



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COCCIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE
LADRILLOS DE CERÁMICA ROJA EN EL CANTÓN CHAMBO.”**

TESIS DE GRADO

PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

OLGA ISABEL TOCTAQUIZA NARANJO

RIOBAMBA – ECUADOR

2008

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dr. Edmundo Caluña		
DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS	_____	_____
Ing. Mario Villacrés		
DIRECTOR DE ESCUELA DE ING. QUÍMICA	_____	_____
Ing. Mario Villacrés		
DIRECTOR DE TESIS	_____	_____
Ing. Gonzalo Sánchez		
MIEMBRO DE TRIBUNAL	_____	_____
Ing. José Usiña		
MIEMBRO DE TRIBUNAL	_____	_____
Sr. Carlos Rodríguez		
DIRECTOR DEL CENTRO DE	_____	_____
DOCUMENTACIÓN		
NOTA TESIS ESCRITA:	_____	

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por sus bendiciones concedidas en cada instante de mi vida.

Expreso una gratitud particular a mis maestros que impartieron en mi sus vastos conocimientos.

De igual manera mi gratitud a la ONG: Eco Sur que me permitió trabajar e investigar para bien de la comunidad.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado, especialmente, a mis padres a mi esposo y mis hijas, quienes han logrado impactar un ímpetu de amor, paz y felicidad en nuestro hogar y a todas las personas que de una o de otra manera me han ayudado a culminar una trayectoria más en de mi vida.

Yo, OLGA ISABEL TOCTAQUIZA NARANJO, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis, y el patrimonio intelectual de la tesis de grado pertenece a la “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Al	Aluminio
Si	Silicio
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
σ	factor de radiación
Kg	Kilogramos
Cp	Capacidad calorífica
CaO	Óxido de Calcio
CED	Calorimetría de Exploración Diferencial
CO ₂	Dióxido de Carbono
Q	Calor
T _s	Temperatura del material a la salida
T _a	Temperatura ambiente
T	Temperatura:
M ₁	Masa seca del ladrillo

M_2	Masa húmeda del ladrillo
D	Densidad del ladrillo
V	Volumen del ladrillo
R	Resistencia de las muestras
MPa	Mega Pascal
PPC	Pérdida por calcinación
m^3	Metro cúbico
P_{SH}	Peso sólido húmedo
P_{SS}	Peso sólido seco
Q_H	Calor suministrado al horno
T_E	Temperatura de entrada del producto al horno
T_S	Temperatura de salida del producto del horno
Q_P	Calor perdido
E	Entrada
S	Salida

A	Acumulación
Q_E	Calor de entrada
Q_S	Calor de salida del producto
Q_E	Calor en la estructura del horno
P_{PQ}	Pérdidas por calor
Q_P	Calor de producto dentro del horno
Q_E	Calor de entrada
$m_{p.e}$	Masa del producto que entra
$C_{p.p.e}$	Calor específico del producto
T_e	Temperatura de entrada del producto
T_a	Temperatura ambiente
G	Gramo
L	Litro

INDICE DE TABLAS

INDICE DE GRAFICOS

INDICE DE ANEXOS

Pág.

INDICE GENERAL

Pág.

Contenido

CAPÍTULO I	18
1.1 INTRODUCCIÓN	18
1.2 OBJETIVOS	21
CAPÍTULO II	23
2 MARCO TEÓRICO	23
2.1 LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE ARCILLA COCIDA	23
2.1.1 RETROSPECTIVA HISTÓRICA.....	23
2.2 LA TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DEL LADRILLO DE ARCILLA COCIDA.	24
2.3 SELECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS.	24
2.3.1 ARCILLAS.	24
2.3.1.1 <i>Cualidades de las arcillas cerámicas.</i>	25
2.3.1.2 <i>Clasificación</i>	26
2.3.1.3 <i>Propiedades Físicas de las arcillas.</i>	26
2.3.1.4 <i>Propiedades químicas de las arcillas.</i>	27
2.3.1.5 <i>Acción del calor sobre las arcillas.</i>	27
2.3.1.6 <i>Coloración</i>	28
2.3.1.7 <i>Composición química de una arcilla para producir ladrillo</i>	28
2.3.1.8 <i>ADECUACION DE LA MATERIA PRIMA.</i>	29
2.3.2 LOS FUNDENTES.....	30
2.3.3 LOS DESGRASANTES.....	30
2.4 PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS LADRILLOS DE CERÁMICA ROJA	31
2.4.1 EXTRACCIÓN DE LA MATERIA PRIMA:.....	32
2.4.2 PREPARACIÓN DE LAS PASTAS:	33
2.4.3 AMASADO:	34
2.4.4 MOLDEADO.....	34
2.4.4.1 <i>Técnicas de Moldeo.</i>	34
2.4.5 DESECACIÓN:.....	35
FUENTE: GNNECO, MAURICIO(2000)	35
2.4.6 COCCIÓN.	36
2.5 EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS.	37
2.5.1 TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO:	38
2.5.2 EN CUANTO AL TIPO DE HORNO:.....	38
2.6 RESISTENCIA Y DURABILIDAD DE LOS MATERIALES PRODUCIDOS A PARTIR DE ARCILLA COCIDA.	39
2.6.1 REACCIÓN DE SINTERIZACIÓN	39
2.6.2 PROCESO DE CERAMIZACIÓN:	39
2.6.2.1 <i>Proceso de Sinterización</i>	41
2.6.3 CAMBIOS DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LAS	42
ARCILLAS DURANTE LA COCCIÓN.....	42

2.7 LA INFLUENCIA DE LA POROSIDAD EN LA DURABILIDAD DE LOS LADRILLOS COCIDOS.	46
2.8 PRODUCCIÓN ALTERNATIVA DE LADRILLOS CERÁMICOS.	48
2.8.1 LA EXTRACCIÓN DE LA MATERIA PRIMA:	49
2.9 LA TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN (TIPO DE HORNO Y EL TIPO DE COMBUSTIBLE).	49
2.10 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS DE LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS COCIDOS.	50
2.11 FUNDAMENTACIÓN DEL USO DEL CARBONATO DE CALCIO EN LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS DE ARCILLA COCIDA.	52
2.11.1 VENTAJAS DEL CARBONATO DE CALCIO CON RESPECTO A OTROS MATERIALES FUNDENTES.	52
2.11.2 PRINCIPIO BÁSICO DE ACCIÓN.	53
2.11.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA REACCIÓN.	55
2.11.3.1 El tamaño de granos.	55
2.11.3.2 La temperatura de cocción.	56
2.11.3.3 El porcentaje de adición o de presencia en la composición química de las arcillas.	56
2.12 TRANSFERENCIA DE CALOR.	57
2.12.1 CONDUCCIÓN.	57
2.12.2 CONVECCIÓN.	59
2.12.3 RADIACIÓN.	61
2.13 GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.	62
2.13.1 CALOR SENSIBLE Y LATENTE.	62
2.13.2 CALOR SUMINISTRADO AL HORNO (Q)	62
2.13.3 TRANSMISIÓN TOTAL DEL CALOR.	63
2.14 CALOR EN EL AIRE INDIRECTO DE COMBUSTIÓN INTRODUCIDO EN EL HORNO.	66
2.15 CALOR DEL AIRE CALIENTE.	67
2.16 RESISTENCIA TOTAL.	67
2.17 PÉRDIDAS EN LA SALIDA DEL MATERIAL COCIDO (Q_s).	69
2.18 SECADO.	70
2.19 HUMEDAD (X):	70
2.19.1 BASE HÚMEDA.	70
2.19.2 BASE SECA.	71
CAPITULO III	73
3 PARTE EXPERIMENTAL	73
3.1 DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE COCCIÓN EN LA LADRILLERA DE CHAMBO.	73
3.1.1 LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO.	73
3.1.2 TOMA DE MUESTRA: DE MATERIAS PRIMAS.	74
3.1.3 DOSIFICACIONES EMPLEADAS EN EL EXPERIMENTO.	75

3.1.4	VARIABLES DE PROCESO.....	75
3.1.4.1	MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN EL HORNO.....	75
3.1.4.2	MEDICIÓN DEL TIEMPO DE COCCIÓN EN EL HORNO.....	76
3.1.5	VARIABLES DE CALIDAD.....	77
3.1.5.1	DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA.....	77
3.1.5.2	DENSIDAD APARENTE.....	79
3.1.5.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	80
3.1.5.4	CARACTERÍSTICAS DEL LADRILLO.....	82
3.1.5.5	DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES.....	82
3.1.5.6	DETERMINACIÓN DE LA MASA.....	82
CAPÍTULO IV	84
4.1 CÁLCULOS Y RESULTADOS	84
4.1.1	DATOS OBTENIDOS DEL HORNO ARTESANAL.....	84
4.1.2	CARACTERIZACIÓN DEL ADITIVO.....	84
4.1.3	RESULTADO DEL ENSAYO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	85
	A LAS MATERIAS PRIMAS.....	85
4.1.3.1	TIPO: ARCILLA (Tierra Negra).....	86
4.1.3.2	TIPO: CARBONATO (De Calcio).....	86
4.1.4	CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	87
4.1.5	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPOSICIÓN.....	88
	QUÍMICA A LAS MATERIAS PRIMAS.....	88
4.1.6	MEDICIÓN DE LA CANTIDAD DE LEÑA UTILIZADA EN LA.....	89
	QUEMA.....	89
	<i>El tipo de leña empleada es de Eucalipto.</i>	89
4.1.7	VARIABLES DE PROCESO.....	90
4.1.7.1	TEMPERATURA.....	90
4.1.7.2	TIEMPO.....	91
4.1.8	DOSIFICACIÓN DEL ADITIVO.....	91
4.1.9	RESULTADOS DEL TIEMPO DE COCCION DEL.....	93
	CACO ₃	93
4.1.10	RESULTADOS DE LA ABSORCIÓN.....	94
4.1.11	RESULTADOS DE DENSIDAD.....	96
4.1.12	RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	97
4.2 BALANCE DE MATERIA	98
4.2.1	SIN ADITIVO.....	98
4.2.2	CON ADITIVO (CACO ₃).....	99
4.3 CURVA DE SECADO	100
4.4 BALANCE DE ENERGÍA	101
4.4.1	CALOR DE ENTRADA (Q _E).....	102
4.4.2	CALOR CONTENIDO EN EL PRODUCTO DENTRO DEL HORNO (Q _{P,H}).....	103
4.4.3	CALOR DE SALIDA DEL PRODUCTO (LADRILLO) (Q _{SP}).....	103
4.4.4	CALOR EN LA ESTRUCTURA DEL HORNO (Q _{EH}).....	104
4.4.4.1	DATOS DEL HORNO.....	105
4.4.4.2	TIPOLOGÍA DE LA TRANSFERENCIA COMBINADA.....	105
4.4.4.3	CÁLCULO DE LA RESISTENCIA REFERIDA AL HORNO.....	105
4.4.4.4	CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL.....	106
4.4.4.5	CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR.....	106
4.4.4.6	CÁLCULO DE PÉRDIDAS.....	107
CAPITULO V	109
5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	109

5.1 ANÁLISIS DE TEMPERATURA Y TIEMPO	109
5.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD	109
5.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN	109
5.4 RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	110
5.5 ASPECTOS ECOLÓGICOS	110
5.6 ANÁLISIS ECONÓMICO	111
5.7 ANÁLISIS DEL BALANCE DE ENERGÍA	114
CAPÍTULO VI.....	116
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
6.1 CONCLUSIONES.....	116
6.2 RECOMENDACIONES	118
RESUMEN	119
SUMARY	120
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
8 ANEXOS.....	126

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

La fabricación de ladrillos se realiza tanto de forma artesanal como industrial; en los países del tercer mundo predomina la producción artesanal por pequeños y medianos productores, que cuentan con esta como su única fuente de supervivencia e ingresos.

Debido al bajo nivel tecnológico y a la ineficiencia de los hornos que se emplean en estas fábricas, se utilizan en la cocción de los ladrillos grandes volúmenes de leña, procedente de la tala indiscriminada de los bosques, lo que trae como consecuencia la deforestación, una de las principales causas de los cambios climáticos a nivel global. La leña es el combustible más utilizado por los productores artesanales en las fábricas pequeñas y medianas.

Es por ello que cada vez se hace más necesario lograr la eficiencia energética en la industria de la cerámica en general y en la producción de ladrillos en particular, ya sea por las mejoras en la eficiencia de los hornos, por la utilización de combustibles más económicos, eficientes, renovables, o por cualquier otra vía disponible. Los esfuerzos en este sentido deben estar enfocados al uso eficiente de cualquier fuente de energía.

Una primera parte trata a cerca de los materiales utilizados en la fabricación del ladrillo. Se tienen en cuenta especialmente sus propiedades y los cambios de estas durante el proceso de fabricación del ladrillo. Además muestra el estado económico de la industria ladrillera, sus posibilidades de ampliación en el mercado interno y externo y además coloca en una posición desde la cual se pueda tener una visión global de la importancia de esta industria.

El pueblo de Chambo provincia de Chimborazo, a 8 kilómetros de la ciudad de Riobamba es un centro regional de producción de ladrillos y tejas. Existen 200

pequeñas empresas familiares, todas trabajando de forma totalmente rústica y ocupando leña para cocer su producto.

Los ladrilleros están organizados en dos asociaciones y están buscando formas para sobrevivir, pero evidentemente se necesita un cambio radical, introduciendo nuevas tecnologías para el rescate de estos talleres, lo que significa el primer paso para el aseguramiento de miles de puestos de trabajo entre las capas más pobres de esta sociedad.

El proyecto produce materiales de alta calidad a precios populares, el cual se basa en crear y fortalecer una acción basada en introducir cambios e innovaciones tecnológicas que reducen sustancialmente el uso de leña en la cocción de ladrillos, estos tendrán un eco- balance mucho menos dañino que en la actualidad, y potencialmente menos dañino que los bloques de concreto, tanto por la extracción de la materia prima, el uso de energías no renovables como por el hecho de producir descentralizadamente cerca de los usuarios

Una importante vía para incrementar la eficiencia energética en este proceso es el uso de fundentes. Estos son componentes de bajo punto de fusión, que se combinan con los aluminio-silicatos presentes en las arcillas, reduciendo temperatura de fusión de las mismas. En otras palabras, son los encargados de disminuir la temperatura a la que ocurre la sinterización durante el tratamiento térmico de las arcillas, mediante la cual se produce la formación de las fases cristalinas que le aportan al ladrillo la resistencia necesaria para su puesta en obra. El uso de fundentes reduce además de la temperatura, el tiempo de cocción, ambos factores conllevan el ahorro de energía.

Existe una amplia gama de estos materiales; la piedra caliza de alta pureza, cuya composición química fundamentalmente es el carbonato de calcio y mineralógica el

mineral calcita, se considera un material fundente. En la literatura se reporta su uso para la producción de objetos cerámicos y también en la de ladrillos, formando parte de las arcillas y como adición mineral a estas (en altos porcentajes).

El presente trabajo aborda la utilización de caliza como fuente de carbonato de calcio como aditivo fundente en la fabricación de ladrillos cocidos, con vistas a elevar la eficiencia energética durante su proceso de fabricación, a la vez que, mejorar las cualidades del producto.

La industria de la cerámica y en el caso muy específico de los ladrillos cocidos, en el caso de Chambo se encuentra deprimida y con un relativo atraso tecnológico dentro de la propia Industria de Materiales de Construcción y más aún si se compara con el nivel que ha alcanzado la misma a nivel internacional debido, precisamente a las investigaciones que en este campo de la cerámica se realizan y se han realizado en el mundo, las que han ubicado a los materiales cerámicos dentro de los más utilizados a nivel mundial. Este panorama no es el de Chambo, no se realizan actualmente investigaciones de envergadura en la mencionada industria y mucho menos en la ladrillera; ni para mejorar la eficiencia energética ni la calidad de los productos, de ahí la importancia del presente trabajo, ya que los resultados del mismo servirían para disminuir el consumo de combustible y elevar la calidad de los productos cerámicos.

1.2 OBJETIVOS

GENERAL:

Optimizar el proceso de cocción con adición de un aditivo en la producción de ladrillos de cerámica roja del Cantón Chambo.

ESPECÍFICOS:

- Realizar el diagnóstico del proceso de cocción en la producción de ladrillos de cerámica roja en una ladrillera del cantón Chambo.
- Identificar las variables del proceso en la producción de ladrillos de cerámica roja de una ladrillera del cantón Chambo.
- Monitorear las variables del proceso variando las condiciones de producción.
- Seleccionar las condiciones óptimas de producción en la fabricación de ladrillos de cerámica roja de una ladrillera del cantón Chambo.
- Ajustar los porcentajes de aditivo en la línea de producción en la fabricación de ladrillos de cerámica roja de una ladrillera del cantón Chambo.

CAPÍTULO II

PARTE TEÓRICA

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE ARCILLA COCIDA

2.1.1 RETROSPECTIVA HISTÓRICA

El ladrillo constituyó el principal material de la construcción en las antiguas Mesopotamia y Palestina, donde apenas se disponía de madera y piedras. Los habitantes de Jericó en Palestina fabricaban ladrillos desde hace unos 9000 años. Los constructores sumerios y babilonios levantaron zigurats, palacios y ciudades amuralladas, con ladrillos secados al sol, que recubrían con otros ladrillos cocidos en hornos, más resistentes y a menudo con esmaltes brillantes formando frisos decorativos. En sus últimos años los persas construían con ladrillos, al igual que los chinos, que levantaron la gran muralla. Los romanos construyeron baños, anfiteatros y acueductos con ladrillos, a menudo recubiertos de mármol.

En el curso de la edad media, en el imperio bizantino, al norte de Italia, en los Países bajos y en Alemania, así como en cualquier otro lugar donde escaseara la piedra, los constructores valoraban el ladrillo por sus cualidades decorativas y funcionales. Realizaron construcciones con ladrillos templados, rojos y sin brillo, creando una amplia variedad de formas, como cuadros, figuras de punto de espina, de tejido de esterilla o lazos flamencos. Esta tradición continuó en el renacimiento y en la arquitectura georgiana británica, y fue llevada a América del norte por los colonos. El ladrillo ya era conocido por los indígenas americanos de las civilizaciones prehispánicas. En regiones secas construían casas de ladrillos de adobe secado al sol. Las grandes pirámides de los olmecas, mayas y otros pueblos fueron construidas con ladrillos revestidos de piedra. Pero fue en España donde por influencia musulmana, el uso del ladrillo alcanzó más difusión, sobretodo en Castilla, Aragón y Andalucía.

2.2 LA TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DEL LADRILLO DE ARCILLA COCIDA.

La calidad final de los ladrillos de barro cocido depende de la calidad de las materias primas y su procesamiento, y en gran medida del control riguroso del proceso de elaboración de los mismos, de acuerdo a la tecnología empleada para su producción.

Las tecnologías utilizadas van desde las más artesanales hasta las consideradas dentro de la “alta tecnología”.

2.3 SELECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS.

Raramente las arcillas pueden ser utilizadas para la producción de ladrillos tal y como están en la naturaleza, sino que hay que añadir otros materiales, tales como fundentes u otros tipos de arcillas para mejorar sus propiedades. De hecho existen diferentes formas de preparar las arcillas de acuerdo con el fin que se persiga (15).

Por tanto las materias primas fundamentales para la elaboración de ladrillos de cerámica roja son:

- La arcilla como material fundamental
- Los fundentes.
- Los desgrasantes.

2.3.1 *ARCILLAS.*

La arcilla no es una roca primitiva sino el producto de la descomposición de ciertas rocas ígneas antiguas, se presenta en terrenos llamados estratificados generalmente en capas muy regulares. La arcilla pura es el silicato de aluminio llamado caolín.

