

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



Mejoramiento del proceso de fabricación de productos de arcilla a través de la optimización de la etapa de manufactura del ladrillo fresco y la fase de cocción en una planta de cerámica

Trabajo de graduación presentado por Edgar Eduardo García Chiu para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería  
Química

Guatemala

2008

Mejoramiento del proceso de fabricación de productos de arcilla a través de la optimización de la etapa de manufactura del ladrillo fresco y la fase de cocción en una planta de cerámica

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



Mejoramiento del proceso de fabricación de productos de arcilla a través de la optimización de la etapa de manufactura del ladrillo fresco y la fase de cocción en una planta de cerámica

Trabajo de graduación presentado por Edgar Eduardo García Chiu para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería  
Química

Guatemala

2008

## RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo mejorar el proceso productivo de ladrillo haciendo énfasis en dos etapas del proceso de producción, la elaboración de ladrillo fresco, y la cocción. Se busca implementar un molino laminador tipo LI 810, con el objetivo de mejorar la granulometría de la materia prima, lo que conlleva a mejorar la apariencia, textura, propiedades del producto final, así como obtener un aumento en la línea de producción. Para dicha implementación, se estiman los costos relacionados a la adquisición, montaje del mismo, e instrumentación. Considerando los costos fijos y variables, así como las ganancias percibidas, se estima una tasa de retorno aproximada de 42% con un valor actual neto de Q1,664,963.36, por lo que se considera un proyecto rentable.

Por otra parte, para la mejora del proceso de cocción, se establecen curvas óptimas de cocción, que muestran el rango de temperatura adecuada para la cocción de diversos productos. Con ello se garantiza obtener un producto con características físicas deseables, como color, además de mejorar la resistencia mecánica de los mismos. Así se establece que mediante la utilización de dichas curvas, se logró aumentar la resistencia a la compresión de un Tubular 14x9x29 de  $60.15 \pm 2.568$  kg/cm<sup>2</sup> a  $76.61 \pm 2.962$  kg/cm<sup>2</sup>. Mientras que el Superblock 3H, un tipo de ladrillo ampliamente utilizado en la construcción, aumento su resistencia de  $46.518 \pm 1.473$  kg/cm<sup>2</sup> a  $62.193 \pm 1.862$  kg/cm<sup>2</sup> al utilizar la curva óptima de cocción, lo cual representa un aumento del 33.69%.

Por último se realiza un diseño de sistema de recirculación de aire caliente dentro del horno, con el objetivo de precalentar el ladrillo húmedo que ingresa al mismo. Para ello se utiliza un turbina, y un túnel ya existente en el horno. Al realizar un balance energético se determinó que el calor removido por la turbina es de 32,034.18 kJ/s, y el que se introduce en el compartimiento donde se encuentra el ladrillo húmedo es de 26,423.00 kJ/s.

# ÍNDICE

Página

|  |     |
|--|-----|
| LISTA DE CUADROS.....                                  | vi  |
| LISTA DE GRÁFICOS.....                                 | vii |
| RESUMEN.....   | 4   |
| Capítulos  |     |
| I. INTRODUCCIÓN.....                                   | 10  |
| II. ANTECEDENTES.....                                  | 11  |
| A. Arcillas  |     |
| B. Composición química.....                            | 12  |
| C. Granulometría.....                                  | 13  |
| D. Sistemas de trituración                             |     |
| 1. Molino de martillos.....                            | 15  |
| 2. Triturador de mandíbulas.....                       | 17  |
| 3. Molino de discos.....                               | 18  |
| 4. Molino de rodillos.....                             | 18  |
| E. Plasticidad   |     |
| 1. Límite líquido.....                                 | 19  |
| 2. Límite plástico.....                                | 22  |
| F. Proceso de fabricación                              |     |
| 1. Selección y homogenización de materias primas ..... | 23  |
| 2. Extrusión del ladrillo fresco.....                  | 24  |
| 3. Secado del producto.....                            | 24  |
| 4. Cocción de las piezas.....                          | 25  |
| 5. Optimización del proceso de cocción.....            | 26  |
| III. JUSTIFICACIÓN.....                                | 27  |
| IV. OBJETIVOS  |     |
| a. GENERALES.....                                      | 28  |
| b. ESPECÍFICOS.....                                    | 28  |
| V. PROBLEMA A RESOLVER.....                            | 29  |

|   |    |
|---|----|
| VI. METODOLOGÍA.....  | 30 |
| VII.RESULTADOS.....   | 32 |
| 1. Análisis de materia prima.....   | 32 |
| 2. Implementación del molino laminador LI 810.....                              | 34 |
| 3. Curva óptima de cocción.....   | 37 |
| 4. Resistencia a la compresión.....   | 39 |
| 5. Sistema de recirculación de aire.....  | 40 |
| VIII.DISCUSIÓN.....   | 42 |
| IX. CONCLUSIONES.....   | 47 |
| X. RECOMENDACIONES.....   | 48 |
| XI. BIBLIOGRAFÍA .....  | 49 |
| Apéndices .....   | 50 |
| Apéndice A: Curva utilizada para la determinación del límite líquido.....       | 51 |
| Apéndice B: Curvas eficiencia del molino laminador.....                         | 52 |
| Apéndice C: Costos estimados para la implementación del molino LI 810..         | 53 |
| Apéndice D: Recuperación de la inversión. ....                                  | 56 |
| Apéndice F: Pruebas de resistencia a la compresión.....                         | 61 |
| Apéndice G: Balance de masa y energía para el sistema de recirculación.....     | 63 |
| Apéndice H: Cálculo de la curva óptima de cocción de Tubular 14x9x29 ...        | 65 |
| Apéndice I: Cálculo de la curva óptima de cocción de Tubular SuperBlock 3H..... | 67 |
| Apéndice I: Pruebas realizadas a materia prima y al ladrillo cocido....         | 69 |

# LISTA DE CUADROS

| Cuadro | Página   |
|--------|--|
| 1      | Composición de una muestra representativa de arcilla empleada para la fabricación del ladrillo.....3 |
| 2      | Análisis de muestra de barro specker utilizado para la fabricación de ladrillo fresco.....32         |
| 3      | Análisis de muestra de talpetate utilizado para la fabricación de ladrillo fresco.....33             |
| 4      | Especificaciones del molino LI 810.....35  |
| 5      | Producción nominal permitida por el molino LI 810.....35   |
| 6      | Producción nominal permitida por el molino actual 7LRA.....35  |
| 7      | Inversión estimada para la implementación del molino LI 810.....36                                   |
| 8      | Tasa de retorno estimada de la inversión.....36  |
| 9      | Valores de resistencia a la compresión del SB 3H (14x19x39).....39                                   |
| 10     | Valores de resistencia a la compresión del tubular 14x9x29.....39                                    |
| 11     | Propiedades del aire seco a las condiciones de operación.....41                                      |
| 12     | Balance de energía para el sistema de recirculación.....41   |
| 13     | Costos estimados asociados a la instalación del molino laminador.....55                              |
| 14     | Porcentaje de producción mensual de los distintos tipos de ladrillos producidos.....56               |
| 15     | Producción estimada en toneladas al mes mediante el molino LI 810.....57                             |
| 16     | Producción promedio en toneladas por hora producidas por el molino LI 810.....58                     |
| 17     | Producción promedio en toneladas por hora producidas por el molino L7RA.....58                       |
| 18     | Relación Costo por tonelada producida en máquina, en quetzales (Q).....58                            |
| 19     | Costos variables e ingresos por tonelada producida .....59   |
| 20     | Determinación de la tasa de retorno de la inversión de implementar el molino LI 810.....60           |
| 21     | Resistencia a la compresión para el ladrillo cocido.....61   |
| 22     | Prueba de resistencia realizada con la curva óptima de cocción de tubular 14x9x29.....61             |
| 23     | Resistencia a la compresión para el ladrillo cocido del SuperBlock 3H (14x19x39) .....62             |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 24 | Prueba de resistencia realizada con la curva óptima de cocción del SuperBlock 3H (14x19x39) .....          | 62 |
| 25 | Límite de control superior e inferior utilizados para la curva de cocción de tubular 14x9x29.....          | 65 |
| 26 | Rango móvil de datos utilizados para la curva de cocción.....  | 66 |
| 27 | Límite de control superior e inferior utilizados para la curva de cocción de SuperBlock 3H (14x19x39)..... | 67 |
| 28 | Rango móvil de datos utilizados para la curva de cocción de SuperBlock 3H (14x19x39).....                  | 68 |

# LISTA DE GRÁFICOS

| Gráfico | Página   |
|---------|--|
| 1       | Curva granulométrica de un suelo.....15  |
| 2       | Quebrantador primario.....16   |
| 3       | Molino de martillos.....17   |
| 4       | Triturador de mandíbulas.....17  |
| 5       | Funcionamiento de rodillos de un molino laminador.....19   |
| 6       | Plasticidad de los suelos según límites de Atterberg.....20                                      |
| 7       | Aparato utilizado para la determinación del índice de plasticidad.....21                         |
| 8       | Composición granulométrica del barro Speaker, tamaño<br>de sólidos presentes. ....32             |
| 9       | Composición granulométrica del talpetate, tamaño de sólidos presentes.....33                     |
| 10      | Diagrama de proceso por equipo al utilizar el molino actual L7RA.....34                          |
| 11      | Rango de temperaturas para el cocimiento del tubular 14x9x29.....37                              |
| 12      | Rango de temperaturas para el cocimiento del SuperBlock 3H (14x19x39).....38                     |
| 13      | Diagrama de horno.....40   |
| 14      | Diagrama del sistema de recirculación.....41   |
| 15      | Curva del límite líquido del barro.....51  |
| 16      | Curva del límite líquido del talpetate.....51  |
| 17      | Curva de eficiencia del molino a implementar LI 810.....52                                       |
| 18      | Curva de eficiencia del molino actual L7.....53  |
| 19      | Factores asumidos para establecer costos estimados de instalación del molino<br>laminador.....54 |
| 20      | Producción en porcentaje por familia de productos.....56   |
| 21      | Prueba de resistencia a la compresión realizada<br>en SuperBlock 3H (14x19x39).....69            |
| 22      | Fractura realizada por la fuerza aplicada al ladrillo.....69                                     |
| 23      | Instrumento utilizado para determinar el límite líquido<br>de la muestra de barro Speaker.....70 |
| 24      | Surco realizado a la muestra de barro.....70   |

## I. INTRODUCCIÓN

Al analizar el panorama de la industria ladrillera en Guatemala es necesaria la búsqueda constante de la tecnificación del proceso, con el objetivo de mejorar la productividad y excelencia en calidad.

El objetivo principal de este trabajo es la mejora del proceso de fabricación que se lleva a cabo en una empresa de cerámica en la industria guatemalteca. Ofreciendo nuevas posibilidades y alternativas para mejorar la calidad del ladrillo, mediante la optimización del proceso de fabricación, y el cocimiento de la pieza.

Para lograrlo, es preciso partir de la importancia que hay que dar a la preparación de la materia prima, teniendo en cuenta que la irregularidad en su composición es una de las causas más frecuentes de variaciones en la calidad del producto terminado.

Por ello se realiza un estudio para la implementación de un sistema de molienda distinto al utilizado actualmente, que permita adaptarse a las variables de proceso, y permita una mejora en la productividad. Lo que significa un aumento en la eficiencia y disminución en los costos de producción.

Por otra parte, también es de gran importancia la etapa de cocción del ladrillo, por ello se establecerá mejoras que permiten estandarizar los tiempos y temperaturas de cocción, así como el uso eficiente de los flujos de aire, mediante el diseño de un sistema de recirculación. Mediante un control adecuado en el cocimiento se logra evitar las roturas de precalentamiento, cocción e enfriamiento, lo que conlleva a una disminución de los porcentajes de desperdicio del ladrillo terminado.

## II. ANTECEDENTES

### A. Arcillas

La abundancia de la arcilla en la naturaleza, su relativa facilidad de tratamiento, resistencia, e impermeabilidad de este elemento lo convirtieron en un material muy utilizado por las sociedades antiguas. Las arcillas son básicamente rocas secundarias, formadas, por envejecimiento de otras rocas, mezclas de granito, sílice alúmina, feldespato, caliza y óxidos metálicos. (7)

Considerando las arcillas como un mineral natural complejo, constituido principalmente por una mezcla de aluminosilicatos cristalinos a los que denominamos minerales arcillosos y de otros silicatos y minerales de hierro, calcio, titanio, etc., acompañados frecuentemente por materia orgánica, su composición mineralógica es determinante en el comportamiento de los procesos a los que se destine. (7)

Puesto que la mayor aplicación de las arcillas ha sido tradicionalmente para la producción de objetos cerámicos, es preocupación de los investigadores en este campo el poder relacionar los datos del análisis químico y mineralógico de la materia prima con su comportamiento cerámico. (7)

Este sistema permite determinar la composición mineralógica cuantitativa aproximada de una materia prima, basado en el método clásico de cálculo, que relaciona la composición química expresada en óxidos, con los datos obtenidos por difracción de rayos X. (7)

A continuación se muestra la composición de minerales y silicatos, considerando que la misma es homogénea en toda su extensión:

Cuadro No. 1 Composición de una muestra representativa  
de arcilla empleada para la fabricación del ladrillo (\*)

| Composición química              |       |
|----------------------------------|-------|
| % SiO <sub>2</sub>               | 54.79 |
| % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19.27 |
| % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.82  |
| % CaO                            | 2.02  |
| % MgO                            | 0.28  |
| % K <sub>2</sub> O               | 1.19  |
| % Na <sub>2</sub> O              | 2.6   |
| % TiO <sub>2</sub>               | 0.82  |
| % Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.06  |
| % MnO                            | 0.20  |

(\*) Fuente: Laboratorio Central de Cementos Progreso,  
Centro Tecnológico (CETEC)

## B. Composición química

La sílice en forma de cuarzo constituye el mineral más abundante en la naturaleza, de cristalización perfecta y de gran pureza. Es el principal constituyente de las arenas. Los cristales de cuarzo cambian su estructura cristalina a 573 °C, produciendo cambios de volumen lo cual afecta el producto cerámico). Por eso debe programarse una menor velocidad de calentamiento entre 500 °C y 600 °C cuando se efectúa el proceso cerámico para que la pasta que los contiene no sufra rupturas por esa situación. (3)

El carbonato de calcio ejerce una acción fundente muy enérgica en las pastas cerámicas rebajando la temperatura de cocción. Por acción del calor, se descompone en óxido de calcio y desprende gas carbónico, por eso se usa también cuando se desea obtener cerámica porosa. Si aparece en la arcilla como granos grandes, la cal formada durante la cocción tiende a carbonatarse e hidratarse al salir del horno por acción del medio ambiente, produciendo grietas en el interior y erosión en la superficie de los productos como resultado del aumento de volumen. (2)

Los aluminosilicatos están constituidos por redes tridimensionales de tetraedros de Sílice en los cuales parte del silicio se encuentra sustituido por aluminio, lo que origina una deficiencia de carga que se ve compensada con iones potasio, sodio y calcio y ocasionalmente con bario o estroncio. (3)

Estos minerales presentan alguna plasticidad, pero muy baja, por eso se pueden considerar antiplásticos o desgrasantes, además como funden o sinterizan a las temperaturas comunes en el proceso cerámico se usan principalmente como fundentes. (2)

Los minerales de hierro que se encuentran comúnmente en las arcillas son: Hematita, Magnetita, Goethita y Pirita. Las tres primeras son las principales responsables del color de las arcillas y de sus productos. (7)

Su extrema finura, en forma de copos al ser humedecidas, forma una masa casi amorfa que tiene propiedades plásticas. (7)

### C. Granulometría

El propósito del análisis granulométrico, es determinar el tamaño de las partículas o granos que constituyen un suelo, y fijar en porcentaje de su peso total, la cantidad de granos de distintos tamaños que el suelo contiene. (5)

