

Son materiales que proceden de erupciones volcánicas.

Constan de materiales vítreos de estructura incoherente o tufas compactadas que se forman por la deposición de polvo y cenizas volcánicas. Se pueden encontrar como rocas consolidadas, en estado fragmentado y no consolidado. Están compuestas de silicatos y contienen tanto partículas vítreas

como cristalinas. Por ejemplo, las cenizas volcánicas, las pómez, las tobas, la escoria y obsidiana.

### **Puzolanas de origen orgánico**

Son materiales que incluyen las tierras de infusorios y algunas rocas silíceas que han perdido muchos de sus óxidos básicos. Las tierras de infusorios están formadas por los esqueletos silicios de diatomeas, depositadas en ambientes tanto marinos como lacustres.

### **Puzolanas artificiales**

Son productos obtenidos por tratamiento térmico de materiales naturales como la arcilla, ciertas rocas silíceas y ceniza volante.

### **Cenizas volantes**

Se producen en la combustión de carbón mineral (lignito) fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.

### **Arcillas activadas o calcinadas artificialmente**

Por ejemplo, residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.

## **Escorias de fundición**

Principalmente son producto de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.

## **Las cenizas de residuos agrícolas**

La ceniza de cascarilla de arroz y las cenizas del bagazo y la paja de la caña de azúcar. Cuando son quemados convenientemente, se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión.

### **1.3.2.1.2 Composición**

La composición de las puzolanas se obtienen sometiendo una muestra a la acción de ácidos reductores, para aislar los elementos que tienen preponderancia (Fe, Al, Ca, Mg) quedando como residuo los componentes de silicio (Si). Generalmente se prefiere puzolanas con composición química tal que la presencia de los tres principales óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sea mayor del 70%. En la tabla V, se muestra la composición química de algunas puzolanas obtenidas en cuatro bancos diferentes en Guatemala.

**Tabla V. Composición química de cuatro puzolanas**

<b>Compuesto</b>	<b>BANCO 1 El Progreso</b>	<b>BANCO 2 Guatemala</b>	<b>BANCO 3 Chimaltenango</b>	<b>BANCO 4 Alta Verapaz</b>
SiO <sub>2</sub>	73.68	65.74	73.61	50.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.25	16.72	12.78	32.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.20	3.58	2.34	2.35
CaO	1.13	3.33	1.04	0.40
MgO	0.23	0.95	0.56	0.14
SO <sub>3</sub>	0.32	0.65	0.37	0.33
Na <sub>2</sub> O	3.60	4.48	3.45	1.15
K <sub>2</sub> O	3.95	3.05	4.05	1.00
Perdida * ignición.	3.05	2.40	2.71	12.89

La pérdida por ignición fue realizada a una temperatura de 750°C.

Fuente: Zeceña Girón, Carlos Efraín. **Caracterización físico-mecánica y química del cemento puzolánico.** Página 56.

### **1.3.2.1.3 Propiedades**

Las propiedades de las puzolanas dependen de la composición química y la estructura interna. Se prefiere puzolanas con composición química tal que la presencia de los tres principales óxidos (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sea mayor del 70%.

**Peso específico (Norma ASTM C-188):** Es la masa por unidad de volumen y se determina con el objeto de conocer la densidad absoluta de los materiales puzolánicos empleados en la elaboración de cementos puzolánicos.

**Fineza 325 (ASTM C-430):** Es la determinación de la fineza por medio del tamiz 325 o de 45 micrones. Se determina con el objeto de establecer

diferentes grados de fineza, para conocer la reactividad puzolánica de los materiales. Es recomendable que los materiales puzolánicos tengan una fineza, que pasa el tamiz 325 no menor del 71%.

**Superficie específica (ASTM C-204):** Se obtiene utilizando el aparato de permeabilidad al aire Blaine, y consiste en cuantificar el tamaño de partículas de un material mediante la velocidad con que un chorro de aire atraviesa un volumen de material determinado. En las puzolanas se aplica para establecer diferentes grados de superficie específica.

**Resistencia a la flexión (ASTM C-348):** Este ensayo en los materiales puzolánicos tiene como objeto determinar el módulo de ruptura en la caracterización de un cemento puzolánico.

**Retención de agua (ASTM C-110):** En los materiales puzolánicos tiene como objeto determinar la cantidad de agua que puedan retener estos cuando se usan en un cemento puzolánico.

**Resistencia a la compresión (ASTM C-109):** En los materiales puzolánicos esta norma se limita únicamente al procedimiento del moldeo de los especímenes para los ensayos a compresión de estos materiales. Estos son los ensayos que se hacen para determinar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de las puzolanas.

### **1.3.2.2 Cal hidratada**

#### **1.3.2.2.1 Definición**

Es un polvo coagulante seco, que resulta de la hidratación de la cal viva, por medios mecánicos, con la cantidad de agua suficiente para transformar en

hidróxido el óxido de calcio, pero insuficiente para formar la pasta o masilla. El apagado de la cal es el proceso de adición de agua a la cal viva. En este proceso se desarrolla gran cantidad de calor y gran parte del agua escapa como vapor. Durante él, la cal viva debe ser agitada y removida continuamente, para evitar que se produzcan chasquidos o detonaciones, picaduras y desintegraciones.

La cal hidratada se fabrica en hidratadores mecánicos en los cuales las cargas de cal viva y agua son cuidadosamente proporcionadas en peso. Después de pasar por el hidratador, se somete a un sistema mecánico de separación, el cual elimina los grumos o materias impuras que pueden provocar detonaciones, etc. La cal hidratada en Guatemala se vende en sacos de 20 y 25 Kg, y sólo se requiere mezclarla con agua y arena para formar un mortero. La cal hidratada que se fabrica bajo supervisión química, es un producto de confianza, libre de tendencias que pudieran dar lugar a detonaciones, picaduras y desintegraciones. La cal hidratada de buena calidad se puede emplear en casi todos los trabajos en que se usa mortero de cal y se considera con mayor confianza que la cal viva. Entre los nuevos usos de la cal hidratada se puede mencionar el empleo en morteros de cemento y hormigón.

#### **1.3.2.2.2 Composición**

La cal es químicamente óxido de calcio. Es el nombre de una gran variedad de productos fabricados calcinando la piedra caliza. Ésta se compone de carbonatos de calcio y de magnesio en proporciones variables.

Los principales componentes de la piedra caliza son:

- Calcio, en forma de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ )

- Magnesio, en forma de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ).

Además, se encuentra un porcentaje ocupado por impurezas, que influyen en las propiedades de la cal. Entre las que más se encuentran como componentes de la caliza están:

- Silicio, en forma de óxido de silicio ( $SiO_2$ ) o sea el sílice.
- Aluminio, en forma de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) o sea alúmina.
- Hierro, en forma de óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ) o sea óxido de hierro.

Desde el punto de vista químico, la cal hidratada es un hidróxido de calcio lo cual lo diferencia de la cal viva que es un óxido de calcio.

#### 1.3.2.2.3 Propiedades

Entre las principales propiedades de la cal hidratada se tienen:

**Residuo insoluble:** Es una medida que limita el contenido de impurezas. Según la norma IRAM 1508 debe ser un porcentaje menor al 5%.

**Anhídrido carbónico:** Limita el calcáreo no calcinado. La norma IRAM indica que debe ser menor o igual al 7%.

**Expansión en autoclave:** Controla el proceso de apagado de una cal. Debe ser menor del 1%.

**Resistencia a compresión a 7 días:** Sirve para clasificar las cales. Debe ser de 0.5 Mpa.

**Resistencia a compresión a 28 días:** Clasifica la cal y verifica su hidraulicidad. Esta se verifica colocando a los 7 días la probeta bajo agua y se mantiene o eleva la resistencia a 28 días. Debe ser mayor de 0.5 Mpa.

**Fineza:** Tiene un efecto fundamental en todas las propiedades de una cal. Se requiere que el material retenido en el tamiz de 75 micrones resulte menor al 15%. Además tiene importancia en la resistencia al potenciar la hidratación de los compuestos silico-aluminosos. La estabilidad se ve favorecida, por el hecho de que se completa la hidratación al elaborar los morteros y no en la pared.

**Cal útil:** Representa los compuestos activos de una cal. Se requiere que su valor sea superior al 33%. Este factor influye favorablemente en propiedades como la resistencia, plasticidad, etc.

### **1.3.3 Propiedades de los cementos puzolánicos**

Entre las principales propiedades que se deben determinar de los cementos puzolánicos se tienen: Peso específico, fineza, superficie específica, consistencia normal, fraguado de vicat, expansión en autoclave, resistencia a la flexión, retención de agua y resistencia a la compresión. Estas propiedades se determinan de la forma que lo especifican las normas ASTM. También en los cementos puzolánicos se observan las siguientes propiedades:

- La tasa de desarrollo de la resistencia a la compresión de los cementos puzolánicos aumenta con la temperatura de curado, mientras a bajas temperaturas, ésta es afectada en forma mas acentuada que la de un cemento Portland.
- La evolución de calor durante el fraguado de los cementos puzolánicos es menor que la de los Portland, aunque la reducción no es proporcional al

grado de sustitución, pues la reacción entre la cal y la puzolana produce algo de calor.

- Tiene bajo calor de hidratación y esta propiedad no solamente se debe a una reducida contracción térmica de la masa sino también a una mayor elasticidad lo que permite mayores expansiones y contracciones.
- Tiene una alta resistencia al ataque químico en general y en particular al agua de mar. Es atribuible a la eliminación del hidróxido de calcio formado durante la hidratación del cemento por los compuestos formados en la reacción con las puzolanas. Esta propiedad depende mas de la inhibición del ataque químico que de su modo de acción.

## **1.4 Ladrillos de ceniza y desechos de vidrio**

### **1.4.1 Generalidades**

Esta es una investigación que se ha venido desarrollando en Alberta, Canadá, pero a pesar del incremento en los últimos 10 años en el uso de cenizas volantes en la industria de la construcción, la producción de ceniza es mayor que la utilización de la misma. Esta ceniza es considerada como un material de desecho que es negativo para el medio ambiente, ya que es producido por la quema de carbón en las estaciones generadoras de energía.

La idea de la utilización de la ceniza volante como componente de el ladrillo no es nueva. Aunque ya se han hecho ladrillos con 100% de ceniza volantes, y a pesar de mostrar alta resistencia y baja densidad, también fueron evidentes ciertas propiedades indeseables, como lo son:

- Alto grado de porosidad
- Alto índice de absorción
- Son propensos a agrietamiento
- Alto grado de contracción en el cocido
- Baja resistencia inicial

El mejorar estas propiedades adversas se ha vuelto el objetivo principal de esta investigación en Alberta, Canadá. Para reducir el alto grado de porosidad se ha optado por la inclusión de un material estabilizador inerte. Este se utiliza para que los ladrillos de ceniza logren producir las propiedades de los ladrillos de barro cocido. De varios tipos de material estabilizador que

han sido estudiados, el que mejores resultados ha proporcionado es el vidrio pulverizado.

Una proporción ceniza / vidrio de 60:40 produce los resultados más prometedores desde el punto de vista económico e ingenieril, con una temperatura de cocido de 900°C durante tres horas se considera suficiente para convertir el material cristalino en un sistema de componentes predominantemente cristalinos. Ambos niveles de temperatura y de duración del cocido, muestran gran diferencia con los del cocido de los ladrillos de barro cocido que es cerca de 1,100°C por un mínimo de 13 horas.

El ladrillo y los resultados de las pruebas fueron mostrados a ingenieros especializados en la construcción en mampostería y fueron unánimes en su aprobación. Gustando el color natural del ladrillo, pero con opción de añadir colores y texturas diferentes. Además se puede apreciar de que de dos productos ambientalmente negativos se pueda obtener un producto favorable al ambiente y para una industria tan grande como la construcción.

#### **1.4.2 Información general**

Son muchos los grupos o personas que han realizado estudios sobre la utilización de cenizas volantes en la fabricación de ladrillos, a continuación una breve reseña de algunos de los estudios realizados.

#### **Slonaker**

La proporción de mezcla para ladrillos propuesta por Slonaker consiste en: 72% ceniza, 25% escoria de fondo, 3% activador de silicato de sodio y 7% de humedad. La escoria de fondo es utilizada para suministrar un medio para

liberar la humedad mientras el ladrillo se seca, por tanto previene grietas de secado. El silicato de sodio es usado como un aglutinante antes del cocido.

Resumió su proceso de fabricación de la siguiente manera:

1. El material puro será bien mezclado.
2. La mezcla se someterá a presión usando una prensa hidráulica de 750 ton.
3. Los ladrillos frescos se secan por 18 horas a 100°C.
4. Se cocerán por 24 horas a 1135°C
5. Los ladrillos se dejaron enfriando por tiempo no definido.

Slonaker evaluó la interpretación ingenieril de acuerdo con las normas ASTM C-62, C-67 y C-216. Las pruebas incluyen:

1. Resistencia compresión de la unidad cocida y no cocida
2. Contracción.
3. 24 horas de absorción (indica si el espacio del poro es fácilmente llenado).
4. Absorción después de 5 horas de cocido (indica si el espacio del poro se llena totalmente).
5. Coeficiente de saturación.
6. Porosidad aparente.
7. Densidad de masa.
8. Succión

En la tabla VI se muestra los resultados de la investigación de Slonaker, en comparación con los ladrillos de barro cocido en Canadá.

**Tabla VI. Resultados de la investigación de Slonaker**

<b>Método de prueba</b>	<b>Ladrillo de ceniza</b>	<b>Ladrillo de barro cocido</b>
% de absorción, 24 horas	0.56	2.7 – 4.5
% Absorción, 5 horas de cocido (17.0 máx.).	8.03	3.7 – 5.3
Coeficiente de saturación (0.78 máx.).	0.71	0.56 – 0.90
Porosidad aparente, %	17.1	8.6 – 12.5
Densidad de masa, Kg/m <sup>3</sup> )	2130	2250 – 2360
% contracción	7.4	5.5 – 8.2
Resistencia a compresión no-cocido Mpa.	13.1	3.0 – 5.9
Resistencia a compresión cocido Mpa (21 min.).	54.6	36.7 – 50.3
Succión g H <sub>2</sub> O/30 in <sup>2</sup> /min.	37	6 – 36
Grado ASTM	CS	CS

**Grupo de investigación de la Universidad de Calgary**

La investigación de este grupo consta de dos partes:

- a. Producción de un material cerámico de ceniza canadiense y la determinación de las propiedades ingenieriles.
- b. Estudios físico-químicos posteriores de los materiales producidos.

Para los estudios se obtuvieron cenizas de cuatro lugares de Canadá:

- 1. Sundance (Alberta) – clasificada (partículas mayores serán removidas).
- 2. Foretsburg (Alberta) – clasificada.
- 3. Boundary Dam (Saskatchewan).

#### 4. Lingan (Nueva Escocia)

Las cenizas de Sundance y Foretsburg fueron sacadas de carbones sub-bituminosos, la De Boundary Dam de carbón de lignito y la de Lingan de carbón bituminoso. La investigación no se llevo a cabo con ladrillos de las dimensiones tradicionales, en su lugar se evaluaron pequeños cilindros de 39 mm de diámetro y 50 mm de largo. La presión óptima de moldura será de 15 Mpa y la temperatura de cocido está en el rango de 900°C a 1000°C por tres horas.

Los especímenes frescos se almacenaron en una habitación climatizada por 18 a 20 horas y luego fueron cocidos. El cocido se llevo a cabo en un horno de laboratorio. La temperatura se aumentará gradualmente de 20 a 200°C por tres horas y luego se dejarán enfriando dentro del horno. Después se moverán a un cuarto ventilado.