Composición Química de al arcilla

Caolín: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

La arcilla es un compuesto de los elementos Silicio (Si) y Aluminio (Al) con agua químicamente combinada. Puesto que el silicio y el aluminio se encuentran generalmente en combinación con el oxígeno, como óxidos, se les llama Sílice (SiO_2) y Alúmina (Al_2O_3). La arcilla es conocida en química como un Silicato hidratado de Alúmina. La arcilla pura es una combinación de una molécula de alúmina, dos moléculas de sílice y dos de agua: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Esta agua no es la que se añade para hacer plástico el material.

La arcilla totalmente seca a perdido el agua que le da plasticidad pero tiene aun su agua química.

2.3.1.1 Cualidades de las arcillas cerámicas.

Hay 3 cualidades esenciales en una arcilla, adecuada para la producción de cerámica.

- **Plasticidad.-** Esta es la cualidad natural que tienen todas las arcillas, pero algunas no tienen suficiente plasticidad para poderlas trabajar y otras en cambio son demasiado plásticas. Se sabe que las partículas individuales de la arcilla son aplanadas y por ello pueden deslizarse las unas sobre las otras, especialmente cuando están mojadas. Esta característica hace que la arcilla se estire y sea más fácil de moldear. Cuando una arcilla es demasiado plástica, se le llama *larga* y cuando no es plástica se la llama *corta*.
- **Porosidad.-** La arcilla debe ser suficientemente porosa para poderse secarse uniformemente sin agrietarse o torcerse. Las arcillas que son demasiado son tan burdas que generalmente son inútiles para ciertos productos. sin embargo, cuanto más gruesa sea la capa de arcilla más porosa será. Cuando una arcilla no es suficientemente porosa para secar uniformemente en todo su grueso, la parte exterior se seca primero. A esto se le llama contracción diferencial. La

parte interior, como esta mojada, resiste la contracción exterior y la tensión resultante solo puede descargarse mediante el agrietado.

- **Vitrificación.-** cualidad de hacerse dura y resistente con el calor. Cuando una arcilla es vidriosa, es como de vidrio y se fractura en forma limpia, lisa, en que se rompe el vidrio. En este estado es totalmente densa y no absorbente. Cada arcilla tiene una temperatura de madurez a la cual puede realizarse la mejor combinación de las cualidades de fuerza, contracción y resistencia al choque. Este punto es un poco menor que el de la vitrificación y se le encuentra haciendo pruebas in situ

2.3.1.2 Clasificación

Pueden ser de dos clases, según su procedencia:

1. **Primarias o residuales:** Formadas in situ, o sea, donde se desintegró la roca. Contienen partículas sin ninguna clasificación, desde caolín izadas hasta fragmentos de roca y minerales duros e inalterados. Por su heterogeneidad no son de mucha aplicación en la industria cerámica.
2. **Secundarias o sedimentarias:** Han sido transportadas y depositadas en pantanos, lagos, el océano, etc. Están clasificadas por tamaño debido al transporte. Tienen mejores condiciones para la industria cerámica

2.3.1.3 Propiedades Físicas de las arcillas

- **Elasticidad:** Producida por la mezcla de la arcilla con una adecuada cantidad de agua.
- **Endurecimiento:** Lo sufren a ser sometidas a la acción de calor.
- **Color:** este se debe a la presencia de óxidos metálicos.
- **Absorción:** Absorben materiales tales como aceites, colorantes, gases, etc.

2.3.1.4 Propiedades químicas de las arcillas.

La arcilla pura es bastante resistente a la acción química de los reactivos; sin embargo, es atacada por algunos reactivos, sobre todo si se le aplican en condiciones apropiadas de presión, temperatura y concentración.

- El ácido clorhídrico y el sulfúrico concentrados la descomponen a una temperatura de 250 a 300 ° C y actúan más lentamente sobre arcilla calcinada.
- Algunos álcalis como sosa y potasa atacan el silicato aluminico si hay calentamiento prolongado y la transforman en silicatos dobles de sodio o potasio y aluminio.
- El anhídrido bórico la transforma en una masa vítrea (vitrificado) más atacable por los reactivos químicos.
- Con mayor facilidad actúa el ácido fluorhídrico y los fluoruros ácidos formando fluoruro de Al y de Si.

Pero para la industria cerámica, las propiedades más importantes son las relacionadas con las reacciones efectuadas entre los diferentes silicatos de la arcilla para formar compuestos de ciertas características como resistencia, dureza, aumento de densidad, disminución de absorción, según la reacción que haya tenido lugar.

2.3.1.5 Acción del calor sobre las arcillas.

- La eliminación del agua higroscópica se da a una temperatura de aproximadamente 100 ° C, aún no pierde su agua de composición y conserva la propiedad de dar masas plásticas.
- Con una temperatura entre 300 y 400 ° C el agua llamada de combinación es liberada, perdiendo la propiedad de dar masas plásticas aunque se le reduzca a polvo y se le añada suficiente agua.

- Entre 600 y 700° C el agua en la arcilla es totalmente eliminada.
- Por la acción del calor entre 700 y 800° C adquiere propiedades tales como dureza, contracción y sonoridad, la sílice y la alúmina comienzan a formar un silicato anhidro (Mullita: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$).
- Esta combinación se completa al parecer entre 1100 y 1200° C.
- Hacia los 1500° C aparecen los primeros síntomas de vitrificación.

2.3.1.6 Coloración.

Esta se debe a la presencia de óxidos metálicos, principalmente el de hierro (por su actividad y abundancia). Dependiendo de si la llama es oxidante o reductora se colorea de rojo, amarillo, verde o gris. También el titanio, el vanadio producen fenómenos similares.

2.3.1.7 Composición química de una arcilla para producir ladrillo

La composición química óptima para un ladrillo es la siguiente:

- Contenido de Alcalis y Ácidos: menor del 0.2%. Puede causar eflorescencia con un porcentaje mayor.
- Sustancias solubles (sales: sulfato sódico, sulfato de magnesio): menor al 0.04%. Igual al anterior produce eflorescencias con un porcentaje mayor.
- Piritas (Sulfuros de Hierro). Su exceso puede producir una deposición sulfúrica, en el momento de la cocción, ocasionando coloraciones indeseables y cuarteadoras sobre el material.
- Contenido de Alúmina: 20% - 30%: Imparte plasticidad a la arcilla, y un exceso provoca contracciones altas en el secado.

- Contenido de Sílice: 50% - 60%: Da baja contracción, previene el agrietamiento, imparte formas uniformes al ladrillo. Asociada con la durabilidad. Su exceso disminuye la cohesión entre partículas.
- Óxido de Hierro: Imparte coloración rojiza a la cerámica, previene que la cal produzca la función de la arena. Su exceso produce una coloración azul oscura (generalmente no ocasiona otra molestia).
- Cal: Debe estar dispersa (diámetro 0.2 mm) o sea cal viva más agua. Es un fundente que permite bajar la temperatura de fusión de la sílice. Si hay un exceso puede fundir demasiado provocando agrietamiento y deformación de la pieza.
- MgO: Imparte coloración amarilla a la cerámica. Ayuda a decrecer la deformación. Sé exceso produce deterioro por expansión de la superficie.
- Además la arcilla debe tener un bajo contenido de material orgánico para que en el proceso de la cocción no queden espacios vacíos por el consumo de este material.

2.3.1.8 ADECUACION DE LA MATERIA PRIMA.

- Ajuste granulométrico: Dependiendo de la finura de la arcilla esta tendrá mayor o menor grado de plasticidad. El ajuste se hace por medios mecánicos
- Ajuste por contracción: consiste en agregar arena o arcillas no plásticas.
- Ajustes por humedad: Se realiza teniendo en cuenta las especificaciones dadas por los límites de atterberg.
- Mezcla homogénea: se debe lograr una misma composición en toda la matriz ya sea por bestia, por batidora, o por otros procesos mecánicos.

2.3.2 LOS FUNDENTES.

Los fundentes, dentro de las pastas cerámicas, son componentes de bajo punto de fusión, que se combinan con los compuestos aluminio-silicatos y que reducen la temperatura de fusión de la masa arcillosa; son sustancias que funden y hacen que fundan otros componentes. En otras palabras, son los encargados de bajar la temperatura de vitrificación y hacen que la pasta cerámica densifique más rápidamente. (54, 59, 61, 62)

Estos materiales al combinarse con los aluminosilicatos presentes en las arcillas forman fases mineralógicas a más bajas temperaturas. La temperatura a la que comienza la sinterización o densificación del material cerámico depende del tipo de fundente y del tipo de arcilla; generalmente se conoce que la sinterización comienza (cuando se emplean fundentes) a partir de los 850°C y en casos muy específicos, alrededor de los 500°C. (14, 16)

Entre los fundentes más utilizados se encuentran: el feldespato, el carbonato de calcio, el cuarzo, el plomo, el sodio, el potasio, y el vidrio molido, entre otros. (6, 12)

2.3.3 LOS DESGRASANTES.

Son los materiales encargados de disminuir la plasticidad de las arcillas y su retracción al secado, y evitan retracciones muy bruscas de la masa que conducen al agrietamiento. Entre los materiales más utilizados como desgrasantes en las mezclas cerámicas se encuentran las arenas, la piedra pulverizada, conchas molidas (arcilla cocida y pulverizada), huesos, el cuarzo, el pedernal, las arcillas silíceas, la cáscara de arroz, hierbas, residuos molidos de ladrillos cocidos (chamota), entre otros. (5)

Los desgrasantes se añaden a la arcilla además, para aumentar la porosidad, así como la resistencia de las piezas. El mejor desgrasante es el formado por conchas trituradas y quemadas. (11).

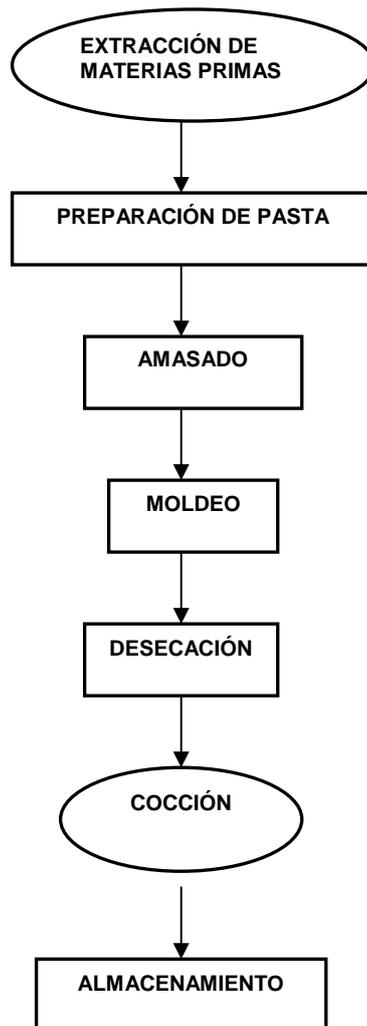
2.4 PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS LADRILLOS DE CERÁMICA ROJA.

El proceso de elaboración de los ladrillos de cerámica roja se resume en los siguientes pasos:

1. Extracción de la materia prima.
2. Preparación de las pastas.
3. Amasado.
4. Moldeo.
5. Desección.
6. Cocción.

FIGURA 2.4 -1

**DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE PRODUCCION
DE LADRILLOS CERÁMICOS**



Elaborado por: Toctaquiza, Olga. (2008)

2.4.1 EXTRACCIÓN DE LA MATERIA PRIMA:

Los depósitos de arcilla se encuentran al pie de colinas o en tierras agrícolas cercanas a ríos. Los criterios para seleccionar una localización adecuada son la calidad de la

arcilla, disponibilidad a nivel superficial y la cercanía de una vía transitable.

La excavación manual en plantas de pequeña y mediana escala generalmente se realiza a una profundidad menor de 2 m. Para plantas de fabricación de ladrillos a gran escala se necesitan medios mecánicos como dragaminas y excavadoras de cucharas de diferentes tipos. Estos métodos requieren proporcionalmente menor área de excavación, pero hacen cortes profundos en el paisaje. (18)

2.4.2 PREPARACIÓN DE LAS PASTAS:

Las tierras arcillosas empleadas en la fabricación de ladrillos se amasan con un poco de agua, después de añadir algún desgrasante (arena, carbón, etc.) y se trituran mediante molinos de rulos o cilindros, por acompañarles generalmente piedras, arena, etc.

Para los productos cerámicos se suelen preparar las tierras haciéndolas sufrir primero una meteorización, mediante exposición a la acción de lluvias en capas de pequeño espesor, para que las disgreguen y laven. (9)

Por vía húmeda, se preparan las arcillas por levigación, poniéndolas en suspensión en el agua, con objeto de separar los productos no deseados. Esto se hace en unos grandes depósitos, en los cuales una serie de rastrillos giratorios agitan la masa; las impurezas se recogen en el fondo y se da salida a la papilla por un vertedero; luego es conducida a una fosa de sedimentación, y se obtiene así la arcilla colada. (9)

También la arcilla pulverizada y puesta en suspensión en agua se puede preparar por electroósmosis; se le añade un electrolito, (sosa, carbonato sódico o silicato alcalino) y al hacer pasar una corriente eléctrica, se deposita la arcilla en el ánodo, con poca agua (15%).(9)

La preparación por vía seca de las arcillas es raramente usada; se reduce a la pulverización y mezclado mediante malaxadores.

2.4.3 AMASADO:

Este paso se hace rústicamente en las eras; para ello, se vierte la arcilla en una pista circular, y se amasa con los pies o con el paso de caballos, describiendo una espiral desde el centro hacia la periferia. Industrialmente el amasado de las arcillas se hace en molinos de rulos o cilindros, y se humedecen ligeramente para poder ser moldearlas. (9)

2.4.4 MOLDEADO.

2.4.4.1 Técnicas de Moldeo.

En esta operación se le da a la arcilla la forma que ha de tener el producto cerámico después de la cocción; se puede hacer a mano o a máquina. En ambos casos hay que dar al molde mayores dimensiones, puesto que las pastas experimentan una contracción lineal del 1/10 al 1/7 de su volumen en la desecación y cocción. (9)

Las técnicas de moldeado que más frecuentemente se utilizan para la conformación de los ladrillos son las siguientes: (9,19)

a) El moldeo a mano: práctica vertiendo la arcilla amasada con consistencia muy plástica en unos moldes llamados gradillas. El operario comprime la masa con las manos y después pasa un rasero para eliminar el exceso de material.

b) El moldeo a máquina: Con máquinas galleteras o al vacío

c) El moldeo por prensas: se usa si las piezas a fabricar tienen relieves y superficies curvas, los cuales no pueden darse con las máquinas de hilera.

d) El moldeo por colada: se usa en la fabricación de losas y porcelanas

FIGURA 2.4.4-1

Ladrillo moldeado



Fuente: Gneco, Mauricio(2000)

2.4.5 DESECACIÓN:

Tiene por objeto eliminar de la pasta la humedad libre (agua de amasado antes de la cocción) y parte de la combinada por exposición al ambiente, lo cual se hace así por costos, velocidad de contracción, lo que nos da una mejor calidad. La desecación debe practicarse de manera lenta y gradual, para evitar alabeos y resquebrajaduras.

FIGURA 2.4.5-1

Ladrillos antes de la cocción



Fuente: Gneco, Mauricio(2000)

En los tejares se realiza este proceso poniendo los ladrillos primero de plano, después de canto, apoyados de dos en dos, por dos aristas y finalmente se apilan al cabo de dos o tres días, formando rejales de unas cinco o seis hiladas, que son colocadas cada una perpendicular a la inferior, dejando espacios. Estos rejales se resguardan del

sol y la lluvia.

En algunas fábricas la desecación se realiza en secadores situados en la parte alta de los hornos anulares. Las estufas son las más aptas para la desecación del producto, ya que en estas la desecación se produce de forma gradual; el proceso tarda 24 horas. (9, 19)

2.4.6 COCCIÓN.

FIGURA 2.4.6-1

Ladrillos después de la cocción



Elaborado por: Toctaquiza, Olga. (2008)

Proceso mediante el cual se somete al fuego la arcilla moldeada y seca, para producir una sinterización intensa de la arcilla, y una vitrificación adecuada.

Estos procesos de cocción se deben llevar a cabo manejando una curva de temperaturas de la cual dependerán varias de las características del ladrillo, ya que si es mal manejada esta curva puede haber problemas con el ladrillo, por ejemplo la generación de esfuerzos residuales en el ladrillo, produciendo agrietamientos.

La cocción en el proceso de fabricación de los materiales cerámicos es la fase final y más importante del mismo. De acuerdo con la técnica de cocción que se emplee, la preparación de las pastas y las materias primas, así serán las características o propiedades del producto final: compacidad, resistencia mecánica, y otras.

La eficiencia de esta etapa depende, entre otros factores, del tipo de horno empleado.

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

En ella se utilizan, de acuerdo al tipo de fábrica o a la tecnología empleada, varios tipos de hornos, que van desde los más rústicos hasta los más modernos y eficientes: Túnel y Hoffman. (8)

2.5 EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS.

La eficiencia energética es el conjunto de acciones que permiten al ahorro de energía en todos sus tipos: térmica, eléctrica, etc. Es la habilidad de lograr objetivos productivos empleando la menor cantidad de energía posible, la capacidad de alcanzar los mayores beneficios en el uso final de la energía con el menor impacto al medio ambiente. (7, 20)

Las industrias de la cerámica en general, y de ladrillos en particular, se encuentran entre las grandes consumidoras de combustibles, tanto fósiles como alternativos. Lograr la eficiencia energética en este sector no resulta fácil debido a la disparidad de los niveles tecnológicos del proceso productivo: los ladrillos se producen tanto a nivel artesanal como a escala industrial, en pequeñas, medianas y grandes empresas; en los países del primer mundo estas últimas llegan hasta la automatización de los procesos con la consiguiente eficiencia productiva y energética del proceso integral

Para realizar el análisis de la eficiencia energética de este sector constructivo se debe partir del hecho de que en los países del tercer mundo y donde existan de manera general pequeños productores independientes de este material, con procesos productivos artesanales y obsoletos, la producción de ladrillos se realiza con

combustibles y hornos ineficientes, con la consiguiente agresión al medio ambiente, pues la eficiencia energética en la producción de ladrillos representa un consumo mínimo de combustible con bajas emisiones de contaminantes hacia la atmósfera.

De lo anteriormente dicho se concluye entonces que la eficiencia energética de la industria ladrillera depende fundamentalmente de:

1. El tipo de combustible empleado,
2. La tecnología de producción y dentro de este punto y muy importante el tipo de horno, pues es en la etapa de cocción donde se materializa o se hace realidad el concepto de eficiencia energética.

2.5.1 TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO:

Se emplean múltiples y diversos tipos de combustibles, como el carbón de piedra, el fuel oil, el gas natural, la leña, materiales de desecho como los neumáticos usados, aceites de desecho, el cisco de café, la cascarilla de arroz, el aserrín, entre otros. (4,20), sin embargo varios autores coinciden en que los combustibles líquidos son los más eficientes en cuanto al aprovechamiento de la energía. (4, 21).

2.5.2 EN CUANTO AL TIPO DE HORNO:

El mayor potencial de ahorro se consigue al utilizar los hornos de túnel en primer lugar y luego con los hornos Hoffman e intermitentes respectivamente. De lo anterior se deduce que los hornos periódicos son los más ineficientes. (20, 21)

2.6 RESISTENCIA Y DURABILIDAD DE LOS MATERIALES PRODUCIDOS A PARTIR DE ARCILLA COCIDA.

A diferencia de los hormigones y los morteros, en los que el endurecimiento ocurre por reacciones químicas de fraguado, en el caso de los materiales cerámicos, incluyendo los ladrillos de barro cocido, la adquisición de su resistencia y dureza ocurre durante la etapa de cocción, en la que se verifican transformaciones físico-químicas que influirán en las propiedades finales del producto: resistencia mecánica, absorción, porosidad entre otras.