Una distribución granulométrica inadecuada supondrá una cantidad mínima de contacto entre las partículas durante la cocción lo que con frecuencia conduce a serios problemas durante el secado, ya que al producirse la evaporación del agua se generan espacios vacíos que generan grietas. (5)

La presencia de fisuras superficiales en los materiales tiene su origen en la incorrecta distribución granulométrica de las partículas, ya que una partícula de gran tamaño no queda recubierta por el líquido produciendo una discontinuidad. (5)

El método más directo para separar un suelo en fracciones de distinto tamaño consiste en el uso de tamices. Pero como la abertura de las mallas más fina que se fabrica corrientemente es de 0.07 mm. El uso de tamices está restringido al análisis de arenas limpias, de modo que, si un suelo contiene partículas menores de dicho tamaño debe ser separado en dos partes por lavado sobre aquel tamiz. (5)

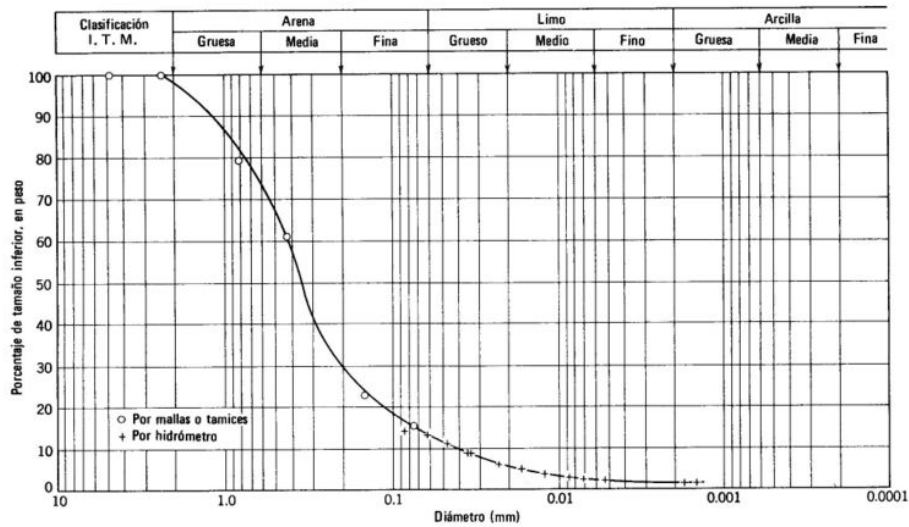
La parte de suelo retenido por el tamiz se somete al tamizado y aquella demasiado fina para ser retenida por tamices y que ha sido arrastrada por el agua, es analizada por medio de métodos basados en la sedimentación. (5)

Los métodos para efectuar análisis granulométricos por vía húmeda están basados en la ley de Stokes, que fija la velocidad a que una partícula esférica de diámetro dado sedimenta en líquido en reposo. En el método que se utiliza comúnmente en mecánica de suelos, de 20 a 40 gr. de suelos arcillosos o de 50 a 100 gr. de suelo arenoso, se mezclan con 1 L. de agua, se agitan y se vierten en un recipiente. A intervalos de tiempos dados se mide la densidad de la suspensión por medio de un hidrómetro. (5)

La forma más conveniente para representar el análisis granulométrico la proporciona el gráfico semi-logarítmico indicado en la figura que se muestra a continuación. (5)

En éste las abscisas representan el logaritmo del diámetro de las partículas, que corresponde a la abertura de cada tamiz utilizado, y las ordenadas el porcentaje en peso de los granos menores que el tamaño indicado por las abscisas. Cuanto más uniforme es el tamaño de los granos, tanto más inclinada es la curva, la línea vertical representa a un polvo perfectamente uniforme. (5)

Gráfico No. 1 Curva granulométrica de un suelo



La homogeneidad de la materia prima al momento de extruirse es de gran importancia para la obtención de un ladrillo con propiedades específicas. La compactación de sus partículas contribuye a aumentar la resistencia, y disminuye su porosidad. Por ello de gran importancia contar con el equipo necesario para su molienda.

#### D. Sistemas de trituración

En la industria cerámica es muy importante contar con equipo para el manejo de sólidos, y se necesita de trituradores o molinos para la reducción del tamaño. En este trabajo se mencionará el funcionamiento de varios tipos de molinos, considerando las ventajas de cada uno de ellos. (8)

En función de la materia prima y su estado es preciso utilizar un tipo de molino u otro. Cada molino emplea un tipo de funcionamiento diferente. Entre los principales hay:

Sistemas de impacto: el producto no debe tener un grado de humedad muy alto, generalmente menor de 10 %.

Sistema de compresión: es el que mejor se adapta para triturar productos húmedos.

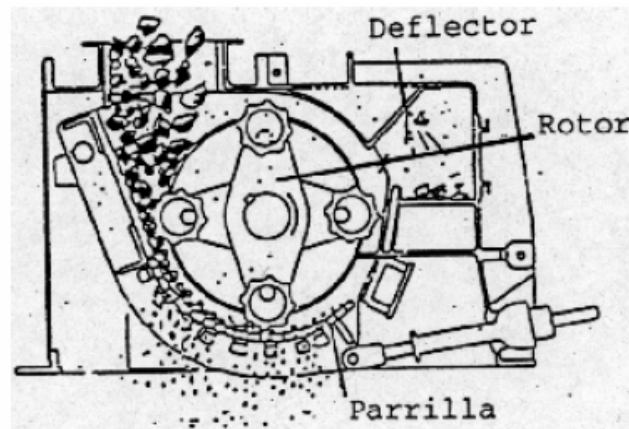
Sistemas de corte: diseñado para triturar materiales duros y secos.

Sistemas de abrasión: el producto a triturar debe avanzar una elevada velocidad. (8)

1. Quebrantadores Primarios. El principio de funcionamiento es la compresión aplastamiento, sin embargo las canales longitudinales de que se hallan provistas las mandíbulas permiten que a la acción anterior se sumen la cizalla y la flexión. (8)

Funciona como un molino de bolas, en el cual un rodillo de acero con dientes o cuchillas rodeado de una cámara más cercana a él por la parte inferior. Al moverse, los dientes ejercen por un lado su función de cuchillo y por otra, presión a la parte inferior de la cámara. Se usa cuando la arcilla a triturar es bastante húmeda. (8)

Gráfico No. 2 Quebrantador primario

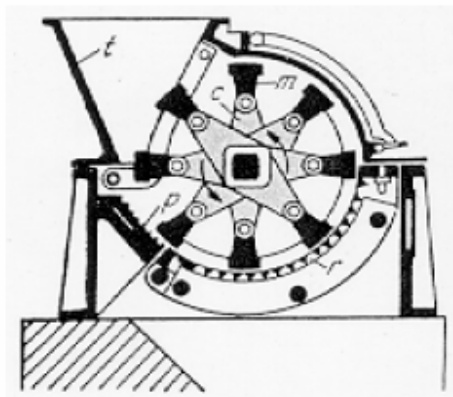


2. Molino de martillos. Estos equipos se utilizan para materiales no muy abrasivos, por el desgaste que pueden sufrir sus partes. Constan de un rotor con eje horizontal que lleva una serie de martillos pivoteados o colgantes que, al hacerse girar, toman una posición extendida.

La alimentación cae en la cámara donde es golpeada por los martillos y arrojada a las paredes que sirve como carcaza rompedora. El tamaño de descarga se controla para permitir salir únicamente el tamaño de partícula requerido (8).

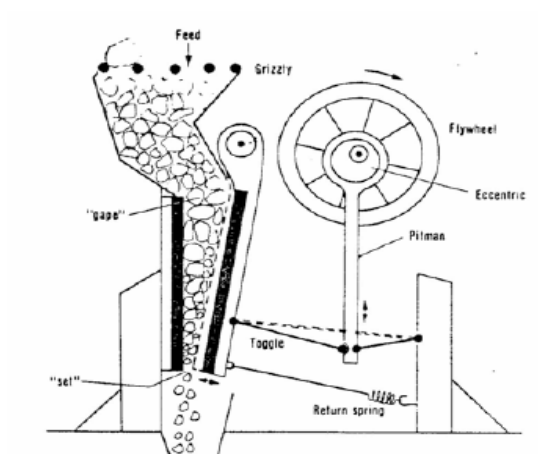
Este equipo puede usarse para materiales fibrosos, si se utilizan martillos con bordes cortantes, pero no puede trabajar con materiales muy húmedos con tendencias a empastarse. (8)

Gráfico No. 3 Molino de martillos



3. Trituradora de mandíbulas. Actúan comprimiendo el material entre dos mandíbulas, una o otra móvil, recubiertas con una aleación sumamente resistente a la abrasión. La mandíbula móvil puede ser la de arriba o la de abajo que se acerca a la fija por acción de un excéntrico. Cuando la mandíbula se abre por arriba la boca de descarga inferior es constante, por lo que el producto de trituración es más uniforme en tamaño que en el caso en que la mandíbula abra por debajo. (8)

Gráfico No. 4. Triturador de mandíbulas



#### 4. Molino de discos. Actúan fundamentalmente por rozamiento del material

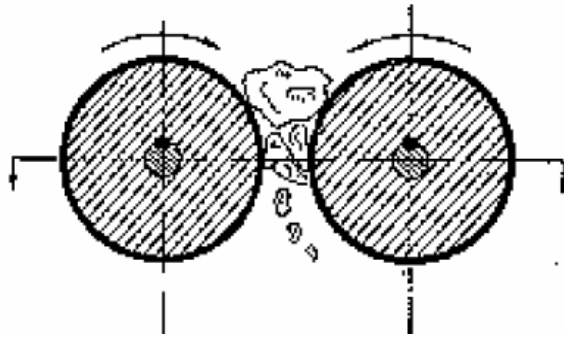
entre dos discos que pueden rotar ambos o bien uno solo. Las superficies de los discos generalmente son corrugadas, con estrías o con dientes. El eje de rotación es horizontal la separación entre discos es ajustable, entrando la alimentación por un punto cercano al centro del disco y descargando el producto por la periferia. Son equipos aptos para productos blandos, variando el tipo de rugosidad o estriado de los discos se puede obtener variedad de tamaños. Estos equipos operan a altas velocidades (1000 a 700 rpm.) y se puede obtener una reducción de tamaño hasta 10 micrones. (8)

#### 5. Molinos de rodillo. Un molino de rodillo consiste en un par de rodillos

que giran en sentido opuesto. Uno de ellos gira más rápidamente que el otro, para permitir que la cáscara se retire del grano. Un rodillo está sostenido por un soporte fijo, el otro se coloca en paralelo por medio de un resorte ajustable, de modo que la separación y, por lo tanto, la textura de molienda pueda ser adaptada. Los molinos de rodillo, por lo general, operan en serie: cada uno produce una harina de grano más fin. (8)

Es el tipo de molinos más adecuado para procesar arcillas que, en estado natural tengan una humedad superior al 10%. En esencia, como indica la figura, consisten en dos rodillos iguales, con sus ejes dispuestos horizontalmente y paralelos, que se someten a rotación cada uno de ellos en sentido contrario al otro. (8)

Las ventajas principales asociadas a este proceso son: reducción a la dimensión deseada de las partículas y preciso control de las mismas, total eliminación de las impurezas como raíces, carbonatos, y piedras provocan defectos de carácter técnico y estético del producto final. (8)



## E. Plasticidad

Las arcillas cambian sus propiedades al agregar agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido. El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y es de gran importancia conocer el rango de humedades, para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse. (4)

El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por Atterberg a principios de siglo a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico. Los límites de Atterberg son propiedades índices de los suelos, con que se definen la plasticidad y se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo. (4)

Durante mucho tiempo se creyó que los minerales de las arcillas eran de naturaleza amorfa, pero todas las investigaciones de detalle realizadas hasta ahora han demostrado, que son cristalinos y altamente estructurados. (4)

Existe una relación específica entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas. Las investigaciones han probado que la plasticidad de un suelo es debida a su contenido de partículas más finas de forma laminar ya que esta ejerce una influencia importante en la compresibilidad del suelo, mientras que el pequeño tamaño propio de esas partículas hace que la permeabilidad del conjunto sea muy baja. (4)

Según su contenido de agua en forma decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definido por Atterberg.

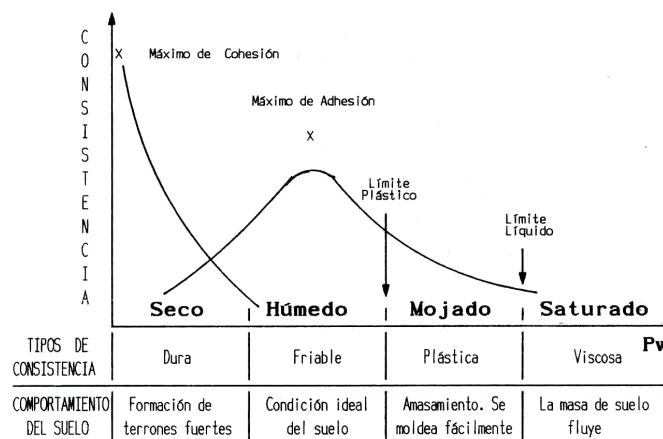
Estado líquido, con las propiedades y apariencias de una suspensión.

Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.

Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.

Estado semi-sólido, en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado. (4)

Gráfico No. 6 Plasticidad de los suelos según límites de Atterberg



1. Límite líquido. El límite líquido es una medida de la resistencia al corte del suelo a un determinado contenido de humedad. El límite líquido es análogo a un ensayo de resistencia. Según las normas ASTM, se coloca la muestra en el plato de evaporación agregando suficiente cantidad de agua destilada, mezclando con espátula hasta lograr una pasta homogénea. El procedimiento utilizado se describe a continuación (4).

Colocar la muestra en una charola de aluminio dejarla secar en el horno a 80 °C por 24 horas. Deshacer la muestra con un martillo de hule sobre una bandeja, si es necesario reducir el tamaño mediante un molino. Posteriormente se hace pasar la muestra por un tamiz No. 40 (4)

Colocar la muestra tamizada y seca en las 4 charlas y pesarlas para obtener el peso de la muestra en cada charola. A cada una de las muestras, se le agrega un porcentaje diferente de agua, utilizando una pipeta graduada de 10 mililitros. Posteriormente se utiliza un mortero para mezclar cada una de las muestras con agua hasta obtener una pasta homogénea. (4)

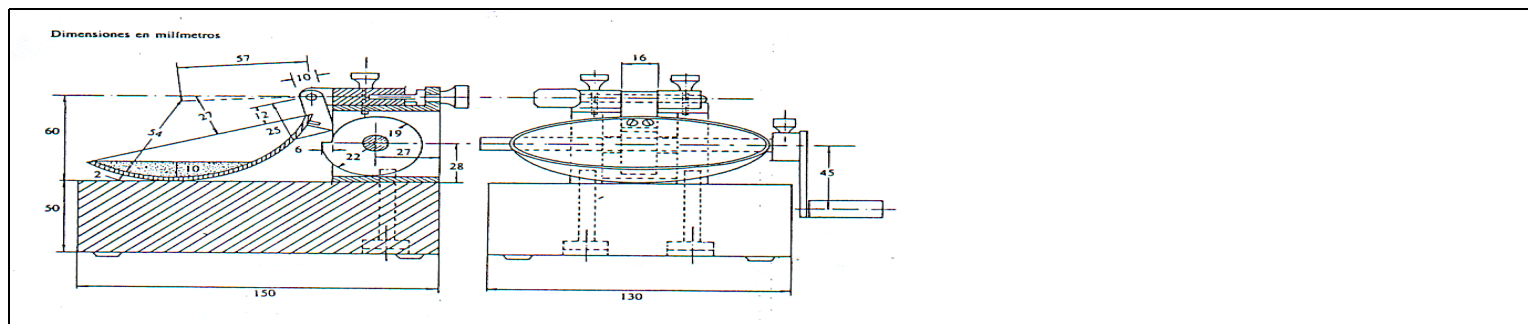
Utilizar el aparato del límite líquido de Atteberg. Verificando que se encuentre en buenas condiciones, y que los tornillos estén firmemente colocados. . Colocar, con una espátula, la muestra en el platillo de bronce del aparato medidor, de forma que ocupe la mitad del platillo, con un grosor aproximado de un centímetro, una superficie pareja y evitando que se formen burbujas. (4)