Las conclusiones que se obtuvieron en esta investigación son:

1. Una adecuada combinación de ceniza canadiense y un activador tiene el potencial para ser usado como una mezcla pura en la fabricación de unidades de mampostería para aplicaciones de ingeniería.
2. El ladrillo fabricado con ceniza de Sundance (ceniza sub-bituminosa de Alberta) tiene los mejores resultados en cuanto a resistencia. El ladrillo fabricado con cenizas de Foretsburg y Boundary Dam también tienen buena resistencia.
3. De los líquidos usados para la mezcla: a) Silicato de sodio en solución acuosa y b) simple agua, los dos lograron dar buenos resultados de resistencia.
4. La temperatura de cocido que parece mas adecuada para lograr los niveles de resistencia deseados está entre 900°C y 1000°C por 3 horas.

5. La absorción de agua con la ceniza de Sundance es alto. Sin embargo el coeficiente de saturación de el mismo material es bastante bajo.
6. La relación resistencia / peso del ladrillo fabricado con ceniza de Sundance es mucho mayor que la de un ladrillo de barro cocido, y es significativamente mayor que los ladrillos fabricados usando cenizas del este de los Estados Unidos.
7. Las pruebas de resistencia al congelamiento, del ladrillo fabricado con ceniza Sundance y agua como activador muestra un rendimiento superior al de otras mezclas. No se observó deterioro, a pesar de las condiciones severas de las pruebas, en realidad, la resistencia de esta mezcla incrementó significativamente durante el período de prueba.

Esta investigación sirve como indicativo de que es factible la producción a gran escala de ladrillos usando ceniza. Las resistencias serán altas, el material parece durable al congelamiento y el costo de producción puede ser bajo.

### **Day y Bergman**

Estos científicos lograron determinar que el ladrillo hecho por la Universidad de Calgary con 100% de ceniza volante, aunque resiste el congelamiento, este tiene alta porosidad, es propenso a agrietamiento y es debido a la falta de un material estabilizador. Además muestra alto grado de contracción en el cocido, carencia de una resistencia inicial que permita un normal apilamiento del ladrillo en los hornos. Por lo que el objetivo de estos investigadores se centró en encontrar el tipo y cantidad de material estabilizador que puede ser utilizado para producir ladrillos con aceptables propiedades estructurales y prácticas.

Se usaron tres tipos de ceniza de las estaciones de energía de Sundance (Alberta):

1. **Ceniza “Clasificada”**, 16% de partículas mayores de 45  $\mu\text{m}$ .
2. **Ceniza “No-clasificada”**, 26% de partículas mayores de 45  $\mu\text{m}$ .
3. **Ceniza** donde el 52% de partículas son mayores de 45  $\mu\text{m}$ .

Además se usaron tres tipos de material estabilizador:

1. Vidrio obtenido de depósitos de botellas, pulverizado y que pase a través de un tamiz de 85  $\mu\text{m}$ .
2. Arena de sílice-cuarzo normada por ASTM que pase a través de un tamiz de 85  $\mu\text{m}$ .
3. Arcilla de Alberta usada para fabricar ladrillos de barro cocido. Ésta se secará por 24 horas, se pulverizará y se pasará por un tamiz de 85 $\mu\text{m}$ .

Las proporciones de material estabilizador / ceniza serán de 0:100, 10:90, 20:80 y 40:60 por unidad de masa. El mezclado se hará basado con la experiencia del grupo de la U de C. Los componentes de la mezcla se combinarán con 6% de agua por masa. Se colocará la mezcla en 5 capas iguales y se presionará con una máquina de pruebas a una tensión máxima de 12 Mpa que se mezclará por tres minutos. El ladrillo fresco se almacenará en el laboratorio por tres días para su secado y luego se cocerá a una temperatura de 900°C por tres horas.

En los estudios hechos se observó que la arena de sílice produce resultados inaceptables; presentando el ladrillo una cantidad sustancial de grietas en la superficie, con la consiguiente baja resistencia a flexión y a

compresión. El estudio se concentró en el uso de vidrio y arcilla como material estabilizador y esto fue lo que se observó:

1. **Densidad de masa:** Los ladrillos de ceniza pura muestran un 70% aproximadamente de la densidad de un ladrillo de barro cocido. Los que usan vidrio y arcilla como estabilizador también demuestran baja densidad –cerca del 20% por debajo. Aunque se encontraron dificultades en la demoldura de ladrillos fabricados con estabilizador de arcilla.
2. **Resistencia a la compresión:** Los ladrillos hecho con ceniza pura y los hechos con estabilizador de vidrio exceden la resistencia a compresión requerida por las normas ASTM C62-85 para CS (22 Mpa).
3. **Resistencia a la flexión:** La ceniza de desecho muestra, bajo módulo de ruptura (10 kPa), mientras los ladrillos de ceniza “clasificada” tienen módulo de ruptura de 23 kPa. Los hechos con estabilizador de vidrio tienen módulo cercano a 18-19 kPa.
4. **Absorción:** En lo que se refiere a la absorción, sólo los ladrillos hechos con estabilizador de vidrio se encuentran dentro de los límites propuestos por la norma ASTM C62-85.
5. **Índice inicial de absorción:** Ninguno de los ladrillos hecho satisfizo los requerimientos de la Norma ASTM C62-85. Los bajos valores obtenidos por unidades que contenían vidrio como estabilizador, son todavía cerca de tres veces mayores que los requerimientos.

Day y Bergman llegaron a concluir que de todos los materiales estabilizadores que se estudiaron, el vidrio fue el que mejores resultados

presentó. Aunque se siguieron observando algunas deficiencias que tienen que eliminarse, como lo son:

- El índice inicial de absorción de los ladrillos de ceniza es alto.
- Problemas de pre y post cocido tienen que ser corregidos.
- La propensión al agrietamiento tiene que ser eliminada.
- La resistencia inicial es un problema de fabricación y necesita ser incrementado.

En la tabla VII se muestra la comparación de los resultados obtenidos por los diferentes grupos de investigación, en las diferentes pruebas que se hicieron:

**Tabla VII. Resultados de los diferentes estudios realizados**

<b>Método de prueba</b>	<b>Ladrillo de barro cocido</b>	<b>Slonaker Tabla 6.</b>	<b>Grupo de U de C.</b>	<b>Day y Bergman.</b>
% Absorción , 24 horas	2.7 – 4.5	5.6	14 - 18	13.3 – 20.8
% Absorción (5 horas de cocido) 17% max.	3.7 – 5.3	8.0	20.20	19 – 26
Coeficiente de saturación (0.78 max.)	0.56 – 0.90	0.71	0.72	0.7 – 0.8
Resistencia a compresión MPa	43.5	54.6	42.8	31 – 46
Densidad de masa Kg/m <sup>3</sup>	2.31	2.13	1.55	1.55 – 1.81

### 1.4.3 Proporción de ceniza y vidrio

Se hicieron investigaciones con diferentes proporciones de ceniza y vidrio, con el fin de encontrar la más adecuada, éstas fueron: 90:10, 80:20 y 60:40 por masa. Sobre la base de los resultados obtenidos se determinó que la proporción que da mejores resultados es la 60:40. La principal razón para la introducción de un material estabilizador dentro de unos ladrillos de ceniza pura es el reducir el alto índice de absorción que tiene la unidad de ceniza. Para obtener la proporción más favorable, se basó en la relación del porcentaje de 24 horas de absorción sobre el porcentaje de absorción después de 5 horas de cocido.

Los resultados se muestran en la tabla VIII:

**Tabla VIII. Resultado de pruebas de absorción inicial**

<b>Proporción ceniza / vidrio</b>	<b>24 horas de absorción (%)</b>	<b>5 horas de cocido absorción (%)</b>	<b>Coefficiente de saturación.</b>
90:10	16.3 – 21.5	20.0 – 23.6	0.82 – 0.91
80:20	15.5 – 20.0	16.8 – 22.7	0.87 – 0.88
70:30	15.8 – 19.3	17.6 – 20.4	0.82 – 0.95
60:40	10.2 – 17.4	13.8 – 19.4	0.74 – 0.89

Esto confirma la tendencia mostrada por Day y Bergman; una proporción 60:40 ceniza / vidrio es la que da mejores resultados y es la que se seleccionará para la serie principal de pruebas.

## **1.4.4 Proceso de elaboración del ladrillo**

### **1.4.4.1 Preparación y mezclado de materiales**

El primer paso en la preparación de la mezcla es la combinación de cantidades correctas de ceniza y vidrio triturado. Con una carga frontal, la mezcla es transportada al interior de una tolva. Ésta actúa como un facilitador del almacenamiento así como asegura una dosis uniforme dentro de la mezcla hecha.

Cuando el proceso de mezclado es completado, el material es amasado y enrollado. Durante esta parte del proceso se añade agua o vapor a la mezcla. Con la cantidad adecuada de agua la mezcla de ceniza / vidrio obtiene la consistencia deseada. Cuando se usa vapor, también se calienta el material que mejora sus propiedades plásticas.

En esta etapa se pueden añadir aditivos químicos, con el objetivo de incrementar la resistencia de la unidad 60:40 fresca. Aunque esto significa un aumento en la resistencia inicial del ladrillo cuando se añade NaOH o Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, los efectos negativos son superiores a los positivos. Esto llega a ser evidente al agregar óxidos de sodio dentro del mezclado con agua, observándose un marcado incremento de eflorescencia que ocurre en la cara del ladrillo cuando se somete a las pruebas de coeficiente de saturación.

Esta eflorescencia se puede minimizar a través de la adición de sales de potasio tales como K<sub>2</sub> S<sub>2</sub> O<sub>5</sub> y KSCN que son usados para reducir las temperaturas de conversión. La eflorescencia se puede reducir cubriendo la cara del ladrillo con metil-siliconato de sodio.

#### **1.4.4.2 Contenido de humedad y presión de moldura**

Investigaciones previas muestran que un contenido de humedad de 6% y una presión de moldura de 12 Mpa es suficiente para fabricar ladrillos 100% ceniza. Sin embargo, la resistencia inicial es inaceptable para la producción en masa usando maquinaria de fabricación de secado a presión. En la industria de ladrillos de barro cocido se usan altos porcentajes de agua en sus mezclas (9 – 10%) y su presión varía con la calidad de la arcilla usada.

Para la producción de ladrillos de ceniza / vidrio 60:40, el contenido de agua de mezcla será del 10% y la presión de moldura de 15 Mpa.

El moldeado se lleva a cabo de la siguiente manera: La mezcla es transportada dentro de una tolva rectangular, donde es movida hacia abajo a través de un agujero en el fondo. Una cantidad medida del material es colocada en una moldura fija de una faja transportadora. La mezcla es presionada dentro del molde por un bloque de presión. La parte superior del molde se llena mecánicamente. La faja transportadora luego gira el molde al revés y el ladrillo está hecho.

#### **1.4.4.3 Secado**

Antes del proceso de secado puede iniciarse removiendo del 20 al 30% de agua en los ladrillos frescos para evitar grietas prematuras por la sensibilidad de la mezcla ceniza / vidrio. El secado toma parte en las cámaras de secado.

El cocido después de tres días de secado a la temperatura ambiente se muestra también como muy satisfactorio. En la industria se podrá tener un rango de 40 a 60°C, lo que permitirá una aceleración en el proceso de secado.

#### **1.4.4.4 Colocado**

Debido a la alta sensibilidad del material del ladrillo después del secado inicial, es necesario manejar las unidades muy suavemente durante el transporte y colocado. El equipo de colocado automáticamente vacía las carros-estanterías que serán regresados a las máquinas de moldeado. Los ladrillos serán removidos por una banda transportadora a un dispositivo giratorio. Este dispositivo gira los ladrillos y los coloca en el límite y luego en los hornos.

#### **1.4.4.5 Cocido**

La fusión de la ceniza ocurrirá a 900°C después de 3 horas de cocido. El estabilizador de vidrio se fundirá a 800-900°C. El tiempo del cocido puede incrementarse en un período de 3 a 12 horas, pero ese incremento no tendrá impacto en la medida de la porosidad del ladrillo. El tiempo ideal queda definido en 3 horas a 900°C.

Justamente como hay un régimen de secado ideal para algunos tipos de ladrillo, hay también una curva ideal de cocido para cada unidad –una gráfica que indica la secuencia de temperatura ideal para producir el material óptimo en un tiempo mínimo. Esta curva de cocido solo se puede obtener experimentalmente en planta.

## **1.4.5 Características del ladrillo ceniza / vidrio**

### **1.4.5.1 Resistencia a compresión**

La resistencia a compresión es considerada como un indicador del rendimiento potencial bajo ciertas condiciones ambientales. La resistencia media obtenida es de 36 Mpa; el coeficiente de variación de los resultados es de 11%.

### **1.4.5.2 Densidad de masa**

El peso de un ladrillo ceniza / vidrio 60:40 es de 1.5 Kg. Este es significativamente más ligero en comparación a la unidad de barro cocido que pesa cerca de 2 Kg.

### **1.4.5.3 Porosidad**

La porosidad del ladrillo disminuye en comparación a la del ladrillo de barro cocido, disminuyendo por consiguiente el índice inicial de absorción y la absorción de agua.

## **1.5 Ensayos de laboratorio**

Luego de terminado el proceso de fabricación de los ladrillos, éstos serán sometidos a algunos ensayos de laboratorio para determinar sus propiedades físicas y mecánicas. Los ensayos se realizarán de la misma forma como se realizan con los ladrillos de barro cocido, tomando en cuenta siempre las especificaciones de las normas COGUANOR y ASTM. A continuación se presenta una breve descripción de cómo se realizan estos ensayos.

### **1.5.1 Determinación de las dimensiones y forma (COGUANOR 41 024 h1)**

El objetivo de esta norma es definir los métodos para determinar las dimensiones reales y los requisitos de forma para los ladrillos. Se hace un esbozo completo de cómo determinar longitudes, espesores y anchos de un ladrillo, tomando en cuenta que debe ser muy exacto.

### **1.5.2 Determinación del peso del ladrillo**

Este, en sí, no es considerado como un ensayo. Consiste en hacer las mediciones de peso de los ladrillos, en una balanza con una capacidad no menor de 2,000 gramos y sensible a 1/2 gramo.

### **1.5.3 Resistencia a la compresión (COGUANOR 41 024 h2)**

Para efectuar este ensayo, las muestras deben ser 5 mitades de ladrillo con sus caras extremas aproximadamente planas y paralelas. En las muestras, el largo es aproximadamente igual al ancho con una tolerancia de (+, -) 25mm y

la altura es el espesor del ladrillo. Las caras de carga se deberán nivelar con azufre o yeso. Luego las 5 muestras serán llevadas a la máquina de ensayos.

**Procedimiento:**

1. Las muestras se deberán ensayar en las caras anchas. Esto significa que la carga se debe aplicar en la dirección del espesor del ladrillo.
2. La máquina de ensayo debe estar conforme los requerimientos de las normas.
3. Para lograr una mejor distribución de la carga, la muestra debe nivelarse con azufre.
4. Rapidez del ensayo. Para ensayar el espécimen, se aplica una carga hasta la mitad de la máxima carga esperada a una velocidad conveniente, luego la carga se aplica a una velocidad uniforme entre 1 y 2 minutos.