En el caso de los ladrillos ocurre a través del proceso de sinterización.

2.6.1 REACCIÓN DE SINTERIZACIÓN

Los materiales cerámicos para su fabricación utilizan como materia prima principal las arcillas, formadas por un conjunto de minerales complejos. Cuando las arcillas se someten al calor, este provoca una creciente excitación de las estructuras cristalinas, las que se van transformando. La cocción es la última etapa del proceso cerámico y constituye una serie de procesos físico – químicos que se inician con las reacciones en estado sólido.

Los procesos cerámicos se pueden dividir en sub etapas o subprocesos, llamados procesos de ceramización.

2.6.2 PROCESO DE CERAMIZACIÓN:

La primera operación que debe hacer es la preparación de la arcilla, ya sea triturada o colocada en agua (podrido de la arcilla); posteriormente se pasa a la fase de amasado, donde se pone de manifiesto una de las principales características de las arcillas, que es la plasticidad. Culminado el amasado, se continúa con el moldeo de las piezas; este puede hacerse de dos formas principalmente: por extrusión o manualmente. Le sigue

la etapa de secado, con el fin de extraer el agua del amasado para pasar a la etapa principal de la ceramización: la cocción que consiste en someter el producto a una temperatura creciente hasta alcanzar la viscosidad de la fase líquida cohesiva, que hace rígido el conjunto. Desde el punto de vista cerámico, el material cocido puede definirse por un cuerpo complejo compuesto de:

Fases cristalinas, que ya existían en las materias primas y permanecen inalterables a lo largo del proceso.

Fase amorfa, desarrollada durante la cocción según la especie cerámica esta fase puede oscilar de un 50% al 90%.

Fases cristalizadas, a partir del líquido. Depende de la naturaleza de la fase amorfa y de la velocidad de enfriamiento.

Proceso de densificación, la densificación es la esencia del proceso cerámico.

En la cerámica convencional, entendiéndose esta como aquella cuya ceramización tiene lugar con la fase líquida como promotor, las partículas, próximas unas con otras, gracias a la etapa de conformación, empiezan a tender unos puentes (reacción en estado sólido), ayudadas por las fuerzas del tipo de Vander Waals.

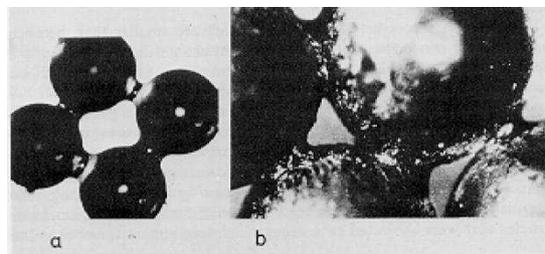
Más tarde comienza la formación de la fase líquida a esta temperatura, aunque muy viscosa, y aumenta la superficie de contacto entre las partículas. En la medida que el líquido se va introduciendo en los intersticios aumenta la contracción, puesto que se van rellenando los poros y se entra de lleno en la fase de densificación.

La diferencia en el desarrollo de esta etapa de densificación es la que permite catalogar las cerámicas, o los procesos de densificación en:

- Sinterizaciones
- Ceramizaciones
- Fusiones o vitrificaciones

Desde el punto de vista del ahorro de energía en los materiales cerámicos, podemos decir que la etapa de sinterización es una de las más importantes ya que la misma ocurre a temperaturas más bajas.

FIGURA 2.6.2-1
Figura 1a Figura 1b.



Fuente: Xavier, E(2004)

2.6.2.1 **Proceso de Sinterización**

Los ladrillos adquieren la resistencia mecánica a través del tratamiento térmico de la arcilla usada, en un proceso conocido como sinterización, el cual consiste básicamente en que los puntos de contacto de los granos adyacentes se funden en una fase vítrea y se unen a través de esta. Este proceso conocido como **sinterización vítrea**, comienza a los 800°C y continúa hasta temperaturas cercanas a los 1200°C, cuando tiene lugar la fusión y recristalización de los materiales.

La sinterización es un proceso de calentamiento, con la finalidad de aglomerar pequeñas partículas en un todo. Para que ocurra la sinterización debe desarrollarse una unión:

1. A través de la formación de una fase líquida
2. Por difusión sólida.

Según Van Vlack la sinterización vítrea ocurre al comenzar a formarse un silicato vidrioso cuando el material es calentado arriba del sólido. El vidrio no se cristaliza en el enfriamiento, pero forma una unión fuerte entre las partículas remanentes.

2.6.3 CAMBIOS DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LAS ARCILLAS DURANTE LA COCCIÓN

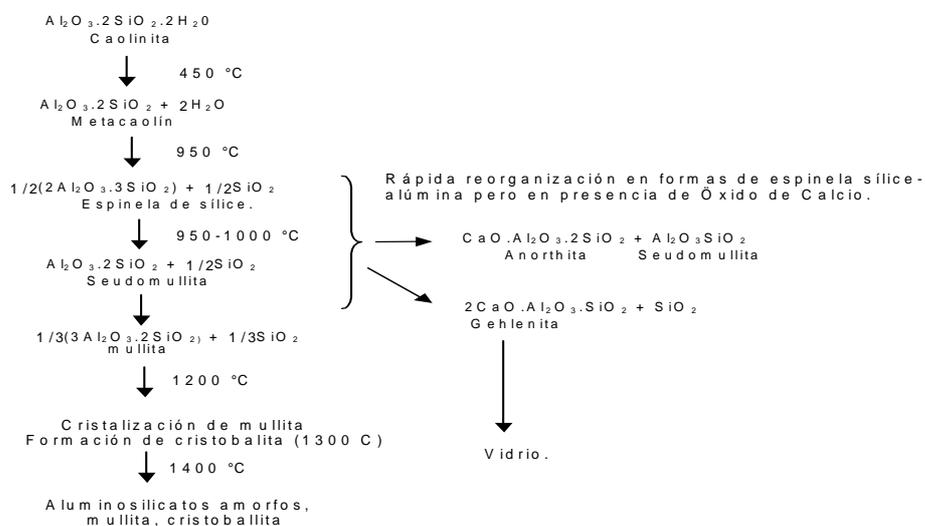
Las propiedades y características del producto final dependen de factores tales como: la técnica de cocción que se emplee, la preparación de las pastas y las materias primas. Las transformaciones que ocurren son las siguientes: (2, 14)

1. De 0-400°C: Eliminación de residuos de agua, combustión de la materia orgánica. El material se dilata hasta los 100°C, y luego, a 250°C sufre una retracción, para volver a dilatarse después. No se producen cambios químicos ni estructurales.
2. De 400-600°C: Se desprende el agua químicamente combinada, se descomponen las arcillas en óxidos, cesa la dilatación y se inicia la contracción de volumen.
3. De 600-900°C: Se produce un meta caolín muy inestable, que tiende a formar alúmina; es muy higroscópico.

De 900-1000°C: En este período reacciona la alúmina con la sílice, y se forma el silicato aluminico, $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, del que existen tres estados alotrópicos en la naturaleza: Sillimanita y Andalucita.

4. A más de 1000°C: El silicato $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ tiende a transformarse en $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (mullita, de gran dureza, pequeño coeficiente de dilatación, que cristaliza en agujas muy finas).
5. Fusión: La fusión ocurre a temperaturas por encima de 1700° C; las arcillas funden a 1780°C; la Sillimanita, a 1880 °C y la Mullita, a 1930°C.

FIGURA 2.6.3-1
Acción fundente del CaCO₃ cuando se adiciona a la arcilla.



Fuente: Betancourt, Dania (2008)

Información muy interesante sobre los cambios en la composición mineralógica de las arcillas durante el tratamiento térmico de estas, fue hallada en el artículo presentado por Mayoral et al "Thermochimica Acta" (24), el cual describe la acción fundente del CaCO₃ en los minerales de arcilla. El trabajo está basado en el estudio del mecanismo de descomposición de la Caolinita en el sistema ternario CaO.Al₂O₃.2SiO₂.

La investigación se hizo con las cenizas volantes resultantes de la combustión del carbón, la que tiene una composición química muy similar a la arcilla. Esta investigación consistió en el estudio de la influencia del CaCO₃ sobre el tiempo de sinterización en las reacciones de los aluminosilicatos en el estado sólido.

Las reacciones que ocurren y las nuevas fases que se forman durante el tratamiento térmico de las arcillas al adicionar CaCO₃ son descritas por Mayoral (24) en la Figura 2.6.3-1

- **Agentes de la deterioración.-** Los ladrillos de cerámica roja están sometidos durante su vida útil a agentes que deterioran el origen físico y químico; estos son los causantes de la deterioración y la pérdida de sus capacidades de trabajo, de acuerdo con las funciones que deben desempeñar en una edificación. Los de origen físico son los siguientes:
- **Los cambios de volumen.-** pueden ocurrir dentro del ladrillo debido a la contracción del secado, a las variaciones de temperatura, y a las variaciones de la humedad. El agrietamiento resulta cuando el cambio de volumen es resistido por los confinamientos internos o externos. El ladrillo de cerámica es intrínsecamente sensible a las variaciones de la humedad, debido a que la arcilla es su componente constitutivo principal. La determinación de la cantidad y del tipo de arcilla presente en el suelo para la producción del ladrillo es de suma importancia. La presencia de la humedad tiene la capacidad potencial de dispersar las láminas. (2, 25)
- **Ciclos de humedecimiento y secado.-** Los ciclos de humedecimiento y secado causados por la alternancia de períodos de sol y lluvia propician la desagregación y disolución de los materiales de construcción, particularmente de los ladrillos, debido a su alta capacidad de absorción de agua. (2, 26)
- **Efectos destructivos de la humedad.-** El factor más serio que influye en la deterioración de los ladrillos es la humedad, que resulta de las lluvias, de la humedad ascendente, o de la condensación del vapor. Si se quiere que los ladrillos sean aceptados más extensamente en el futuro como material de construcción durable y alternativo, entonces deben superar la desventaja principal que es su incapacidad de resistir la exposición prolongada a la humedad. (26, 27)

El ablandamiento y la acción abrasiva de la humedad conducen a la erosión de las superficies expuestas. Es por tanto importante identificar las fuentes de la humedad, la naturaleza de su acción, el mecanismo del transporte y los parámetros medibles. Las variables que podrían afectar el funcionamiento del ladrillo son vastas; las más significativas incluyen el nivel de exposición a los elementos ambientales (en este caso, la lluvia) y los procesos de fabricación (la presión de compactación, el contenido de arcilla y la mineralogía, el contenido de agua, el tiempo de curado, el tiempo de mezclado, la vibración, entre otros. (26)

La durabilidad del ladrillo depende en gran parte de las características del poder absorbente de agua, de la permeabilidad y de la porosidad del ladrillo de una parte, y de la naturaleza de la acción de la humedad, así como de la capacidad del ladrillo de resistir fuerzas quebrantadoras en la otra. (28)

- **La presencia de Caliche en la arcilla.-** Habitualmente se utiliza el término “caliches” para denominar los gránulos de hidróxido de calcio existentes en las piezas cerámicas de arcilla cocida. Los desconchados por caliche se producen por la expansión de los nódulos de óxido de calcio, formados durante la cocción, al hidratarse y pasar a hidróxido cálcico.

El origen hay que buscarlo en los nódulos de caliza (carbonato cálcico) contenidos en la materia prima, que no han sido suficientemente triturados durante el proceso de molienda hasta dimensiones por debajo de 0.5 mm (29). La presión ejercida por la expansión de las partículas, es proporcional al cuadrado de su radio; de tal forma, una partícula de 4 mm de radio producirá un efecto 16 veces mayor que otra de 1 mm. (29)

La resistencia mecánica de la pieza es un factor primordial para definir la vulnerabilidad de los productos de arcilla cocida a la acción destructiva de los caliches,

ya que un mismo tamaño de grano de caliche, puede producir rotura en una pieza cerámica de baja resistencia mecánica, y no producirla en otra de mayor resistencia.

Para la formación de tensiones destructivas o fisurantes por parte de los nódulos de hidróxido cálcico, es necesaria la presencia de vapor de agua, ya que cuando la hidratación del óxido cálcico se produce con agua líquida, la masa plástica de hidróxido de calcio fluye por la red capilar del material cerámico, sin producir tensiones. El principal problema de este efecto, estriba en que la apreciación de sus consecuencias no es inmediata, ya que en función de la humedad ambiente, pueden pasar días, semanas o incluso meses hasta la aparición de las grietas o la desintegración del ladrillo. (28)

Los desconchados por caliche no suelen ser problemas para los fabricantes serios, ya que existen medios en el proceso de fabricación para eliminar este defecto, bien moliendo más fino, elevando la temperatura de cocción o sumergiendo en agua el material a la salida del horno. (30)

2.7 LA INFLUENCIA DE LA POROSIDAD EN LA DURABILIDAD DE LOS LADRILLOS COCIDOS.

La durabilidad de los materiales de construcción, una vez colocados en su sitio en el edificio, está influenciada por factores externos (las condiciones ambientales) así como por las propiedades del material (porosidad, composición y textura).

Las rocas y muchos materiales de construcción artificiales (ladrillos, morteros, concreto, etc.) están compuestos de mono o poli minerales agregados y espacios vacíos; estos espacios (poros y fisuras) son un componente esencial del material. Su volumen, tamaño y distribución afectan sus características y su comportamiento ante la intemperie, cuando se usan para propósitos ornamentales o estructurales (29)

El volumen y el tamaño de los poros determinan la capacidad para el almacenamiento y la facilidad para la circulación de los fluidos dentro de los materiales; ambos favorecen inevitablemente su deterioración. Además, las variaciones de la porosidad afectan marcadamente la resistencia mecánica de los materiales de construcción. La porosidad y la distribución del tamaño de los poros han sido consideradas como los principales parámetros para predecir la durabilidad de los materiales de construcción y especialmente de los ladrillos, sujetos a diferentes tipos de fenómenos atmosféricos y en ambientes agresivos (ataque de la lluvia ácida, cristalización de sales y ciclos de congelación-descongelación). Se ha demostrado experimentalmente que los ladrillos y otros materiales de construcción con una alta porosidad y un alto porcentaje de poros con radio menor a una micra son más susceptibles a la intemperie, debido principalmente a los fenómenos de la cristalización de sales y a los ciclos de congelación-descongelación. La porosidad y la distribución del tamaño de los poros se consideran parámetros cruciales para determinar la durabilidad de los materiales de construcción. (29)

Un elemento que influye en la porosidad y por tanto en la durabilidad de los ladrillos es la presencia de carbonatos en la arcilla en altas proporciones (alrededor del 20%) debido a que los carbonatos calcinados (el CaO libre que queda dentro de la masa del ladrillo) en presencia de agua o en ambientes húmedos afectan significativamente la durabilidad de los ladrillos debido al efecto llamado "lime blowing o explosión por cal. Este efecto se produce durante el proceso de hidratación del CaO para formar Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que reacciona con el CO_2 para formar Carbonato de Calcio (CaCO_3) con un gran incremento de volumen, el cual origina gran cantidad de grietas. (29)

El desarrollo de grietas está confirmado por la alta conectividad entre los poros. La descomposición térmica de los carbonatos también provoca el surgimiento de microporosidades que afectan la durabilidad de los ladrillos. Se ha demostrado que la presencia de poros con radio menor a 1,5 micras afecta la durabilidad del ladrillo debido a las variaciones en la dinámica de la circulación del agua dentro del sistema de poros y la generación de grandes presiones asociadas a la cristalización de las sales y a los ciclos de congelación-descongelación; en ambos casos, la presión de cristalización es inversamente proporcional al radio de los poros. (29). El problema principal con los ladrillos calcáreos, por lo tanto, es la presencia de grandes cantidades de poros pequeños ($< 1 \mu\text{m}$) y la formación de grietas que progresan rápidamente con el tiempo. Las grietas, que salen de los granos de la portlandita, y los poros menores que $1 \mu\text{m}$, formados por la descomposición de carbonato de calcio (CaCO_3) y su transformación en óxido de calcio (CaO), dan lugar a un aumento notable de los valores de absorción, mientras que la desecación es más lenta. (29)

2.8 PRODUCCIÓN ALTERNATIVA DE LADRILLOS CERÁMICOS.

La explotación de las canteras de arcilla destinada a la producción de ladrillos produce excavaciones que no solamente afectan el paisaje sino también la estructura y configuración del terreno, a la vez que ocasiona deforestación, pérdida de la capa productiva del suelo, y la erosión de este. Por ello cada día se hace más necesaria la utilización de otras materias primas que sustituyan a la arcilla para disminuir los efectos negativos.

Los factores de mayor influencia o grado de responsabilidad en los impactos negativos sobre el medio ambiente son:

2.8.1 LA EXTRACCIÓN DE LA MATERIA PRIMA:

La extracción de la materia prima, al remover la base de los taludes o excavando y hace que quede un desnivel con relación a las zonas circundantes, afecta grandes áreas y genera impactos negativos, como la eliminación de la capa orgánica fértil, junto con la vegetación arbórea, arbustiva y herbácea; quita capacidad de drenaje y sostén al terreno, con lo que se incrementa el riesgo de erosión e inestabilidad. (4,9)

2.9 LA TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN (TIPO DE HORNO Y EL TIPO DE COMBUSTIBLE).

En el caso de la fabricación artesanal de ladrillos, la naturaleza del combustible utilizado (material de desecho en la mayoría de los casos y altamente tóxico) y la ineficiencia de los hornos (combustión incompleta) contribuye a un proceso sumamente contaminante, con la consecuente generación de humo negro. Los efectos de las emisiones van desde la presencia de hollín hasta impactos adversos a la salud, que se manifiesta en una alta incidencia de enfermedades respiratorias en los trabajadores de las fábricas y en las comunidades cercanas a ellas. (4)

La parte más contaminante y a la vez compleja del proceso artesanal de elaboración de ladrillos, se centra en la etapa de cocción y principalmente en el encendido del horno. Las emisiones atmosféricas son el principal problema ambiental generado en esta etapa del proceso productivo. Aún cuando las principales emisiones son monóxido de carbono y partículas suspendidas, en dependencia del combustible utilizado también puede llegarse a emitir compuestos orgánicos volátiles, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, metales pesados y dióxido de carbono, el más importante gas causante del efecto invernadero.(4)

2.10 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS DE LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS COCIDOS.