Con el acanalador, dividir la muestra a la mitad por un corte uniforme y limpio, tratando que se mire el fondo del platillo. (4)

Dar vueltas al manubrio del aparato a una velocidad de 2 revoluciones por segundo, contando el número de golpes hasta que las dos mitades de la muestra se una en sus bases en una longitud de medio pulgada aproximadamente. Finalmente se toma aproximadamente 10g del material en el fondo del surco para determinar la humedad. (4)

Graficar los datos del porcentaje de humedad contra el número de golpes en un cuadro semilogarítmico y hacer una curva de flujo uniendo los puntos obtenidos. (4)

Gráfico No. 7 :Aparato utilizado para determinación de límite líquido



2. Límite plástico. Para la determinación del límite plástico, las normas ASTM, indican el siguiente procedimiento. Colocar la muestra en una charola de aluminio dejarla secar en el horno a 80 °C por 24 horas. Deshacer la muestra con un martillo de hule sobre una bandeja, si en necesario reducir el tamaño mediante un molino. Posteriormente se hace pasar la muestra por un tamiz No. 40 (4)

Agregar agua a la muestra con una pipeta graduada de 10 mililitros, hasta alcanzar la formación de un producto plástico. Hacer una esfera con la mezcla homogénea y posteriormente hacer bastones de 3 milímetros de diámetro sobre una lámina de vidrio. Agregar agua o sólido a mezcla hasta que los bastones de 3 milímetros se rompan por la presión de la mano (punto en el que se cumple el límite plástico) (4)

Después de obtenidos los bastones resquebrajados, colocar los pedazos en una charola previamente pesada y determinar el peso de los bastones húmedo y dejar secar la charola en el horno a 80 °C por 24 horas. Pesarse la charola con los pedazos ya secos, y determinar su peso. (4)

Se sitúa el aparato del límite líquido sobre una base firme, limpia y seca, y se deposita alrededor de 50 g de la muestra. Luego, por medio de la espátula se alisa la superficie, de modo que la altura obtenida en el centro sea de 10mm. Se realiza un surco mediante una herramienta patrón. (4)

Cuando se tiene el surco, se gira la manivela del aparato con una frecuencia de dos golpes por segundo, contando el número de golpes necesarios para cerrar la ranura. (4)

## F. Proceso de fabricación:

El proceso de fabricación de ladrillo se desarrolla en una serie de etapas sucesivas, que pueden resumirse del modo siguiente: Selección y homogenización, extrusión del producto, secado, cocción, clasificación y distribución.

1. Selección y homogenización de las materias primas. El proceso cerámico comienza con la selección de las materias primas que deben formar parte de la composición de la pasta, que son fundamentalmente arcillas, feldespatos, arenas, carbonatos y caolines. (9)

En la industria cerámica tradicional las materias primas se suelen utilizar, por lo general, tal y como se extraen de la mina o cantera, o después de someterlas a un mínimo tratamiento. Su procedencia natural exige, en la mayoría de los casos, una homogeneización previa que asegure la continuidad de sus características.

La selección correcta garantiza una plasticidad adecuada para la formación de la pasta, y de un ladrillo de calidad, que permite contracciones en su estructura al momento de cocción, lo que aumenta su resistencia. Una vez realizada la primera mezcla de los distintos componentes de la pasta cerámica, ésta se somete por lo general a un proceso de molienda. Mediante los molinos se logra una reducción drástica del tamaño de partícula, lo cual es de gran importancia para la formación de la pasta. (9)

Las arcillas duras y húmedas, se preparan mejor en instalaciones por cuya reducción del diámetro de partícula sea eficiente. Este sistema asegura la obtención de un porcentaje importante de partículas finas, que se humectan con más facilidad y rapidez obteniéndose una masa homogénea y de mayor plasticidad, todo lo cual se traduce a un mejor acabado y una mayor resistencia mecánica, tanto del material seco como del producto cocido. (9)

2. Extrusión del producto. Mediante la adicción de agua a las materias primas se consigue una masa plástica fácilmente moldeable por extrusión. Según el producto que se desee elaborar se utilizan distintos moldes, los cuales otorgan características específicas. (9)

Cada molde proporciona medidas distintas para cada tipo de ladrillo, el cual debido a su plasticidad, es decir, la cantidad de agua retenida, posee un tamaño mayor al de su comercialización. El agua en exceso se retira mediante operaciones de secado y cocción. Los equipos que se utilizan para la extrucción del ladrillo constan de tres partes principales: el sistema propulsor, la matriz y la cortadora. (9)

3. Secado del producto. La pieza cerámica una vez conformada se somete a una etapa de secado, con el fin de reducir el contenido en humedad de las piezas tras su conformado hasta niveles los suficientemente bajos (10-15 %), para que las fases de cocción (9)

En los secaderos que normalmente se utilizan en la industria cerámica, el calor se transmite mayoritariamente por convección, desde gases calientes a la superficie de la pieza, participando ligeramente el mecanismo de radiación desde dichos gases y desde las paredes del secadero a dicha superficie. (9)

Por lo tanto, durante el secado de piezas cerámicas, tiene lugar simultánea y consecutivamente un desplazamiento de agua a través del sólido húmedo y a través del gas. El aire que se utiliza debe ser lo suficientemente seco y caliente, no sólo para eliminar el agua procedente del sólido sino también para suministrar la energía en forma de calor, que necesita esa agua para evaporarse. (9)

4. Cocción de las piezas. La cocción de los productos cerámicos es una de las etapas más importantes del proceso de fabricación, ya que de ella dependen gran parte de las características del producto cerámico: resistencia mecánica, estabilidad dimensional, resistencia a los agentes químicos, facilidad de limpieza, resistencia al fuego, etc. (9)

El óxido de ferroso que proporciona el color característico del ladrillo se acentúa durante el proceso de cocción. Las variables fundamentales a considerar en la etapa de cocción son, el ciclo térmico, y la temperatura máxima que se alcanza. (9)

La cocción constituye la fase más importante y delicada del proceso de fabricación. Confiere a la pieza las propiedades deseadas y el mismo tiempo pone de manifiesto si las fases precedentes, se han llevado a cabo correctamente. (1)

Durante el calentamiento de las arcillas se producen una serie de reacciones que se manifiestan exteriormente en forma de: absorción y desprendimiento de calor, desprendimiento de gases, dilataciones y contracciones (1)

El análisis térmico-diferencial mide los efectos endotérmicos y exotérmicos que acompañan a las reacciones de cocción, indicando al mismo tiempo a las temperaturas a las que se producen. Por ejemplo, las descomposiciones son endotérmicas, mientras que las oxidaciones y formación de nuevas fases cristalinas son exotérmicas. (1)

Entre la temperatura ambiente y los 200 °C se produce un efecto endotérmico debido a la eliminación del agua giroscópica, El cambio más importante se produce entre los 400°C y 600 °C, aproximadamente, donde los grupos hidróxilo (OH-) del cristal de arcilla, son expulsados en forma de vapor de agua.

La pérdida de los grupos (OH-) da lugar a la destrucción de la red cristalina de la caolinita convirtiéndola en un cuerpo amorfo conocido con el nombre de metacaolín. La densidad de carga eléctrica en la superficie de las partículas es más alta, presentando una mayor capacidad de reacción y absorción. (1)

El agua de cristalización evaporada entre el 470 y 600 °C en una caolinita pura representa el 14% del peso de la muestra, lo cual significa que al calentar un kilo de arcilla, aproximadamente se desprenderán 140 gramos de agua. (1)

5. Optimización del proceso de cocción. La optimización del proceso de cocción, debe comenzar con el establecimiento de la curva ideal de temperaturas que permita evitar las roturas de precalentamiento, cocción e enfriamiento (1)

Estas roturas, lo mismo que sucede con las de secado, son producidas por esfuerzos de flexorotación derivadas de las diferencias de contracción o dilatación que tiene lugar en la misma pieza. Estas diferencias, dependen a su vez de los gradientes térmicos que en un momento determinado puedan existir en la pieza, los cuales varían a lo largo del proceso de cocción en función de las reacciones endotérmicas o exotérmicas que se producen. Además depende de la difusividad térmica del material. (1)

El ladrillo insuficientemente cocido es más poroso, menos resistente, contiene un porcentaje mayor de sales solubles generadoras de eflorescencias, no resiste la helada, y es menos estable frente a la humedad ambiental, presentando una mayor dilatación por rehidratación a lo largo del tiempo. (1)

Las grietas de precalentamiento se distinguen de las de enfriamiento por los siguientes caracteres: la superficie agrietada es algo más oscura o de un rojo más vivo que la rotura forzada del mismo ladrillo. Las grietas de precalentamiento se han de evitar estableciendo la curva de cocción exigida por la arcilla. (1)

### III. JUSTIFICACIÓN

Para mejoramiento del sistema de fabricación actual, se hace énfasis en dos áreas de gran importancia del proceso, que son puntos claves para obtener un producto de calidad, la etapa de fabricación de ladrillo fresco y la cocción de la pieza.

En la elaboración del ladrillo fresco es necesario un control adecuado de la granulometría, es por ello la necesidad de un sistema eficiente que permita la homogenización de la materia prima.

Se realizará un estudio al mecanismo de molturación existente, con el fin de implementar un sistema de molienda distinto, que pueda adaptarse a las variables del proceso y a la línea de producción.

Mediante el cual se obtenga un tamaño de partícula más pequeño, con granulometría uniforme, lo que provoca una disminución en el diámetro de paredes al momento de su fabricación en fresco, sin modificar su resistencia, consiguiendo un ladrillo menos poroso, más compacto, llamativo y fino.

Por otra parte, la cocción constituye la fase más importante y delicada del proceso de fabricación, debido a que durante este proceso se produce un cambio de las propiedades químicas de la pieza, lo que conlleva a aumentar su resistencia mecánica y que pueda ser utilizada como un producto cerámico.

Es de suma importancia un control detallado de esta etapa, es por ello que se establecerá la temperatura y el tiempo óptimo de cocción para diversos productos.

Además de establecer un control de flujos de aire dentro del horno, con el fin de disminuir los costos de operación, proporcionar un cocimiento homogéneo, una disminución en las variaciones en la contracción de la arcilla, así como una disminución en los costos de producción.

De esta forma, al mejorar el proceso se obtendrá un producto con mayor atractivo visual, y con mayor resistencia, que permita cumplir con las necesidades del mercado.

## IV. OBJETIVOS

### A. Generales:

1. Mejorar el proceso de elaboración del ladrillo a través de la optimización de dos etapas, la fase de fabricación en fresco y la fase de cocción.

### B. Específicos:

1. Modificar el sistema de molienda actual mediante la implementación de un tipo de molino que mejore las características del producto final y que se adecue a las necesidades de producción.
2. Evaluar la capacidad y eficiencia de la línea de producción actual.
3. Disminuir los costos de fabricación mediante la reducción del grosor de paredes del ladrillo fresco, manteniendo constante su resistencia.
4. Determinar mediante pruebas fisicoquímicas la calidad del producto final (resistencia a la compresión, absorción de humedad, etc.)
5. Establecer un control en la etapa de cocimiento del ladrillo con el fin de estandarizar las temperaturas y tiempos de cocción.
6. Diseñar un sistema de recirculación de los gases de combustión de las cámaras del horno para su reutilización en otra etapa del cocimiento.

## **v. PROBLEMA A RESOLVER**

Mejorar el proceso de fabricación de ladrillo en una planta de cerámica, mediante la optimización del proceso de manufactura del ladrillo fresco, a través del sistema de molienda de la materia prima y la mejora del proceso de cocimiento, con el fin de obtener un producto de calidad, con mayor resistencia, que permita cumplir con las necesidades del mercado.

## VI. METODOLOGÍA

1. Realizar un balance de masa de la etapa del ladrillo fresco, con el objetivo de conocer, con el diseño actual, la capacidad y eficiencia del sistema de molienda
2. Investigar y cotizar acerca de los distintos equipos de molienda existentes en el mercado, que puedan adaptarse a las variables del proceso y a la línea de producción.
3. Establecer los parámetros de operación que serán utilizados, diámetro de partícula, requerimientos energéticos, flujos másicos, etc.
4. Realizar pruebas de granulometría, con el fin de establecer la cantidad de sólidos finos presentes en la materia prima, y con ello el diámetro de partícula presente. Se utilizara la prueba mecánica del hidrómetro, según las normas ASTM D41-58 y D422-63.
5. Establecer el índice de plasticidad de la materia prima con el fin de conocer la cantidad de agua necesaria para la extrusión. Se utilizará la prueba de los limites de plasticidad de Atterberg según las normas ASTM 423-66 y D424-59

Por otra parte, para mejorar la etapa de cocimiento del ladrillo se realizar los siguientes procedimientos:

1. Implementar el uso de termocoplas tipo K para la medición de temperaturas dentro de las distintos compartimientos (cámaras) del horno tipo Hoffman.
2. Mantener un control adecuado de temperaturas y tiempos de cocción, lo que permitirá establecer una curva de cocción óptima para los productos.
3. Realiza pruebas de resistencia a la compresión a distintos tipos de ladrillos, con el objetivo de determinar los cambios en su resistencia mecánica, al utilizar las curvas de cocción.

4. Establecer la velocidad del flujo del aire que circula en el interior del horno, con el fin de determinar si su velocidad es constante.
5. Diseñar un sistema de recirculación de aire que permita aprovechar los gases de combustión, para el calentamiento de producto húmedo en el horno.
6. Realizar un balance energético para cuantificar el calor que es aprovechado para el calentamiento del producto húmedo.

## VII. RESULTADOS

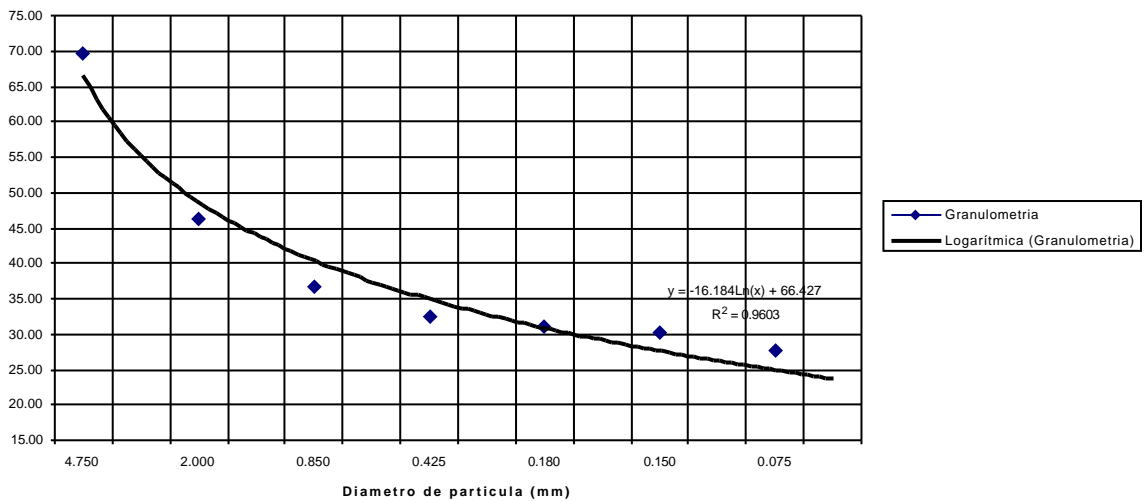
### A. Análisis de materia prima:

Cuadro No. 2 Análisis de muestra de barro Specker utilizado para la fabricación de ladrillo fresco

| Análisis realizado                               |       |
|--|-------|
| Límite líquido de Atteberg (Norma ASTM D423-66 ) | 37.2  |
| Límite plástico de Atteberg (Norma ASTM D422-66) | 19.77 |
| Índice de plasticidad de Atteberg                | 17.43 |

Gráfico No. 8 Composición granulométrica del barro Specker, tamaño de sólidos presentes.