Luego, la resistencia a compresión se puede calcular usando la siguiente expresión:

$$R = F/A$$

Donde:

F = carga máxima aplicada

A = área bruta de la muestra ensayada

R = resistencia a la compresión

#### 1.5.4 Resistencia a la flexión (Módulo de ruptura)

Este ensayo no está considerado por las normas COGUANOR, pero se hace como prueba y como control de calidad de los ladrillos. Se deben ensayar 5 ladrillos secos de tamaño natural. El procedimiento es el siguiente:

1. La muestra se debe apoyar en su cara más ancha sobre una luz de 7 pulgadas y la carga se debe aplicar a media luz. La carga central se aplica a través de una barra de acero redondeado. La dirección debe ser perpendicular a la superficie cargada de la muestra.
2. Los soportes deben ser libres de rotación longitudinal y transversalmente en la muestra, y debe ser ajustado para que no ejerzan fuerza en esas direcciones.
3. La razón de carga no debe exceder de 2,000 lbs/min, si la velocidad de la máquina durante la aplicación de la carga no es mayor que 0.05"/min.

El módulo de ruptura se determina por la siguiente expresión:

$$MR = 3WI/2bd^2$$

Donde:

W = máxima carga indicada por la máquina

L = distancia entre los soportes (7")

B = ancho total promedio de cara a cara de la muestra (")

D = espesor total promedio de la muestra (")

### 1.5.5 Ensayo de absorción de agua (COGUANOR 41 024 h4)

Para este ensayo, las muestras serán medios ladrillos de acuerdo a los requisitos para muestras a compresión. Se ensayarán cinco muestras. El procedimiento es como sigue:

1. **Secado.** Cada una de las muestras deberán ser secadas hasta que tengan peso constante, el secado se llevará a cabo en un horno ventilado a 110° a 115°. Al estar frías, cada muestra se pesará de nuevo.
2. **Saturación.** La muestra ya fría se sumergirá sin inmersión parcial preliminar en agua limpia (suave, destilada o agua de lluvia) a 15.5° a 30°, durante 24 horas. Luego la muestra se removerá y el agua que este sobre la superficie, se deberá limpiar y se pesará la muestra. Es importante considerar que el pesado de las muestras se debe realizar en los 5 minutos después de remover las muestras del depósito.

Otro aspecto importante a considerar, es que se debe contar con una balanza con una capacidad no menor de 2,000 grs. para medir el peso de las muestras.

La expresión de la absorción es la que sigue:

$$\text{Absorción (\%)} = (m_h - m_s / m_s) \times 100$$

Donde:

$M_s$  = masa de la muestra completamente seca

$M_h$  = masa de la muestra completamente húmeda

### **1.5.6 Determinación de la densidad de masa**

Este ensayo consiste en obtener el peso volumétrico del ladrillo. Este se calcula de los datos obtenidos del peso del ladrillo y las dimensiones del ladrillo (ancho, largo y espesor). Para obtener la densidad de masa se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad de masa (gr/cm}^3\text{)} = k \times \text{Peso/Volumen}$$

Donde:

K = constante = 1, cuando el peso está en gramos y el volumen en cm<sup>3</sup>

P = peso del espécimen

V = volumen del espécimen



## **2. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **2.1 Obtención de los materiales**

#### **2.1.1 Cemento puzolánico**

##### **2.1.1.1 Selección del banco de puzolana**

En la investigación que se ha estado desarrollando en Canadá, el material utilizado han sido las cenizas obtenidas de centrales de energía que funcionan con carbón mineral. En Guatemala ya existe una central de energía donde se puede encontrar este tipo de material, pero existe también una gran cantidad de materiales de origen volcánico que tienen su composición y algunas propiedades similares a las cenizas de Canadá. Para el efecto de este estudio, se utilizó puzolana que mezclado con cal es un material que puede ser usado como cementante.

Se eligió el banco ubicado en el Km 83, carretera al Atlántico en El Rancho, El Progreso. Se tomó como punto de partida el hecho que ese ha sido uno de los bancos más estudiados y el material que de este banco se ha obtenido es uno de los que mejores resultados presenta en la elaboración de cementos puzolánicos.

### **2.1.1.2 Ubicación del banco**

El banco se encuentra en el departamento de El Progreso, situado en el Km. 83 al Nor-este de la Ciudad de Guatemala, carretera al Atlántico CA-9. Se ubica en las coordenadas: Longitud Oeste 90° 02'      Latitud Norte 14° 54'

### **2.1.1.3 Extracción del material**

Luego de ser seleccionado el banco, se procedió a la extracción del material necesario para la elaboración de los ladrillos, fueron colocados en recipientes y en total fueron 600 lbs. Se utilizaron herramientas tradicionales como palas y piochas. El material no se encontraba cementado, por lo que la extracción se hizo fácilmente. La extracción se llevo a cabo en época seca en el mes de febrero. El material se encontraba con un alto contenido de humedad, por lo que fue necesario ponerlo a secar.

### **2.1.1.4 Secado**

El proceso de secado fue al aire libre bajo los rayos del sol, durante dos días. Luego, la muestra se deposito en recipientes bajo techo, libres de humedad.

### **2.1.1.5 Mezclado y molido**

Para el proceso de molido se utilizó un molino de bolas, en la sección de Prefabricados del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Es un molino de 28" de largo, 21" de diámetro y capacidad interior de 2.8 pies cúbicos.

En este proceso se hizo también la mezcla de la puzolana con la cal, se usó una proporción de 80:20 (puzolana:cal), que según la tesis del Ing. Carlos Efraín Zeceña Girón, daba mejores resultados y resultaba ser la más económica. Se emplearon 50 libras de la mezcla (40 lbs de puzolana y 10 libras de cal) y 250 libras de bolas de Aricita, el 60% de 1 1/8" y el 33% de 7/8\*1 1/4" de diámetro, cuyo material es bastante resistente al desgaste.

Al encontrarse el material bien seco, no se presentó el problema de que el material se adhiriera a las paredes laterales del molino. El tiempo de molienda fue de 1 hora, por cada una de ellas. Luego el material ya mezclado y molido se almacenó en recipientes y se dejó en un sitio donde estuviera libre de la humedad ambiental y espera de su utilización posterior.

#### **2.1.1.6 Caracterización del cemento puzolánico**

Luego de tener ya mezclado y molido el cemento puzolánico, se procedió a hacer algunos ensayos para caracterizarlo, de acuerdo a la norma ASTM C-91. Estos ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de la sección de aglomerantes en el Centro de Investigaciones de Ingeniería. Se evaluaron los siguientes aspectos:

- \* **Resistencia a compresión:** Se siguieron las recomendaciones establecidas en ASTM C-109. Esta norma se refiere a la elaboración y ensayo de cubos de compresión y resistencia mínimas para morteros. El mortero que se utilizó para este ensayo fue de una proporción de 60% cemento puzolánico y 40% vidrio pulverizado. La relación agua cemento:  $a/c = 0.64$ . Los resultados fueron:

**Resistencia a compresión a 7 días:** 4.7 kg/cm<sup>2</sup>

**Resistencia a compresión a 28 días:** 26.2 kg/cm<sup>2</sup>

- \* **Consistencia normal:** De acuerdo a las recomendaciones establecidas en la norma ASTM C-187, su objeto es establecer el método para la determinación de la cantidad de agua necesaria para obtener una pasta de consistencia normal. El resultado del ensayo fue:

**Cemento puzolánico:** 650 gramos

**Agua:** 230 ml

**Consistencia normal:** 35%

- \* **Fraguado de Vicat:** Norma ASTM C-191. Método que cubre la determinación del tiempo de fraguado del cemento por medio de las agujas de Vicat. Los tiempos de fraguado (inicial y final) se determinarán haciendo una pasta de consistencia normal. El fraguado inicial se obtiene cuando la aguja penetra 25 mm, y el fraguado final cuando la aguja no penetra la pasta endurecida. El resultado en este estudio fue:

**Fraguado inicial:** más de 7 horas.

**Fraguado final:** no se tomó lectura.

- \* **Fineza tamiz No. 325:** Norma ASTM C-430. Este método consiste en la separación mecánica del tamaño de partículas de un material, mediante la utilización del tamiz 325 (45 micrones). El resultado fue el siguiente:

**Material inicial:** 1 gramo.

**Material retenido tamiz 325:** 0.32 gramos

**Pasa:** 68%

- \* **Peso específico:** Norma ASTM C-188. Este método cubre la determinación de la densidad de cemento, su particular utilidad es la designación y control de una mezcla de concreto. La densidad de un cemento es definida como la masa por unidad de volumen de los sólidos y se expresa en gramos por centímetros cúbicos.

**Peso específico:** 2.20 gr/cc.

- \* **Retención de agua:** Norma ASTM C-110. La determinación de la retención de agua en materiales puzolánicos tiene el objeto de determinar la cantidad de agua que puedan retener estos cuando se usan como cemento de albañilería.

**Retención de agua:** 73%

## **2.1.2 Obtención del vidrio**

### **2.1.2.1 Recolección de botellas**

Para obtener el vidrio pulverizado, que es otro de los materiales necesarios para la elaboración de estos ladrillos, primero tuvo que hacerse una recolección de botellas u otros recipientes de vidrio en tiendas, casas particulares, etc., de distintos colores y tamaños. Estas botellas y recipientes se limpiaron para eliminar contaminantes que tuvieran en su interior y quitar las etiquetas de papel.

### **2.1.2.2 Quebrado de botellas y recipientes**

Esto se hizo con el propósito de dejar el vidrio en un grano lo más fino posible para que el proceso de molienda fuera más efectivo y se obtuviera la fineza que se requería. El proceso consistió en colocar las botellas enteras en el suelo y con una masa metálica y otros objetos pesados se fueron golpeando hasta llegar a la granulometría más fina. Este material obtenido se almaceno en recipientes en espera del proceso de molienda.

### **2.1.2.3 Molido**

Para el proceso de molido también se utilizó el mismo molino usado para la molienda del cemento puzolánico. Se introdujo la misma cantidad de bolas de Aricita y 50 lbs del vidrio triturado. El tiempo de molienda varió y fue de 1 ½ horas, ya que el grano a moler era bastante grande y se quería alcanzar una fineza donde más del 80% pasara el tamiz 325. El material obtenido se almacenó en recipientes y se dejó en un lugar libre de la humedad ambiental.

#### 2.1.2.4 Caracterización del vidrio

El vidrio ya molido fue sometido a una serie de ensayos que sirvieron para conocer sus propiedades.

**Composición química:** se tomo una muestra del vidrio pulverizado y se envió al laboratorio de Cementos Progreso, para que se determinare la composición química del material. El resultado se muestra en la tabla IX:

**Tabla IX. Composición química del vidrio pulverizado**

Componente	Porcentaje %
SiO <sub>2</sub>	60.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00
CaO	10.84
MgO	0.17
K <sub>2</sub> O	1.44
Na <sub>2</sub> O	10.91
SO <sub>3</sub>	0.33
PF (950°C)	0.54
TOTAL	86.55

- \* **Prueba de residuo. Tamiz 200:** en esta prueba se analiza la cantidad de material que queda retenido en el tamiz 200. Se hizo de acuerdo a los procedimientos que indica la norma ASTM C-110. El resultado fue el siguiente:

**Tamiz 30** = 0.40

**Tamiz 200** = 60.40  
60.80 %

- \* **Peso específico:** el peso específico del vidrio se obtuvo de la misma manera que el de la puzolana, de acuerdo a los procedimientos que indican la norma ASTM C-188.

**Peso específico:** 2.42 gr/cc.

## **2.2 Elaboración del ladrillo**

### **2.2.1 Equipo de trabajo**

- Moldes: se hicieron moldes metálicos, con las dimensiones de 6.5 x 11 x 23 cm. Se hicieron 2 moldes con capacidad para dos ladrillos cada uno.
- Mezcladora: para la mezcla del material se utilizó una mezcladora de madera, ya que el proceso de mezclado se llevó a cabo con cucharas de albañilería.
- Invernadero: se hizo para el secado de los ladrillos fabricados. Se hizo con madera un cajón de 2m x 2m y luego se forró con plástico transparente para permitir que pasen los rayos del sol. Ver figura 1.
- Termómetro ambiental: se utilizó para medir la temperatura a la que se encontraba el invernadero a diferentes horas del día, durante el período de secado de los ladrillos.
- Balanza: se utilizó para hacer las mediciones de la cantidad de material para hacer la mezcla. Las dosificaciones se hicieron por unidades de masa.

### **2.2.2 Proceso de fabricación**

Con ambos materiales molidos y ya caracterizados, el proceso de elaboración de los ladrillos se efectuó de la siguiente manera:

#### **2.2.2.1 Mezclado de materiales**

Las proporciones de material fueron: 60:40, 80:20 y 90:10. Estas dosificaciones fueron tomadas en peso de cemento puzolánico y vidrio

pulverizado respectivamente. Con la balanza se peso la cantidad de cemento puzolanico y de vidrio que se necesitaría para cada bachada. El material pesado se introdujo dentro de la mezcladora y con cucharas de albañil se fue revolviendo hasta quedar ambos materiales bien mezclados. Luego se le agregó la cantidad de agua necesaria para formar una pasta con una consistencia normal y esta se fue amasando para dejar listo el material para la conformación de los ladrillos.

#### **2.2.2.2 Moldeo**

Se hicieron dos tipos de ladrillos, tubulares y tayuyos. Los tubulares se conformaron con el molde entero. Se introdujo el material amasado dentro del molde acomodándolo en los espacios donde se necesitaba. Se fue haciendo por capas y cada capa se fue compactando con piezas de madera para que el material ocupara todos los espacios en el molde. Al llenar el molde el material sobrante se rasó con la cuchara y se fue alisando la superficie. Los ladrillos tayuyos se hicieron con la parte del molde que servía como división entre los ladrillos tubulares y de igual forma se fueron llenando y compactando hasta que quedaron conformados los ladrillos. En la figura 2, se observa como se hizo el moldeo de los ladrillos.

#### **2.2.2.3 Desencofrado**

Este proceso consistió en dejar uno de los moldes ya llenos de material, un tiempo prudencial, -durante la preparación del material para llenar el otro molde-, para que este perdiera un poco de humedad y el desencofrado fuera más fácil. Luego el molde era retirado lentamente, colocando sobre tablas los ladrillos terminados y listos para el secado de 3 días. Ver figura 3.

#### 2.2.2.4 Secado

El secado se hizo dentro del invernadero. Conforme salían los ladrillos se fueron dejando durante tres días para seguir con lo que indica la literatura investigada. La temperatura del secado se debió encontrar en el rango entre 40 – 100°C. Dentro del invernadero, durante el día se llegó a alcanzar los 50°C, tomando en cuenta que se hizo en época seca, y fue en el mes de marzo cuando más calienta el sol. A continuación en la tabla X, se muestra la temperatura que alcanzo el invernadero durante los tres días de secado. En la figura 4 y 5 se observan los ladrillos el primer y tercer día de secado respectivamente.

**Tabla X. Temperaturas de secado**

Hora	Temperatura °C		
	Día 1	Día 2	Día 3
7:00 a.m.	33°C	34°C	36°C
8:00 a.m.	37°C	36°C	37.5°C
9:00 a.m.	40°C	39°C	39.5°C
10:00 a.m.	42°C	42°C	42°C
11:00 a.m.	44°C	45°C	45°C
12:00 a.m.	47°C	48.5°C	50°C
13:00 p.m.	45°C	46°C	48.5°C
14:00 p.m.	44°C	43°C	45.5°C
15:00 p.m.	41°C	41°C	42°C
16:00 p.m.	40°C	39°C	40°C
17:00 p.m.	38°C	37°C	38°C

### **2.2.2.5 Cocido**

Después de esto los ladrillos fueron trasladados para el cocido en horno. Este se llevó a cabo en los hornos de Cerámicas J&R que sirven para el cocido de piezas de cerámica, azulejos, etc. El proceso de cocido, desde que se inició hasta el final, fue de 6 horas y la temperatura máxima de cocido fue de 1,000°C. Luego del cocido, los ladrillos fueron trasladados hacia el Centro de Investigaciones de Ingeniería, para realizar los ensayos necesarios para este estudio. En la figura 6 se observan los ladrillos dentro del horno.