La existencia de diversos sistemas constructivos no ha podido reemplazar el consumo del ladrillo. El mismo se basa en su costo – beneficio, desde el enfoque económico, y en la identidad constructiva desde el enfoque histórico - cultural, que lo convierten en un elemento vital de la construcción de las ciudades latinoamericanas. Como sistema constructivo tradicional, su producción no demanda tecnologías sofisticadas ni mano de obra calificada (4)

En los países del tercer mundo en general, la producción de ladrillos se lleva a cabo mayormente de manera artesanal, en la realidad socioeconómica de estos países; específicamente en el sector ladrillero coexisten los productores artesanales con las medianas y grandes empresas; por tanto, se establecen relaciones mercantiles y de competencia entre ambos sectores. Las diferencias entre ellos en cuanto al desempeño de la producción y a la obtención de ganancias podrían sintetizarse en que el empresario ladrillero participa de la mediana y gran empresa que recurre al trabajo asalariado y a una producción orientada por un cálculo de rentabilidad mercantil, lo cual lo articula al desarrollo capitalista, mientras que el productor artesanal lleva a cabo la producción sobre la base del trabajo propio, con el objetivo de satisfacer las necesidades de consumo de la unidad familiar, directamente o por medio del intercambio. No responde a una racionalidad capitalista, dado que no visualiza a los medios de producción como capital y el volumen de la producción se fija para maximizar niveles de consumo y no ganancias. (9)

En los países desarrollados la situación es diferente: la tendencia del sector es a la aparición de unidades fabriles de gran capacidad productiva y fuertemente

automatizadas y a la desaparición de fábricas más intensivas en mano de obra, por lo que el número de trabajadores en el sector ha ido disminuyendo. (31)

En cuanto a la estructura de costos, se destacan los costos de la energía y de la mano de obra. A modo de ejemplo, para una fábrica con una producción de 50.000 t/año, el costo medio de producción tiene la siguiente distribución. (31)

TABLA 2.10-1
Costo medio de Producción

CERAMICA ESTRUCTURAL	ESTRUCTURA DE COSTOS
Materias Primas	8,35%
Personal	32,65%
E. Eléctrica	10,62%
E. Térmica	21,14%
Carburantes y Lubricantes	1,14%
Embalajes	6,46%
Mantenimiento	7,14%
Gastos Generales	4,94%
Técnicos	3,43%

Elaborado por: Toctaquiza, Olga. (2008)

Se tiende a la reducción de los costos de producción y de personal por medio de cambios en las instalaciones, la reducción del consumo energético y la

2.11 FUNDAMENTACIÓN DEL USO DEL CARBONATO DE CALCIO EN LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS DE ARCILLA COCIDA.

El carbonato de calcio se ha utilizado como fundente en la elaboración de productos cerámicos y en menor grado para la producción de ladrillos. Este puede adicionar a la mezcla en forma de aditivo o estar presente en la composición química de las arcillas utilizadas como materia prima en la fabricación de ladrillos de barro.

Su acción fundente y las consecuencias que trae su adición a la mezcla en las propiedades finales de los productos cerámicos, han sido referidas en la literatura por varios autores. (28, 24)

2.11.1 VENTAJAS DEL CARBONATO DE CALCIO CON RESPECTO A OTROS MATERIALES FUNDENTES.

Anteriormente se mencionó la “Utilización de aditivos fundentes”, se demuestra a través de una exhaustiva recopilación bibliográfica que existe una amplia gama de fundentes que con diferentes fines y formas de obtención se emplean en la industria de la cerámica en general. Entre los más utilizados en los momentos actuales y sobre todo en la fabricación de ladrillos se encuentran el vidrio molido, el silicato de sodio y el bórax.

En el caso específico del Ecuador, los materiales anteriormente mencionados no se encuentran abundantes en el mercado, son caros o su obtención a escala industrial se dificulta; tal es el caso del vidrio molido obtenido a partir de frascos o botellas reciclados.

La caliza se puede obtener en el Chimborazo de las marmolerías existentes en el lugar, en la gran mayoría de los casos, está compuesta básicamente por carbonato de calcio. De aquí que este fundente se puede obtener de dos formas: moliendo la piedra caliza en un molino de bolas hasta una finura inferior a 64 micras o como subproducto de la trituración, clasificación y lavado en las canteras, el cual se comercializa a un precio módico de 3 dólares el quintal.

2.11.2 PRINCIPIO BÁSICO DE ACCIÓN.

El uso de los carbonatos como agentes fundentes se ha reportado como una buena práctica para reducir la energía necesaria para la cocción de los ladrillos. La presencia de carbonatos (calcita y dolomita) durante el proceso de cocción está asociada a la reducción de la temperatura de sinterización, básicamente porque estos minerales influyen en las transformaciones mineralógicas que tienen lugar en los minerales de arcilla durante su tratamiento térmico y permite la formación de mayor cantidad de fases vítreas a menor temperatura, comparado con materiales que carecen de carbonatos. Durante la cocción tienen lugar dos procesos:

- a) La deshidrolización de la Caolinita (500-600°C) .
- b) La descarbonatación de los carbonatos (700-800°C). Una gran cantidad de material amorfo es creado a través de este proceso, el cual favorece la formación de nuevas fases. (32)

Se supone que esta red de densas zonas favorece el reforzamiento mecánico de este material sinterizado a baja temperatura. (33)

La influencia del CaCO_3 (mineral calcita) y el tiempo de sinterización sobre los aluminosilicatos en estado sólido fue estudiado a través de un procedimiento para monitorear la transformación mineral que ocurre en los aluminosilicatos quemados a altas temperaturas usando Calorimetría de Exploración Diferencial (CED). Se probó

que la sinterización puede comenzar a temperaturas por debajo de los 850°C, y el tiempo de sinterización puede ser reducido a 30 min, a través del uso de CaCO₃. Los mejores resultados se lograron con un 33% de adición. (24)

Cultrone et al (29), también estudiaron el comportamiento de ladrillos de arcilla cocida con adición de carbonato de calcio y/o con altos porcentajes de este en la composición química de las arcillas. La adición del 10% de carbonato a la arcilla trae consigo un incremento de la vitrificación a temperaturas entre 800-900°C; sin embargo, se reporta un incremento en la porosidad y la capacidad de absorción de agua, debido a la presencia de pequeñas grietas las que son probablemente causadas por la súbita expansión del CaO en presencia de humedad; la portlandita formada ejerce una gran presión de cristalización en los espacios confinados del ladrillo previamente ocupados por el CaO, produciendo fracturas radiales alrededor de los granos de carbonato. Este proceso depende en gran medida del tamaño de los granos de carbonato. (29)

Jordán Vidal (14), son otros autores que han estudiado la influencia de la adición de CaCO₃ en las transformaciones mineralógicas de las arcillas durante su tratamiento térmico, al sustituir parcialmente pastas cerámicas de una arcilla, rica en sílice, por un residuo rico en carbonato cálcico (polvo de mármol) en un intervalo entre el 15-35%.

En cuanto a las transformaciones mineralógicas que se producen al adicionar CaCO₃ a la arcilla utilizada en el experimento, los autores las describen de la siguiente manera: cuando la temperatura aumenta, el CaCO₃ se descompone y aparece CaO.

Cuando la temperatura aumenta el CaCO₃ se descompone y aparece CaO y que parte del CaO no ha reaccionado por encontrarse en exceso, debido a la falta de sílice libre para poder reaccionar. Además, en cuanto a la capacidad de absorción de agua se observa una clara tendencia a aumentar a medida que el contenido de residuo en la

pasta se incrementa, debido a que durante la cocción los carbonatos contenidos en el residuo reaccionan (desprendiendo CO_2 y formando poros), provocando un aumento de la porosidad.(14)

Una de las conclusiones fundamentales a la que arriba el referido autor es que el uso de los carbonatos como adición en las mezclas arcillosas se justifica sobre la base de la cocción a temperaturas más bajas (ahorro energético) y reducción de costos de materia prima (introducción de un residuo sin costo), dado que el CaCO_3 reacciona fácilmente con los filosilicatos y con el cuarzo, y proporciona compacidad a las piezas (probetas cerámicas); con esta adición se originan composiciones mineralógicas similares a las obtenidas con margas o arcillas carbonatadas. (14)

2.11.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA REACCIÓN.

Para que la acción fundente del carbonato de calcio se haga realidad y sea efectiva en la masa de arcilla, hay que tener en cuenta la influencia de tres factores fundamentalmente:

1. El tamaño de los granos.
2. La temperatura de cocción.
3. El porcentaje de adición o de presencia en la composición química de las arcillas.

2.11.3.1 El tamaño de granos.

Para que el carbonato de calcio actúe como fundente, el tamaño del grano debe ser inferior a 64 micras (Pasa por el tamiz #100) para que se combine químicamente con esta durante la etapa de cocción y por medio de la sinterización (sinterización vítrea que produce el contacto entre las partículas) se formen, a partir de los 850°C aproximadamente, nuevas fases mineralógicas: la Gehlenita y la Anorthita. El Carbonato de calcio que no se combina con la arcilla se convierte

en CaO; este a su vez, en presencia de humedad, reacciona rápidamente y se convierte en Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); esta reacción es exotérmica y causa un considerable aumento de volumen. La Portlandita formada ejerce una gran presión de cristalización en los espacios confinados del ladrillo previamente ocupados por el CaO, lo que produce fracturas radiales alrededor de los granos de carbonato. Este es el efecto conocido como “lime blowing” ya referido, que se hace más agudo cuando los granos de Carbonato de calcio son mayores que 1 mm. (29)

2.11.3.2 La temperatura de cocción.

Los carbonatos de calcio y de magnesio finamente molidos son agentes fundentes dentro de la masa de arcilla. Sin embargo a la temperatura de quema de 1000°C , la influencia de los carbonatos como agentes fundentes se elimina. (11)

2.11.3.3 El porcentaje de adición o de presencia en la composición química de las arcillas.

En la mayoría de los casos, específicamente en la producción de ladrillos, el CaCO_3 no se adiciona a la mezcla, sino que está presente en la arcilla formando parte de esta. Para que no influya negativamente en las propiedades finales no debe estar presente en la composición química de la arcilla en más de un 25%. (11)

Cuando se adiciona a la mezcla se considera que esta adición no debe ser mayor del 10% en peso. (34)

Los refractarios varían en su composición de acuerdo con el uso que se requiera; en general estas arcillas se requieren para elaborar refractarios del tipo silicoaluminosos y aluminosos.

2.12 TRANSFERENCIA DE CALOR

De acuerdo a la segunda ley de la termodinámica, el calor pasa siempre de las regiones de mayor temperatura a las de temperatura más baja. De este modo dos objetos, aislados térmicamente con respecto a otros objetos, se aproximan gradualmente a una temperatura final común.

Proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. (3)

El calor se transmite de un lugar a otro de tres maneras diferentes:

- Por conducción entre cuerpo sólidos en contacto
- Por convección en fluidos (líquidos o gases)
- Por radiación a través del medio en que la radiación pueda propagarse

2.12.1 CONDUCCIÓN

La conducción es el transporte de calor a través de una sustancia y tiene lugar cuando se ponen en contacto dos objetos a diferentes temperaturas. El calor fluye desde el objeto que está a mayor temperatura hasta el que la tiene menor. La conducción continúa hasta que los dos objetos alcanzan a la misma temperatura (equilibrio térmico).

Podemos explicarlo si tenemos en cuenta las "colisiones de las moléculas". En la superficie de contacto de los dos objetos las moléculas del objeto que tiene mayor temperatura, que se mueven más deprisa, colisionan con las del objeto que está a

menor temperatura, que se mueven más despacio. A medida que colisionan, las moléculas rápidas ceden parte de su energía a las más lentas. (3)

Estas a su vez colisionan con otras moléculas contiguas. Este proceso continúa hasta que la energía se extiende a todas las moléculas del objeto que estaba inicialmente a menor temperatura. Finalmente alcanzan toda la misma energía cinética y en consecuencia la misma temperatura.

Los sólidos son mejores conductores que los líquidos y éstos mejor que los gases. Los metales son muy buenos conductores del calor, mientras que el aire es un mal conductor.

Ley de FOURIER.- es la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo. El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material.

$$Q = -KA \left(\frac{dT}{dX} \right) \quad \text{Ec. 2.12.1-1}$$

Donde:

Q = rapidez de transferencia de calor por conducción.

K = Conductividad térmica constante de proporcionalidad valor característico para cada material en función de la temperatura

dT/dX = Gradiente de temperatura

X = espesor de cada refractario

A = Área de su sección transversal al flujo de calor

Mientras mayor la conductividad térmica, mejor conductor de calor es el material en consideración. Los metales son buenos conductores de calor, con k del orden de 10^3 a 10^4 veces más grandes que buenos aislantes, como lana mineral. El aire es un buen aislante. Ello explica la eficacia en evitar la transmisión de calor por conducción.(1)

Es importante que el aire permanezca sin movimiento, puesto que es en ese caso que sirve como aislante térmico. El aire en movimiento transporta calor, por lo que no sirve como aislante térmico.

Usualmente se tiene que la temperatura ambiente es menor que la temperatura del horno. En ese caso el horno trata de no perder calor a través del refractario. Hay casos, sin embargo, en que se tratan de no ganar calor a través del refractario. Si el horno, por ejemplo, debe permanecer en un ambiente en que la temperatura ambiente es mayor que la de su cuerpo, él debería recibir calor a través del refractario. A fin de evitar este calentamiento adicional, en ese caso el horno eleva la temperatura de su cuerpo, disminuyendo de ese modo dT , y evitando un transporte excesivo de calor desde el ambiente hacia su cuerpo.

2.12.2 CONVECCIÓN

En los líquidos y en los gases el calor se propaga por convección. Las moléculas calientes de un líquido o de un gas tienen tendencia a elevarse, mientras que las moléculas frías tienden a descender. Así, se forman unas corrientes, llamadas de convección, que ayudan a transportar el calor a todas partes.

La transferencia de calor por convección implica el transporte de calor a través de una fase y el mezclado de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Además, con frecuencia involucra también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido.

Existe una diferencia entre la transferencia de calor por convección forzada en la que se provoca el flujo de un fluido sobre una superficie sólida por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico y la convección libre o natural, en la cual un fluido más caliente o más frío que está en contacto con la superficie sólida, causa una circulación debido a la diferencia de densidades que resulta del gradiente de temperaturas en el fluido.

El fluido próximo a una fuente de calor se calienta y se dilata ligeramente, haciéndose más liviano que el fluido más frío de las capas superiores. Sube, entonces, y es reemplazado por fluido más frío y más pesado. Cuando el fluido más caliente llega a las partes más frías del recipiente, se enfría, se contrae, y comienza a caer de nuevo.
(1)

No es posible, en general, escribir una ecuación simple que relacione el flujo de calor por convección a gradientes de temperatura u otros parámetros termodinámicos. cada caso debe tratarse por separado.

En aire quieto, la tasa de transmisión de calor por convección desde una superficie de área

A está dada aproximadamente por la fórmula empírica

$$Q = hc A \Delta T$$

Ec. 2.12.2-1

Donde: ΔT es la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire lejano a ella. La constante de transmisión de calor por convección hc q depende de la forma y la orientación de la

superficie y también de ΔT , es decir, del rango de temperaturas de trabajo.

2.12.3 RADIACIÓN

Tanto la conducción como la convección requieren la presencia de materia para transferir calor. La radiación es un método de transferencia de calor que no precisa de contacto entre la fuente de calor y el receptor. No se produce ningún intercambio de masa y no se necesita ningún medio material para que se transmita.(1)

La radiación se produce cuando los electrones situados en niveles de energía altos caen a niveles de energía más bajos. La diferencia de energía entre estos niveles se emite en forma radiación electromagnética. Cuando esta energía es absorbida por los átomos de una sustancia los electrones de dichos átomos "saltan" a niveles de energía superiores.

La energía total radiada por un cuerpo caliente es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura expresada como temperatura absoluta. $E = \text{cte} \cdot T^4$

$$Q_{rd} = \sum aA \sigma \left[\left(\frac{T_p - T_a}{100} \right)^4 \right] \quad \text{Ec. 2.12.3-1}$$

$$Q_{rd} = \sum aA \sigma \left[\left(\frac{T_p + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad \text{Ec. 2.12.3-2}$$

Donde: Q_{rd} = Calor disperso por radiación.

a = Emisividad total de la sección transversal

A = Área de la sección transversal

σ = factor de radiacion constante de Stefan-Boltzman 5.77×10^{-8}
para Q_{rd} en kW ó 4.96 para obtener Q_{rd} en kcal/h

Un cuerpo negro se define como aquel que absorbe todo el calor que cae sobre él.

2.13 GENERACIÓN DE ENERGIA TÉRMICA

2.13.1 CALOR SENSIBLE Y LATENTE

Cuando aplicamos calor a una sustancia y esta responde aumentando la temperatura estamos aplicando calor sensible. Cuando aplicamos calor a una sustancia y esta no aumenta la temperatura pero si cambia de estado estamos aplicando calor latente.(1)

2.13.2 CALOR SUMINISTRADO AL HORNO (Q)

El calor suministrado al horno debe ser mayor que el teórico, ya que el material a cocerse absorberá calor hasta la fundición del esmaltado. El calor suministrado en exceso, será considerado en perdidas que se verificaran a continuación en el detalle del horno de rodillos.

La cantidad de calor que genera el combustible se calcula de la siguiente manera que es necesaria para la combustión completa. La naturaleza del calor transferido es Sensible, ya que es la cantidad de calor en una variación de temperatura sin que haya cambio de estado físico, matemáticamente la ecuación que rige este fenómeno es la siguiente:

$$Q_s = m. C_p. \Delta T \quad \text{Ec.} \quad 2.13.2-1$$

$$Q_s = m. C_p (T^s - T^a) \quad \text{Ec.} \quad 2.13.2-2$$

Donde: Q_s = Cantidad de calor que sale arrastrado por el material , en Kcal/Kg cocido.

m = masa del material, en Kg material/Kg cocido.

C_p = capacidad calorífica del material, en Kcal/Kg C

T_s = temperatura del material a la salida, en 54 °C

T_a = temperatura ambiente, 21 °C

Unidades de medida: el calor es una forma de energía, por lo tanto sus unidades

Fundamentalmente son:

Cantidad de calor:	Q	Joule (J)
Flujo de calor:	q	Watt o Joule por segundo (W)
Conductividad térmica:	l	Watt por metro kelvin (W/m ² K)
Temperatura:	T	Kelvin o grados Celsius (°K) o (°C)

En algunos casos se sigue utilizando la caloría “cal” como unidad de calor, la equivalencia con las anteriores es:

$$\boxed{1 \text{ Kilocaloría/hora} = 1,1628 \text{ W}} \quad \text{Ec. 2.13.2-3}$$

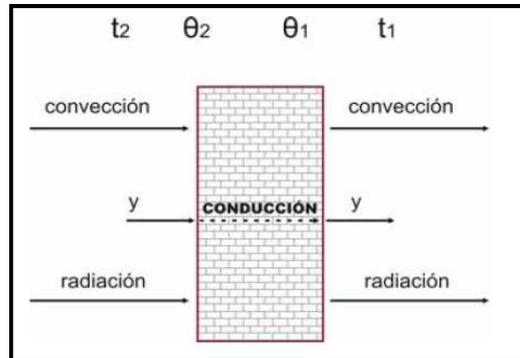
2.13.3 TRANSMISIÓN TOTAL DEL CALOR

En los casos prácticos la transmisión de calor ocurre.

Generalmente, como una conjunción de dos o de las tres formas de transmisión simultáneamente.

FIGURA 2.13.3-1

Transmisión de calor entre dos ambientes



Fuente: Fuente: Norton, F. H. (1975).

Por ejemplo, la transmisión del calor entre dos ambientes con distintas temperatura separado por una pared sólida, se produce de la siguiente manera:

En estado de régimen la cantidad de calor que se transmite en cada uno de los tres procesos: (convección y radiación, conducción, convección y radiación) será la misma aunque referida a temperaturas distintas: t_2 a θ_2 para el primero, θ_2 a θ_1 para el segundo y θ_1 a t_1 para el tercero.

Pero ante la dificultad de medir las temperaturas intermedias se relaciona el flujo del calor con las temperaturas de los ambientes.

Los coeficientes de convección y radiación: h_r y h_c actúan simultáneamente en el aire en.

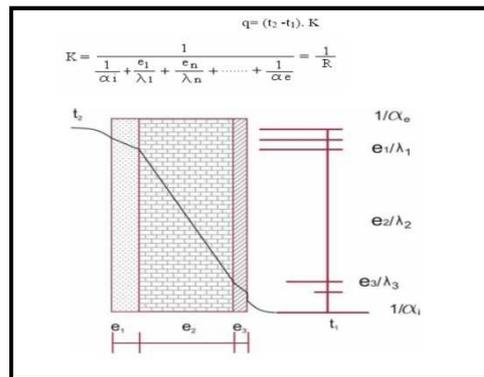
Contacto con las superficies, por lo tanto se los reúne en un único coeficiente de transmisión "a" que a una sus efectos y es llamado de conductancia superficial. Este coeficiente involucra todos los factores que intervienen y varía según se considere la superficie exterior "ae" o la superficie interior "ai".