Curva de distribución granulométrica de Barro Specker

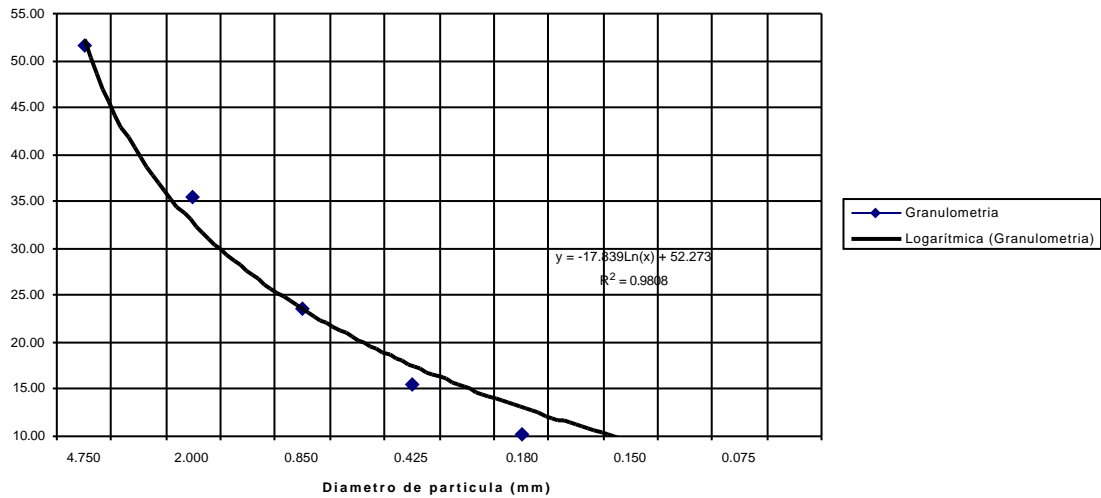


Cuadro No. 3 Análisis de muestra de talpetate utilizado para la fabricación de ladrillo fresco

| Análisis realizado                               |        |
|--|--------|
| Límite líquido de Atteberg (Norma ASTM D423-66 ) | 22.15  |
| Límite plástico de Atteberg (Norma ASTM D422-66) | 14.052 |
| Índice de plasticidad de Atteberg                | 8.098  |

Gráfico No. 9 Composición granulométrica del talpetate, tamaño de sólidos presentes.

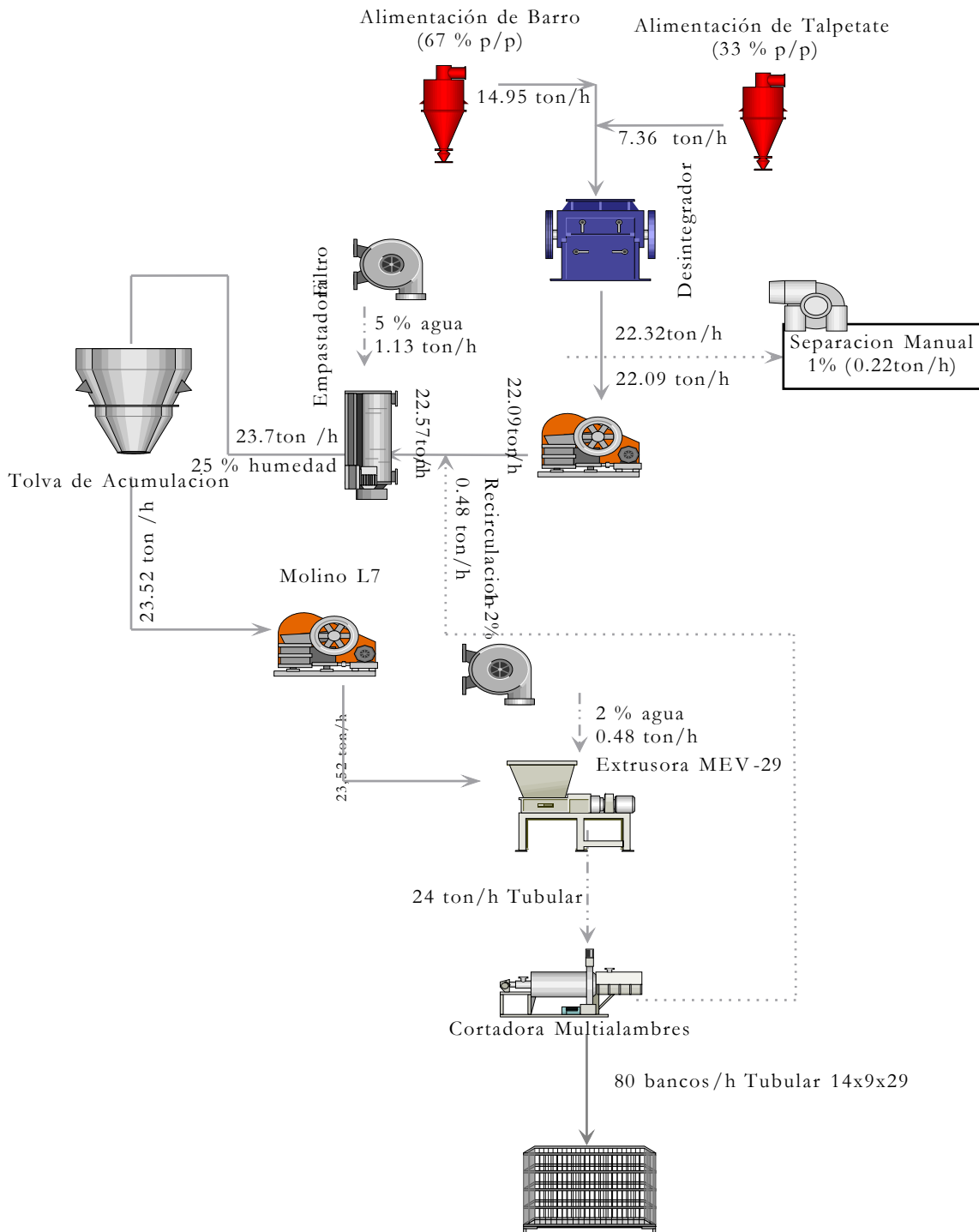
Curva de distribución granulométrica de Barro talpetate



## B. Implementación de molino laminador LI 810:

### 1. Diagrama de proceso

Diagrama No. 1 Diagrama de proceso por equipo al utilizar el molino actual L7RA



Cuadro No.4 Especificaciones del molino LI 810

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Tipo:                 | Compact   |
| Modelo:               | LI 810  |
| Diámetro de rodillos: | 800 mm  |
| Anchura de rodillos:  | 1000 mm   |
| Potencia instalada:   | 55 + 75 kW  |
| Corriente:            | Trifásica   |
| Peso                  | 17000 kg  |
| Material              | Armadura: Acero<br>Camisas: acero aleado, tratado térmicamente,<br>con dureza HRC 61-62<br>Partes: recubrimiento de nitruro de boro |

## 2. Comparación de capacidad de producción

Cuadro No.5 Producción nominal permitida por el molino LI 810

| Producto               | Abertura del molino utilizada | Producción m <sup>3</sup> /h* | Producción (ton/h) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| FACHALETAS             | 0.8 mm                        | 28                            | 25.76              |
| TUBULARES              | 1 mm                          | 35                            | 32.2               |
| SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 1 mm                          | 35                            | 32.2               |

\*Para convertir de m<sup>3</sup>/h a ton/h multiplicar por 0.92

Cuadro No.6 Producción nominal permitida por el molino actual 7LRA

| Producto               | Abertura del molino utilizada | Producción m <sup>3</sup> /h* | Producción (ton/h) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| FACHALETAS             | 0.8 mm                        | 9                             | 8.28               |
| TUBULARES              | 1 mm                          | 14                            | 12.88              |
| SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 1 mm                          | 14                            | 12.88              |

\*Para convertir de m<sup>3</sup>/h a ton/h multiplicar por 0.92

Cuadro No.7 Inversión estimada para la implementación del molino LI 810

| Descripción  | Precio*      | Precio        |
|--|--------------|---------------|
| Laminador tipo LI 810                                | € 163,800.00 | Q1,834,560.00 |
| Grupo de accionamiento para rodillo lento y rápido   | € 6,897.78   | Q77,255.14    |
| Tornos automáticos tipo 17-RT-RCI para rectificación | € 27,984.44  | Q313,425.73   |
| Moto reductor tipo MRAO-35                           | € 3,177.10   | Q35,583.52    |
| Total  | € 201,859.32 | Q2,260,824.38 |

\* Precio del suministro en Exworks

Cuadro No.8 Tasa de retorno estimada de la inversión

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| Tasa Interna de Retorno (TIR): | 42%           |
| Valor Actual Neto (VAN):       | Q1,664,963.36 |

\* Valores fueron calculados considerando una tasa de 18% de costo de capital y un impuesto de 31% mediante Microsoft Excel.

### C. Curva óptima de cocción

Gráfico No. 11 Rango de temperaturas para el cocimiento del tubular 14x9x29

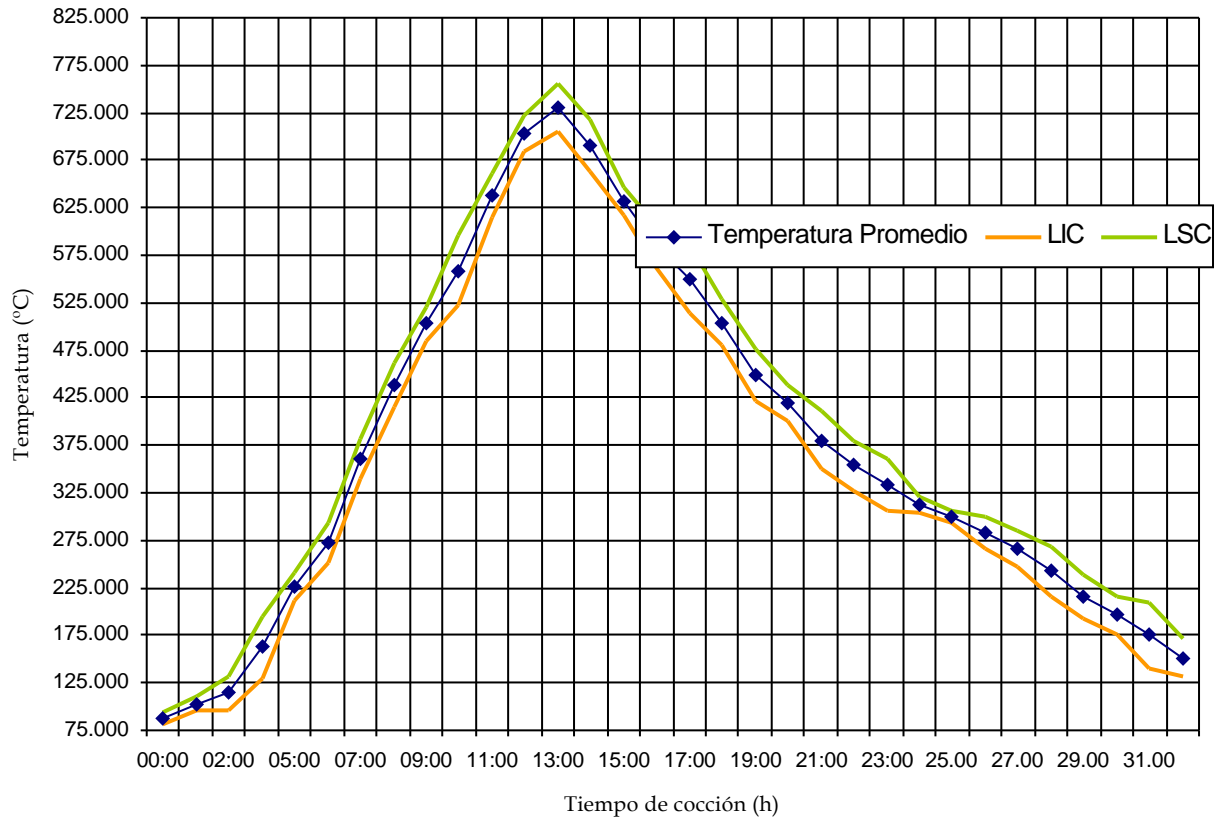
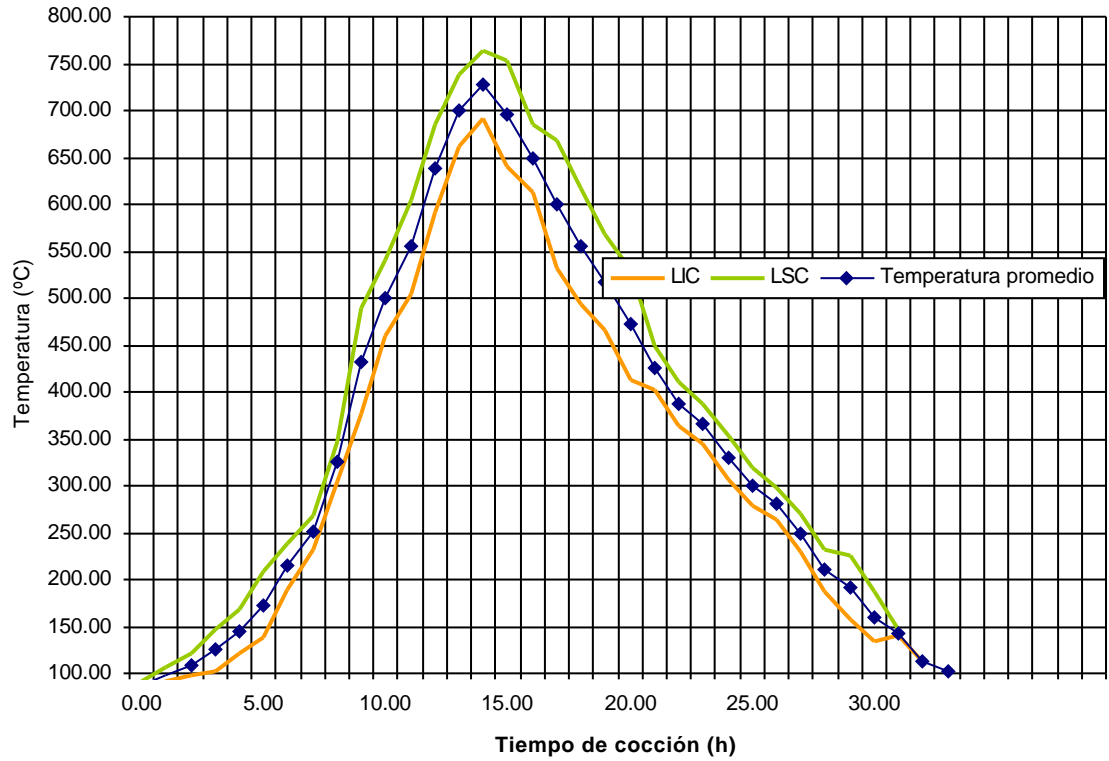


Gráfico No. 12 Rango de temperaturas para el cocimiento del SuperBlock 3H (14x19x39)



## D. Pruebas de resistencia a la compresión

Cuadro No. 9 Valores de resistencia a la compresión del SB 3H (14x19x39)

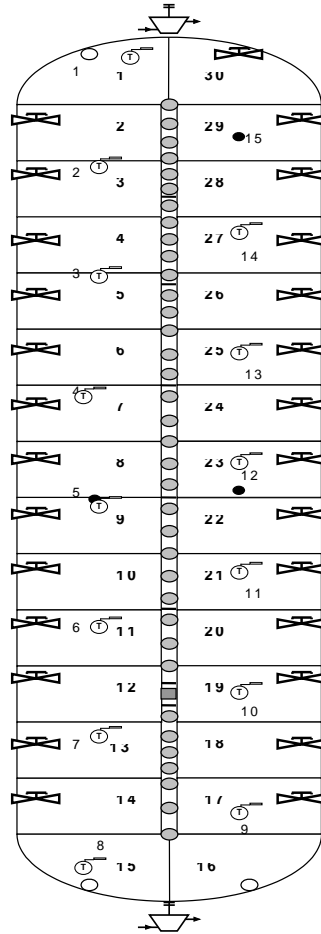
| Análisis                    | Peso (kg)    | Absorción (%) | Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------|--------------|---------------|--|
| Sin curva de cocción        | 10.09 ± 0.01 | 21.13 ± 1.03  | 46.52 ± 1.47                                   |
| Con curva óptima de cocción | 10.45 ± 0.01 | 18.41 ± 1.03  | 62.19 ± 1.86                                   |