## **2.3 Ensayos de laboratorio**

Luego del procedimiento anteriormente descrito para hacer los ladrillos, éstos se sometieron a una serie de ensayos para determinar sus propiedades mecánicas y físicas.

### **2.3.1 Determinación de las dimensiones**

Para determinar las dimensiones de los ladrillos a ensayar, se usó como instrumento una cinta métrica. El procedimiento para medir es descrito por la norma COGUANOR 41 O24 H1 y consiste en sacar cuatro medidas del largo, ancho y espesor del ladrillo. Las medidas se aproximaron hasta los milímetros. Luego con las cuatro medidas se saca un promedio que será la medida a utilizar en los cálculos de las propiedades de los ladrillos.

### **2.3.2 Determinación del peso del ladrillo**

Para determinar el peso del ladrillo se utilizó una balanza con capacidad para 1.1 kg y un contrapeso de 1 kg. para ladrillos de mayor peso. Se fueron pesando cada uno de los ladrillos, tomando en cuenta que ese dato sirve para determinar la densidad de masa.

### **2.3.3 Ensayo de resistencia a compresión**

Antes de realizar el ensayo fue necesario nivelar las caras de los ladrillos donde se aplicaría la carga, ya que éstos presentaban muchas combaduras que podían afectar los resultados de los ensayos. Para la nivelación se hizo un molde metálico, similar al que se usa en el Centro de Investigaciones de Ingeniería para nivelar blocks, pero con las medidas de los ladrillos que se

evaluaron. La nivelación consistió en poner a derretir azufre en polvo en un horno a 300°C, éste al hacerse líquido había que colocarlo en el molde y antes de que se endureciera se debía colocar una de las caras del ladrillo, hasta que se endureciera el azufre, luego se retiró con algunos golpes al molde al que se le hecho previamente aceite para evitar que se quedara pegado y luego se hace lo mismo para la otra cara del ladrillo. Luego de nivelar la cantidad de ladrillos necesarios para los ensayos se procedió a aplicarles la carga de compresión a la primera grieta. Ver figura 7 y 8.

#### **2.3.4 Ensayo de resistencia a la flexión**

Se tomó una cantidad determinada de ladrillos y a cada uno se le midió la mitad del largo. Se colocaron los apoyos con una luz de 7 pulgadas y sobre ellos los ladrillos, cuidando que quedarán centrados sobre los apoyos para que la carga uniforme fuera aplicada justo en el centro del ladrillo. La carga uniforme se aplicó colocando una barra de hierro liso sobre el ladrillo y al bajar la máquina universal, se aplicó la carga hasta la ruptura del ladrillo en dos partes. Ver figura 9 y 10.

#### **2.3.5 Ensayo de absorción**

Se tomaron las mitades de los ladrillos ensayados a flexión. Se colocaron en el horno del Centro de Investigaciones, a una temperatura entre 100°C y 115°C y se dejaron durante 24 horas. Cumplidas las 24 horas se sacaron del horno y fueron pesadas, para obtener el peso seco. Luego fueron sumergidas en una de las pilas que se encuentran en el Centro de Investigaciones, cuidando que el agua cubriera por completo la pieza de ladrillo. Se dejó durante 24 horas en el agua. Luego de las 24 horas se retiró cada mitad del agua y se fue pesando obteniendo el peso húmedo de la pieza. Con estos dos pesos se puede hacer el cálculo de la absorción del ladrillo.

### 3. RESULTADOS

Siguiendo las especificaciones de las normas COGUANOR, se hicieron los ensayos y pruebas en los ladrillos de cemento puzolánico / vidrio. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

#### 3.1 Dimensiones y pesos

**Tabla XI. Dimensiones y peso de ladrillos tubulares. Proporción 60:40**

Proporción 60:40 (cemento puzolánico:vidrio)						
No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Variación Long, mm	Variación Ancho, mm.	Peso (gramos)
1	23.0	10.9	6.5	0	1	1,521
2	22.8	11.0	6.5	2	0	1,502
3	23.0	11.1	6.2	0	1	1,498
4	22.9	11.2	6.5	1	2	1,552
5	22.8	11.2	6.4	2	2	1,484
6	22.6	11.2	6.4	4	2	1,535
7	23.0	11.0	6.6	0	0	1,538
8	22.9	11.2	6.4	1	2	1,514
9	22.8	11.1	6.6	2	1	1,540
10	22.8	11.0	6.5	2	0	1,500
11	22.8	11.2	6.6	2	2	1,529
12	23.0	11.0	6.6	0	0	1,505

**Tabla XII. Dimensiones y peso de ladrillos tubulares. Proporción 80:20**

Proporción 80:20 (cemento puzolánico:vidrio)						
No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Variación Long, mm	Variación Ancho, mm.	Peso (gramos)
1	22.9	11.0	6.6	1	0	1,390
2	23.0	11.2	6.4	0	2	1,511
3	22.9	11.1	6.5	1	1	1,470
4	23.2	11.3	6.4	2	3	1,481
5	23.3	11.3	6.4	3	3	1,704
6	23.1	11.2	6.3	1	2	1,472
7	23.0	11.1	6.5	0	1	1,455
8	22.9	11.2	6.5	1	2	1,501
9	23.0	11.0	6.4	0	0	1,510
10	22.9	11.3	6.5	1	3	1,510
11	22.8	11.3	6.5	2	3	1,545
12	22.9	11.0	6.6	1	0	1,524

**Tabla XIII. Dimensiones y peso de ladrillos tubulares. Proporción 90:10**

Proporción 90:10 (cemento puzolánico:vidrio)						
No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Variación Long, mm	Variación Ancho, mm.	Peso (gramos)
1	23.0	11.2	6.5	0	2	1,483
2	23.2	11.1	6.4	2	1	1,470
3	22.8	11.2	6.4	2	2	1,467
4	23.0	11.0	6.4	0	0	1,480
5	23.1	11.3	6.3	1	3	1,500
6	22.9	11.0	6.6	1	0	1,399
7	22.9	11.0	6.5	1	0	1,436
8	22.9	11.0	6.5	1	0	1,408
9	22.9	11.0	6.6	1	0	1,526
10	23.0	11.2	6.4	0	2	1,440
11	23.2	11.1	6.2	2	1	1,529
12	22.9	11.0	6.6	1	0	1,458

**Tabla XIV. Dimensiones y peso de ladrillos tayuyos. Proporción 60:40**

<b>Proporción 60:40 (cemento puzolánico:vidrio)</b>						
<b>No.</b>	<b>Longitud (cm)</b>	<b>Ancho (cm)</b>	<b>Grosor (cm)</b>	<b>Variación Long, mm</b>	<b>Variación Ancho, mm.</b>	<b>Peso (gramos)</b>
1	23.4	11.3	6.5	4	3	2,582
2	23.0	11.3	6.6	0	3	2,500
3	23.2	11.2	6.7	2	2	2,558
4	22.9	11.3	6.6	1	3	2,584
5	23.0	11.1	6.5	0	1	2,518
6	23.1	11.5	6.6	1	5	2,609
7	23.1	11.2	6.6	1	2	2,466
8	23.3	11.6	6.7	3	6	2,720
9	23.4	11.3	6.7	4	3	2,614
10	23.3	11.4	6.7	3	4	2,683
11	23.1	11.2	6.6	1	2	2,460
12	23.5	11.4	6.5	5	4	2,540
13	23.1	11.3	6.7	1	3	2,628
14	23.1	11.2	6.6	1	2	2,630
15	23.3	11.3	6.7	3	3	2,648
16	23.1	11.4	6.7	1	4	2,682
17	23.1	11.4	6.5	1	4	2,471

**Tabla XV. Dimensiones y peso de ladrillos tayuyos. Proporción 80:20**

Proporción 80:20 (cemento puzolánico:vidrio)						
No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Variación Long, mm	Variación Ancho, mm.	Peso (gramos)
1	23.1	11.5	6.8	1	5	2,565
2	23.6	11.4	6.7	6	4	2,792
3	23.2	11.2	6.6	2	2	2,490
4	23.1	11.3	6.6	1	3	2,497
5	23.2	11.2	6.6	2	2	2,566
6	23.1	11.2	6.7	1	2	2,553
7	22.9	11.5	7.0	1	5	2,583
8	23.3	11.3	6.7	3	3	2,683
9	23.1	11.3	6.7	1	3	2,675
10	23.4	11.5	6.8	4	5	2,710
11	23.0	11.2	6.9	0	2	2,655
12	23.3	11.2	6.8	3	2	2,644
13	23.1	11.4	6.6	1	4	2,625
14	23.0	11.3	6.6	0	3	2,599
15	23.1	11.2	6.8	1	2	2,520
16	23.1	11.5	6.6	1	5	2,615
17	23.2	11.3	6.8	2	3	2,600

**Tabla XVI. Dimensiones y peso de ladrillos tayuyos. Proporción 90:10**

<b>Proporción 90:10 (cemento puzolánico:vidrio)</b>						
<b>No.</b>	<b>Longitud (cm)</b>	<b>Ancho (cm)</b>	<b>Grosor (cm)</b>	<b>Variación Long, mm</b>	<b>Variación Ancho, mm.</b>	<b>Peso (gramos)</b>
1	23.1	11.3	6.6	1	3	2,535
2	23.2	11.2	6.5	2	2	2,615
3	23.5	11.3	6.5	5	3	2,551
4	23.2	11.3	6.5	2	3	2,509
5	23.1	11.5	6.7	1	5	2,729
6	23.1	11.2	6.6	1	2	2,645
7	23.6	11.6	6.4	6	6	2,587
8	23.1	11.4	6.8	1	4	2,655
9	23.2	11.3	6.8	2	3	2,622
10	23.2	11.4	6.5	2	4	2,714
11	23.3	11.5	6.5	3	5	2,659
12	23.1	11.3	6.6	1	3	2,658
13	23.0	11.3	6.5	0	3	2,734
14	23.2	11.4	6.4	2	4	2,765
15	23.2	11.1	6.7	2	1	2,665
16	23.0	11.3	6.6	0	3	2,665
17	23.2	11.1	6.6	2	1	2,562



### 3.2 Resistencia a compresión

**Tabla XVII. Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tubulares. Proporción 60:40**

No.	Carga (Kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo MPa.
1	7,700	22.9	11.2	256.48	30.02	2.95
2	5,900	23.0	11.1	255.30	23.11	2.27
3	8,600	22.8	11.0	250.80	34.29	3.36
4	9,100	22.6	11.2	253.12	35.95	3.53
5	3,650	22.9	11.2	256.48	14.23	1.40
6	3,650	22.8	11.1	253.08	14.42	1.42

**Tabla XVIII. Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tubulares. Proporción 80:20**

No.	Carga (Kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo MPa.
1	3,200	23.0	11.2	257.60	12.42	1.22
2	3,650	22.9	11.1	254.19	14.36	1.41
3	5,000	22.9	11.2	256.48	19.49	1.91
4	4,550	22.8	11.3	257.64	17.66	1.73
5	2,700	22.9	11.0	251.90	10.72	1.05
6	6,350	22.9	11.3	258.77	24.54	2.41

**Tabla XIX. Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tubulares. Proporción 90:10**

No.	Carga (Kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo MPa.
1	1,800	23.2	11.1	257.52	6.99	0.69
2	2,700	23.1	11.3	261.03	10.34	1.02
3	4,550	23.0	11.0	253.00	17.98	1.76
4	3,650	22.9	11.2	256.48	14.23	1.40
5	1,400	23.0	11.2	257.60	5.43	0.53
6	2,300	23.2	11.1	257.52	8.93	0.88

**Tabla XX. Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tayuyos. Proporción 60:40**

No.	Carga (Kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo MPa.
1	18,150	23.4	11.3	264.42	68.64	6.73
2	15,900	23.0	11.3	259.90	61.18	6.00
3	20,000	22.9	11.3	258.77	77.29	7.58
4	13,600	23.0	11.1	255.30	53.27	5.23
5	20,400	23.3	11.4	265.62	76.80	7.53
6	22,700	23.1	11.2	258.72	87.74	8.61
7	10,000	23.5	11.4	267.90	37.33	3.66
8	14,500	23.1	11.2	258.72	56.04	5.50

**Tabla XXI. Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tayuyos. Proporción 80:20**

No.	Carga (Kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo MPa.
1	11,350	23.1	11.5	265.65	42.73	4.19
2	13,600	23.1	11.3	261.03	52.10	5.11
3	13,600	23.1	11.2	258.72	52.57	5.16
4	18,150	23.1	11.3	261.03	69.53	6.82
5	15,900	23.3	11.3	263.29	60.39	5.92
6	18,600	23.0	11.2	257.60	72.20	7.08
7	11,350	23.2	11.3	262.16	43.29	4.25
8	13,600	23.3	11.2	260.96	52.12	5.11

**Tabla XXII. Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tayuyos. Proporción 90:10**

No.	Carga (Kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo MPa.
1	20,850	23.1	11.2	258.72	80.59	7.91
2	9,100	23.3	11.5	267.95	33.96	3.33
3	7,700	23.2	11.1	257.52	23.90	2.93
4	17,250	23.2	11.3	262.16	65.80	6.45
5	4,550	23.2	11.3	262.16	17.36	1.70
6	15,900	23.1	11.3	261.03	60.91	5.98
7	9,500	23.1	11.5	265.65	35.76	3.51
8	16,350	23.5	11.3	265.55	61.57	6.04

### 3.3 Resistencia a la flexión

**Tabla XXIII. Determinación de la resistencia a flexión. Ladrillos tubulares. Proporción 60:40**

No.	Carga (kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Luz (pulg)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Mpa.
1	35	23.0	11.0	6.6	7	1.95	0.19
2	65	23.2	11.1	6.4	7	3.81	0.37
3	60	22.8	11.2	6.6	7	3.28	0.32
4	35	22.8	11.0	6.5	7	2.01	0.20
5	35	23.0	10.9	6.5	7	2.03	0.20
6	25	22.8	11.2	6.4	7	1.45	0.14

**Tabla XXIV. Determinación de la resistencia a flexión. Ladrillos tubulares. Proporción 80:20**

No.	Carga (kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Luz (pulg)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Mpa.
1	20	23.0	11.1	6.5	7	1.14	0.11
2	20	23.1	11.2	6.3	7	1.20	0.12
3	15	23.3	11.3	6.4	7	0.86	0.09
4	25	22.9	11.0	6.6	7	1.39	0.14
5	20	23.0	11.0	6.4	7	1.18	0.12
6	25	23.2	11.3	6.4	7	1.44	0.14

**Tabla XXV. Determinación de la resistencia a flexión. Ladrillos tubulares. Proporción 90:10**

No.	Carga (kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Luz (pulg)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Mpa.
1	20	23.0	11.2	6.5	7	1.13	0.11
2	15	22.9	11.0	6.5	7	0.86	0.08
3	15	22.8	11.2	6.4	7	0.87	0.09
4	15	22.9	11.0	6.6	7	0.83	0.08
5	25	22.9	11.0	6.6	7	1.39	0.14
6	20	22.9	11.0	6.6	7	1.11	0.11

**Tabla XXVI. Determinación de la resistencia a flexión. Tayuyos.  
Proporción 60:40**

No.	Carga (kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Luz (pulg)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa).
1	120	23.1	11.5	6.6	7	6.38	0.63
2	200	23.4	11.3	6.7	7	10.52	1.03
3	235	23.1	11.4	6.5	7	13.01	1.28
4	195	23.3	11.3	6.7	7	10.25	1.01
5	140	23.1	11.3	6.7	7	7.36	0.72
6	175	23.1	11.4	6.7	7	9.12	0.89
7	170	23.3	11.6	6.7	7	8.71	0.85
8	200	23.1	11.2	6.6	7	10.93	1.07
9	125	23.2	11.2	6.7	7	6.63	0.65