Su valor numérico ha sido determinado por ensayos.(1)

Resumiendo podemos decir que la transmisión total de calor del exterior al interior, o viceversa, depende de la diferencia de temperatura, de las conductancias superficiales y de la conductibilidad del o los materiales, expresándose:

FIGURA 2.13.3-2

Transmisión total de calor del exterior al interior



Fuente: Norton, F. H. (1975).

Siendo: **q**: flujo de calor por unidad de superficie y de tiempo W/m^2

($T_2 - T_1$): diferencia de temperatura de los ambientes

K: coeficiente de transmitancia térmica. W/m^2K

R: resistencia al paso del calor. m^2K/W

El coeficiente “K” de transmitancia térmica puede definirse como “la cantidad de calor que transmite un cerramiento en estado de régimen, por metro cuadrado de superficie, por hora y por gradiente unitario de temperatura entre los ambientes interior y exterior”.

A título orientativo se presenta un cuadro comparativo de los valores de transmitancia térmica “K” de los cerramientos verticales más usuales en nuestro medio. Cabe acotar que los valores de “K” aquí suministrados han sido extraídos de la norma IRAM 11.601

y que los mismos corresponden a un muro con revoque de 1,5 cm de espesor en cada paramento.

En la norma IRAM 11.605 se establecen los valores máximos de “K” para tres niveles de confort higrotérmico (A, B y C) exigiendo la Secretaría de Vivienda de la Nación con carácter de obligatorio el cumplimiento del nivel “C”.

En las viviendas ejecutadas a nivel particular su observancia no es obligatoria.(1)

Se establecen en la citada norma valores máximos admisibles de transmitancia térmica K para las condiciones de invierno y verano. La verificación debe realizarse para ambas condiciones.

Para la condición de invierno es necesario conocer la temperatura exterior de diseño llamada temperatura mínima de diseño (TDMN) que se obtiene para cada localidad del país mediante la norma IRAM 11603.

2.14 CALOR EN EL AIRE INDIRECTO DE COMBUSTIÓN INTRODUCIDO EN EL HORNO.

Es el calor sensible que viene introducido en el horno en las zonas de precalentamiento y cocción a través del aire de combustión (introducido forzosamente a los quemadores).

Se refiere al balance térmico a la temperatura ambiente, que permite considerar solo el contenido térmico del aire de combustión. El aire de combustión es precalentada, mediante el sistema de recuperación del calor del horno mismo a través del aire caliente del enfriamiento rápido.

$$Q_{A, Comb.} = V_{A.C.} \times C_{pA.C.} (T_{A, Comb} - T_a)$$

Ec. 2.14-1

2.15 CALOR DEL AIRE CALIENTE

El aire caliente es proviene de las zonas de enfriamiento natural y enfriamiento final, donde el material cocido empieza a enfriarse. Este calor es totalmente dispersado al medio ambiente.

2.16 RESISTENCIA TOTAL

Para los cálculos de la transferencia de calor de una pared se utiliza un coeficiente de transferencia de calor total, que tiene en cuenta los fenómenos indicados y permite simplificar dichos cálculos.

El coeficiente de transmitancia total **K** se la cantidad de calor en Kcal, que se transmite en una hora a través de un m² de superficie, existiendo una diferencia de temperatura de 1°C entre el ambiente interno y externo.

$$Q = K.A.(T_1 - T_2)$$

Ec. 2.16-1

Donde:

Q: Cantidad de calor que se transmite (Kcal/h)

K: Coeficiente de transmitancia térmica (Kcal/h.m².°C). Según tablas.

A: Área (m²).

T₁: Temperatura del aire en la cara más caliente (°C).

T₂: Temperatura del aire en la cara más fría (°C).

Determinación del coeficiente de transmitancia total K

Para el cálculo de transmitancia total K, se emplea la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \dots + \frac{1}{\alpha_e}$$

Ec. 2.16-2

Se denomina resistencia total $R_t = 1/K$

Las inversas de α , se denominan resistencias superficiales.

$$R_{si} = \frac{1}{\alpha_i} \quad \text{y} \quad R_{se} = \frac{1}{\alpha_e}$$

Ec. 2.16-3

Donde: α_1, α_2 : coeficiente de conductibilidad térmica (Kcal/m.h.°C).

R_{si} : coeficiente superficial interior (Kcal/h.m².°C).

R_{se} : coeficiente superficial exterior (Kcal/h.m².°C).

K : coeficiente de transmitancia térmica total (Kcal/h.m².°C).

R_t : resistencia a la transmitancia térmica total (m³.h.°C/Kcal).

R_{si} : resistencia superficial interior (m³.h.°C/Kcal).

R_{se} : resistencia superficial exterior (m³.h.°C/Kcal).

e : espesor de los materiales (m).

De esa manera, la ecuación será:

$$R_t = \frac{1}{k} = R_{si} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \dots + R_c + R_{se}$$

Ec. 2.16-4

R_c : resistencia del aire que se opone al paso de calor. Es importante que el aire permanezca sin movimiento, puesto que es en ese caso que sirve como aislante térmico, el aire en movimiento transporta calor, por lo que no sirve como aislante térmico. Usualmente se tiene que la temperatura ambiente es menor que la temperatura del horno. En ese caso el horno trata de no perder calor a través del refractario.

Tabla 2.16-1

Composición de materiales

Composición	Calor de reacción Kcal/kg	Porcentaje %
Arcilla (silico-aluminato)	150	71.62
CaCO ₃	425	2.39
FeCO ₃	120	7.68
MgCO ₃	284	1.30
Humedad	539	6.5

Fuente: Betancourt, Dania (2008)

2.17 PÉRDIDAS EN LA SALIDA DEL MATERIAL COCIDO (Q_s)

El material al haber alcanzado la máxima temperatura de cocción, empieza a perder calor apenas entra a la zona de enfriamiento. Este calor que el material cocido va perdiendo, se determina de la siguiente manera:

El aire del enfriamiento rápido reentra en la zona de precalentamiento y cocción como aire de combustión, constituyendo no una pérdida sino una recuperación interna en el horno que se evita dar más calor.

El aire caliente del enfriamiento natural y final es dispersado en el medio ambiente, pudiendo darse una utilidad en algún otro proceso y no considerarse una pérdida neta.

La pérdida propiamente dicha esta constituido por el calor que lleva el material cocido al momento de abandonar el horno, puesto que dicha cantidad de calor es totalmente dispersado en el ambiente.(1)

2.18 SECADO

Se entiende por secado la Operación unitaria en la industria mediante la cual se puede secar total o parcialmente el líquido que contiene un sólido húmedo por evaporización en una corriente gaseosa: normalmente se efectúa por convención de un fluido caliente que atraviesa al producto eliminando la humedad contenida en este. El secado es una operación que implica transferencia de calor y masa simultáneamente. El término secado es relativo y significa solamente que hay una reducción en el contenido de humedad desde el valor inicial hasta el valor final.(3)

2.19 HUMEDAD (X):

Se entiende por humedad de un sólido, el peso de agua que acompaña a la unidad de peso de sólido seco, o a la cantidad de vapor acuoso contenida en alguna sustancia.

Al contenida de humedad de un sólido se lo puede expresar a base seca o base húmeda, en los cálculos de secado es más conveniente sugerir la humedad a base seca, debido a que esta permanece constante a lo largo del fenómeno de secado.(1)

2.19.1 BASE HÚMEDA

$$\boxed{BaseHúmeda = \frac{MH_2O}{MSH}}$$

Ec. 2.19-1

Donde: MH_2O = Masa de agua

MSH= Masa de sólido húmedo

2.19.2 BASE SECA

$$BaseSeca = \frac{MH_2O}{MSS}$$

Ec. 2.19-2

Donde: MH_2O = Masa de agua

MSS = Masa de sólido seco

CAPÍTULO III

PARTE EXPERIMENTAL

CAPITULO III

3 PARTE EXPERIMENTAL

En el presente trabajo experimental se aborda el tema de la reducción de la energía para la cocción de los ladrillos con pequeñas adiciones de carbonato de calcio (CaCO_3) finamente molido. Para lo cual se hace necesario estudiar el comportamiento de los materiales que forman parte del producto y además realizar ensayos de calidad, comparando siempre su desempeño con muestras elaboradas bajo los mismos parámetros de fabricación pero sin adición. (100 % arcilla sin aditivo).

3.1 DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE COCCIÓN EN LA LADRILLERA DE CHAMBO

3.1.1 LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

Medición de Temperatura, Tiempo y Toma de muestras:

Horno artesanal utilizado en la ladrillera del Sr Cristóbal Guamán del Cantón Chambo.

La muestra del Carbonato de Calcio que se utilizó como aditivo se obtuvo del molino de propiedad de la Red Eco Sur ubicada en Riobamba.

Análisis Físico-Químicos de la Materia Prima:

Realizados a la materia prima y al aditivo. Los análisis utilizados fueron físico-químicos y se realizaron de la siguiente manera:

Laboratorio de Análisis Técnicos (Facultad de Ciencias).

Laboratorio de Control de Calidad (Empresa Cemento Chimborazo)

3.1.2 TOMA DE MUESTRA: DE MATERIAS PRIMAS

PRINCIPIO DEL MÉTODO

Tomar la muestra de un lote a inspección de cada uno de los materiales a utilizar en la preparación de la mezcla para elaborar los ladrillos.

LUGAR

Ladrillera

PROCEDIMIENTO

De cada uno de los materiales, se realiza un muestreo y se procede a obtener la muestra por cuarteo para el análisis físico. Seguidamente se realiza lo siguiente.

- Se toma una muestra del sitio que mas se aproxime al centro del terrón para determinar su humedad y sus componentes.
- Se verificara que el tamaño de los terrones sea inferior a 20 cm. Entre sus aristas más distantes.
- El color del material deberá ser parecido al que se usa en la producción diaria.
- Se debe verificar que haya ausencia total de material orgánico visible así como también piedras con características diferentes al de la materia prima.
- Las muestras serán llevadas al laboratorio para su respectivo análisis

REPORTE

Se analizaran los resultados obtenidos de los análisis y se procederá a la elaboración de la mezcla de las materias primas.

3.1.3 DOSIFICACIONES EMPLEADAS EN EL EXPERIMENTO

A la hora de elaborar las muestras en el laboratorio, la medición de los materiales se realizó en peso de acuerdo a la proporción usada en cada una de las series. En el caso de la producción real es imposible dosificar en peso por dos razones fundamentalmente: la primera, por la ausencia de equipos de medición de gran capacidad en las fábricas de ladrillos y la segunda por el gran volumen de arcilla y de otros materiales que se le pueden adicionar a esta; por tanto, la dosificación de la mezcla se realiza en la gran mayoría de los casos en volumen; quiere decir que los porcentajes de adición (2% y 5%) identificados como más adecuados según teoría a escala de laboratorio, se convirtieron en esta escala productiva a volumen.

3.1.4 VARIABLES DE PROCESO

Los parámetros a medir son la temperatura y el tiempo los cuales no están sujetos a normas:

3.1.4.1 MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN EL HORNO

La temperatura es una variable importantísima dentro del proceso de cocción de los ladrillos ya que de acuerdo a esta se determinara la temperatura real de cocción y las medidas correctivas a tomar para mejorar el proceso y por ende el producto.

Si los ladrillos se queman a una temperatura inferior a la óptima se verifica un producto pálido y crudo.

Por otro lado, si la temperatura es demasiado alta, existe un producto quemado y no apto para su ventase.

Entonces para que el ladrillo culmine su proceso de cocción según teoría será una Temperatura optima a 900 °C el mismo que cumpla con las normas de calidad establecido para ladrillos de cerámica roja.

3.1.4.2 MEDICIÓN DEL TIEMPO DE COCCIÓN EN EL HORNO

De acuerdo al tiempo se puede indicar cuál es el rango de cocción y como reducir el mismo para aumentar la utilidad sin dañar calidad y además utilizar menor combustible que en la actualidad además de deforestar el medio ambiente constituye un factor importantísimo en el análisis económico.

TABLA 3.1.4.2-1

Datos Obtenidos en el Horno

ZONAS DEL HORNO	TIEMPO (horas)	TEMPERATURA (°C)
Pared Intermedia	24	650
Pared baja	24	420
Pared Alta	24	536
Pared Intermedia	36	834
Pared Baja	36	658
Pared Alta	36	794
Pared Externa	36	500
Pared Intermedia	48	750
Pared Alta	47	690
Pared Alta	48	700
Pared Baja	48	565
Pared externa	48	650

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

3.1.5 VARIABLES DE CALIDAD

Los ladrillos fueron sometidos a los ensayos de calidad: Resistencia a la compresión, Absorción y Determinación de la masa y Dimensiones; ensayos de calidad establecidos por la norma **NTE INEN 0155:87**

Los ensayos fueron realizados basados en los manuales de la Empresa Cemento Chimborazo y los parámetros medidos son:

TABLA 3.1.5-1

Variables de Calidad

PARÁMETRO	TECNICO
Muestreo	NTE INEN 0292:78
Absorción	NTE INEN 0296:78
Densidad	NTE INEN 0572:81
Resistencia a la Compresión	NTE INEN 0294:78

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

3.1.5.1 DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA.

Se realizaron 9 muestras con varias dosificaciones para comparar los valores con las dos dosificaciones en estudio: de las cuales se tomaron 3 para el ensayo de absorción.

1. La primera combinando 88 % de arcilla + 5% de carbonato de calcio (dosificación de mejores resultados a nivel de laboratorio) y 7% de agua.
2. La segunda 85% de arcilla y 15% de agua (muestra patrón).

PRINCIPIO DEL MÉTODO

Este ensayo se realiza con el objetivo de obtener la cantidad de agua que es capaz de absorber el material, expresada en porcentaje.

El procedimiento descrito en esta norma se basa en la determinación de las masas de una muestra de ladrillo antes y después de ser sumergida en agua, estableciéndose la diferencia entre las dos masas como base para conocer el valor de la absorción de la humedad.

MATERIALES

- Estufa
- Cronómetro
- Cubetas de vidrio
- Balanza digital
- Calculadora
- Paño

PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se introducen las muestras en una estufa a temperatura de 105 a 110°C por espacio de 24 horas
- Posteriormente se dejan enfriar durante 5 minutos
- Se pesan determinando su masa (masa seca).

- Se colocan las muestras de canto en un recipiente y se cubren con agua hasta aproximadamente 5 cm. por encima de estas manteniéndolas sumergidas durante 24 horas
- Posteriormente se extraen y se secan superficialmente con un paño y
- Seguidamente se pesan determinándose su masa (masa húmeda).

CÁLCULOS

La absorción de cada muestra se calcula por la fórmula siguiente:

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} * 100, (\%)$$

Ec. 3.1.5.1-1

Donde: A: Absorción de agua del ladrillo, (%).

M_1 : Masa seca del ladrillo, (Kg.).

M_2 : Masa húmeda del ladrillo, (Kg.).

3.1.5.2 DENSIDAD APARENTE

De las muestras antes mencionadas se toman 3 para realizar el ensayo de densidad

PRINCIPIO DEL MÉTODO

El objetivo principal de este ensayo es conocer la relación existente entre la masa y el volumen de las muestras.

MATERIALES

- Balanza digital
- Calculadora

- Flexómetro

PROCEDIMIENTO

- Tomar el peso de cada una de las muestras después de realizada la quema
- Se miden sus dimensiones para hallar su volumen.

CÁLCULOS

El cálculo de la densidad se hizo de la siguiente manera:

$$D = \frac{m(g)}{V(cm^3)}, (g/cm^3).$$

Ec. 3.1.5.2-1

Donde: D: Densidad del ladrillo, g/cm³

m: Masa seca del ladrillo, (g.).

V: Volumen del ladrillo (cm³)

3.1.5.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Se tomaron 3 ladrillos para realizar el ensayo

PRINCIPIO DEL MÉTODO

El método consiste en someter cada ladrillo de la muestra a una carga de compresión en dirección perpendicular a las caras mayores del mismo y determinar la carga en el momento de la rotura. Este ensayo se realiza consecutivamente a la quema.

MATERIALES

- Máquina de ruptura a la compresión
- Calculadora

PROCEDIMIENTO

- Cada ladrillo a ensayar se coloca suavemente sobre el plato inferior de la máquina para ensayos a la compresión sin deslizarlo por este, haciendo coincidir el eje geométrico del ladrillo con el eje de carga de la máquina.
- La operación de poner en contacto la cara superior del ladrillo con el plato superior de la máquina para ensayos a la compresión se hace suavemente, sin que se produzcan impactos al ladrillo. Se debe garantizar un buen contacto entre ambas superficies.
- En el momento en que la superficie de la cara superior de la máquina y el ladrillo tengan un buen contacto, se comienza a aplicar la carga a una velocidad de aproximadamente 80 N/s (800 Kgf/s) hasta la rotura, con lo que se obtiene un valor de resistencia a compresión a las 24 horas.

CÁLCULOS

La fórmula es la siguiente:

$$R = \frac{Rup.(Kn)}{A(cm^2)} * 10; (MPa)$$

Ec. 3.1.5.3-1

Donde: R: resistencia de las muestras en MPa.

Rup: Valor de fallo de la muestra en Kn.

A: Área de la muestra en cm²

3.1.5.4 CARACTERÍSTICAS DEL LADRILLO

Para el experimento se utilizó un molde tradicional metálico para ladrillos macizos; a partir de este molde se tomaron las medidas a los respectivos ladrillos.

3.1.5.5 DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES

Este método consiste en medir con ayuda del pie de rey las dimensiones de cada ladrillo que constituye la muestra de ensayo y determinar el promedio de cada una de las dimensiones. Es establecida por la Norma NTE 0570:81

3.1.5.6 DETERMINACIÓN DE LA MASA

Este método se establece para determinar la masa de los ladrillos. Para ello se utilizó la pesada simple, es decir, la pesada de cada ladrillo que constituye la muestra de ensayo para determinar la masa. La misma se conservó a temperatura ambiente bajo techo y en una superficie plana. Se colocó cada ladrillo de la muestra sobre el plato, evitando la pérdida de masa por manipulación incorrecta, y se realizó la correspondiente pesada.

CAPÍTULO IV

CÁLCULOS Y RESULTADOS

CAPÍTULO IV

4.1 CÁLCULOS Y RESULTADOS

4.1.1 DATOS OBTENIDOS DEL HORNO ARTESANAL

TABLA. 4.1.1-1

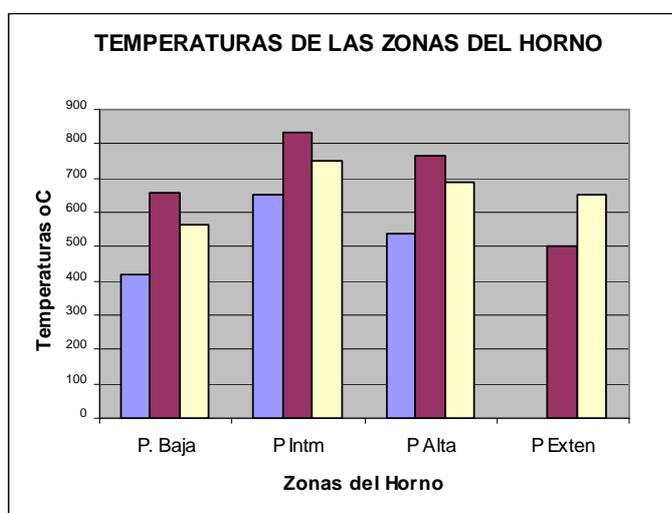
Datos de temperatura del horno artesanal

Tiempo h	P. Baja	P Intrm	P Alta	P Exten
24	420	650	536	
36	658	834	794	500
48	565	750	690	650

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

FIGURA 4.1.1-1

Temperaturas de las zonas del horno



Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

El aditivo utilizado en el experimento se trata del carbonato de calcio (CaCO_3), usado de la marmolería de la Red Eco Sur.