Cuadro No. 10 Valores de resistencia a la compresión del tubular 14x9x29

| Análisis                    | Peso (kg)  | Absorción (%) | Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------|------------|---------------|--|
| Sin curva de cocción        | 3.72± 0.01 | 18.98 ± 1.035 | 60.15 ± 2.57                                   |
| Con curva óptima de cocción | 3.95± 0.01 | 17.76 ± 1.035 | 76.61 ± 2.96                                   |

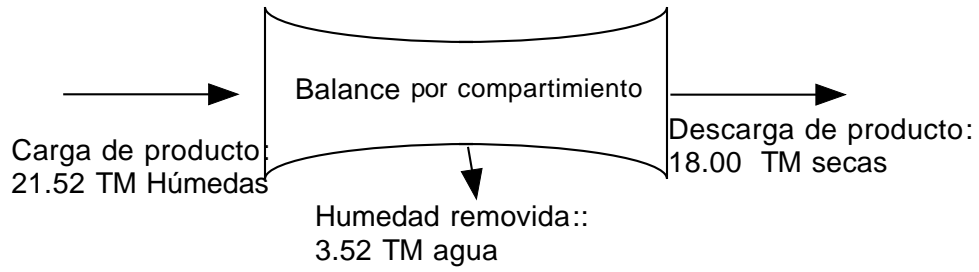
## F. Sistema de recirculación de aire

Gráfico No 14. Diagrama de horno



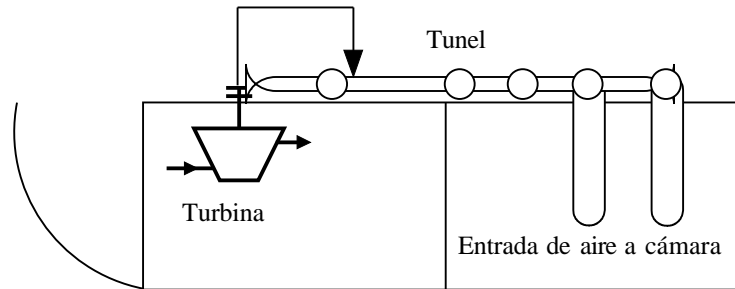
|                            |                     |
|----------------------------|---------------------|
| Tipo de horno:             | Hoffman             |
| Diametro del horno         | 11.54 m             |
| Longitud horno             | 75 m                |
| Número de compartimientos: | 30 cámaras          |
| Turbinas:                  | 2 Turbinas de 50 hP |

1. Balance de materiales



2. Balance de energía

Gráfico No. 14 Diagrama del sistema de recirculación



Cuadro No. 11 Propiedades del aire seco a las condiciones de operación

| Medición         | Flujo de aire (m/s) ± 0.1 m/s | Temperatura ± 1°C | Entalpía aire seco: (kJ/kg) | Densidad aire (kg/m <sup>3</sup> ) | Incertidumbre |
|------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------|
| En turbina       | 7.925                         | 110               | 382.4                       | 0.9396                             | ± 0.056       |
| Entrada a cámara | 6.51                          | 80                | 353.9                       | 1.0195                             | 0.0730        |

Cuadro No. 12 Balance de energía para el sistema de recirculación

| Flujo de calor extraído por la turbina | Flujo de calor entrada de cámara | Flujo de calor perdido a los alrededores |
|--|----------------------------------|--|
| 32,034.18 kJ/s                         | 26,423.00 kJ/s                   | 5,611.18 kJ/s                            |

## VIII. DISCUSIÓN

Para la elaboración del ladrillo se utiliza una mezcla de dos tipos de arcillas: el barro y el talpetate debido a su abundancia en el territorio guatemalteco, especialmente en las regiones montañosas. Estas vetas son relativamente jóvenes, por lo que su composición granulométrica es variada. En el gráfico No. 8 y 9 de la sección de resultados (página 25) se muestra la curva granulométrica del barro y del talpetate, donde se puede observar la variación de sólidos de cada arcilla, y se concluye que el talpetate posee sólidos de mayor tamaño.

Por otra parte se analizó la plasticidad de estos dos tipos de arcilla, ya que la plasticidad es una medida indirecta de las características de esfuerzo – deformación de los materiales, y en la fabricación de los productos cerámicos, es muy importante para evitar las deformaciones al momento de extruir el ladrillo fresco. Como se muestra en el cuadro No. 2 y 3 de la sección de resultados (página 24), el índice de plasticidad del barro es de 17.43, mientras que el del talpetate de 8.098, según los cálculos realizados. Estos se elaboran a partir de las gráficas descritas en la sección del Apéndice A (página 46).

El talpetate es una arcilla utilizada para controlar la plasticidad de la mezcla, ya que a diferencia del barro, posee un porcentaje menor de contracción, además por su granulometría, aporta firmeza, evitando las deformaciones y roturas al momento de manipular el ladrillo fresco. Otra ventaja de su uso, es la reducción de los costos de fabricación, ya que la explotación del barro es más costosa.

Es por ello que surge la necesidad de contar con un sistema de molienda que permita homogenizar la materia prima, debido a que la irregularidad en su composición es una de las causas más frecuentes de variaciones en la calidad del producto terminado.

El tamaño de partículas presente en el sólido afecta la resistencia mecánica en el ladrillo, cuando se tiene un diámetro mayor de sólidos, el producto es menos compacto en su estructura interna, por lo que al momento de evaporarse el agua en el proceso de cocción, se obtiene un sólido más poroso y frágil, lo que conlleva a disminuir su resistencia, y afecta la apariencia del producto final. La homogenización permite además, reducir la variación en las medidas del ladrillo, debido a que permite que las contracciones sean iguales en toda la pieza, lo que favorece a la disminución de rajaduras en el ladrillo cocido. Además se evita la presencia de materias indeseables como raíces u otros contaminantes.

Para ello se desea implementar un molino laminador LI 810 en el área de maquinas, que permita mejorar la granulometría del producto final, mediante una mayor reducción del tamaño de partícula.

El principio de funcionamiento de este molino, al igual que los demás laminadores, es por acción de dos rodillos que giran a distintas velocidades, y el sólido se tritura al pasar por ellos. Además se produce una menor cantidad de atascamiento de sus partes móviles, debido a las altas velocidades de rotación.

La variable de la humedad es un factor muy importante a considerar, debido a que las condiciones climáticas de la ciudad de Guatemala son muy irregulares, por lo que la materia prima presenta variaciones en su extensión. El rango permisible de humedad del molino LI 810 para la molienda es de 10% a 25%, por lo que es ideal para los parámetros de operación. En la temporada de verano, el contenido de humedad de la materia prima madurada, es decir, que ha sido expuesta a condiciones de disgregación, es aproximadamente de 18%, mientras que en temporadas lluviosas, el contenido puede oscilar entre 22% a 25% de humedad.

Al analizar la curva de eficiencia del molino LI 810, se puede conocer la producción nominal que permite trabajar a determinado apertura de los rodillos. Al comparar dicha capacidad, con la del molino actual, permite más versatilidad para el procesamiento de materia prima. Así por ejemplo, la producción de fachaletas, se requiere una granulometría muy fina, debido a que es un tipo de ladrillo visible ampliamente utilizado en la construcción de casas y edificios. Con el molino LI 810 se estima una producción de fachaletas de 10.09 ton/h, utilizando un diámetro de 0.8mm, mientras que con el sistema actual se produce alrededor de 7.2 ton/h con una granulometría mayor.

Como se muestra en el cuadro No. 5 en la sección de resultados (página 27), con el molino LI 810 se obtiene una mayor producción nominal en toneladas por hora que con el molino utilizado actualmente para los diversos productos. Además con ello será posible mejorar la apariencia del producto final, e inclusive de disminuir el diámetro de paredes de ladrillo permitiendo conservar su resistencia a la compresión, lo que representa una disminución en los costos de fabricación.

Para la estimación de la inversión se cotizó el equipo en la empresa BonGioanni, que se especializa en la distribución de equipo para la industria cerámica. Los costos de instalación se muestran en el cuadro No. 7 en la sección de resultados (página 28). Además se considero los costos de instalación, componentes eléctricos, instrumentación, y contingencia, como se muestra en gráfico 19. del Apéndice C (página 48).

Para este proyecto se estimo las toneladas que serán producidas al mes, así como los costos por tonelada producida, en función de los distintos utilitarios, e insumos involucrados en su fabricación. Además se estimó una ganancia por tonelada producida como se muestra en cuadro No. 18 del Apéndice D (página 52). Con ello se estableció una Tasa de Retorno de la inversión aproximada de 42 %, con una Valor Actual Neto de Q1,664, 963.36 .

Por otra parte, en este estudio se consideró otra fase del proceso productivo, el cocimiento del ladrillo. La cocción de los productos cerámicos es una de las etapas más importantes del proceso de fabricación, ya que de ella dependen gran parte de las características del producto terminado, como resistencia mecánica, estabilidad dimensional, resistencia a los agentes químicos, etc.

Para ello se implementó el uso de termocoplas tipo K dentro de los distintos compartimientos del horno como se muestra en el gráfico No. 14 la sección de resultados (página 32), con el objetivo de monitorear el aumento de temperatura dentro de cada cámara a fin de establecer una curva ideal, con lo que se logra disminuir las roturas de precalentamiento, cocción y enfriamiento del ladrillo. Además se logra mejorar la apariencia del ladrillo cocido, obteniendo un color más llamativo, y sin manchas provocadas principalmente por la vitrificación a temperaturas elevadas.

La vitrificación es el proceso en el cual la arcilla se convierte en un sólido amorfo, con grandes características de dureza y resistencia, por acción de calor. Las reacciones de vitrificación inician aproximadamente a temperaturas de 900°C y finalizan alrededor de 1050°C. Debido al diseño del horno no es posible alcanzar dichas temperaturas, por lo que las reacciones que se producen son incompletas, originando manchas indeseables en el ladrillo. Es por ello de suma importancia mantener un control adecuado de estos parámetros.

En el gráfico No. 11 y 12 en la sección de resultados (páginas 29 y 30) se muestra la curva óptima de cocción para tubular 14x9x29 y SuperBlock 3H (14x19x39), en función de la temperatura y el tiempo de cocción. Además se estableció el límite superior de control (LSC) y límite inferior de control (LIC), que indican el rango de temperatura adecuado para un determinado periodo de cocción.

Así se muestra la temperatura a la que debe estar siendo cocido el ladrillo, según la curva realizada. Los límites que se presentan, fueron calculados en función de la dispersión de los valores medidos con las termocoplas. Se calculó una curva promedio, y se determinó la diferencia absoluta de cada una de las mediciones. Con ello se logra establecer la variabilidad de los datos a través del rango móvil, que es una medida de dispersión utilizada para el análisis de procesos.

Para la distancia de los límites respecto a la curva promedio se consideró tres veces sigma, lo que indica que se considera un nivel de confianza del 95% para los valores de cada subgrupo. Con ello se logró aproximar el rango de temperaturas para el cocimiento de la pieza.

En el cuadro No. 9 y 10 en la sección de resultados (página 31) se muestra los valores obtenidos de la resistencia a la compresión. La cual representa la máxima carga axial que puede soportar el producto cerámico antes de que éste sufra

deformaciones. Esta propiedad es fundamental, y frecuentemente utilizada para el diseño de estructuras, es por ello que es de suma importancia contar con parámetros adecuados.

En la sección de resultados se muestra la resistencia a la compresión de dos productos, el tubular 14x9x29, y el SuperBlock 3H (14x19x39), los cuales son un tipo de ladrillo que representan un mayor porcentaje de ventas para la empresa. Aquí se detalla los resultados obtenidos antes de la implementación de la curva óptima de cocción, y pone en evidencia las mejoras que se obtienen al controlar adecuadamente las temperaturas de cocción del ladrillo.

Así por ejemplo, el tubular 14x9x29 aumento su resistencia a la compresión de  $60.15 \pm 2.568 \text{ kg/cm}^2$  a  $76.61 \pm 2.962 \text{ kg/cm}^2$ , lo que representa un 27% aumento. De manera similar sucede con el SuperBlock 3H, logrando aumentar su resistencia de  $46.518 \pm 1.473 \text{ kg/cm}^2$  a  $62.193 \pm 1.862 \text{ kg/cm}^2$

Además de aumentar la resistencia mecánica del ladrillo, la curva de cocción, permite evitar las roturas de precalentamiento, cocción, enfriamiento, obteniendo un ladrillo menos poroso.

La absorción de humedad esta relacionada con el buen cocimiento del ladrillo, ya que un ladrillo con baja absorción presenta una alta resistencia a la compresión. Esto se debe a que durante la cocción los óxidos presentes en la composición química de las arcillas pierden su humedad libre, provocando la formación de cristales más grandes lo que produce menos porosidad en el ladrillo, y por lo tanto una menor absorción.

Por otra parte, el funcionamiento de este tipo de horno consiste en la alimentación de cascabillo en su parte superior, mediante un conjunto de alimentadores. Los alimentadores son dosificadores de diafragma que permiten alimentar la biomasa utilizada como combustible. Los alimentadores se desplazan a lo largo del horno, conforme el producto alcanza su temperatura de cocción adecuada, pasa a la siguiente cámara, en un proceso continuo.

Es por ello que se implementó un sistema de recirculación de aire caliente, mediante el cual se aprovecha la energía resultante del proceso de cocción. Para lo cual se utiliza una turbina, que permite extraer el aire caliente resultante y lo distribuye a un túnel interno que lo conecta con las demás cámaras. Se utiliza este equipo para evitar perdidas en la velocidad de flujo, por las variaciones de la densidad del aire a altas temperaturas. El aire es distribuido e ingresa a las cámaras que se encuentran cargadas con producto húmedo. (Ver sección de resultados página 33.).

El aire utilizado permite disminuir el contenido de humedad del ladrillo, provocando un precalentamiento, que además previene las fracturas y torsiones de la pieza, ya que se produce un aumento gradual de la temperatura antes de su cocimiento. Además permite un ahorro de combustible utilizado para la cocción del ladrillo.

Con ello se determinó un flujo de calor removido por la turbina de 32,034.18 kJ/s, de los cuales únicamente se aprovechan 26,423.00 kJ/s por la cámara con producto húmedo, el resto se considera como pérdidas en el ambiente. Para la implementación de este sistema se utilizó un túnel ya existente en el horno, con el objetivo de reducir los costos de instalación. El flujo de aire es recirculado alrededor de 25 metros, donde se encuentra el producto húmedo, pero debido a que el túnel actual no cuenta con un sistema de aislantes se producen pérdidas de calor por radiación y convección con el ambiente.