**Tabla XXVII. Determinación de la resistencia a flexión. Tayuyos.  
Proporción 80:20**

No.	Carga (kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Luz (pulg)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa).
1	140	23.4	11.5	6.8	7	7.02	0.69
2	175	23.0	11.3	6.6	7	9.48	0.93
3	190	23.2	11.4	6.7	7	10.39	1.02
4	125	23.1	11.4	6.6	7	6.51	0.64
5	175	22.9	11.5	7.0	7	8.28	0.81
6	100	23.1	11.2	6.8	7	5.15	0.51
7	140	23.1	11.5	6.6	7	7.45	0.73
8	130	23.2	11.2	6.6	7	7.11	0.70
9	145	23.6	11.4	6.7	7	7.56	0.74

**Tabla XXVIII. Determinación de la resistencia a flexión. Tayuyos.  
Proporción 90:10**

No.	Carga (kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Luz (pulg)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa).
1	100	23.2	11.2	6.5	7	5.63	0.55
2	50	23.2	11.4	6.4	7	2.86	0.28
3	95	23.0	11.3	6.5	7	5.31	0.52
4	85	23.1	11.3	6.6	7	4.61	0.45
5	165	23.2	11.4	6.5	7	9.14	0.90
6	80	23.0	11.3	6.6	7	4.33	0.42
7	150	23.6	11.6	6.4	7	8.42	0.83
8	115	23.2	11.1	6.6	7	6.34	0.62
9	160	23.1	11.4	6.8	7	8.10	0.80

### 3.4 Absorción

**Tabla XXIX. Determinación de la absorción. Ladrillos tubulares.  
Proporción 60:40**

No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso seco (gramos)	Peso húmedo (gramos)	Absorción %
1	23.0	11.0	701	882	25.82
2	23.2	11.1	706	895	26.77
3	22.8	11.2	749	947	26.44
4	22.8	11.0	703	900	28.02
5	23.0	10.9	659	856	29.89
6	22.8	11.2	710	907	27.75

**Tabla XXX. Determinación de la absorción. Ladrillos tubulares.  
Proporción 80:20**

No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso seco (gramos)	Peso húmedo (gramos)	Absorción %
1	23	11.1	698.0	914	30.95
2	23.1	11.2	746.0	1,004	34.58
3	23.3	11.3	829.0	1,044	25.93
4	22.9	11.0	785.0	1,067	35.92
5	23	11.0	663.0	918	38.46
6	23.2	11.3	790.0	1,033	30.76

**Tabla XXXI. Determinación de la absorción. Ladrillos tubulares.  
Proporción 90:10**

No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso seco (gramos)	Peso húmedo (gramos)	Absorción %
1	23	11.2	798.0	1,056	32.33
2	22.9	11.0	746.0	985	32.03
3	22.8	11.2	705.0	942	33.62
4	22.9	11.0	680.0	925	36.03
5	22.9	11.0	783.0	1,075	37.29
6	22.9	11.0	774.0	1,066	37.73

**Tabla XXXII. Determinación de la absorción. Ladrillos tayuyos.  
Proporción 60:40**

No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso seco (gramos)	Peso húmedo (gramos)	Absorción %
1	23.4	11.3	553	696	25.86
2	23.1	11.4	854	1,067	24.94
3	23.3	11.3	1,066	1,318	23.64
4	23.1	11.3	1,155	1,421	23.03
5	23.1	11.5	1,379	1,707	23.79
6	23.1	11.4	1,135	1,403	23.61
7	23.3	11.6	1,165	1,431	22.83
8	23.1	11.2	1,235	1,513	22.51
9	23.2	11.2	960	1,193	24.27

**Tabla XXXIII. Determinación de la absorción. Ladrillos tayuyos.  
Proporción 80:20**

Proporción 80:20					
No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso seco (gramos)	Peso húmedo (gramos)	Absorción %
1	23.4	11.3	553	696	25.86
2	23.1	11.4	854	1,067	24.94
3	23.3	11.3	1,066	1,318	23.64
4	23.1	11.3	1,155	1,421	23.03
5	23.1	11.5	1,379	1,707	23.79
6	23.1	11.4	1,135	1,403	23.61
7	23.3	11.6	1,165	1,431	22.83
8	23.1	11.2	1,235	1,513	22.51
9	23.2	11.2	960	1,193	24.27

**Tabla XXXIV. Determinación de la absorción. Ladrillos tayuyos.  
Proporción 90:10**

Proporción 90:10					
No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso seco (gramos)	Peso húmedo (gramos)	Absorción %
1	23.4	11.3	553	696	25.86
2	23.1	11.4	854	1,067	24.94
3	23.3	11.3	1,066	1,318	23.64
4	23.1	11.3	1,155	1,421	23.03
5	23.1	11.5	1,379	1,707	23.79
6	23.1	11.4	1,135	1,403	23.61
7	23.3	11.6	1,165	1,431	22.83
8	23.1	11.2	1,235	1,513	22.51
9	23.2	11.2	960	1,193	24.27

### 3.5 Densidad de masa

**Tabla XXXV. Determinación de la densidad de masa. Ladrillos tubulares. Proporción 60:40**

No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Peso (gramos)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (gramos/cm <sup>3</sup> )
1	23.0	10.9	6.5	1,521	1629.55	0.93
2	22.8	11.0	6.5	1,502	1630.20	0.92
3	23.0	11.1	6.2	1,498	1582.86	0.95
4	22.9	11.2	6.5	1,552	1667.12	0.93
5	22.8	11.2	6.4	1,484	1634.30	0.91
6	22.6	11.2	6.4	1,535	1619.97	0.95
7	23.0	11.0	6.6	1,538	1669.80	0.92
8	22.9	11.2	6.4	1,514	1641.47	0.92
9	22.8	11.1	6.6	1,540	1670.33	0.92
10	22.8	11.0	6.5	1,500	1630.20	0.92
11	22.8	11.2	6.6	1,529	1685.38	0.91
12	23.0	11.0	6.6	1,505	1669.80	0.90

**Tabla XXXVI. Determinación de la densidad de masa. Ladrillos tubulares. Proporción 80:20**

No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Peso (gramos)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (gramos/cm <sup>3</sup> )
1	22.9	11.0	6.6	1,483	1662.54	0.89
2	23.0	11.2	6.4	1,470	1648.64	0.89
3	22.9	11.0	6.5	1,467	1637.35	0.90
4	23.2	11.3	6.4	1,480	1677.82	0.88
5	23.3	11.3	6.4	1,500	1685.06	0.89
6	23.1	11.2	6.3	1,399	1629.94	0.86
7	23.0	11.1	6.5	1,436	1659.45	0.87
8	22.9	11.2	6.5	1,408	1667.12	0.84
9	23.0	11.0	6.4	1,526	1619.20	0.94
10	22.9	11.3	6.5	1,440	1682.01	0.86
11	22.8	11.3	6.5	1,529	1674.66	0.91
12	22.9	11.0	6.6	1,458	1662.54	0.88

**Tabla XXXVII. Determinación de la densidad de masa. Ladrillos tubulares. Proporción 90:10**

No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Peso (gramos)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (gramos/cm <sup>3</sup> )
1	23.0	11.2	6.5	1,390	1674.40	0.83
2	23.2	11.1	6.4	1,511	1648.13	0.92
3	22.8	11.2	6.4	1,470	1634.30	0.90
4	23.0	11.0	6.4	1,481	1619.20	0.91
5	23.1	11.3	6.3	1,704	1644.49	1.04
6	22.9	11.0	6.6	1,472	1662.54	0.89
7	22.9	11.0	6.5	1,455	1637.35	0.89
8	22.9	11.0	6.5	1,501	1637.35	0.92
9	22.9	11.0	6.6	1,510	1662.54	0.91
10	23.0	11.2	6.4	1,510	1648.64	0.92
11	23.2	11.1	6.2	1,545	1596.62	0.97
12	22.9	11.0	6.6	1,524	1662.54	0.92

**Tabla XXXVIII. Determinación de densidad de masa. Ladrillos tayuyos. Proporción 60:40**

No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Peso (gramos)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (gramos/cm <sup>3</sup> )
1	23.4	11.3	6.5	2,582	1718.73	1.50
2	23.0	11.3	6.6	2,500	1715.34	1.46
3	23.2	11.2	6.7	2,558	1740.93	1.47
4	22.9	11.3	6.6	2,584	1707.88	1.51
5	23.0	11.1	6.5	2,518	1659.45	1.52
6	23.1	11.5	6.6	2,609	1753.29	1.49
7	23.1	11.2	6.6	2,466	1707.55	1.44
8	23.3	11.6	6.7	2,720	1810.88	1.50
9	23.4	11.3	6.7	2,614	1771.61	1.48
10	23.3	11.4	6.7	2,683	1779.65	1.51
11	23.1	11.2	6.6	2,460	1707.55	1.44
12	23.5	11.4	6.5	2,540	1741.35	1.46
13	23.1	11.3	6.7	2,628	1748.90	1.50
14	23.1	11.2	6.6	2,630	1707.55	1.54
15	23.3	11.3	6.7	2,648	1764.04	1.50
16	23.1	11.4	6.7	2,682	1764.38	1.52
17	23.1	11.4	6.5	2,471	1711.71	1.44

**Tabla XXXIX. Determinación de densidad de masa. Ladrillos tayuyos.  
Proporción 80.20**

No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Peso (gramos)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (gramos/cm <sup>3</sup> )
1	23.1	11.5	6.8	2,565	1806.42	1.42
2	23.6	11.4	6.7	2,792	1802.57	1.55
3	23.2	11.2	6.6	2,490	1714.94	1.45
4	23.1	11.3	6.6	2,497	1722.80	1.45
5	23.2	11.2	6.6	2,566	1714.94	1.50
6	23.1	11.2	6.7	2,553	1733.42	1.47
7	22.9	11.5	7.0	2,583	1843.45	1.40
8	23.3	11.3	6.7	2,683	1764.04	1.52
9	23.1	11.3	6.7	2,675	1748.90	1.53
10	23.4	11.5	6.8	2,710	1829.88	1.48
11	23.0	11.2	6.9	2,655	1777.44	1.49
12	23.3	11.2	6.8	2,644	1774.53	1.49
13	23.1	11.4	6.6	2,625	1738.04	1.51
14	23.0	11.3	6.6	2,599	1715.34	1.52
15	23.1	11.2	6.8	2,520	1759.30	1.43
16	23.1	11.5	6.6	2,615	1753.29	1.49
17	23.2	11.3	6.8	2,600	1782.69	1.46

**Tabla XL. Determinación de la densidad de masa. Ladrillos tayuyos.  
Proporción 90:10**

No.	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Peso (gramos)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (gramos/cm <sup>3</sup> )
1	23.1	11.3	6.6	2,535	1722.80	1.47
2	23.2	11.2	6.5	2,615	1688.96	1.55
3	23.5	11.3	6.5	2,551	1726.08	1.48
4	23.2	11.3	6.5	2,509	1704.04	1.47
5	23.1	11.5	6.7	2,729	1779.86	1.53
6	23.1	11.2	6.6	2,645	1707.55	1.55
7	23.6	11.6	6.4	2,587	1752.06	1.48
8	23.1	11.4	6.8	2,655	1790.71	1.48
9	23.2	11.3	6.8	2,622	1782.69	1.47
10	23.2	11.4	6.5	2,714	1719.12	1.58
11	23.3	11.5	6.5	2,659	1741.68	1.53
12	23.1	11.3	6.6	2,658	1722.80	1.54
13	23.0	11.3	6.5	2,734	1689.35	1.62
14	23.2	11.4	6.4	2,765	1692.67	1.63
15	23.2	11.1	6.7	2,665	1725.38	1.54
16	23.0	11.3	6.6	2,665	1715.34	1.55
17	23.2	11.1	6.6	2,562	1699.63	1.51

### 3.6 Resultados promedio

Tabla XLI. Tabla de resultados promedio

	Ladrillos tubulares proporciones			Ladrillos tayuyos proporciones		
	60:40	80:20	90:10	60:40	80:20	90:10
Resistencia a la compresión en Mpa	2.49	1.62	1.05	6.36	5.46	4.73
Absorción de agua en 24 horas en porcentaje máximo	27.45	32.77	34.84	23.83	24.75	26.92
Resistencia a la flexión en Mpa	0.24	0.12	0.10	0.90	0.75	0.60
Densidad de masa en gramos/cm <sup>3</sup>	0.92	0.88	0.92	1.49	1.48	1.53
Peso del ladrillo en gramos	1,518	1,466	1,506	2,582	2,610	2,639
Tolerancia en las dimensiones en mm., máximo	L: 2 A: 1 G: 1	L: 1 A: 2 G: 1	L: 1 A: 1 G: 1	L: 2 A: 4 G: 2	L: 2 A: 4 G: 3	L: 2 A: 4 G: 1

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Análisis estadístico

Para analizar el comportamiento de la información obtenido se utilizó la mediana, debido a que ésta no es afectada por valores extremos.

Los modelos matemáticos a utilizar son:

$$\Sigma f_i / 2$$

$$\Sigma (f_i + 1) / 2$$

Según su valor sea par o impar.

Para realizar este análisis se hizo la comparación de la mediana obtenida con el promedio de los resultados obtenidos de los ladrillos tayuyos y tubulares, con el fin de observar si existía alguna diferencia significativa entre estos valores.

Luego el promedio de los resultados se comparará con los valores requeridos por las especificaciones para ladrillos de barro cocido, y con los valores promedio obtenidos por el Ing. Miguel Ángel Juárez Sandoval en su trabajo de tesis titulado “Evaluación de las normas COGUANOR sobre ladrillos de barro cocido en relación a su aplicación local y propuesta de revisión de las mismas”. Esto con el fin de observar la diferencia entre las propiedades de los ladrillos de cemento puzolánico/vidrio con los ladrillos de barro cocido.