4.1.2 CARACTERIZACIÓN DEL ADITIVO

Los resultados obtenidos se indican en la siguiente tabla.

TABLA. 4.1.2-1

Composición química de la arcilla y de la piedra caliza.

Determinación (%)	Caliza	Arcilla
SiO ₂ (%)	2.72	54,88
Al ₂ O ₃ (%)	0.34	14,2
Fe ₂ O ₃ (%)	0.43	9,29
TiO ₂ (%)	0,02	0,52
CaO (%)	53.77	3,35
MgO (%)	0.58	5,69
Na ₂ O (%)	0.25	2,52
K ₂ O (%)	0.10	0,7
SO ₃ (%)	0.07	0,06
PPC (%)	41.19	5.36

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.1.3 RESULTADO DEL ENSAYO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA A LAS MATERIAS PRIMAS.

Composición Química de las Materias Primas. Realizadas en la empresa Cemento Chimborazo.

4.1.3.1 TIPO: ARCILLA (Tierra Negra)

TABLA. 4.1.3.1-1

Composición química de la arcilla

#	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂ (%)	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Suma	PPC
Mtra.	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(%)		(%)
M-P	62.32	16.69	5.55	0.69	5.97	1.64	2.18	1.21	96.25	
M-1	61.07	16.36	5.44	0.68	5.85	1.61	2.14	1.19		5.36

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

$$(\%) \text{Al}_2\text{O}_3 = \sum \text{componentes} - \text{PPC} \quad \text{Ec. 4.1.3.1-1}$$

$$(\%) \text{Al}_2\text{O}_3 = 94.34 - 5.36$$

$$(\%) \text{Al}_2\text{O}_3 = 88.98$$

$$\text{PPC} = 5.36$$

4.1.3.2 TIPO: CARBONATO (De Calcio)

TABLA. 4.1.3.2-1

Composición química de la piedra caliza

#	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	SO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Suma	PPC
Mtra.	(%)	(%)	3 (%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		(%)
M-B	2.78	0.35	0.43	0.07	54.87	0.59	0.25	0.10	59.44	
M-2	2.72	0.34	0.43	0.07	53.77	0.58	0.25	0.10		41.19

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

$$(\%) \text{CaCO}_3 = \sum \text{componentes} - \text{PPC} \quad \text{Ec. 4.1.3.2-1}$$

$$(\%) \text{CaCO}_3 = 92.1 - 41.19$$

$$(\%) \text{CaCO}_3 = 50.91$$

$$\text{PPC} = 41.19$$

Leyenda:

M-1: Arcilla (Tierra negra utilizada para fabricar ladrillos)

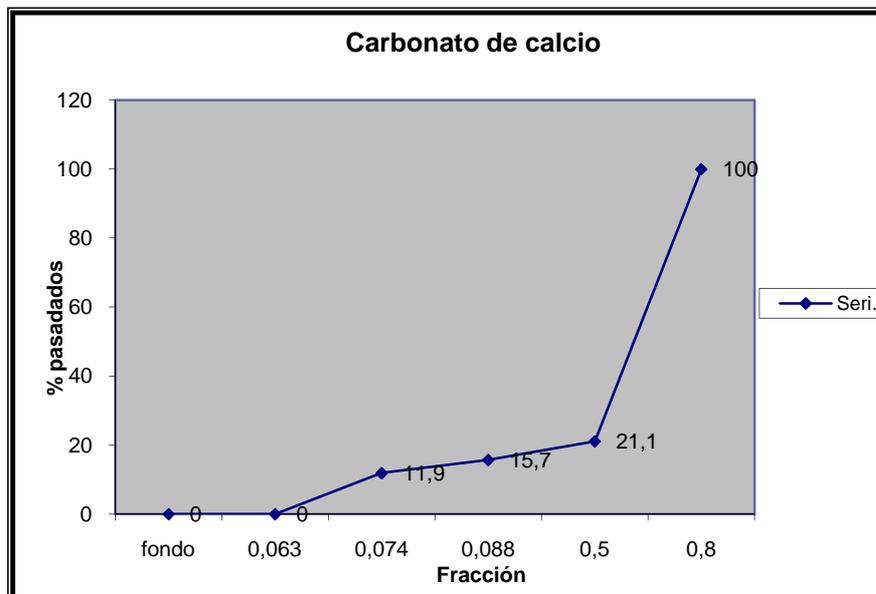
M-P: Arcilla utilizada en la producción de cemento.

M-2: Carbonato de Calcio utilizado como aditivo.

M-B: Carbonato utilizada en la producción de cemento.

4.1.4 CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS.

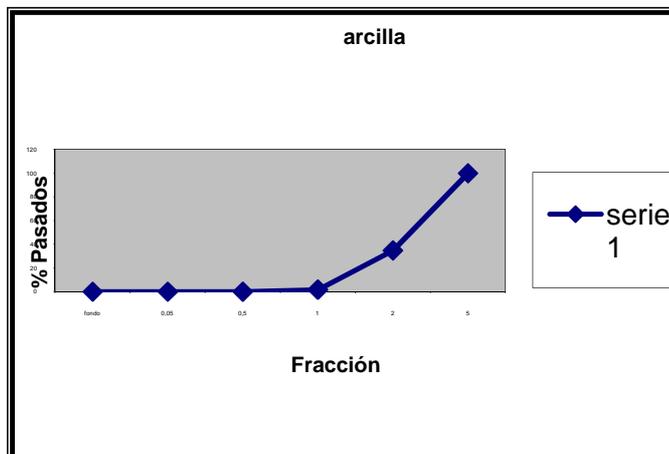
FIGURA 4.1.4-1
Curva del Carbonato de Calcio



Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

FIGURA 4.1.4-2

Curva de la arcilla



Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.1.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA A LAS MATERIAS PRIMAS

El Carbonato de calcio utilizado para el experimento es proveniente de la marmolera que trabaja en sociedad con la Red Eco Sur.

Los métodos de determinación utilizados fueron gravimétricos y se realizaron en los “Laboratorios de análisis técnicos” de la Facultad de Ciencias de la “Escuela Superior Politécnica de Chimborazo” (ESPOCH). En lo que se refiere al Carbonato de Calcio el ensayo de finura por el tamiz #100 (Tamaño de partícula 60 micras), el resultado fue que pasó el 100% de la muestra ensayada (500g).

TABLA. 4.1.5-1

Composición química del Carbonato de Calcio

Determinación	Unidades	Resultados
Material insoluble en ácido (Sílice)	%	6.4
Carbonato de Calcio.	%	86.0
Óxido de Calcio.	%	66.7
Óxidos de Hierro y Aluminio.	%	2,3

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA. 4.1.5-2

Ensayo de análisis químico a la arcilla

Determinación	Resultados %
Sílice total.	89,7
Carbonato de Calcio.	54.78
Óxido de Calcio.	5.79
Óxidos de Hierro y Aluminio.	9,6

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.1.6 MEDICIÓN DE LA CANTIDAD DE LEÑA UTILIZADA EN LA QUEMA

El tipo de leña empleada es de Eucalipto.

CÁLCULOS

Para calcular la cantidad de leña utilizada en el cargue se determina que:

1 Tarea = 2m³

$$\text{Combustible} = \frac{2m^3}{1\text{tarea}} * 8\text{tareas}$$

$$\text{Combustible} = 16m^3 \times \frac{350Kg}{1m^3}$$

Combustible = 5600 Kg de leña para un cargue

4.1.7 VARIABLES DE PROCESO

4.1.7.1 TEMPERATURA

La temperatura es una variable importantísima dentro del proceso de cocción porque:

De acuerdo a esta se puede obtener una idea de cómo está llevándose a cabo el proceso productivo y que medidas correctivas tomar para mejorar el mismo.

Por lo tanto si la temperatura es demasiada alta existe problemas en el producto, de igual manera si no existe un control existirían daños irreversibles en el ladrillo y por ende pérdidas económicas.

La temperatura ideal para obtener una cocción buena fue de 900°C en el horno a temperatura controlada.

Mientras que en el horno industrial solo llego a una temperatura de 794° C.

TABLA. 4.1.7.1-1

Datos Obtenidos de Temperatura

TIPO DE HORNO	TEMPERATURA (°C)	MUESTRA
Industrial	900	MP y M-2
Artesanal	794	MP y M-2

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.1.7.2 TIEMPO

El tiempo también es importantísimo en la cocción de los ladrillos ya que junto con la temperatura se puede comparar que es inversamente proporcional a la misma ya que si existe una temperatura mayor se utilizara menos tiempo para su cocción de esta manera se indica que:

TABLA. 4.1.7.2-1

Datos Obtenidos de Tiempo

TIPO DE HORNO	TIEMPO (h)	MUESTRA
Industrial	3	MP y M-2
Artesanal	37	MP y M-2

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.1.8 DOSIFICACIÓN DEL ADITIVO

Realizado en el Cantón Chambo Provincia de Chimborazo, en la ladrillera del Sr. Cristóbal Guamán

Debido a que la elaboración de los ladrillos se hizo en la ladrillera y no en el laboratorio, la medición de las materias primas se realizó de manera volumétrica. Posteriormente se llevó a cabo el mezclado en seco y mediante una pala mecanizada se transportó hacia la mezcladora mecánica, se humedeció el material, luego la mezcla se introdujo en un molino donde las partículas de tamaño no adecuado fueron trituradas junto a las materias primas. Esta mezcla se transportó al moldeado para lograr las dimensiones de los ladrillos establecidas por la norma NTE 0292 y NTE 0293 para ladrillos estándar: una vez conformados los ladrillos se llevaron hacia el lugar de secado (a la sombra) por 9 días, para luego llevarlos a cocción en un horno a temperatura controlada de 900 °C por un tiempo de tres horas.

Se decidió utilizar el 2% de adición porque en la producción real, tanto en los talleres artesanales como en las fábricas de mediana y alta tecnología, la medición de los materiales se hace de forma volumétrica. Esta manera de medir los materiales (materias primas) es aproximada y para estar del lado de la seguridad se acuerda utilizar el 2%.

Cantidad de ladrillos por combinaciones realizadas.

En el experimento se prepararon 3 series de ladrillos de 12 muestras cada una. Se designaron 6 para el ensayo de resistencia, 3 para el ensayo de absorción, 2 para el ensayo de humedecimiento-secado y 1 ladrillo seccionado en 6 partes para el ensayo de cristalización de sales.

TABLA. 4.1.8-1

Resultados de los pesos de dosificación

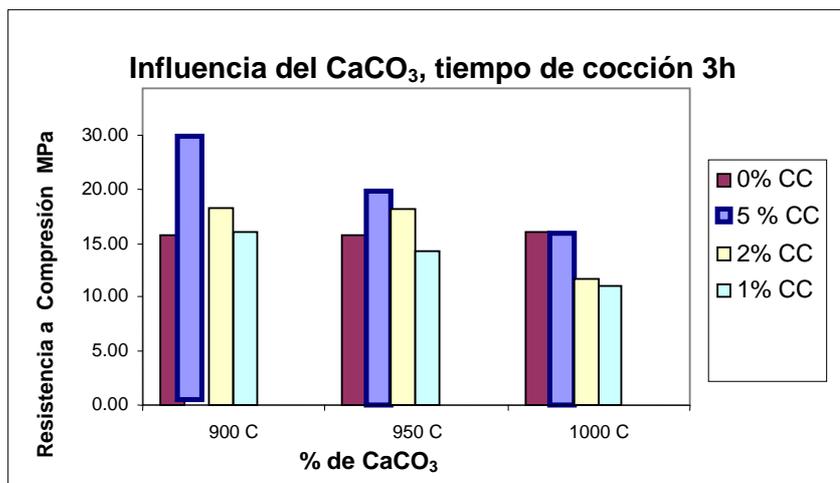
Muestra	Arcilla %	CaCO ₃ %	Agua %
Muestra Patrón	85	-	15
M-1	80	5	15
M-2	83	2	15
M-3	84	5	11
M-4	87	2	11
M-5	88	5	7
M-6	91	2	7
M-7	84	1	15
M-8	88	1	11
M-9	92	1	7

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.1.9 RESULTADOS DEL TIEMPO DE COCCION DEL
CaCO₃

FIGURA 4.1.9-1

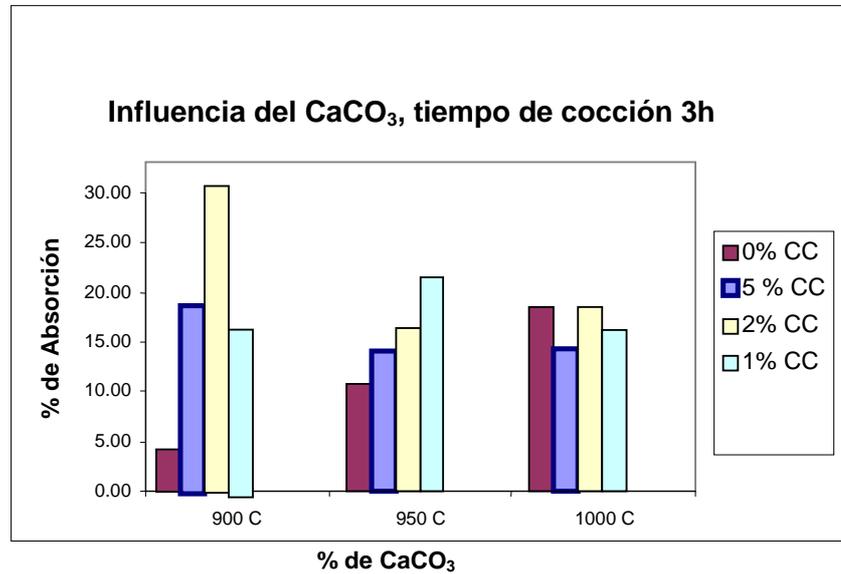
Influencia del CaCO₃ tiempo de cocción 3h Resistencia a la Compresión



Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

FIGURA 4.1.9-2

Influencia del CaCO₃ tiempo de cocción 3h Absorción



Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.1.10 RESULTADOS DE LA ABSORCIÓN

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} * 100, (\%)$$

Ec. 4.1.10-1

Donde: A: Absorción de agua del ladrillo, (%).

M_1 : Masa seca del ladrillo, (Kg.).

M_2 : Masa húmeda del ladrillo, (Kg.).

TABLA. 4.1.10-1**Resultados del ensayo de absorción con 2% de aditivo**

Muestra M-2	Peso Seco (Kg)	Peso Húmedo (Kg)	% de Absorción.	Absorción media.
1	0.143	0.186	30.07	30.09
2	0.148	0.192	29.73	
3	0.151	0.191	30.46	
4	0.151	0.197	30.45	
5	0.143	0.198	30.07	
6	0.151	0.186	29.73	
7	0.148	0.192	30.00	
8	0.147	0.192	30.07	
9	0.143	0.197	30.07	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA. 4.1.10-2**Resultados del ensayo de absorción de muestra patrón (0% de aditivo)**

Muestra MP	Peso Seco (Kg)	Peso Húmedo (Kg)	%de Absorción.	Absorción media.
1	0,154	0,160	3.9	2.1
2	0,168	0,166	1.2	
3	0,167	0,169	1.2	
4	0.154	0.160	3.9	
5	0.167	0.166	1.2	
6	0.154	0.169	1.2	
7	0.168	0.166	1.2	
8	0.167	0.160	3.9	
9	0.154	0.160	1.2	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.1.11 RESULTADOS DE DENSIDAD

$$Densidad = \frac{masa(g)}{volumen(cm^3)}, (g/cm^3).$$

Ec. 4.1.11-1

TABLA. 4.1.11-1

Resultados del ensayo de densidad de muestra con 2% de aditivo

Muestra M-2	Dimensiones (cm).	Volumen	Peso (g).	Densidad.	Densidad media.
1	5.0 x 4.9 x 5.1	117.65	147.7	1.26	1.20
2	5.1 x 5.0 x 5.1	148.88	143.0	0.96	
3	5.1 x 5.0 x 5.1	110.59	151.5	1.37	
4	5.0 x 5.0 x 5.0	148.88	143.0	0.96	
5	5.0 x 4.9 x 5.1	117.65	147.7	1.26	
6	5.1 x 5.0 x 5.1	110.59	151.5	1.37	
7	5.1 x 5.0 x 5.1	148.88	143.0	0.96	
8	5.0 x 5.0 x 5.0	148.88	143.0	0.96	
9	5.0 x 4.9 x 5.1	117.65	147.7	1.26	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA. 4.1.11-2

Resultados del ensayo de densidad de muestra patrón (0% de aditivo)

Muestra MP	Dimensiones (cm).	Volumen	Peso (g)	Densidad.	Densidad media.
2	5.0 x 5.0 x 5.0	125.00	167.9	1.43	1.22
3	4.8 x 4.9 x 5.0	117.65	168.7	1.35	
4	4.8 x 4.9 x 5.0	117.65	154.1	1.31	
5	5.0 x 5.0 x 5.0	125.00	154.1	1.31	
6	4.8 x 5.0 x 4.9	117.65	167.9	1.43	
7	5.0 x 5.0 x 5.0	125.00	154.1	1.35	
8	5.1 x 4.8 x 4.8	117.65	168.7	1.35	
9	4.8 x 4.9 x 5.0	117.65	167.9	1.43	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.1.12 RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

TABLA. 4.1.12-1

Resultados del ensayo de Resistencia a la compresión de muestra patrón 0% de aditivo

Muestra MP	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	24.01	20.88	23.58
2	24.01	26.33	
3	25.00	23.52	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA. 4.1.12-2

Resultados del ensayo de Resistencia a la compresión de muestra con 2% de aditivo

Muestra	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
M-2			
1	24.01	17.30	19.68
2	28.09	18.40	
3	23.04	23.34	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

$$A(X_A) + B(X_B) = P(X_P) + W$$

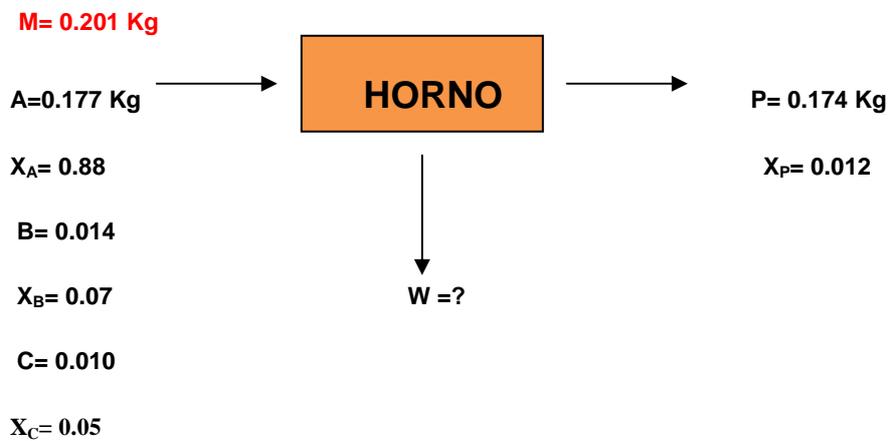
$$W = 0.123 \text{KgH}_2\text{O}$$

Donde:

- A: arcilla (Kg)
- B: agua (Kg)
- P: producto (Kg)
- W: agua (Kg)
- M: mezcla (Kg)

4.2.2 CON ADITIVO (CaCO₃)

$$\text{ENTRADA} = \text{SALIDA} + \text{ACUMULACIÓN} \quad \text{Ec. 4.2.2-1}$$



$$A + B + C = P + W$$

$$A(X_A) + B(X_B) + C(X_C) = P(X_P) + W$$

$$W = 0.155 \text{KgH}_2\text{O}$$

Donde:

- A: arcilla (Kg)
- B: agua (Kg)
- P: producto (Kg)
- W: agua (Kg)
- M: mezcla (Kg)
- C: carbonato (Kg)

4.3 CURVA DE SECADO

$$X = \frac{P_{SH} - P_{SS}}{P_{SS}}$$

Ec. 4.3-1

Donde:

- X= Humedad
- P_{SH}= Peso sólido húmedo
- P_{SS}= Peso sólido seco

TABLA. 4.3-1

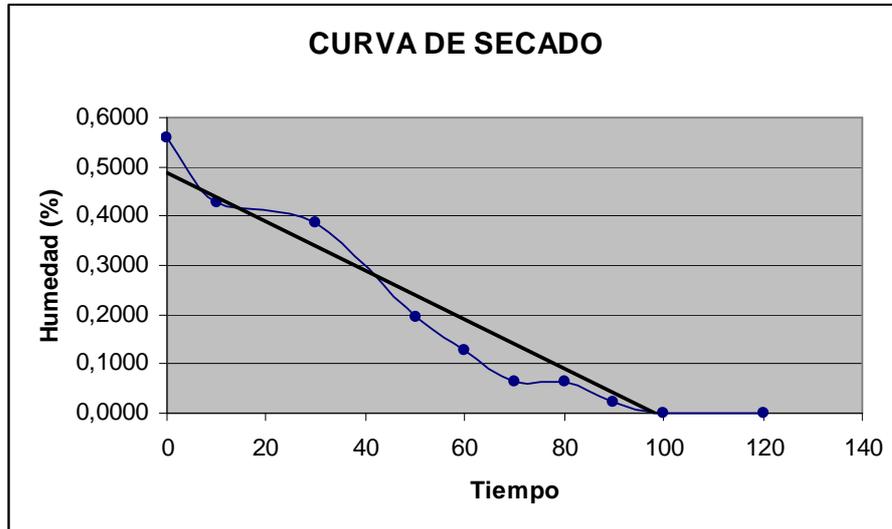
Resultados de las pruebas de Secado

Tiempo (min)	% X
0	0,5597
10	0,4268
30	0,3868
50	0,1942
60	0,1291
70	0,0646
80	0,0642
90	0,0214
100	0,0000
120	0,0000

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

FIGURA 4.3-1

Curva de Secado

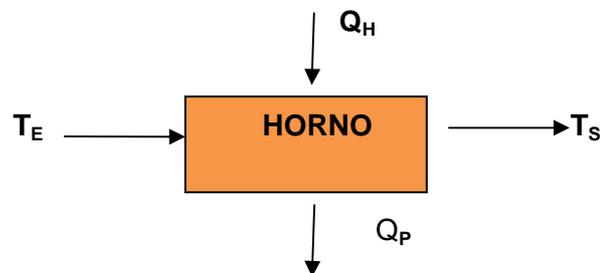


Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

Este gráfico es muy importante porque se observa como disminuye la humedad del ladrillo.

4.4 BALANCE DE ENERGÍA

El cálculo del balance de energía se realiza para la muestra M-2 (2% de adición de CaCO_3) que según los ensayos mecánicos se encuentran bajo la norma y es el más óptimo para mejorar la producción



Donde: Q_H : Calor suministrado al horno
 T_E : Temperatura de entrada del producto al horno
 T_S : Temperatura de salida del producto del horno
 Q_P : Calor perdido

$$E = S + A \quad \text{Ec. 4.4-1}$$

$$\sum Q_E = \sum Q_S + \sum P$$

$$\sum Q_E = (\sum Q_{SM} + \sum Q_{PH} + \sum Q_{EH}) + \sum P_Q$$

Donde: $\sum Q_E$: Sumatoria de Calor de entrada
 $\sum Q_{SP}$: Sumatoria de Calor de salida del producto
 $\sum Q_{EH}$: Sumatoria de Calor en la estructura del horno
 $\sum P_Q$: Sumatoria de pérdidas por calor
 $\sum Q_{PH}$: Sumatoria de Calor de producto dentro del horno

4.4.1 CALOR DE ENTRADA (Q_E)

$$Q_E = m_{p,e} \times C_{p,p,e} (T_e - T_a) \quad \text{Ec. 4.4.1-1}$$

Donde: Q_E = Calor de entrada
 $m_{p,e}$ = masa del producto que entra
 $C_{p,p,e}$ = calor específico del producto
 T_e = temperatura de entrada del producto
 T_a = temperatura ambiente de referencia 21 °C

$$Q_E = 0.201 \frac{\text{Kg crudo}}{h} \times 0.22 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \times (25 - 21)^\circ\text{C}$$

$$Q_E = 0.18 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

4.4.2 CALOR CONTENIDO EN EL PRODUCTO DENTRO DEL HORNO (Q_{P.H})

$$m = 0.201 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{P.H} = 0.201 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \times 0.22 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \times (905 - 21)^\circ\text{C}$$

$$Q_{P.H} = 0.194 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

4.4.3 CALOR DE SALIDA DEL PRODUCTO (ladrillo) (Q_{SP}).

Se utiliza la fórmula general:

$$Q_{SP} = m_{SM} \cdot C_{pSM} \cdot (\Delta T) \quad \text{Ec 4.4.3-1}$$

$$Q_{SP} = m_{SP} \cdot C_p \cdot (T_s - T_a)$$

Donde: Q_{SP} = calor de producto que sale

m = masa del producto que sale

T_s = temperatura de salida del producto

T_a = temperatura ambiente

En este cálculo se debe considerar al calor que abandona al horno.

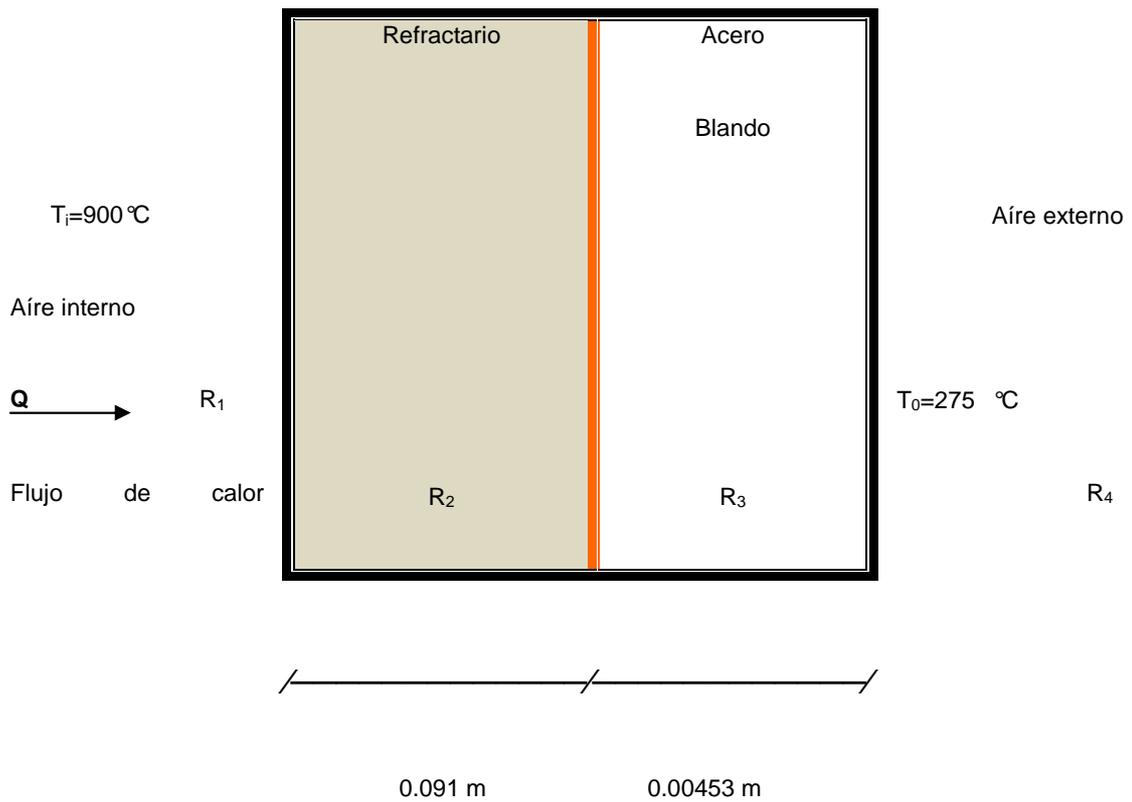
$$Q_s = 0.174 \frac{\text{Kg producto sale}}{\text{h}} \times 0.22 \times \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} (900 - 21)^\circ\text{C} = 33.65 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_s = 33.65 \frac{\text{Kcal}}{h}$$

4.4.4 CALOR EN LA ESTRUCTURA DEL HORNO (Q_{EH})

Esquema

Pared de un Horno



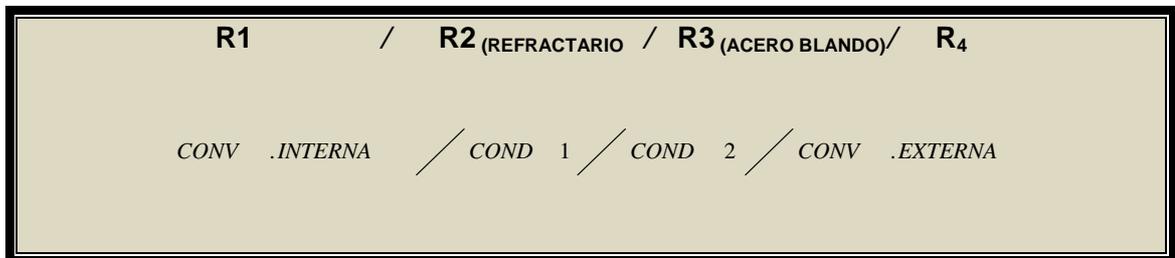
Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.4.4.1 DATOS DEL HORNO

Aire Interno	900°C (1173K)
Aire Externo	275°C (548K)
Pared del refractario	0.091m
Coeficiente de Transf.. exterior(h_i)	5110 W/m ² K
Coeficiente de transf. Interior (h_0)	45 W/m ² K
Conductividad térmica del ladrillo refrac. arcilloso (k_1)	0.9BTU/h-pie°F
Conductividad térmica del acero blando (k_2)	20BTU/h-pie°F
Potencia Térmica suministrada al horno (P)	2.25 Kcal/h
Área del horno	1 m ²

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.4.4.2 TIPOLOGÍA DE LA TRANSFERENCIA COMBINADA



Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

4.4.4.3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA REFERIDA AL HORNO

$$R_{1(\text{interno})} = \frac{1}{h_i A} \times \frac{1}{h_i A_{\text{rectángulo}}} \times \frac{1}{5110W / m^2 \text{ } ^\circ K \times 1m^2} = 1.95 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ K/W$$

$$R_2 = \frac{L_2}{k_1 A_1} \times \frac{L_2}{k_1 A_1_{\text{rectángulo}}} \times \frac{0.091m}{0.9BTU / h \text{ } \text{pie}^\circ F \times 1m^2} = 0.058 \text{ } ^\circ K/W$$

$$R_3 = \frac{L_2}{k_2 A_2} \times \frac{1}{h_{2_i} A_2} \times \frac{0.00453m}{20BTU / hpie \text{ } ^\circ F \times 1m^2} = 1.31 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ K/W$$

$$R_{4(\text{externo})} = \frac{1}{h_0 A_{\text{rectángulo}}} = \frac{1}{45 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K} \times 1m^2} = 0.022 \text{ } ^\circ K/W$$

4.4.4.4 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL

$$\sum R_{EH \text{ TOTALc}} = 1.95 \times 10^{-4} \div 0.055 \div 1.31 \times 10^{-4} \div 0.022$$

$$\sum R_{EH \text{ TOTALc}} = 0.080 \text{ } ^\circ K/W$$

4.4.4.5 CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR

$$Q_{EH} = \frac{\Delta T}{\sum R_T} = \frac{(1173 - 548)^\circ K}{0.080 \text{ } ^\circ K/W} = 7812.5W$$

$$Q_{EH} = 7812.5W \frac{1Kcal}{1.1628W} = 6718.70Kcal/h$$

$$\sum Q_E = (\sum Q_{SM} + \sum Q_{PH} + \sum Q_{EH}) + \sum P_{PQ}$$

$$Q_S = (\sum Q_{SM} + \sum Q_{PH} + \sum Q_{EH})$$

$$Q_S = (33.65 + 0.194 + 6718.70)$$

$$Q_S = 6752.54 \frac{Kcal}{h}$$

$$Q_{ENTRA} = Q_{SALE} + \sum P_{PQ}$$

4.4.4.6 CÁLCULO DE PÉRDIDAS

$$\sum P_{PQ} = Q_E - Q_S$$

Por lo tanto:

$$\sum P_{PQ} = 0.18 - 6752.54 \frac{Kcal}{h}$$

$$\sum P_{PQ} = -6752.32 \frac{Kcal}{h}$$

$$Q_{ENTRA} = 0.22 \frac{Kcal}{h}$$

Comparando se tiene:

$$Q_E = Q_S$$

$$0.22 \frac{Kcal}{h} = 6752.54 \frac{Kcal}{h}$$

Este resultado da una idea de que la cantidad de calor de entrada es menor a la cantidad de calor de salida la misma que es mayor a la de entrada del material lo cual se puede comprobar en la observación realizada en el momento del experimento.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPITULO V

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE TEMPERATURA Y TIEMPO

Para comparar las temperaturas y tiempos fue necesario realizar la quema de muestras en un horno industrial para poder controlar la temperatura, ya que en los hornos artesanales esto es imposible por la dificultad de analizar las muestra una a una tomando sus pesos y analizándolos cual es el más idóneo. De esta manera se indica que mientras la muestra Patrón necesitó más tiempo para su cocción. La muestra con el aditivo (CaCO_3) utilizó menos tiempo sin perder sus propiedades y obteniendo mejores resultados de calidad al producto terminado.

5.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD

La ejecución de este ensayo dio como resultado con una adición del 2% (CaCO_3) se obtiene una densidad media de 1.20g/cm^3 , siendo menor a la densidad de la muestra patrón que es 1.36g/cm^3 , las dos muestras presentan valores de densidad bajos, debido a la calidad de arcilla con la que se trabajó.

5.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN

En este caso la muestra con aditivo mostró un valor medio de absorción superior que la muestra patrón, al obtener un valor de 19.68 % (de CaCO_3) y la muestra patrón de un 2.1%. Ambos valores se consideran extremadamente opuestos pues según la norma los valores de absorción del ladrillo macizo de cerámica roja deben estar entre 8-18%. Se considera la diferencia marcada existente entre estos dos casos debido a que la adición del aditivo ayuda a aumentar la densidad, indicando que si es posible adicionar como materia prima el Carbonato de calcio . Se puede observar de acuerdo a los resultados que el ladrillo al introducir la muestra patrón al horno existen poros que aumenta su absorción y disminuye su densidad.

5.4 RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En el caso de la resistencia a la compresión la muestra con aditivo marcó un valor de 30.09 Mpa, y el valor de la muestra patrón de 23.58 Mpa, se aprecia que son bajos ello se debe (como en el caso de la absorción) a la calidad de arcilla que provoca que la matriz se vuelva muy porosa y que el ladrillo pierda densidad y peso, por ende la pérdida de resistencia a la compresión del material.

No obstante con los resultados se evidencia que la adición de Carbonato de calcio mejora al producto y ahorra combustible aunque por la ineficiencia de los hornos no como se espera.

5.5 ASPECTOS ECOLÓGICOS.

En la quema realizada se utilizaron 5600 Kg de leña, que en volumen representa aproximadamente 16m³; la duración de la misma fue de 37 h y las mediciones de la temperatura que se hicieron en la parte baja e intermedia de la puerta del horno estuvieron entre 548 °C y 745° C. Estas mediciones se realizaron en el segundo día de quema.

Con vistas a comparar la duración de la quema de los ladrillos con la adición de Carbonato de calcio. en cuanto a consumo de combustible, temperaturas de cocción y duración de la misma, se realizó una quema patrón, en el mismo horno y con la misma cantidad de ladrillos (15000 ladrillos) sin aditivo, y se utilizó el mismo tipo de leña. En estas condiciones se consumieron 6300 Kg, que equivalen a 18m³. Se hicieron tres mediciones de temperatura en tres puntos de la puerta del horno al segundo día de la quema, que arrojaron un promedio de 672°C; en cuanto a la duración ambas duraron aproximadamente lo mismo, 37 h.

5.6 ANÁLISIS ECONÓMICO

Se puede apreciar la reducción del costo total del ladrillo en la quema con aditivo, debido a la disminución del consumo de leña con respecto a la quema patrón o sin aditivo.

Tabla 5.6-1

Esquemas de costo

Componente de costo	Ladrillo sin aditivo %	Ladrillo con aditivo %
Mano de obra	25	25
Materias primas	10	12
Combustible	60	52,8
Costos indirectos	5	5
Total.	100	94,8

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

$$\text{Combustible} = 16m^3 \times \frac{350Kg}{1m^3}$$

Entonces se tiene:

La cantidad de leña a utilizar es de 5600 Kg

Si:

$$\frac{1m^3}{\$120} \times 16m^3 = \$1920$$

Este es el resultado del costo del combustible Con aditivo

Para calcular utilizando 6300 Kg

Se tiene:

$$\frac{1m^3}{\$120} \times 18m^3 = \$2160$$

Es el valor que se obtiene cuando se trabaja sin Aditivo

Para hallar el porcentaje de ahorro teniendo en cuenta solamente el combustible, se hace la siguiente operación:

$$\frac{1920}{2160} = 0.88\%$$

Ello quiere decir que el consumo de combustible de la quema con aditivo representa el 88% del combustible que se gastó en la quema patrón o sin aditivo, por tanto hubo un ahorro de un 12%.

En el esquema de costos general para el ladrillo, ello representa teniendo en cuenta que el costo de la energía al igual que en los casos anteriores se considera que es el 60%;

$$60\% * 0.88 = 52.8\%$$

Ello quiere decir que para este estudio de caso al consumo de energía representa el 52,8% del Costo total del ladrillo.

De estos resultados, es necesario destacar que el costo total del ladrillo con aditivo disminuyó en un 6,2% y del combustible en un 12%. Aunque no hubo significativos ahorros económicos, la calidad del ladrillo producido con aditivo aumenta y esto permite elevar el precio, y de esta forma el margen de ganancia para los productores

que en la actualidad es muy baja por la sobre producción de ladrillo pero sin mejorar la calidad.

A continuación en las tablas se muestra un resumen de los resultados de la adición de carbonato.

Tabla 5.6-2

Calidad del producto

Nro. Muestra	Resistencia media a compresión en MPa	Absorción %	Densidad en g/cm³
2	19.68	30.09	1.20

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

Tabla 5.6-3

Aspectos económicos y ecológicos

Consumo de combustible	Reducción del consumo de combustible con respecto a la quema sin aditivo en Kg.	Tiempo de quema	diferencia	Disminución del costo total del ladrillo en %
5600 Kg	700 Kg	37 horas	Ninguna.	6,2%

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

5.7 ANÁLISIS DEL BALANCE DE ENERGÍA.

El resultado de este balance realizado en un horno industrial para obtener datos reales indica el flujo de calor que existe de entrada es menor al flujo de calor de salida ya que el material al ser introducido al inicio en el horno tiene una temperatura menor que al ingresar al mismo.