## IX. CONCLUSIONES

1. Mediante los análisis de Atteberg se determinó el índice de plasticidad de las arcillas que son utilizadas como materia prima. El barro utilizado para fabricación del ladrillo, posee una plasticidad de 17.43, mientras que el talpetate, que es utilizado en menor cantidad, posee un índice de plasticidad de 8.098 Lo que indica que es necesario realizar una mezcla adecuada para evitar las deformaciones al momento de ser extruído el ladrillo.
2. Mediante la implementación del molino LI 810, se logrará mejorar la granulometría de la materia prima, lo que conlleva a mejorar las características del producto final, como apariencia, textura, grosor de paredes, y su resistencia mecánica
3. La Tasa de Retorno de la inversión obtenida para los costos asociados de implementar un nuevo molino en el área de producción es aproximadamente de 42%, con una Valor Actual Neto de Q1,664,963.36, lo que indica que se puede considerar como un proyecto rentable. El Tiempo de Retorno de la inversión, considerando un costo de capital del 18%, es de 2.01 años.
4. Al utilizar el molino LI 810, se tendrá la capacidad de aumentar la producción de los diferentes productos aún cuando el diámetro de partícula es reducido, por ejemplo, se estima una aumento en la velocidad de producción de fachaletas de 30% aproximadamente, en toneladas producidas por hora.
5. Mediante las pruebas de resistencia a la compresión realizadas, se determinó que al utilizar las curvas de cocción propuestas, la resistencia el SuperBlock 3H aumento en un 33.3%, mientras que el tubular en un 27.36%
6. Además de aumentar la resistencia mecánica del ladrillo, la curva óptima de cocción, permite evitar las roturas de precalentamiento, cocción, enfriamiento, obteniendo un ladrillo menos poroso.
7. Para el sistema de recirculación de aire, se calculó que la cantidad de energía que es utilizada para el calentamiento del ladrillo húmedo es de 26,423.00 kJ/s, obteniendo pérdidas por radiación y convección de 5,611.18 kJ/s.

## X. RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar este proyecto para realizar un estudio acerca de la implementación de un sistema de aislantes en el horno, con el objetivo de aumentar la eficiencia del sistema de recirculación, evitando las pérdidas por radiación y convección que se producen en el túnel.

Además se recomienda realizar un análisis de costos incluyendo el ahorro en combustible que producirá mediante este sistema, considerando que la capacidad calorífica del cascabillo de café es aproximadamente de 17.76 MJ/kg, cuyo precio oscila en el mercado alrededor de Q80.00 a Q120.00 por metro cúbico del mismo.

Se recomienda evaluar las curvas de cocción, al momento de modificar las dimensiones de las paredes internas del ladrillo, debido que al existir cambios en la densidad del producto, los tiempos de cocción serán distintos.

## XI. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- (1) Agemac Verdes 2002. *Manual de cocción de los materiales arcillosos*. Medellín, Colombia. 183 páginas
- (2) Agemac Verdes 2002. *Manual preparación de materias primas y su influencia en el rendimiento global del proceso de fabricación de tejas y ladrillos*. Medellín, Colombia
- (3) A.B. Searle 1989 - *The Chemistry and Physics of Clays* - IIIa Edizione - E. Benn LMT London. 222 páginas.
- (4) ASTM Standard Specification for Brick, References ASTM 423-66 and D424-59 Límites líquido y plástico de un suelo. 25 páginas.
- (5) ASTM Standard Specification for Brick, References ASTM D421-58 and D422-63 Análisis granulométrico-método mecánico. 45 páginas
- (6) Bensoain E. 1995 *Mineralogía de arcillas de suelos*. Instituto Interamericano de Cooperación para Agricultura IICA San José Costa Rica.
- (7) Bernal I., Quintero Espitia. 2000 *Análisis Próximo de arcillas para cerámica*. Bogotá, Colombia. 577 páginas.
- (8) Elías Xavier. 2001 *Optimización de procesos cerámicos industriales* Fundación Universitaria Iberoamericana Medellín.
- (9) Technical Notes on Brick Construction 9B *Manufacturing, Classification, and Selection of Brick Selection Part III* January 1989. 6 páginas
- (10) Virta, Robert. 1999. *Clays, In: Minerals Yearbook, Metals and Minerals* Volume 1 U.S. Geological Survey. U.S. Government Printing Office.
- (11) García F. 2003. Documento: Composición de arcillas <http://www.uclm.es/user/higuera/yym/arcillas.htm>. España
- (12) Rodríguez. J 1998. Documento: Proceso de fabricación de baldosas cerámicas. [http:// proceso de fabricación de baldosas ceramicas.pdf](http://proceso de fabricacion de baldosas ceramicas.pdf)

## Apéndice

Gráfico No. 15 Curva del límite líquido del barro

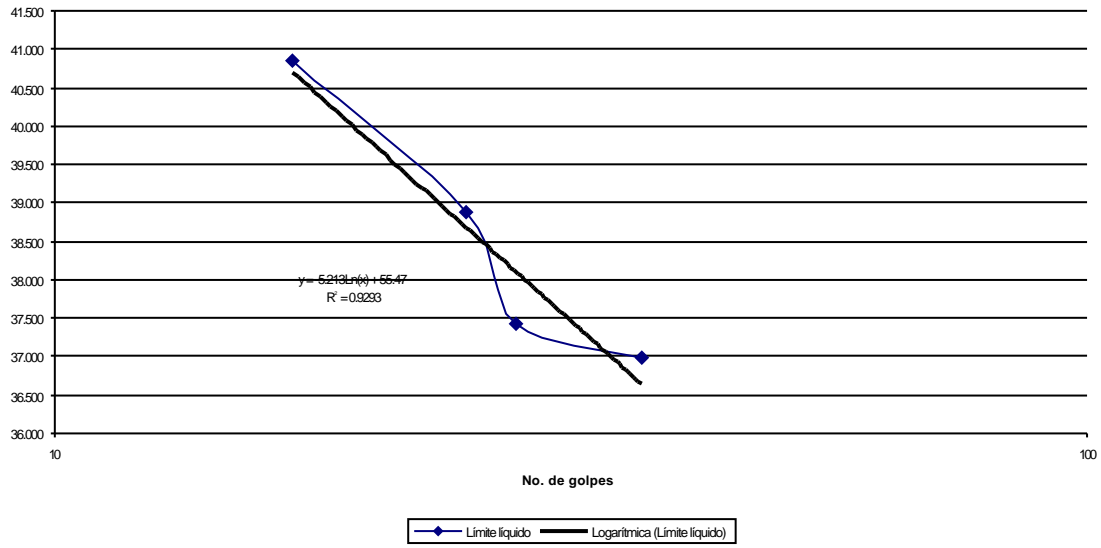
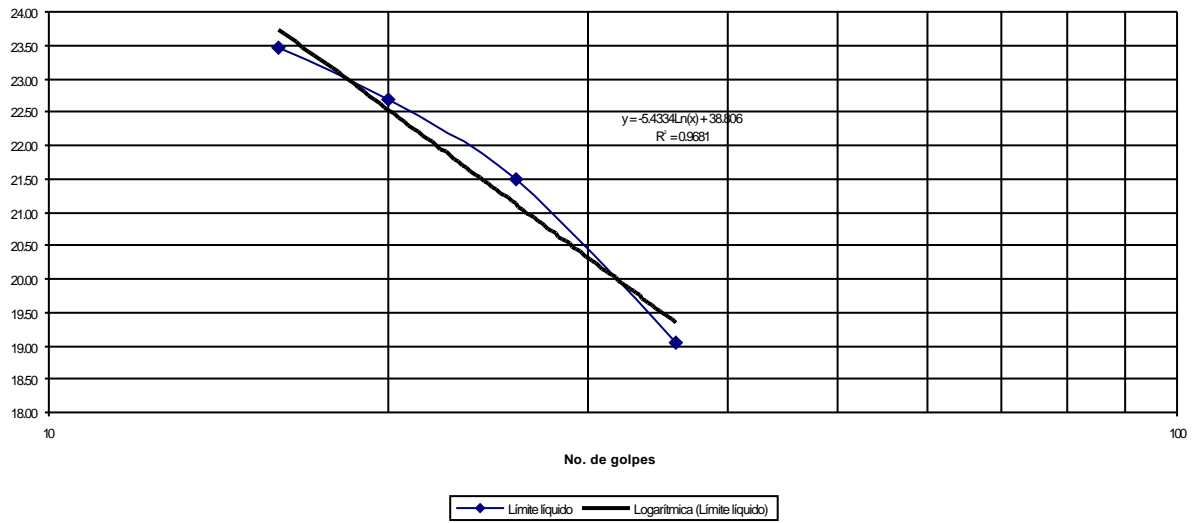


Gráfico No. 15 Curva del límite líquido de talpetate



## Apéndice B: Curva eficiencia del molino laminador LI 810

Gráfico No.17 Curva de eficiencia del molino a implementar LI 810

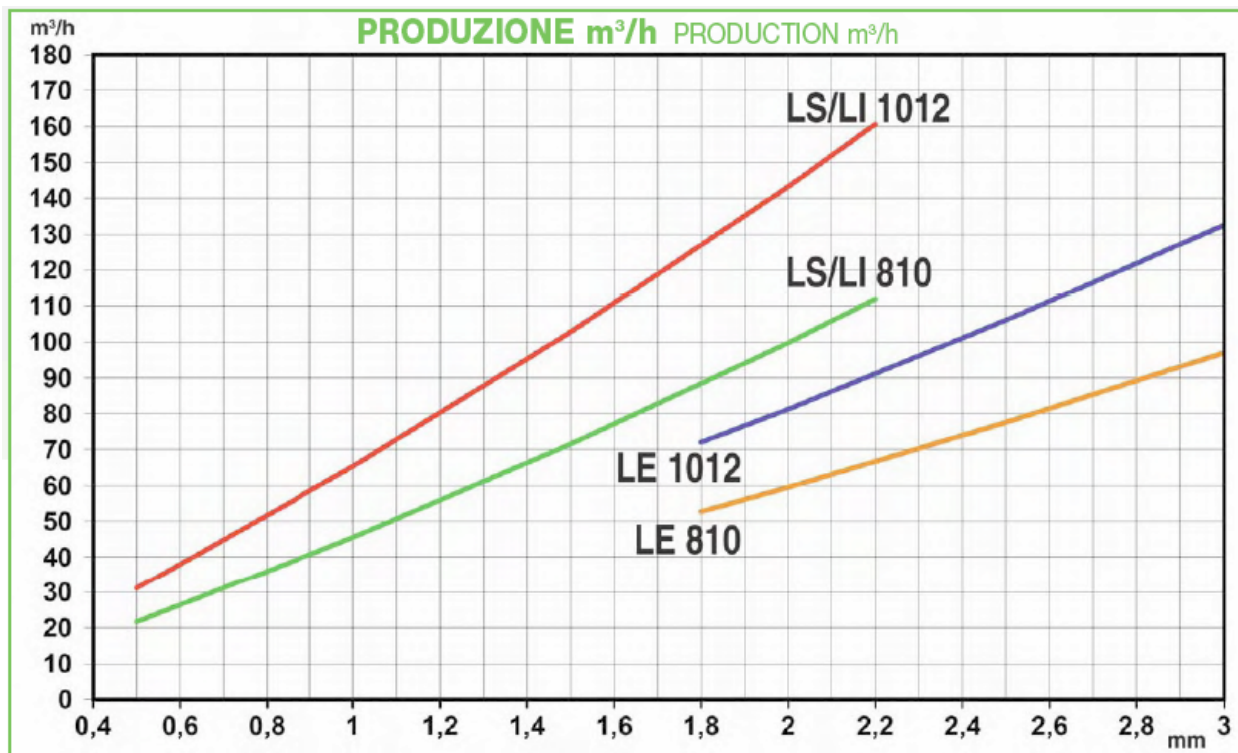
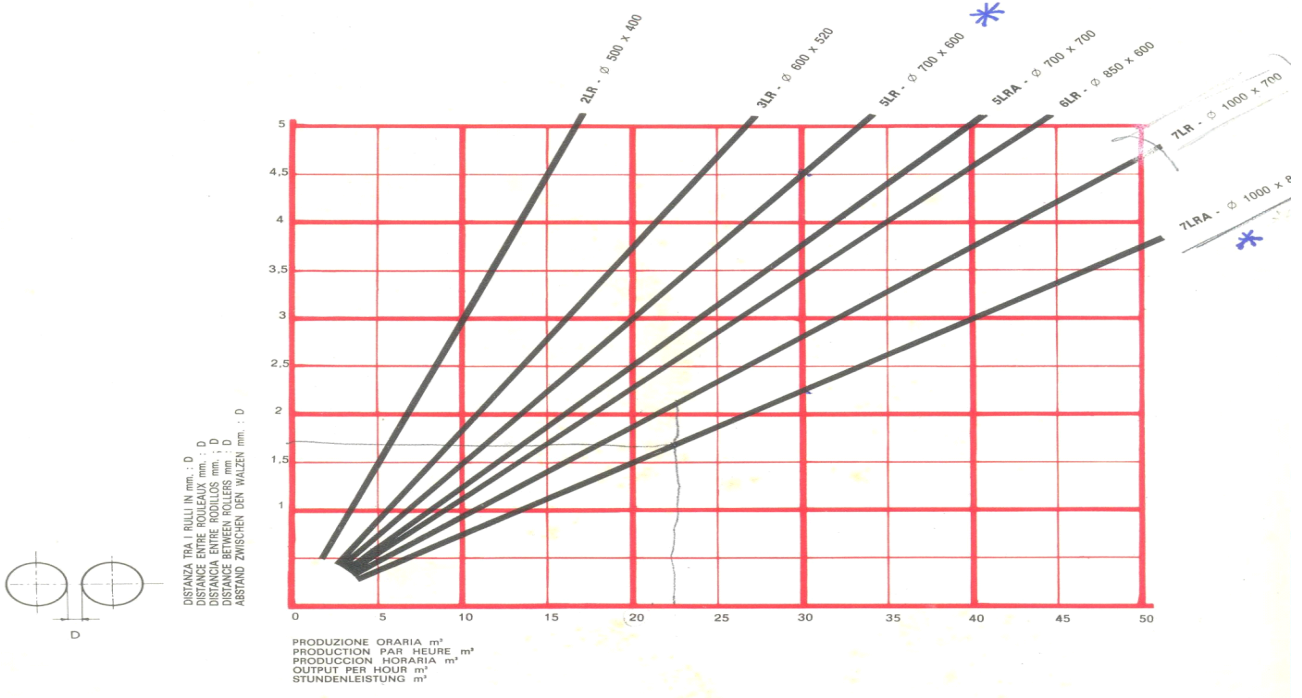


Gráfico No. 18 Curva de eficiencia del molino actual L7



## Apéndice C: Costos estimados para la implementación del molino LI 810

A continuación se presenta la tabla utilizada para estimar los costos de instalación del equipo, que incluyen.