**Tabla XLII. Comparación entre mediana y promedio. Ladrillos tubulares**

	Proporción 60:40				Proporción 80:20				Proporción 90:10			
	Me	Prom	Variación		Me	Prom	Variación		Me	Prom	Variación	
			Abs	Rel (%)			Abs	Rel (%)			Abs	Rel (%)
<b>Comp (Mpa)</b>	2.27	2.49	0.22	8.84	1.41	1.62	0.21	12.96	0.88	1.05	0.17	16.19
<b>Absorción (%)</b>	26.77	27.45	0.68	2.48	30.95	32.77	1.82	5.55	33.62	34.84	1.22	3.50
<b>Flexión (Mpa)</b>	0.20	0.24	0.04	16.67	0.12	0.12	0.00	0.00	0.09	0.1	0.01	10.00
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	0.92	0.92	0.00	0.00	0.88	0.88	0.00	0.00	0.91	0.92	0.01	1.09

**Tabla XLIII. Comparación entre mediana y promedio. Ladrillos tuyos**

	Proporción 60:40				Proporción 80:20				Proporción 90:10			
	Me	Prom	Variación		Me	Prom	Variación		Me	Prom	Variación	
			Abs	Rel (%)			Abs	Rel (%)			Abs	Rel (%)
<b>Compresión (Mpa)</b>	6.00	6.36	0.36	5.66	5.11	5.46	0.21	12.96	3.51	4.73	0.17	16.19
<b>Absorción (%)</b>	23.64	23.83	0.19	0.80	24.62	24.75	0.13	0.52	26.97	26.92	0.05	0.19
<b>Flexión (Mpa)</b>	0.89	0.90	0.01	1.11	0.73	0.75	0.02	2.67	0.55	0.60	0.05	8.33
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.50	1.49	0.01	0.67	1.49	1.48	0.01	0.68	1.53	1.53	0.00	0.00

**Tabla XLIV. Comparación de los ladrillos cemento puzolánico / vidrio con las especificaciones para ladrillos tubulares de barro cocido**

	<b>LADRILLOS TUBULARES</b>				
	<b>Ladrillos cemento puzolánico/vidrio</b>			<b>Ladrillos de barro cocido</b>	
	<b>Prop. 60:40</b>	<b>Prop. 80:20</b>	<b>Prop. 90:10</b>	<b>Grado 2</b>	<b>Grado 3</b>
<b>Compresión (Mpa)</b>	2.49	1.62	1.05	8	4.5
<b>Absorción (%)</b>	27.45	32.77	34.84	14	18

**Tabla XLV. Comparación de los ladrillos cemento puzolánico / vidrio con las especificaciones para ladrillos tayuyos de barro cocido**

	<b>LADRILLOS TAYUYOS</b>					
	<b>Ladrillos cemento puzolánico/vidrio</b>			<b>Ladrillos de barro cocido</b>		
	<b>Prop. 60:40</b>	<b>Prop. 80:20</b>	<b>Prop. 90:10</b>	<b>Grado 1</b>	<b>Grado 2</b>	<b>Grado 3</b>
<b>Compresión (Mpa)</b>	6.36	5.46	4.73	12	8	4.5
<b>Absorción (%)</b>	23.83	24.75	26.92	14	16	20

**Tabla XLVI. Comparación con los resultados obtenidos del estudio del Ing. Juárez Sandoval en ladrillos de barro cocido. Proporción 60:40**

	<b>LADRILLOS TUBULARES</b>				<b>LADRILLOS TAYUYOS</b>			
	<b>Prop. 60:40</b>	<b>Barro cocido</b>	<b>Variación</b>		<b>Prop. 60:40</b>	<b>Barro cocido</b>	<b>Variación</b>	
			<b>Abs.</b>	<b>Rel.</b>			<b>Abs.</b>	<b>Rel.</b>
<b>Compresión (Mpa)</b>	2.49	15.71	<b>13.22</b>	<b>84.15</b>	6.36	6.03	<b>0.33</b>	<b>5.19</b>
<b>Absorción (%)</b>	32.77	21.84	<b>10.93</b>	<b>33.35</b>	24.75	69.83	<b>45.08</b>	<b>64.56</b>
<b>Flexión (Mpa)</b>	0.12	0.93	<b>0.81</b>	<b>87.10</b>	0.75	1.05	<b>0.30</b>	<b>28.57</b>
<b>Peso* (libras)</b>	3.35	4.80	<b>1.45</b>	<b>30.21</b>	5.69	7.00	<b>1.31</b>	<b>18.71</b>

**Tabla XLVII. Comparación con los resultados obtenidos del estudio del Ing. Juárez Sandoval en ladrillos de barro cocido Proporción 80.20**

	LADRILLOS TUBULARES				LADRILLOS TAYUYOS			
	Prop. 80:20	Barro Cocido	Variación		Prop. 80:20	Barro Cocido	Variación	
			Abs.	Rel.			Abs.	Rel.
<b>Compresión (Mpa)</b>	1.62	15.71	<b>14.09</b>	<b>89.69</b>	5.46	6.03	<b>0.57</b>	<b>9.45</b>
<b>Absorción (%)</b>	32.77	21.84	<b>10.93</b>	<b>33.35</b>	24.75	69.83	<b>45.08</b>	<b>64.56</b>
<b>Flexión (Mpa)</b>	0.12	0.93	<b>0.81</b>	<b>87.10</b>	0.75	1.05	<b>0.30</b>	<b>28.57</b>
<b>Peso* (libras)</b>	3.23	4.80	<b>1.57</b>	<b>32.71</b>	5.75	7.00	<b>1.25</b>	<b>17.86</b>

**Tabla XLVIII. Comparación con los resultados obtenidos del estudio del Ing. Juárez Sandoval en ladrillos de barro cocido Proporción 90:10**

	LADRILLOS TUBULARES				LADRILLOS TAYUYOS			
	Prop. 90:10	Barro Cocido	Variación		Prop. 90:10	Barro Cocido	Variación	
			Abs.	Rel.			Abs.	Rel.
<b>Compresión (Mpa)</b>	1.05	15.71	<b>14.66</b>	<b>93.31</b>	4.73	6.03	<b>1.30</b>	<b>21.56</b>
<b>Absorción (%)</b>	34.84	21.84	<b>13.00</b>	<b>37.31</b>	26.92	69.83	<b>42.91</b>	<b>61.45</b>
<b>Flexión (Mpa)</b>	0.10	0.93	<b>0.83</b>	<b>89.25</b>	0.60	1.05	<b>0.45</b>	<b>42.86</b>
<b>Peso * (libras)</b>	3.32	4.80	<b>1.48</b>	<b>30.83</b>	5.82	7.00	<b>1.18</b>	<b>16.85</b>

\* El promedio de los pesos obtenidos de los ladrillos cemento puzolánico/vidrio se transformarán a libras para efecto de la comparación con el peso de ladrillos de barro cocido.

## 4.2 Evaluación de resultados

### 4.2.1 Dimensiones

Los ladrillos fueron medidos como lo propone la norma COGUANOR NGO 41 024 h1. Cada espécimen presenta medidas principales: largo, ancho y grosor.

Analizando los resultados de las mediciones podemos decir que las medidas principales reales no muestran variaciones significativas. Las variaciones que presentan pueden deberse a la contracción del material durante el cocido o por un mal proceso de fabricación. En general, casi la totalidad de los especímenes medidos cumple con el requisito de tolerancia y en las medidas nominales que requiere la norma.

Tanto los ladrillos tubulares como los tayuyos, presentan poca variación en sus dimensiones. Estos resultados se observan de la tabla XI a la XVI.

### 4.2.2 Peso

En la tabla III podemos observar el peso en libras de las unidades de barro cocido, poniendo énfasis en las unidades de 6.5 x 11 x 23 cm. Los ladrillos tubulares de cemento puzolánico/vidrio en promedio pesaron:

**Proporción 60:40 = 3.35 libras.**

**Proporción 80:20 = 3.23 libras.**

**Proporción 90:10 = 3.32 libras.**

**Ladrillo de barro cocido = 4.80 libras**

Los ladrillos tayuyos de cemento puzolánico/vidrio en promedio pesaron:

**Proporción 60:40 = 5.69 libras.**

**Proporción 80:20 = 5.75 libras.      Ladrillo de barro cocido = 7.00 libras**

**Proporción 90:10 = 5.82 libras.**

Puede observarse que en las tres proporciones evaluadas, tanto los ladrillos tubulares y los tayuyos, presentan menos peso que los ladrillos de barro cocido.

Los ladrillos tubulares se presentan de un 30 a 33% más livianos que los de barro cocido, presentándose además la proporción 80:20 como la más liviana. Los ladrillos tayuyos se presentan con un porcentaje entre 17 y 19% más livianos y la proporción 60:40 fue la que presentó menor peso.

#### **4.2.3 Resistencia a compresión**

Esta es una de las características a la que se le presta más atención a la hora de trabajar con ladrillos. Observando en las tablas XVII a XIX los resultados de los ladrillos tubulares evaluados, los valores obtenidos se encuentran muy por debajo de lo que requieren las especificaciones y por lo tanto no se puede clasificar en ninguno de los grados que establecen las especificaciones. En las tablas XLV a XLVII, se observa que comparado con los resultados del estudio realizado por el Ing. Juárez Sandoval en ladrillos de barro cocido, estos valores están mucho más por debajo.

Tomando como base el grado 2 de ladrillos tubulares, observamos que los ladrillos de cemento puzolánico/vidrio con proporción 60:40 tienen un 69% de menos resistencia, la 80:20 un 80% y la 90:10 un 87% con respecto a las especificaciones. Si lo comparamos con el estudio del Ing. Juárez Sandoval la

diferencia es la siguiente: proporción 60:40 es casi 6.30 veces menos la resistencia obtenida por ladrillos de barro cocido, 80:20 casi 10 veces menos y 90:10 casi 15 veces. La proporción 60:40 fue la que presentó mayor resistencia a compresión.

Con los ladrillos tayuyos los resultados se muestran muy diferentes. Ver resultados en las tablas XX a XXII. El ladrillo tayuyo de proporción 60:40 muestra una resistencia promedio que lo ubica muy cerca del valor del grado 2 de las especificaciones, con un 21% por debajo del valor requerido por las especificaciones. Las proporciones 80:20 y 90:10 pueden ubicarse en el grado 3, excediendo en un 21% y 5% respectivamente el valor requerido por las especificaciones. En las tablas anteriormente mencionadas, se observa que sólo la proporción 60:40 excede en un 6% el valor promedio del estudio del Ing. Juárez para ladrillos de barro cocido, las otras dos se encuentran muy cerca pero por debajo del promedio, la 80:20 en un 10% y la 90:10 en un 22%. En síntesis, la proporción 60:40 tuvo mayor resistencia a compresión.

#### **4.2.4 Resistencia a la flexión**

Este es un ensayo que en la normas Americanas aún aparece sin fijarle requisitos. Aunque se considera este ensayo en pruebas y control de calidad que se realiza en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, por lo que puede considerársele como un ensayo opcional, dentro de una normalización referente a este material.

Los resultados obtenidos fueron variados como se observan en las tablas XXIII a XXV. Para los ladrillos tubulares en la proporción 60:40 se obtuvieron resultados en un rango entre 0.14 y 0.37 MPa, para la 80:20 entre 0.09 y 0.14 MPa y la 90:10 entre 0.08 y 0.14 MPa. El promedio fue de 0.24, 0.12 y 0.10 MPa respectivamente. En las tablas XLV a XLVII, se comparan con los

resultados del estudio hecho por el Ing. Juárez y muestran una resistencia menor en un porcentaje de 75% la 60:40, 87% la 80:20 y 89% la 90:10. Se observa que la proporción 60:40 dio los resultados más satisfactorios, mientras que la 80:20 y 90:10 tienen resultados bastante similares.

Con respecto a los ladrillos tayuyos como se observan en las tablas XXVI a XXVIII los resultados variaron entre 0.63 y 1.28 Mpa para la proporción 60:40, para la 80:20 entre 0.51 y 1.02 Mpa y para la 90:10 entre 0.28 y 0.90 Mpa. En promedio se obtuvo 0.90, 0.75 y 0.60 Mpa respectivamente. Haciendo la comparación en las tablas XLV a XLVII, se muestra que tiene una resistencia menor en un 15% la 60:40, 29% la 80:20 y 43% la 90:10, lo que indica que la proporción 60:40 da mejores resultados de resistencia a flexión. Como no se tiene contemplado ningún valor dentro de las especificaciones de la norma COGUANOR no se puede comparar ni ubicar en alguno de los grados de la clasificación de ladrillos de barro cocido.

#### **4.2.5 Absorción**

En las tablas XXIX a XXXI se observan los resultados individuales. Los valores promedio de la absorción para los ladrillos tubulares fueron 27.45% para la 60:40, 32.77% para la 80:20 y 34.84% para la 90:10. Comparando estos valores con los que se requieren en las especificaciones, se observa que no pueden ubicarse en ninguno de los grados de clasificación, ya que todos exceden los valores requeridos. En las tablas XLV a XLVII, haciendo la comparación, se observa que exceden el valor promedio de absorción del estudio del Ing. Juárez, en el porcentaje de 26% la proporción 60:40, 50% la 80:20 y 60% la 90:10.

En las tablas XXXII a XXXIV se observan los resultados individuales. En los tayuyos los valores promedio fueron: para la proporción 60:40 el valor de

absorción es 23.83%, para la 80:20 es 24.75% y para la 90:10 es 26.92%. Haciendo la comparación con los valores de las especificaciones podemos ubicar las tres proporciones de estos ladrillos en el grado 3, ya que la variación es muy poca y el porcentaje que exceden ese valor es: la 60:40 en 19%, la 80:20 en 24% y la 90:10 en 35%. Haciendo la comparación en las tablas XLV a XLVII, se observa que estos ladrillos absorben menos agua que los tayuyos de barro cocido, el porcentaje de diferencia es: proporción 60:40 de 66% menos absorción, 80:20 de 65% y la 90:10 de 62% menos absorción. Con estos resultados podemos observar que tanto en ladrillos tayuyos, como en tubulares, la proporción que absorbe menos agua es la 60:40.

#### **4.2.6 Densidad de masa**

Los resultados que se observan en las tablas XXXV a XXXVII de la densidad de masa en los ladrillos tubulares, varían de acuerdo a la proporción, en la proporción 60:40 en promedio se obtuvo una densidad de 0.92 gr/cm<sup>3</sup>, en la 80:20 en promedio 0.88 gr/cm<sup>3</sup> y en la 90:10 cerca de 0.92 gr/cm<sup>3</sup>. Lo que se observa con estos resultados, es que la proporción 80:20 tiene menor densidad y por lo tanto es más liviano.

En los tayuyos, ver tablas XXXVIII a XL, el comportamiento fue similar la proporción 60:40 obtuvo una densidad promedio de 1.49 gr/cm<sup>3</sup>, la 80:20 tuvo 1.48 gr/cm<sup>3</sup> y la 90:10 tuvo 1.53 gr/cm<sup>3</sup>. Lo que muestra nuevamente la proporción 80:20 como la de menor densidad, pero no es el más liviano ya que en promedio el peso de la proporción 60:40 fue menor que la de 80:20, lo que varía son los volúmenes.

Si se analiza individualmente, la mayoría de los ladrillos de proporción 80:20 y 90:10 tienen un peso mayor que la 60:40. La variación se encuentra en los volúmenes de los ladrillos, ya que en ambas clases de ladrillos la proporción 80:20 y 90:10 tuvieron más variación en sus dimensiones lo que aumenta el volumen, mientras la proporción 60:40 tuvo en general menos variación.

## CONCLUSIONES

1. En ambos tipos de ladrillos, la proporción de mezcla, en peso, con 60% cemento puzolánico y 40% de vidrio pulverizado, es la que muestra los resultados más satisfactorios, comparados con las otras dos proporciones evaluadas.
2. La resistencia a compresión y a flexión de los ladrillos tubulares de cemento puzolánico/vidrio, fue demasiado baja y no alcanzaron los valores mínimos requeridos por las normas COGUANOR para ladrillos de barro cocido.
3. Con respecto a la absorción, los ladrillos tubulares de cemento puzolánico/vidrio, mostraron que absorben mayor cantidad de agua que los límites permitidos por las normas, probablemente debido a grietas internas, producto de la mala compactación en el proceso de fabricación.
4. La resistencia a compresión y a flexión de los ladrillos tayuyos de cemento puzolánico/vidrio, dieron valores que sí permiten ubicarlos en alguno de los grados establecidos dentro de la clasificación de las normas COGUANOR, esto porque en el proceso de elaboración fueron mejor compactados.
5. Con respecto a la absorción de los ladrillos tayuyos de cemento puzolánico/vidrio, fue mucho menor que la de ladrillos tayuyos de barro cocido, lo que muestra que esta unidad de mampostería puede resultar beneficiosa en el aspecto estructural.