Por otro lado cabe indicar que el valor de la resistencia térmica es pequeño por lo que existe un valor de pérdidas considerable.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

1. La caracterización realizada a la arcilla como materia prima, demuestra que se trata una arcilla arenosa que no es apta para la fabricación de ladrillos ya que no es plástica por los resultados obtenidos de acuerdo a la norma debe ser: ($\text{SiO}_2= 50\text{-}60\%$ obteniéndose: 61.07%). En lo que se refiere a ($\text{Al}_2\text{O}_3=20\text{-}30\%$ y el resultado obtenido es: 16.36). Siendo esa la razón por la que no se pudo obtener mejores resultados.
2. La plasticidad permite que el ladrillo sea más blando y se pueda moldear de mejor manera pudiendo hacer que se deslicen unas con otras cuando están mojadas, y la composición de Al, Fe debe tener un mayor porcentaje ya que ayuda a quemar a menor temperatura.
3. Al adicionar el aditivo fundente en el proceso productivo de ladrillos cocidos no altera sus propiedades al poner a podrir el día anterior a su procesamiento, pudiendo adicionar el aditivo en el agua de amasado.
4. La duración de las dos quemas fue aproximadamente las mismas, alrededor de 37 horas.
5. Las temperaturas de cocción en las mediciones que se realizaron en las dos pruebas como es el horno artesanal y el horno industrial se evidencia que la quema con aditivo fueron inferiores en un 19%.
6. Para lograr realmente el efecto fundente del carbonato de calcio, es necesario controlar la temperatura en todo el proceso de cocción, pues para obtener los mejores resultados en cuanto a las propiedades de los ladrillos y el efecto fundente de este material, la temperatura no debe alcanzar los 1000°C . A esta temperatura el efecto fundente del carbonato de calcio disminuye.

7. La dosificación del aditivo se realizó de manera volumétrica, sólo que en este caso, al no existir la “pisa” para el podrido y amasado de la arcilla, la medición de la cantidad de carbonato de calcio a adicionar se halló a partir de la cantidad de cubetas de arcilla para elaborar un molde de 14 ladrillos.
8. Hubo un ahorro de combustible, al consumirse menor cantidad de leña en la quema con aditivo; el ahorro se calcula en 2m³ de leña.
9. El impacto ambiental del uso de la caliza en la producción de ladrillos de cerámica, está dado fundamentalmente por la reducción del consumo de combustible, ya sea derivado del petróleo, leña o cualquier otro.
10. Aunque la reducción de costos no fue representativo, el hecho que el uso del aditivo aumenta la resistencia del ladrillo y su calidad en general, permite aumentar el precio de venta del producto, y de esta forma se aumenta el margen de ganancia de la producción, otro efecto económico beneficioso

6.2 RECOMENDACIONES

1. Realizar el estudio de la durabilidad de los ladrillos de cerámica con adición de carbonato de calcio fabricados con otros tipos de arcilla.
2. Evaluar con mayor profundidad el impacto económico, ecológico y social de la adición de carbonato de calcio como fundente en la fabricación de ladrillos de cerámica.
3. Estudiar otros materiales que puedan ser utilizados como fundentes en la producción de ladrillos de cerámica con la finalidad de incrementar la eficiencia energética de esta producción y disminuir su impacto ambiental.
4. Estudiar las posibilidades reales de disminución del tiempo de cocción de los ladrillos con adición de carbonato de calcio, como vía para aumentar la eficiencia económica de esta producción.
5. Estudiar la posibilidad de mejorar el diseño de los hornos en donde existe demasiadas pérdidas en su cocción

RESUMEN

Investigación para optimizar el proceso de cocción con la adición de carbonato de calcio en la producción de ladrillos de cerámica roja del Cantón Chambo, con la finalidad de mejorar su producción. Esta investigación es parte del proyecto “Producción ecológicamente y económicamente sustentable de ladrillos en Chambo/Ecuador”, con el Organismo Ejecutor Red Eco Sur.

Previamente se monitoreó la temperatura de cocción por 4 meses en una ladrillera particular, observándose que la quema se realiza a 690 °C en un tiempo de 48 horas por carga. (15.000 ladrillos)

Buscando mejorar las condiciones se procedió a trabajar con cantidades diferentes de CaCO_3 con 9 muestras, las mismas que fueron sometidas a cocción; utilizando dos vías: primero en el horno artesanal y a nivel de laboratorio con un horno industrial, manejando diferentes temperaturas y tiempos.

Como resultado de las pruebas se verificó que en el horno industrial se obtuvo un resultado de cocción de 3 horas a una temperatura de 900°C, con una adición del 2% de CaCO_3 . Caso diferente al horno artesanal que tardó 37 horas a 834°C. Con esta muestra se hizo pruebas de calidad como resistencia a la compresión, absorción y densidad, las cuales se someten a normas de calidad INEN.

Gracias a las pruebas realizadas se pudo comprobar que se incrementa la producción y aumenta el rendimiento económico mejorando el tiempo y temperatura de cocción, de esta manera se alcanza el objetivo trazado a nivel de laboratorio, pero insitu no dio buenos resultados debido a la ineficiencia del horno y a la calidad baja de la arcilla respecto a sus componentes.

Se recomienda construir hornos verticales y realizar un a mezcla de arcillas para que aumenten el porcentaje de Al y Si ya que la que se usa en la actualidad es arenosa y no plástica.

SUMARY

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA:

1. CABEZAS, Ruth. Tesis Tecnología Química. Determinación de la actividad puzolámica en el cemento producido. Riobamba, ESPOCH, Facultad de Ciencias, Escuela de Tecnología Química, 1998.
2. VILLACRÉS, Mario. Transferencia de Calor. Riobamba, 2005. (documento de clases).
3. CASADO PIÑEIRO, Manuel. Procesos de producción más limpia en ladrilleras de Arequipa y Cuzco: diagnóstico situacional, Lima- Perú: Pral, 2005.
4. MARTIRENA. J.F, y otros. Improvement Of Engineering Properties: And Energy Efficiency Of Fired Clay Bricks Through The Addition Of Calcite. 7th International Masonry Conference, London 30 October – 1 November 2006. (fotocopias).
5. STULZ, Roland. Materiales de construcción apropiados: catálogo de soluciones potenciales. Valparaiso: CETAL, 1993.
6. MAYORGA ,E, SÁNCHEZ,T. Uso eficiente de la energía en la producción de ladrillos a pequeña escala: programa de energía. Piura-Perú: ITDG, 1998.
7. MAYORAL,M.C,y otros, B,Aluminosilicates transformation in combustion fallwed by DSC. Termochimica : Canada, 2001.
8. GORDEJUELA, Isidro. Expansión por humedad de los productos cerámicos españoles. Artículos Técnicos. España, 2004.
9. CULTRONE, G. Influence of Mineralogy and firing temperatures on the porosity of bricks. Journal of the European Ceramic Society. Canada. 3 (5): 8-9. Julio 2004.
10. ESPAÑA-MINISTERIO DE ECONOMÍA. Secretaría de Estado de Energía Desarrollo industrial y de la Pequeña y Mediana Empresa. Estrategia de ahorro y eficiencia energética. Madrid: Ministerio Economía, 2004.
11. SALAZAR, Alejandro. Reciclaje de residuos sólidos industriales y escombros de la construcción para la producción de materiales de construcción de alta calidad y bajo. Colombia: Universidad del Valle, 1997.

12. MARTIRENA, J. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clinker de cemento Pórtland. Tesis. Santa Clara-Cuba, 2003.
13. BETANCOURT, Dania. Cerámica de alta resistencia y durabilidad en base a arcilla cocida: procedimiento de obtención. (Patente Cuba, 2004).
14. LAWRENCE, Vlák. Materiales para Ingeniería. México: Universidad de Michigan, 1991.
15. GNNECO, Mauricio y MARQUINA, Jorge. Ladrillos que ahorran energía. Manual para pequeños productores de ladrillos. Lima, 2000
16. CARRILLO, Jorge. Estudio Subsectorial del ladrillo de Chambo. Chambo-Chimborazo: Ilustre Municipio del Cantón Chambo, 2004.

INTERNET

1. Brick by Design. Manual 2. The Properties of Clay Masonry Units. http://www.brickbydesign.com-cbpi_manual_2.pdf. 2000. 2008 01.
2. Bottles to bricks. <http://www.grownupgreen.org.uk/news/?id=828>. 1998. 2008.03
3. Centro de Producción de Tecnologías Sostenibles. Concepto de Eficiencia Energética. http://www.boliviaindustry.com/sia/prodlimp/efiene/EE_Quees.htm. 2006. 2007.08
4. Cocción de Cerámica. Historia. <http://www.emison.com/215.htm>. 2005. 2007. 09
5. El estado municipal en los procesos de degradación ambiental. El caso de la actividad ladrillera en la provincia de Buenos Aires. <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/eco/ladribsas.htm>. 2004.
6. El Rincón del Vago. Productos Cerámicos. http://apuntes.rincondelvago.com/materiales-ceramicos_4.html. 2008.05
7. Brick by Design. Weather Resistance. Publicado en la Internet en <http://www.brickbydesign.com/walls/weather-resistance/index.html>. 2004

8. Colectivo de autores. Evaluación de mezclas de arcillas de la región de Centeno Moa. <http://www.monografias.com/trabajos12/artmgs/artmgs.shtml>. 2005. 2008.02
9. Proyecto: "Hacia la construcción de una red de trabajadores y trabajadoras de la producción artesanal de ladrillos". Ladrilleros.http://www.fcs.edu.uy/vconmedio/jornadas_ext/ladrilleros.htm. 1999. 2008.02
10. Sisti, Mario. El secado en la Industria Cerámica. <http://www.negosiosolavarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas>. 2004
11. Manual de buenas prácticas. Eficiencia energética. Publicado en la Internet en <http://www.medioambiente.gov.ar/?idarticulo=348>. 2000.
12. Xavier E. Generación de Residuos y Valoración. <http://www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID56.pdf>. 2004

CAPÍTULO VIII

ANEXOS

8 ANEXOS

ANEXO I

LA JORNADA DE UN DIA



ANEXO II

UBICANDO LOS LADRILLOS EN EL HORNO ARTESANAL



ANEXO III

COCCIÓN DE LOS LADRILLOS EN EL HORNO ARTESANAL



ANEXO IV HORNO INDUSTRIAL



ANEXO V

BALANZA UTILIZADA PARA TOMAS LOS PESOS



ANEXO VI MUESTRAS QUEMADAS EN EL HORNO INDUSTRIAL



ANEXO VII

EQUIPO DE PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESION



ANEXO VIII DATOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LADRILLOS QUEMADOS

ABSORCIÓN

TABLA 1

Muestra Patrón a 900 °C por 3 horas				
Ensayo de absorción				
Muestra MP	Peso Seco (Kg)	Peso Húmedo (Kg)	Absorción (%)	Absorción media (%) Æ
1	0,154	0,160	3.9	2.1
2	0,168	0,166	1.2	
3	0,167	0,169	1.2	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 2

Muestra con 2% de CaCO₃ a 900 °C por 3 horas				
Ensayo de absorción				
Muestra M-2	Peso Seco (Kg)	Peso Húmedo (Kg)	Absorción (%)	Absorción media (%) \bar{A}
1	0.143	0.186	30.07	30.09
2	0.148	0.192	29.73	
3	0.151	0.197	30.46	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 3

Muestra con 5% de CaCO₃ a 900 °C por 3 horas				
Ensayo de absorción				
MuestraM-3	Peso Seco (Kg)	Peso Húmedo (Kg)	Absorción (%)	Absorción media (%) \bar{A}
1	0.155	0.213	37.42	28.49
2	0.156	0.199	27.56	
3	0.166	0.200	20.48	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 4

Muestra con 2% de CaCO₃ a 900 °C 3 horas				
Ensayo de absorción				
MuestraM-4	Peso Seco Kg)	Peso Húmedo (Kg)	Absorción (%)	Absorción media (%) \bar{A}
1	0.161	0.202	25.47	28.07
2	0.156	0.211	35.26	
3	0.166	0.205	23.49	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 5

Muestra con 5% de CaCO₃ a 900 °C 3 horas				
Ensayo de absorción				
Muestra M-5	Peso Seco (Kg)	Peso Húmedo (Kg)	Absorción (%)	Absorción media (%) \bar{A}
1	0.177	0.212	19.77	19.26
2	0.171	0.202	18.13	
3	0.176	0.211	19.89	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.200

TABLA 6

Muestra con 2% de CaCO₃ a 900 °C por 3 horas				
Ensayo de absorción				
Muestra M-6	Peso Seco (Kg)	Peso Húmedo (Kg)	Absorción (%)	Absorción media (%) \bar{A}
1	0.180	0.221	22.78	20.71
2	0.175	0.214	22.29	
3	0.170	0.199	17.06	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 7

Muestra con 1% de CaCO₃ a 900 °C por 3 horas				
Ensayo de absorción				
Muestra M-7	Peso Seco (Kg)	Peso Húmedo (Kg)	Absorción (%)	Absorción media (%) \bar{A}
1	0.168	0.191	13.69	15.95
2	0.162	0.190	17.28	
3	0.154	0.180	16.88	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 8

Muestra con 1% de CaCO₃ a 900 °C por 3 horas				
Ensayo de absorción				
Muestra M-8	Peso Seco (Kg)	Peso Húmedo (Kg)	Absorción (%)	Absorción media (%) \bar{A}
1	0.168	0.211	25.60	29.86
2	0.163	0.188	15.34	
3	0.146	0.217	48.63	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 9

Muestra con 1% de CaCO₃ a 900 °C por 3 horas				
Ensayo de absorción				
Muestra M-9	Peso Seco (Kg)	Peso Húmedo (Kg)	Absorción (%)	Absorción media (%) \bar{A}
1	0.161	0.214	32.92	97.86
2	0.154	0.204	32.47	
3	0.154	0.204	32.47	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

COMPRESIÓN

Muestra Patrón MP (85de arcilla)

Temperatura = 900°C Tiempo de cocción = 3h

TABLA 1

Muestra	Área (cm²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	24.01	20.88	23.58
2	24.01	26.33	
3	25.00	23.52	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

Muestra1 M-1 (80 % de arcilla)

Temperatura = 900°C Tiempo de cocción = 3h

TABLA 2

Muestra	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	26.01	10.66	9.87
2	25.00	9.72	
3	26.01	9.22	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

Muestra 2 M-2 (83% de arcilla)

Temperatura = 900°C Tiempo de cocción = 3h

TABLA 3

Muestra	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	24.01	17.30	19.68
2	28.09	18.40	
3	23.04	23.34	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.200

Muestra3 M-3 (84% de arcilla)

Temperatura = 900°C Tiempo de cocción = 3h

TABLA 4

Muestra	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	24.01	37.17	31.38
2	24.01	25.74	
3	24.01	31.22	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

Muestra 4 M-4 (87% de arcilla)

Temperatura = 900°C Tiempo de cocción = 3h

TABLA 5

Muestra	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	23.04	15.09	23.30
2	24.01	20.73	
3	25.00	34.08	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

Muestra 5 M-5 (88% de arcilla)

Temperatura = 900°C Tiempo de cocción = 3h

TABLA 6

Muestra	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	26.01	35.02	30.78
2	25.00	31.91	
3	26.01	25.40	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

Muestra 6 M-6 (91% de arcilla)

Temperatura = 900°C Tiempo de cocción = 3h

TABLA 7

Muestra	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	27.04	38.33	34.47
2	25.00	35.52	
3	25.00	29.55	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

Muestra 7 M-7 (84% de arcilla)

Temperatura = 900°C Tiempo de cocción = 3h

TABLA 8

Muestra	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	24.01	21.31	17.72
2	25.00	21.54	
3	24.01	10.31	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

Muestra 8 M-8 (88% de arcilla)

Temperatura = 900°C Tiempo de cocción = 3h

TABLA 9

Muestra	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	24.01	10.15	14.52
2	23.04	21.95	
3	24.01	11.47	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

Muestra 9 M-9 (92% de arcilla)

Temperatura = 900°C Tiempo de cocción = 3h

TABLA 10

Muestra	Área (cm ²)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
1	24.01	14.10	17.01
2	24.01	17.27	
3	24.01	19.66	

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

DENSIDAD

TABLA 1

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE							
Muestra Patrón MP	Largo (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen Medio (cm ³)	Peso Medio (g)	Densidad media (g/cm ³)
1	4.9	117.65	154.1	1.31	120.1	163.6	1.36
2	4.9	117.65	167.9	1.43			
3	5.0	125.00	168.7	1.35			

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 2

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE							
Muestra M-1	Largo (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen Medio (cm ³)	Peso Medio (g)	Densidad media (g/cm ³)
1	5.1	132.65	148.8	1.12	131.10	149.3	1.15
2	5.0	125.00	145.2	1.16			
3	5.1	132.65	153.8	1.16			

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 3

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE							
Muestra M-2	Largo (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen Medio (cm ³)	Peso Medio (g)	Densidad media (g/cm ³)
1	4.9	117.65	147.7	1.26	125.71	147.4	1.20
2	5.3	148.88	143.0	0.96			
3	4.8	110.59	151.5	1.37			

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 4

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE							
Muestra	Largo (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen Medio (cm ³)	Peso Medio (g)	Densidad media (g/cm ³)
M-4							
1	4.8	110.59	156.1	1.41	117.7	163.8	1.37
2	4.9	117.65	165.2	1.40			
3	5.0	125	161.2	1.29			

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 5

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE							
Muestra	Largo (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen Medio (cm ³)	Peso Medio (g)	Densidad media (g/cm ³)
M-5							
1	5.1	132.65	175.0	1.32	130.1	174.3	1.34
2	5.0	125.00	176.9	1.42			
3	5.1	132.65	171.0	1.29			

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 6

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE							
Muestra	Largo (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen Medio (cm ³)	Peso Medio (g)	Densidad media (g/cm ³)
M-6							
1	5.2	140.61	170.1	1.21	130.2	175.1	1.35
2	5.0	125.00	179.9	1.44			
3	5.0	125.00	175.4	1.40			

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 7

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE							
Muestra	Largo (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen Medio (cm ³)	Peso Medio (g)	Densidad media (g/cm ³)
M-7							
1	4.9	117.65	161.9	1.38	120.1	161.4	1.34
2	5.0	125.00	167.8	1.34			
3	4.9	117.65	154.4	1.31			

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 8

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE							
Muestra	Largo (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen Medio (cm ³)	Peso Medio (g)	Densidad media (g/cm ³)
M-8							
1	4,9	117.65	162.6	1.38	115.30	158.7	1.38
2	4,8	110.59	145.7	1.32			
3	4,9	117.65	167.8	1.43			

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 9

ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE							
Muestra	Largo (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen Medio (cm ³)	Peso Medio (g)	Densidad media (g/cm ³)
M-9							
1	4.9	117.65	161.2	1.37	117.65	156.5	1.33
2	4.9	117.65	154.0	1.31			
3	4.9	117.65	154.4	1.31			

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008

TABLA 10

MUESTRA	Absorción	Resistencia	Densidad
MP	2.1	23.58	1.36
M-1	27.6	9.87	1.15
M-2	30.09	19.68	1.20
M-3	28.49	31.38	1.35
M-4	28.07	23.30	1.37
M-5	19.26	30.78	1.34
M-6	20.71	34.47	1.35
M-7	15.95	17.72	1.34
M-8	29.86	14.52	1.38
M-9	97.86	17.01	1.33

Elaborado por: Toctaquiza, Olga.2008