- Conexiones eléctricas, así como puesta en tierra.
- Aceites y grasas necesario para el engrase
- Instalación de tubería para llevar el aire comprimido hasta los puntos de utilización
- Armario eléctrico y cables
- Panel del control
- Tolvas de conexiones entre laminador y cintas
- Protección

Grafico No. 19 Factores asumidos para establecer costos estimados  
de instalación del molino laminador

Fuente: Perry's Chemicals Engineer Handbook

**TABLE 9-53 Estimate Using Factors from Table 9-51**

| Details (solids-fluid, grass-roots plant) | Factor<br>assumed | Cost, \$  | Percentage<br>of total |
|---|-------------------|-----------|------------------------|
| Equipment, delivered                      | 1.00              | 1,000,000 | 23.4                   |
| Installed                                 | 0.41              | 410,000   | 9.6                    |
| Piping                                    | 0.34              | 340,000   | 8.0                    |
| Electrical                                | 0.13              | 130,000   | 3.0                    |
| Instruments                               | 0.13              | 130,000   | 3.0                    |
| Battery-limit building and service        | 0.30              | 300,000   | 7.0                    |
| Excavation and site preparation           | 0.15              | 150,000   | 3.5                    |
| Auxiliaries                               | 0.52              | 520,000   | 12.2                   |
| Total physical plant                      | 2.98              | 2,980,000 | 69.7                   |
| Field expense                             | 0.39              | 390,000   | 9.1                    |
| Engineering                               | 0.39              | 390,000   | 9.1                    |
| Direct plant costs                        | 3.76              | 3,760,000 | 87.9                   |
| Contractor's fees, overhead, profit       | 0.13              | 130,000   | 3.0                    |
| Contingency                               | 0.39              | 390,000   | 9.1                    |
| Total fixed-capital investment            | 4.28              | 4,280,000 | 100.0                  |

Cuadro No. 13 Costos estimados asociados a la instalación del molino laminador

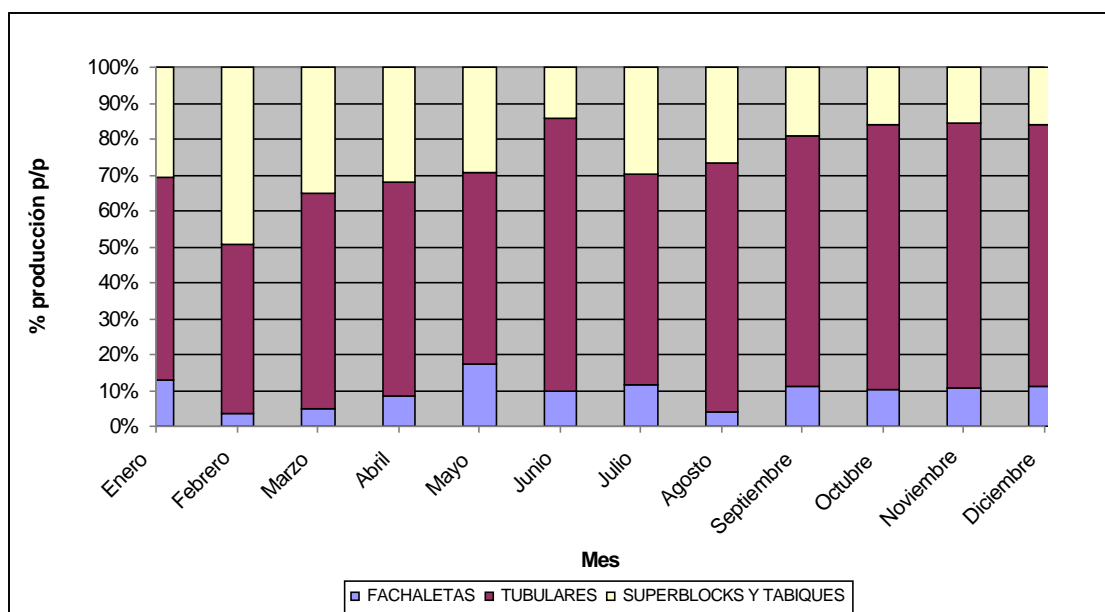
|  |                     | Porcentaje (*) |
|--|---------------------|----------------|
| Costo de instalación del equipo:               | Q 217,039.14        | 9.60%          |
| Costo de instalación de componentes eléctricos | Q 67,824.73         | 3.00%          |
| Costo de instalación de instrumentación        | Q 67,824.73         | 3.00%          |
| <u>Total de gastos por la planta física</u>    | <u>Q 352,688.60</u> |                |
| Contingencia                                   | Q 205,735.02        | 9.10%          |
| Costo total de instalación del equipo          | Q 2,819,248.01      |                |

## Apéndice D: Estimación de la inversión.

Cuadro No. 14 Porcentaje de producción mensual de los distintos tipos de ladrillos producidos

| Productos                  | Ene ro | Febr ero | Mar zo | Abri l | Ma yo | Juni o | Juli o | Ago sto | Sept iem bre | Oct ubre | Novi embr e | Dicie mbre |
|----------------------------|--------|----------|--------|--------|-------|--------|--------|---------|--------------|----------|-------------|------------|
| FACHALETAS (%)             | 12.91  | 3.49     | 4.93   | 8.65   | 17.20 | 9.92   | 11.44  | 4.17    | 11.18        | 10.11    | 10.73       | 11.26      |
| TUBULARES (%)              | 56.46  | 47.35    | 59.85  | 59.48  | 53.29 | 75.86  | 58.62  | 69.20   | 69.92        | 73.70    | 73.7        | 72.7       |
| SUPERBLOCKS Y TABIQUES (%) | 30.63  | 49.16    | 35.22  | 31.87  | 29.50 | 14.21  | 29.94  | 26.63   | 18.90        | 16.20    | 15.5        | 15.9       |

Gráfico No. 20 Producción en porcentaje por familia de productos



Cuadro No. 15 Producción estimada en toneladas al mes mediante el molino LI 810

| Producto               | Enero    | Febrero  | Marzo    | Abril    | Mayo     | Junio    | Julio    |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| FACHALETAS             | 407.88   | 125.29   | 194.50   | 262.59   | 602.21   | 342.57   | 336.06   |
| TUBULARES              | 1,783.54 | 1,700.73 | 2,360.66 | 1,805.02 | 1,865.70 | 2,619.56 | 1,721.78 |
| SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 967.71   | 1,765.63 | 1,389.40 | 967.03   | 1,032.82 | 490.81   | 879.54   |
| Total:                 | 3,159.14 | 3,591.65 | 3,944.57 | 3,034.64 | 3,500.73 | 3,452.94 | 2,937.37 |

| Producto               | Agosto   | Septiembre | Octubre  | Noviembre | Diciembre |
|------------------------|----------|------------|----------|-----------|-----------|
| FACHALETAS             | 116.57   | 344.55     | 394.87   | 419.43    | 440.03    |
| TUBULARES              | 1,936.87 | 2,154.75   | 2,879.72 | 2,880.76  | 2,843.61  |
| SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 745.35   | 582.48     | 632.81   | 607.01    | 623.56    |
| Total:                 | 2,798.78 | 3,081.77   | 3,907.40 | 3,907.20  | 3,907.20  |

Cuadro No. 16 Producción promedio en toneladas por hora producidas por el molino LI 810

| Mes                    | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo  | Junio | Julio | Agosto | Sep   | Oct   | Nov  | Dic. |
|------------------------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|------|------|
| Toneladas producidas/h | 20.38 | 20.79   | 21.00 | 20.79 | 20.58 | 20.76 | 17.40 | 16.54  | 16.12 | 17.71 | 16.5 | 16.5 |

Cuadro No. 17 Producción promedio en toneladas por hora producidas por el molino 7RA

| Mes                    | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo  | Junio | Julio | Agosto | Sep  | Oct  | Nov  | Dic. |
|------------------------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|------|------|------|
| Toneladas producidas/h | 17.05 | 17.39   | 17.92 | 15.02 | 17.28 | 13.84 | 13.92 | 13.93  | 12.8 | 12.2 | 13.2 | 13.2 |

Cuadro No. 18 Relación costo por tonelada producida en máquina, en quetzales (Q)

| Mes        | Producción (TM) | TM ingresada a patio | Materia Prima | Mano de Obra | Insumos | Energía Eléctrica | Combustibles y Lubricantes | Mant. Y reparación | Dep.. | Total  |
|------------|-----------------|----------------------|---------------|--------------|---------|-------------------|----------------------------|--------------------|-------|--------|
| Enero      | 3159.16         | 2720.96              | 34.03         | 126.64       | 28.47   | 27.69             | 24.14                      | 29.39              | 22.76 | 256.67 |
| Febrero    | 3591.63         | 3196.07              | 24.96         | 106.52       | 21.93   | 24.31             | 19.14                      | 19.42              | 20.68 | 219.77 |
| Marzo      | 3944.57         | 3863.34              | 24.21         | 94.98        | 19.19   | 20.88             | 16.32                      | 20.21              | 17.71 | 216.81 |
| Abril      | 3034.65         | 2694.44              | 30.09         | 117.88       | 22.89   | 23.91             | 24.27                      | 36.03              | 27.92 | 271.25 |
| Mayo       | 3500.73         | 3362.66              | 27.74         | 107.14       | 22.03   | 22.99             | 21.75                      | 25.56              | 22.37 | 249.32 |
| Junio      | 3452.94         | 3192.39              | 31.14         | 105.29       | 25.93   | 37.83             | 23.37                      | 19.02              | 25.50 | 252.61 |
| Julio      | 2937.37         | 3130.66              | 27.13         | 102.97       | 21.75   | 35.89             | 27.92                      | 14.91              | 25.67 | 264.69 |
| Agosto     | 2785.53         | 2489.04              | 29.51         | 134.92       | 23.64   | 45.07             | 26.02                      | 14.77              | 34.72 | 296.48 |
| Septiembre | 3081.77         | 2567.41              | 45.58         | 125.96       | 32.77   | 47.46             | 24.84                      | 19.00              | 33.66 | 295.88 |
| Octubre    | 3907.40         | 3560.23              | 35.44         | 121.58       | 30.73   | 40.56             | 22.69                      | 22.67              | 28.82 | 289.33 |
| Noviembre  | 3950.00         | 3870                 | 27.74         | 125.96       | 32.77   | 47.46             | 24.84                      | 19.00              | 22.60 | 300.38 |
| Diciembre  | 3950.00         | 3870                 | 38.30         | 121.58       | 30.73   | 45.07             | 24.84                      | 25.56              | 28.82 | 314.90 |

Cuadro No. 19 Costos variables e ingresos por tonelada producida en máquina

| Mes        | Producto               | TM/h  | Costo por TM/producida | Precio de venta/millar | Ganancia | Ganancia Neta/TM | Total      | Considerando ventas | Flujo mensual |
|------------|------------------------|-------|------------------------|------------------------|----------|------------------|------------|---------------------|---------------|
| Enero      | FACHALETAS             | 10.09 | Q102.67                | Q3,341.42              | 45.20%   | 46.407           | Q146,606.0 | Q109,954.5          | Q143,594.11   |
|            | TUBULARES              | 22.89 | Q77.15                 | Q1,859.56              | 5.80%    | 4.474            | Q14,135.55 | Q12,015.22          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 18.18 | Q76.69                 | Q1,758.19              | 10.50%   | 8.053            | Q25,440.37 | Q21,624.32          |               |
| Feb.       | FACHALETAS             | 12.30 | Q88.04                 | Q3,341.42              | 45.20%   | 39.795           | Q142,927.6 | Q107,195.7          | Q139,939.74   |
|            | TUBULARES              | 27.91 | Q66.04                 | Q1,859.56              | 5.80%    | 3.830            | Q13,757.49 | Q11,693.87          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 22.16 | Q65.67                 | Q1,758.19              | 10.50%   | 6.895            | Q24,764.90 | Q21,050.17          |               |
| Marzo      | FACHALETAS             | 12.42 | Q86.86                 | Q3,341.42              | 45.20%   | 39.259           | Q154,859.3 | Q131,630.4          | Q167,107.94   |
|            | TUBULARES              | 28.19 | Q65.15                 | Q1,859.56              | 5.80%    | 3.779            | Q14,905.98 | Q12,670.08          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 22.38 | Q64.78                 | Q1,758.19              | 10.50%   | 6.802            | Q26,832.30 | Q22,807.45          |               |
| Abril      | FACHALETAS             | 12.30 | Q108.66                | Q3,341.42              | 45.20%   | 49.116           | Q149,048.8 | Q126,691.5          | Q160,837.91   |
|            | TUBULARES              | 27.91 | Q81.51                 | Q1,859.56              | 5.80%    | 4.728            | Q14,346.69 | Q12,194.69          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 22.16 | Q81.05                 | Q1,758.19              | 10.50%   | 8.510            | Q25,825.53 | Q21,951.70          |               |
| Mayo       | FACHALETAS             | 12.18 | Q99.88                 | Q3,341.42              | 45.20%   | 45.144           | Q158,037.5 | Q134,331.9          | Q170,537.56   |
|            | TUBULARES              | 27.63 | Q74.92                 | Q1,859.56              | 5.80%    | 4.345            | Q15,211.90 | Q12,930.11          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 21.93 | Q74.50                 | Q1,758.19              | 10.50%   | 7.822            | Q27,382.98 | Q23,275.54          |               |
| Junio      | FACHALETAS             | 12.28 | Q101.20                | Q3,341.42              | 45.20%   | 45.740           | Q157,938.3 | Q134,247.6          | Q170,430.56   |
|            | TUBULARES              | 27.87 | Q75.91                 | Q1,859.56              | 5.80%    | 4.403            | Q15,202.35 | Q12,922.00          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 22.12 | Q75.48                 | Q1,758.19              | 10.50%   | 7.925            | Q27,365.80 | Q23,260.93          |               |
| Julio      | FACHALETAS             | 12.28 | Q106.03                | Q3,341.42              | 40.20%   | 42.626           | Q125,207.1 | Q106,426.0          | Q138,227.53   |
|            | TUBULARES              | 27.87 | Q89.09                 | Q1,859.56              | 4.80%    | 4.276            | Q12,561.29 | Q10,677.10          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 22.12 | Q88.41                 | Q1,758.19              | 9.57%    | 8.461            | Q24,852.18 | Q21,124.35          |               |
| Agosto     | FACHALETAS             | 10.30 | Q118.77                | Q3,341.42              | 40.20%   | 47.745           | Q132,994.8 | Q113,045.6          | Q143,243.64   |
|            | TUBULARES              | 23.36 | Q89.09                 | Q1,859.56              | 4.80%    | 4.276            | Q11,911.97 | Q10,125.17          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 18.55 | Q88.59                 | Q1,758.19              | 9.57%    | 8.478            | Q23,615.13 | Q20,072.86          |               |
| Septiembre | FACHALETAS             | 9.54  | Q118.53                | Q3,341.42              | 40.20%   | 47.649           | Q146,842.0 | Q124,815.7          | Q158,157.95   |
|            | TUBULARES              | 21.64 | Q88.91                 | Q1,859.56              | 4.80%    | 4.268            | Q13,152.22 | Q11,179.39          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 17.18 | Q88.41                 | Q1,758.19              | 9.57%    | 8.461            | Q26,073.90 | Q22,162.81          |               |
| Octubre    | FACHALETAS             | 10.48 | Q115.90                | Q3,341.42              | 40.20%   | 46.593           | Q182,059.2 | Q154,750.3          | Q196,089.07   |
|            | TUBULARES              | 23.77 | Q86.94                 | Q1,859.56              | 4.80%    | 4.173            | Q16,306.53 | Q13,860.55          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 18.87 | Q86.45                 | Q1,758.19              | 9.57%    | 8.273            | Q32,327.22 | Q27,478.14          |               |
| Nov.       | FACHALETAS             | 9.76  | Q120.33                | Q3,341.42              | 40.20%   | 48.374           | Q191,075.6 | Q162,414.3          | Q205,800.30   |
|            | TUBULARES              | 22.15 | Q90.26                 | Q1,859.56              | 4.80%    | 4.333            | Q17,114.10 | Q14,546.99          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 17.59 | Q89.75                 | Q1,758.19              | 9.57%    | 8.589            | Q33,928.21 | Q28,838.98          |               |
| Dic        | FACHALETAS             | 9.76  | Q126.15                | Q3,341.42              | 40.20%   | 50.711           | Q200,309.4 | Q170,263.0          | Q215,745.61   |
|            | TUBULARES              | 22.15 | Q94.63                 | Q1,859.56              | 4.80%    | 4.542            | Q17,941.14 | Q15,249.97          |               |
|            | SUPERBLOCKS Y TABIQUES | 17.59 | Q94.09                 | Q1,758.19              | 9.57%    | 9.005            | Q35,567.79 | Q30,232.62          |               |

Cuadro No. 20 Determinación de la tasa de retorno de la inversión  
de implementar el molino LI 810

|                              | Año 0          | Año 1         | Año 2         | Año 3        | Año 4        | Año 5         |
|------------------------------|----------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| Ganancia sobre ton/producida |                | Q2,009,711.94 | Q2,049,906.17 | Q2,090,904.3 | 2132722.384  | 2175376.832   |
| Impuesto                     |                | -Q623,010.70  | -Q635,470.91  | -Q648,180.3  | -Q661,143.94 | -Q674,366.82  |
| Utilidad Neta                |                | Q1,386,701.24 | Q1,414,435.26 | Q1,442,723.9 | Q1,471,578.4 | Q1,501,010.01 |
| Inversión equipo             | Q2,260,824.38  |               |               |              |              |               |
| Costos instalación           | Q 352,688.60   |               |               |              |              |               |
| Contingencia                 | Q 205,735.02   |               |               |              |              |               |
| Flujo                        | -Q2,819,248.01 | Q1,386,701.24 | Q1,414,435.26 | Q1,442,723.9 | Q1,471,578.4 | Q1,501,010.01 |

|            |               |
|------------|---------------|
| <i>TIR</i> | 42%           |
| <i>VAN</i> | Q1,664,963.36 |

|                        |        |
|------------------------|--------|
| Porcentaje impuesto    | 31.00% |
| Inflación              | 6.00%  |
| Tasa crecimiento anual | 2.00%  |
| % Para VAN             | 18.00% |

## Apéndice F: Pruebas de resistencia a la compresión

Análisis de ladrillo de barro cocido

Norma: Según estudio C.I.I.