6. El proceso de fabricación que fue hecho a mano, la compactación que no se hizo a una presión continua, y que el proceso de fabricación no fuera continuo, son algunos de los factores que influyeron en los bajos valores de resistencia a compresión y de flexión en los ladrillos tubulares.
7. En el proceso de fabricación una de las ventajas se encuentra en el menor tiempo de secado y en la menor temperatura y tiempo de cocido del material, ya que representa un ahorro de energía que influye en el costo del ladrillo, esto comparado con los ladrillos de barro cocido.
8. Sobre la base de los resultados obtenidos podemos observar que el vidrio puede ser un excelente material que podría utilizarse en la elaboración de ladrillos, mejorando mucho las propiedades físicas, mecánicas y probablemente térmicas.
9. Ambientalmente, la elaboración de este tipo de ladrillo resulta positiva, porque se tiene otra alternativa para el reciclaje del vidrio y se obtiene un material que beneficiaría a la industria de la construcción.
10. La elaboración de este material es factible en gran parte del territorio nacional, aprovechando la naturaleza volcánica del suelo de Guatemala y la disponibilidad de varios bancos de puzolanas o cenizas volcánicas, además de la disponibilidad de ceniza volante de la planta generadora de energía eléctrica, ubicada en el departamento de Escuintla.
11. Los resultados de este estudio son diferentes a los obtenidos en la investigación desarrollada en Canadá, debido a que en este estudio se utilizó cemento puzolánico en sustitución de la ceniza volante que es el principal componente en la investigación desarrollada en Canadá.

## RECOMENDACIONES

1. Continuar con la investigación de este material, con el fin de mejorar la calidad del ladrillo, mejorar sus propiedades, optimizando y mecanizando el proceso de fabricación para presentarlo como una alternativa más para la industria de la construcción y para coadyuvar con la conservación del medio ambiente.
2. Como se sabe, ya existe una planta generadora de energía eléctrica en el departamento de Escuintla, por lo tanto deberá desarrollarse otro estudio para ladrillos, utilizando la ceniza volante que se obtiene en esa planta derivado de la combustión del carbón mineral, para poder comparar de mejor manera con la investigación que se desarrolló en Canadá.
3. Desarrollar otra investigación, sustituyendo el cemento puzolánico, con ceniza volcánica únicamente, con el objeto de determinar propiedades físicas y mecánicas y así poder efectuar comparaciones.
4. Sistematizar cada uno de los pasos del proceso de fabricación, de manera que éste sea continuo y eficiente y en el que se tenga control sobre las especificaciones de temperaturas y tiempos para realizar cada nivel.
5. Lograr que en este proceso continuo se haga todo mecánicamente y que el control de calidad sea supervisado por personal capacitado que garantice un buen funcionamiento del mecanismo.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Altán García, Héctor Hugo. Estudio de las cales fabricadas en el departamento de Guatemala. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1992. 69 Pág.
2. Dates Anleu, Oswaldo Antonio. Diagnóstico de la industria de la cal en Guatemala. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1991. 56 Pág.
3. Juárez Sandoval, Miguel Ángel. Evaluación de las normas COGUANOR sobre ladrillos de barro cocido en relación a su aplicación local y propuesta de revisión de las mismas. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1985. 52 Pág.
4. Molina Marroquín, Mario Estuardo. Cementos puzolánicos para Mampostería típica en Guatemala. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1989. 86 Pág.
5. Schumann, Mario A. Características del ladrillo tayuyo hecho en Guatemala. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1954. 58 Pág.
6. Urizar Lima, Carlos Alberto. Evaluación puzolánica de un banco de ceniza Volcánica del municipio de Tecpán. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1994. 43 Pág.
7. Zeceña Girón, Carlos Efraín. Caracterización físico-mecánica y química del cemento puzolánico. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1989. 81 Pág.
8. Mulligan, John A. **Handbook of brick masonry construction**. McGraw-Hill. New York, 1942.
9. Weeden, C. **Glass containers in the Environment**. The recycling and Disposal of Solid Waste. Nottingham, UK. Abril, 1974.

10. Czernin, Wolfgang. **Cement chemistry and physics for Civil Engineering**. Translation by C. Van Amerongen, 2da. Edición. Wiesbaden, Berlín. Bauverlag, 1980.

1. **Cemento puzolánico CP-40**  
<http://www.ecosur.org/spa/cemento/index.php> marzo 2003
2. **El reciclaje del vidrio**  
<http://www2.uji.es/cyes/internatura/grupos/gima.html> marzo 2003
3. **El vidrio** <http://www.duglass.com/producto/vidrio> abril 2003
4. **Historia del vidrio** <http://webs.sinectis.com.ar/mcagliani/hvidrio.htm>  
abril 2003
5. **Reciclado del vidrio**  
<http://www.anfevi.com/present/reciclado/reciclado.html> abril 2003
6. **La historia del vidrio** [http://www.bsnglasspack.com/html\\_es](http://www.bsnglasspack.com/html_es)  
mayo 2003
7. **Reciclado de vidrio** <http://www.basuraenguayana.s5.com> mayo 2003.

## APÉNDICE

**Figura 1. Invernadero**



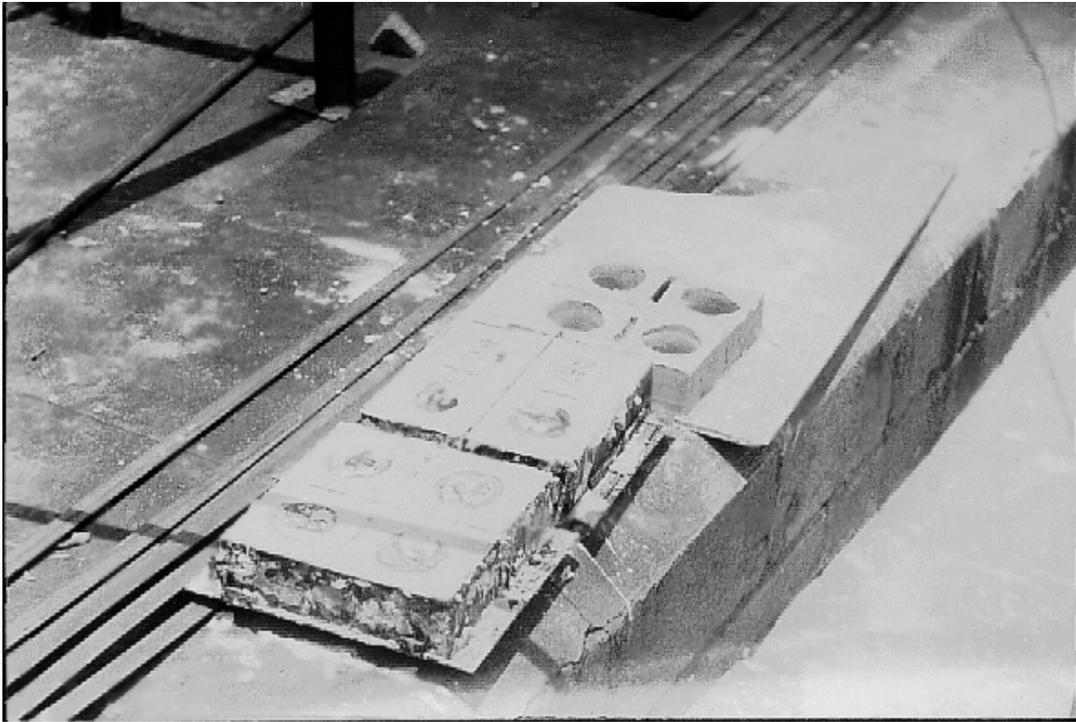
Este es el invernadero construido donde se realizó el secado de tres días.

**Figura 2. Moldeo de los ladrillos**



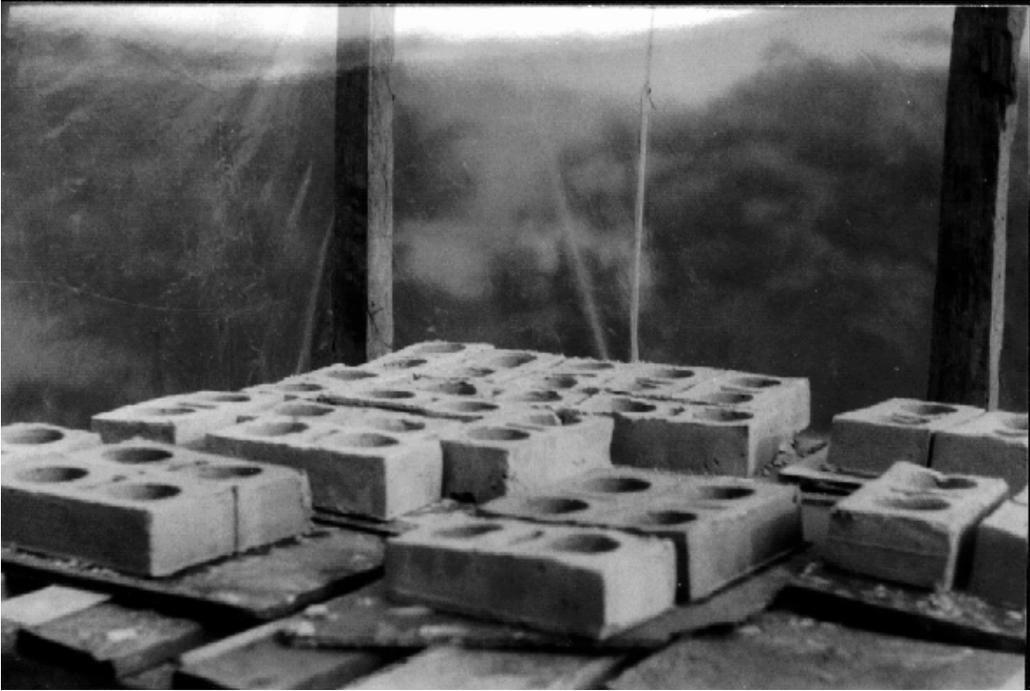
Proceso de mezclado y moldeo de los ladrillos.

**Figura 3. Ladrillos previo al desencofrado**



Moldes puestos al sol, para perder humedad y permitir un buen desencofrado.

**Figura 4. Secado. Unidades frescas. Día 1**



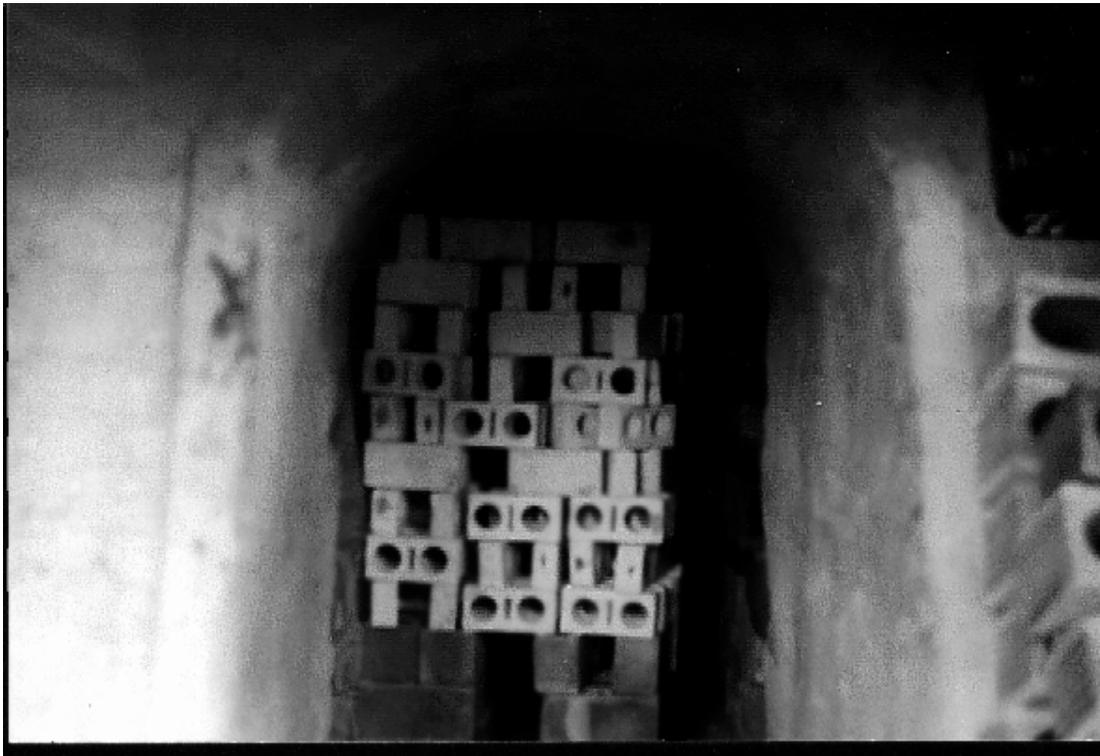
Ladrillos frescos, colocados en el invernadero en el primer día de secado.

**Figura 5. Secado. Día 3**



Ladrillos al tercer día de secado, se observa que ya pueden manipularse y apilarse.

**Figura 6. Ladrillos dentro del horno**



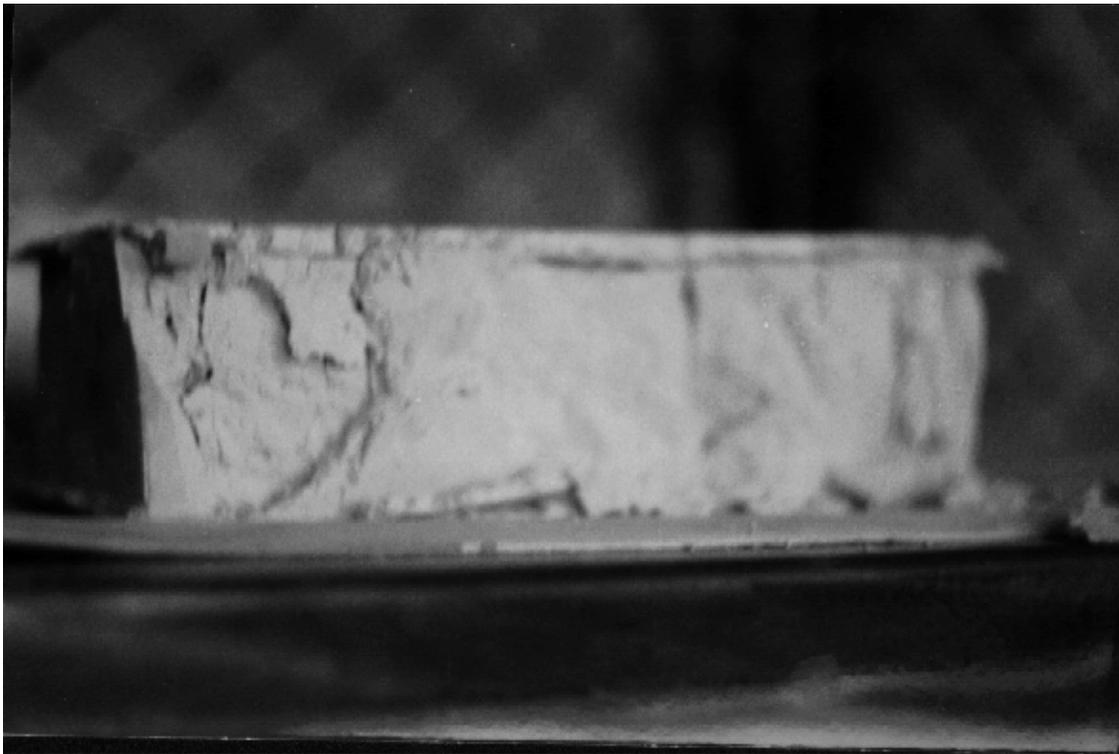
Ladrillos colocados dentro del horno previo a iniciar el proceso de cocido.

**Figura 7. Ensayo de compresión. Aplicación de la carga**



Momento en que se aplica la carga a compresión sobre el ladrillo, y se empieza a observar la falla del mismo.

**Figura 8. Ensayo de compresión. Tipo de falla**



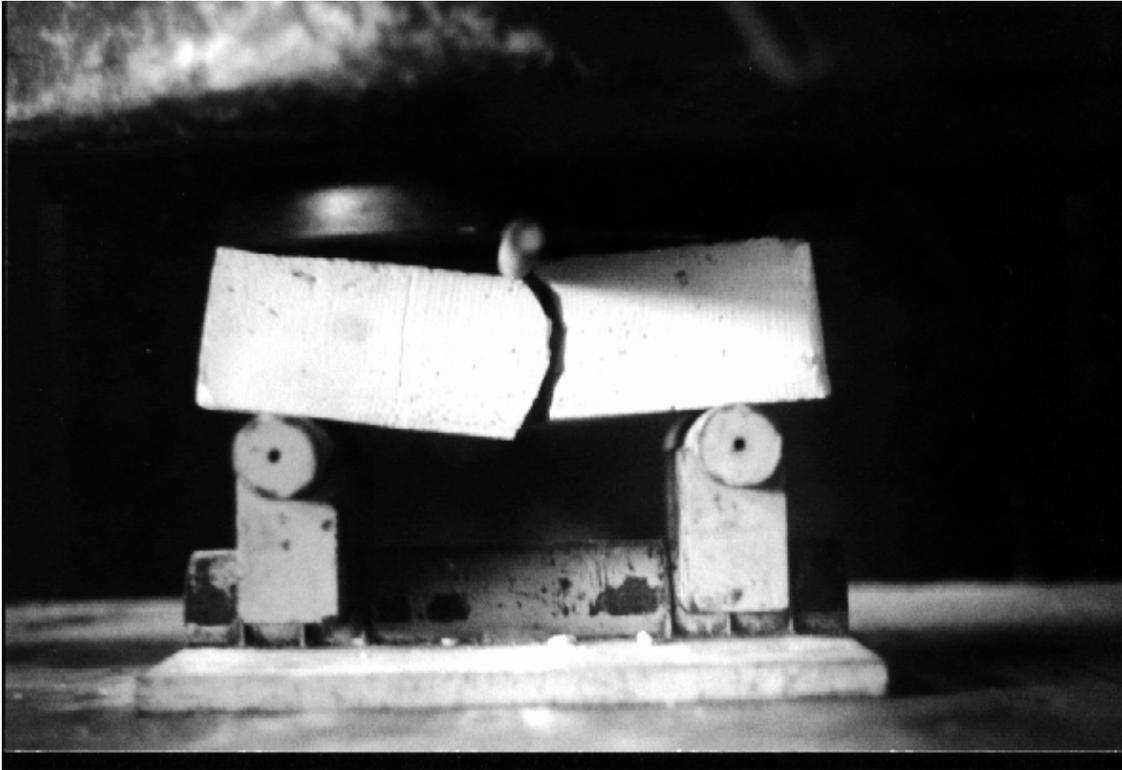
Falla del ladrillo a esfuerzo de compresión. Es falla a flexo-compresión.

**Figura 9. Ensayo de flexión. Aplicación de la carga**



Momento previo a que se aplique la carga a flexión sobre el ladrillo.

**Figura 10. Ensayo de flexión. Falla del ladrillo**



Momento en que falla el ladrillo.



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Invernadero .....	103
2	Moldeo de los ladrillos .....	104
3	Ladrillos previos al desencofrado .....	105
4	Secado. Unidades frescas. Día 1.....	106
5	Secado. Día 3.....	107
6	Ladrillos dentro del horno.....	108
7	Ensayo de compresión. Aplicación de la carga.....	109
8	Ensayo de compresión. Tipo de falla.....	110
9	Ensayo de flexión. Aplicación de la carga.....	111
10	Ensayo de flexión. Falla del ladrillo.....	112

### TABLAS

I	Clasificación, designación y usos de los ladrillos de barro cocido .....	3
II	Dimensiones nominales de los ladrillos de barro cocido .....	4
III	Peso de los ladrillos de barro cocido .....	5
IV	Requisitos físicos del ladrillo de barro cocido .....	6
V	Composición química de cuatro puzolanas .....	31
VI	Resultados de la investigación de Slonaker .....	40
VII	Resultados de los diferentes estudios realizados .....	45
VIII	Resultados de pruebas de absorción inicial .....	46
IX	Composición química del vidrio pulverizado .....	63

X	Temperaturas de secado .....	67
XI	Dimensiones y pesos de ladrillos tubulares. Proporción 60:40 .....	71
XII	Dimensiones y pesos de ladrillos tubulares. Proporción 80:20 .....	72
XIII	Dimensiones y pesos de ladrillos tubulares. Proporción 90:10 .....	72
XIV	Dimensiones y pesos de ladrillos tayuyos. Proporción 60:40 .....	73
XV	Dimensiones y pesos de ladrillos tayuyos. Proporción 80:20 .....	74
XVI	Dimensiones y pesos de ladrillos tayuyos. Proporción 90:10 .....	75
XVII	Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tubulares. Proporción 60:40 .....	77
XVIII	Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tubulares. Proporción 80:20 .....	77
XIX	Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tubulares. Proporción 90:10 .....	77
XX	Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tayuyos. Proporción 60:40 .....	78
XXI	Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tayuyos. Proporción 80:20 .....	78
XXII	Determinación de la resistencia a compresión. Ladrillos tayuyos. Proporción 90:10 .....	78
XXIII	Determinación de la resistencia a flexión. Ladrillos tubulares. Proporción 60:40 .....	79
XXIV	Determinación de la resistencia a flexión. Ladrillos tubulares. Proporción 80:20 .....	79
XXV	Determinación de la resistencia a flexión. Ladrillos tubulares. Proporción 90:10 .....	79
XXVI	Determinación de la resistencia a flexión. Ladrillos tayuyos. Proporción 60:40 .....	80
XXVII	Determinación de la resistencia a flexión. Ladrillos tayuyos. Proporción 80:20 .....	80

XXVIII	Determinación de la resistencia a flexión. Ladrillos tayuyos. Proporción 90:10 .....	80
XXIX	Determinación de la absorción. Ladrillos tubulares. Proporción 60:40 .....	81
XXX	Determinación de la absorción. Ladrillos tubulares. Proporción 80:20 .....	81
XXXI	Determinación de la absorción. Ladrillos tubulares Proporción 90:10 .....	81
XXXII	Determinación de la absorción. Ladrillos tayuyos. Proporción 60:40 .....	82
XXXIII	Determinación de la absorción. Ladrillos tayuyos. Proporción 80:20 .....	82
XXXIV	Determinación de la absorción. Ladrillos tayuyos. Proporción 90:10 .....	82
XXXV	Determinación de la densidad de masa. Ladrillos tubulares. Proporción 60:40 .....	83
XXXVI	Determinación de la densidad de masa. Ladrillos tubulares. Proporción 80:20 .....	83
XXXVII	Determinación de la densidad de masa. Ladrillos tubulares. Proporción 90:10 .....	84
XXXVIII	Determinación de la densidad de masa. Ladrillos tayuyos. Proporción 60:40 .....	84
XXXIX	Determinación de la densidad de masa. Ladrillos tayuyos. Proporción 80:20 .....	85
XL	Determinación de la densidad de masa. Ladrillos tubulares. Proporción 90:10 .....	85
XLI	Tabla de resultados promedio .....	86
XLII	Comparación entre mediana y promedio. Ladrillos tubulares .....	88
XLIII	Comparación entre mediana y promedio. Ladrillos tayuyos .....	88

XLIV	Comparación de los ladrillos cemento puzolánico/vidrio con las especificaciones para ladrillos tubulares de barro cocido .....	89
XLV	Comparación de los ladrillos cemento puzolánico/vidrio con las especificaciones para ladrillos tayuyos de barro cocido .....	89
XLVI	Comparación con los resultados obtenidos del estudio del Ing. Juárez Sandoval en ladrillos de barro cocido. Proporción 60:40 .....	89
XLVII	Comparación con los resultados obtenidos del estudio del Ing. Juárez Sandoval en ladrillos de barro cocido. Proporción 80:20 .....	90
XLVIII	Comparación con los resultados obtenidos del estudio del Ing. Juárez Sandoval en ladrillos de barro cocido. Proporción 60:40 .....	90

## GLOSARIO

<b>Absorción</b>	Es el porcentaje de humedad que absorben los ladrillos.
<b>Activador</b>	Líquido que se utiliza para hacer la mezcla de los materiales, puede ser agua o algún otro compuesto.
<b>Cal hidratada</b>	Polvo coagulante seco, que resulta de la hidratación de la cal viva, por medios mecánicos.
<b>Cemento puzolánico</b>	Es un aglomerante hidráulico, producido por la mezcla íntima de puzolana y cal, finamente molidos.
<b>Ceniza volante</b>	Cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito) fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.
<b>Day y Bergman</b>	Investigadores independientes que han hecho estudios con tres tipos de cenizas diferentes.

**Densidad de masa**

El peso volumétrico del ladrillos se expresa en  $\text{gr/cm}^3$  o  $\text{Kg/m}^3$ .

**Desechos sólidos**

Fracción de los materiales de desecho que se producen tras la fabricación, transformación o utilización de bienes de consumo.

**Impacto ambiental**

Todo efecto que produce en el medio ambiente la producción de cualquier material o la elaboración de cualquier tipo de proyecto.

**Invernadero**

Elemento construido con madera y forrado con plástico transparente, para permitir el paso de los rayos solares y en el cual se llevo a cabo el secado de los ladrillos.

**Ladrillos de barro cocido**

Unidad hecha básicamente de barro o arcilla, con o sin adición de otros materiales, moldeada en forma rectangular, con o sin agujeros, cavidades o perforaciones, y endurecida por medio de fuego hasta fusión incipiente.

<b>Ladrillos ceniza/vidrio</b>	Unidad hecha con una mezcla de ceniza volante y vidrio, finamente pulverizados.
<b>Ladrillos tayuyos o macizos</b>	Ladrillos hechos a mano y compactados en toda su masa sin ninguna perforación.
<b>Ladrillos tubulares</b>	Ladrillos hechos con perforaciones perpendiculares a las caras que soportan la carga.
<b>Material estabilizador inerte</b>	Material que se mezcla con la ceniza o cemento puzolánico y que mejora las propiedades de los ladrillos, pueden ser vidrio, arena de sílice-cuarzo o arcilla.
<b>Medio ambiente</b>	Conjunto de elementos abióticos (energía solar, suelo, agua y aire) y bióticos (organismos vivos) que integran la delgada capa de la tierra llamada biosfera, sustento y hogar de los seres vivos.
<b>Reciclaje</b>	Reutilización de materiales nocivos para el medio ambiente para crear otros tipos de materiales o el mismo material reciclado.

**Resistencia a compresión**

Un indicador de la durabilidad del ladrillo y del rendimiento potencial bajo ciertas condiciones ambientales.

**Resistencia a flexión**

Se considera como el módulo de ruptura del ladrillo ensayado sobre una luz simple, bajo una carga central.

**Slonaker**

Investigador miembro del grupo de investigación de la ceniza de la Universidad de Calgary, hizo un estudio aparte del grupo.

**Vidrio**

Sustancia dura, frágil, comúnmente transparente, que se forma por la combinación de sílice con potasa o sosa y pequeñas cantidades de otras bases.

## RESUMEN

Ante la necesidad de encontrar una manera más eficiente de utilizar dos materiales nocivos para el ambiente, tanto en Estados Unidos como en Canadá, pero con mayor énfasis en el segundo, se ha iniciado la investigación sobre la utilización de la ceniza obtenida de las centrales de generación de energía así como de desechos de vidrio pulverizados a una fineza determinada, para la fabricación de unidades de mampostería.

Las investigaciones han sido realizadas por diversos grupos y cada uno de ellos ha determinado de diversas formas, características que muestran que un ladrillo con una proporción adecuada de ceniza y vidrio, excede en un buen porcentaje las propiedades que presentan los ladrillos de barro cocido. Además, en esos estudios se han definido aspectos sobre el proceso de fabricación que deben llevar estos ladrillos ante una eventual industrialización del producto. Se ha determinado, a través de esos estudios, que el tiempo de secado y de cocido, así como la temperatura son menores que los que presentan un ladrillo de barro cocido, lo que permite un ahorro de energía y baja el costo de producción de los ladrillos.

En síntesis, según los resultados de las investigaciones, este material se presenta como una buena alternativa para ingenieros, arquitectos y constructores, ya que también tiene una gran ventaja estética, porque puede obtenerse ladrillos de diferentes colores y texturas. También presenta ventajas en el aspecto económico, estructural y ambiental. Este último, ya que se utilizan dos materiales que tienen impacto negativo en el ambiente para la

fabricación de un material que trae beneficios para una industria tan grande como la de la construcción.

En Guatemala es muy difícil encontrar este tipo de ceniza, pero debido a la naturaleza volcánica del suelo de nuestro país, puede ser un lugar propicio para la explotación y producción de este tipo de material. Aunado a la falta de empresas que se dediquen al reciclaje de vidrio, ésta se presenta como una manera efectiva de reciclar el vidrio y se obtendría un material beneficioso para la construcción, por sus propiedades estéticas, físicas mecánicas y por su economía.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Dar una nueva alternativa de uso a los desechos de vidrio, utilizándolos como elementos para la fabricación de unidades de mampostería.

### **Específicos**

1. Presentar una nueva opción de material para trabajos de mampostería, que represente una ventaja en el aspecto económico, estructural y estético para ingenieros, arquitectos y constructores.
2. Proporcionar información descriptiva de las propiedades físicas, mecánicas y químicas de este material.
3. Identificar las ventajas y formas de uso de este material.
4. Determinar la proporción adecuada de los componentes para la mezcla, para obtener el ladrillo que esté dentro de los límites que indican las normas y presenten las mejores propiedades.
5. Hacer una comparación de las propiedades físicas y mecánicas entre el nuevo material y los ladrillos de barro cocido.



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria de la construcción se ha visto beneficiada con la introducción de nuevos materiales que han venido a presentarse como una alternativa nueva para los ingenieros, arquitectos y todos aquellos que se dedican a la construcción, y que además presentan características que los hacen más rentables que los materiales tradicionales.

En este trabajo se presenta una de esas alternativas en el área de mampostería. Se trata de una unidad de ladrillo, hecha a base de cemento puzolánico -ceniza volcánica o puzolanas mezcladas con cal hidratada como aglomerante- y un material contaminante como los desechos de vidrio, previamente pulverizados y mezclado en una proporción adecuada para obtener las características y propiedades que son requeridas por las normas para la elaboración de ladrillos.

El proceso de elaboración de esta unidad, básicamente consiste en el mismo procedimiento que es utilizado para los ladrillos de barro cocido. En este estudio el procedimiento se hizo de forma manual y de una manera que se asemejara lo más posible al proceso mecanizado para ladrillos de barro cocido. Existieron algunas variaciones en aspectos como la temperatura y tiempo de secado y cocido. Luego, con la unidades listas se sometieron a una serie de ensayos de laboratorio, para determinar sus propiedades físicas y mecánicas.

Esta unidad se hizo con el propósito de aprovechar positivamente los desechos de vidrio, utilizándolos como un componente en la elaboración de un

nuevo ladrillo, además de que puede ser otra alternativa para el reciclaje del vidrio al industrializar el proceso para la elaboración de este ladrillo. Se espera que esta unidad represente una ventaja en el aspecto económico, estructural y estético, y que sus propiedades sean comparables con las propiedades de los ladrillos de barro cocido.

Es mi deseo en este trabajo de tesis, abrir las puertas para continuar con la investigación de este nuevo material, ya que se presenta como un material que podría revolucionar la industria de la construcción.