Estudio: Tabiques, verjas y en general paredes sin carga, tipo “B”

Producto: Tubular 14x9x29

Cuadro No. 21 Resistencia a la compresión para el ladrillo cocido

|              |  |
|--------------|--|
| Informe:     | 633-M                                  |
| Interesado:  | Técnicas industriales en cerámica S.A. |
| Fecha:       | 12/7/2007                              |
| No. muestras | 3                                      |
| Medidas:     | tubular 14x9x29                        |

| Número de muestra | Peso (kg) | Absorción (%) | Resistencia a compresión (kg/cm <sub>2</sub> ) |
|-------------------|-----------|---------------|--|
| 1                 | 3.709     | 19.2          | 69.29  |
| 2                 | 3.750     | 18.35         | 58.23  |
| 3                 | 3.699     | 19.39         | 52.93  |
| Promedio          |           | 18.98         | 60.15  |

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Sección de Metales productos Manufacturados

Cuadro No. 22 Prueba de resistencia realizada con la curva óptima de cocción

|              |  |
|--------------|--|
| Informe:     | 2045-M                                 |
| Interesado:  | Técnicas industriales en cerámica S.A. |
| Fecha:       | 18/09/2007                             |
| No. muestras | 6                                      |
| Medidas:     | tubular 14x9x29                        |

| Número de muestra | Peso (kg) | Absorción (%) | Resistencia a compresión (kg/cm <sub>2</sub> ) |
|-------------------|-----------|---------------|--|
| 1                 | 3.963     | 17.45         | 82.65  |
| 2                 | 3.979     | 17.44         | 80.85  |
| 3                 | 3.892     | 18.22         | 71.66  |
| 4                 | 3.951     | 18.3          | 71.19  |
| 5                 | 3.964     | 17.92         | 72.4   |
| 6                 | 3.949     | 17.26         | 80.91  |
| Promedio          |           | 17.765        | 76.61  |

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Sección de Metales productos Manufacturados

Análisis de ladrillo de barro cocido

Norma: Según estudio C.I.I.

Estudio: Tabiques, verjas y en general paredes sin carga, tipo “B”

Producto: SB 3H (14x19x39)

Cuadro No. 23 Resistencia a la compresión para el ladrillo cocido

|              |                                       |
|--------------|---------------------------------------|
| Informe:     | 129-M                                 |
| Interesado:  | Técnicas industriales en cerámica S.A |
| Fecha:       | 29/04/2007                            |
| No. muestras | 4                                     |
| Medidas:     | SuperBlock 3H (14x19x39)              |

| Número de muestra | Peso (kg) | Absorción (%) | Resistencia a compresión (kg/cm <sub>2</sub> ) |
|-------------------|-----------|---------------|--|
| 1                 | 10.549    | 20.7          | 40.69  |
| 2                 | 10.333    | 20.62         | 42.1   |
| 3                 | 9.767     | 21.99         | 51.64  |
| 4                 | 9.739     | 21.2          | 51.64  |
| Promedio          |           | 21.128        | 46.518   |

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Sección de Metales productos Manufacturados

Cuadro No. 24 Prueba de resistencia realizada con la curva óptima de cocción

|              |                                       |
|--------------|---------------------------------------|
| Informe:     | 2058-M                                |
| Interesado:  | Técnicas industriales en cerámica S.A |
| Fecha:       | 18/09/2007                            |
| No. muestras | 6                                     |
| Medidas:     | SuperBlock 3H (14x19x39)              |

| Número de muestra | Peso (kg) | Absorción (%) | Resistencia a compresión (kg/cm <sub>2</sub> ) |
|-------------------|-----------|---------------|--|
| 1                 | 10.439    | 18.59         | 58.12  |
| 2                 | 10.321    | 17.97         | 62.94  |
| 3                 | 10.520    | 18.56         | 62.39  |
| 4                 | 10.370    | 18.01         | 61.89  |
| 5                 | 10.462    | 18.47         | 62.23  |
| 6                 | 10.567    | 18.87         | 65.59  |
| Promedio          |           | 18.412        | 62.193   |

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Sección de Metales productos Manufacturados

# Apéndice G: Cálculo del balance de masa y energía para el sistema de recirculación

Utilización de aire seco proveniente de la combustión para el calentamiento de los compartimientos (cámaras posteriores)

## A. Balance de energía:

### 1. Cálculo del calor transferido

$$\begin{aligned}Q &= \dot{m} * H_{aire} \\Q &= (v_{aire} * \rho_{aire} * S_{tunnel}) * H_{aire} \\Q &= \left( 7.98 \frac{m}{s} * 0.9592 \frac{kg}{m^3} * (25m * 0.75m) \right) * 382.4 \frac{kJ}{kg} \\Q &= 32,034.18 \frac{kJ}{s}\end{aligned}$$

### 2. Cálculo del calor aprovechado

$$\begin{aligned}Q &= \dot{m} * H_{aire} \\Q &= (v_{aire} * \rho_{aire} * S_{tunnel}) * H_{aire} \\Q &= \left( 7.98 \frac{m}{s} * 0.9592 \frac{kg}{m^3} * (25m * 0.75m) \right) * 382.4 \frac{kJ}{kg} \\Q &= 26,423.00 \frac{kJ}{s}\end{aligned}$$

### 3. Cálculo del calor perdido a los alrededores

$$\begin{aligned}Q_{transferido} - Q_{aprovechado} &= Q_{perdido} \\Q &= \left( 32,034.18 \frac{kJ}{kg} - 26,423.00 \frac{kJ}{kg} \right) \\Q &= 5,611.18 \frac{kJ}{s}\end{aligned}$$

## B. Balance de materiales

### 1. Determinación de la humedad eliminada

Producto: tubular 14X9X29

Unidades por cámara: 5000

Peso Húmedo : 9.47 lb

Peso Seco: 7.92 lb

$$\text{Humedad perdida} = \frac{(9.47 \text{ lb} - 7.92 \text{ lb}) * (5000)}{2200 \frac{\text{lb}}{\text{TM}}}$$

Humedad perdida = 3.523 ton

### 2. Determinación de las toneladas cargadas:

Producto: tubular 14X9X29

Unidades por cámara: 5000

Peso húmedo: 9.47 lb

Peso seco: 7.92 lb

$$\text{Entrada} = \frac{(9.47) * (5000)}{2200 \frac{\text{lb}}{\text{TM}}} = 21.523 \text{ TM}$$

## Apéndice H: Cálculo de la curva óptima de cocción de tubular 14x9x29

Cuadro No.25 Límite de control superior e inferior utilizados para la curva de cocción de tubular 14x9x29

| Temperatura promedio (°C) | Rango móvil promedio | LIC     | LSC     |
|---------------------------|----------------------|---------|---------|
| 86.873                    | 2.252                | 80.883  | 92.863  |
| 103.053                   | 2.646                | 96.014  | 110.092 |
| 162.187                   | 12.544               | 128.820 | 195.553 |
| 226.700                   | 5.464                | 212.165 | 241.235 |
| 272.267                   | 8.052                | 250.847 | 293.686 |
| 361.000                   | 7.786                | 340.290 | 381.710 |
| 439.067                   | 8.710                | 415.899 | 462.234 |
| 502.933                   | 6.638                | 485.276 | 520.591 |
| 559.133                   | 13.867               | 522.248 | 596.019 |
| 638.533                   | 8.824                | 615.062 | 662.005 |
| 702.800                   | 7.343                | 683.268 | 722.332 |
| 729.600                   | 9.543                | 704.216 | 754.984 |
| 690.600                   | 10.457               | 662.784 | 718.416 |
| 631.733                   | 5.624                | 616.774 | 646.693 |
| 584.933                   | 8.505                | 562.311 | 607.556 |
| 550.000                   | 13.429               | 514.280 | 585.720 |
| 503.800                   | 9.057                | 479.708 | 527.892 |
| 448.800                   | 10.300               | 421.402 | 476.198 |
| 419.933                   | 7.076                | 401.111 | 438.756 |
| 380.200                   | 11.629               | 349.268 | 411.132 |
| 353.933                   | 9.719                | 328.081 | 379.786 |
| 332.733                   | 10.195               | 305.614 | 359.853 |
| 312.800                   | 2.943                | 304.972 | 320.628 |
| 300.267                   | 2.552                | 293.477 | 307.056 |
| 282.867                   | 6.152                | 266.501 | 299.232 |
| 265.933                   | 7.362                | 246.351 | 285.516 |
| 242.400                   | 9.686                | 216.636 | 268.164 |
| 216.133                   | 8.705                | 192.979 | 239.288 |
| 195.800                   | 7.871                | 174.862 | 216.738 |
| 175.600                   | 12.957               | 141.134 | 210.066 |
| 151.233                   | 7.445                | 131.429 | 171.038 |

**Cuadro No. 26 Rango móvil de datos utilizados para la curva  
de cocción de tubular 14x9x29**

| RM1-2  | RM2-3  | RM3-4  | RM4-5  | RM5-6  | RM6-7  | RM7-8  | RM 8-9 | RM9-10 | RM 10-11 | RM 11-12 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| 1.327  | 2.000  | 2.100  | 0.300  | 4.100  | 2.000  | 2.300  | 3.000  | 2.900  | 2.900    | 1.000    |
| 5.247  | 4.100  | 0.300  | 2.300  | 2.400  | 0.700  | 1.800  | 1.100  | 3.100  | 6.700    | 1.600    |
| 11.053 | 6.500  | 16.900 | 1.000  | 1.000  | 6.700  | 0.700  | 5.000  | 22.000 | 10.000   | 2.000    |
| 11.313 | 1.100  | 17.900 | 1.300  | 18.000 | 14.000 | 1.000  | 4.000  | 1.000  | 1.000    | 15.000   |
| 0.500  | 3.700  | 4.200  | 2.100  | 0.600  | 17.400 | 2.000  | 9.000  | 7.700  | 1.000    | 14.200   |
| 9.733  | 3.000  | 11.000 | 8.000  | 2.000  | 9.000  | 7.000  | 16.000 | 10.000 | 16.000   | 5.000    |
| 5.000  | 0.000  | 8.000  | 5.000  | 1.000  | 3.000  | 20.000 | 15.000 | 5.000  | 10.000   | 1.000    |
| 4.933  | 12.000 | 5.000  | 8.000  | 3.000  | 3.000  | 1.000  | 0.000  | 8.000  | 21.000   | 6.000    |
| 28.933 | 20.000 | 2.000  | 12.000 | 2.000  | 0.000  | 1.000  | 6.000  | 5.000  | 1.000    | 6.000    |
| 12.133 | 15.000 | 3.000  | 20.000 | 15.000 | 13.000 | 12.000 | 38.000 | 5.000  | 7.000    | 10.000   |
| 13.533 | 2.000  | 5.000  | 2.000  | 11.000 | 2.000  | 9.000  | 13.000 | 24.000 | 3.000    | 9.000    |
| 22.800 | 26.000 | 1.000  | 0.000  | 3.000  | 3.000  | 6.000  | 8.000  | 1.000  | 5.000    | 7.000    |
| 21.600 | 37.000 | 1.000  | 6.000  | 2.000  | 3.000  | 6.000  | 7.000  | 11.000 | 10.000   | 5.000    |
| 39.400 | 34.000 | 1.000  | 10.000 | 0.000  | 0.000  | 12.000 | 9.000  | 3.000  | 7.000    | 7.000    |
| 6.733  | 11.000 | 4.000  | 6.000  | 7.000  | 8.000  | 7.000  | 3.000  | 0.000  | 4.000    | 5.000    |
| 12.067 | 18.000 | 15.000 | 0.000  | 2.000  | 25.000 | 15.000 | 8.000  | 5.000  | 4.000    | 5.000    |
| 17.000 | 20.000 | 1.000  | 16.000 | 27.000 | 2.000  | 8.000  | 8.000  | 26.000 | 27.000   | 7.000    |
| 12.800 | 11.000 | 4.000  | 10.000 | 11.000 | 6.000  | 16.000 | 16.000 | 2.000  | 5.000    | 11.000   |
| 9.200  | 16.000 | 4.000  | 13.000 | 6.000  | 9.000  | 1.000  | 2.000  | 10.000 | 6.000    | 19.000   |
| 12.067 | 13.000 | 3.000  | 4.000  | 13.000 | 4.000  | 4.000  | 5.000  | 11.000 | 5.000    | 3.000    |
| 2.800  | 25.000 | 1.000  | 7.000  | 12.000 | 18.000 | 6.000  | 1.000  | 4.000  | 28.000   | 29.000   |
| 1.067  | 5.000  | 6.000  | 3.000  | 8.000  | 3.000  | 5.000  | 7.000  | 32.000 | 20.000   | 20.000   |
| 9.733  | 14.000 | 14.000 | 10.000 | 10.000 | 1.000  | 12.000 | 2.000  | 10.000 | 14.000   | 22.000   |
| 5.200  | 3.000  | 1.000  | 3.000  | 1.000  | 3.000  | 3.000  | 3.000  | 7.000  | 0.000    | 0.000    |
| 2.733  | 2.000  | 4.000  | 5.000  | 0.000  | 1.000  | 1.000  | 3.000  | 1.000  | 3.000    | 3.000    |
| 8.133  | 11.000 | 10.000 | 5.000  | 1.000  | 1.000  | 1.000  | 2.000  | 4.000  | 10.000   | 5.000    |
| 10.067 | 11.000 | 6.000  | 0.000  | 8.000  | 11.000 | 0.000  | 15.000 | 12.000 | 11.000   | 1.000    |
| 17.600 | 18.000 | 9.000  | 0.000  | 0.000  | 11.000 | 11.000 | 13.000 | 7.000  | 9.000    | 8.000    |
| 12.867 | 12.000 | 3.000  | 15.000 | 10.000 | 0.000  | 1.000  | 0.000  | 0.000  | 27.000   | 7.000    |
| 5.200  | 0.000  | 3.000  | 11.000 | 2.000  | 0.000  | 0.000  | 9.000  | 3.000  | 20.000   | 1.000    |
| 0.400  | 2.000  | 7.000  | 6.000  | 15.000 | 9.000  | 30.000 | 36.000 | 0.000  | 16.000   | 7.000    |
| 19.733 | 4.500  | 2.000  | 14.000 | 14.000 | 1.000  | 0.000  | 7.000  | 1.000  | 18.000   | 3.000    |

# Apéndice I: Cálculo de la curva óptima de cocción de SuperBlock 3H

Cuadro No. 27 Límite de control superior e inferior utilizados para la curva de cocción de SuperBlock 3H (14x19x39)

| Temperatura promedio (°C) | Rango móvil promedio | LIC     | LSC     |
|---------------------------|----------------------|---------|---------|
| 86.6                      | 2.1                  | 80.968  | 92.178  |
| 109.1                     | 4.6                  | 96.907  | 121.227 |
| 125.1                     | 8.3                  | 102.934 | 147.280 |
| 144.4                     | 8.5                  | 121.818 | 167.076 |
| 172.9                     | 13.1                 | 137.973 | 207.893 |
| 214.6                     | 9.1                  | 190.280 | 238.920 |
| 250.2                     | 6.5                  | 232.910 | 267.490 |
| 325.0                     | 8.1                  | 303.530 | 346.470 |
| 432.3                     | 21.3                 | 375.713 | 488.953 |
| 500.1                     | 15.4                 | 459.283 | 540.983 |
| 554.7                     | 18.9                 | 504.573 | 604.893 |
| 638.0                     | 17.8                 | 590.690 | 685.310 |
| 700.7                     | 14.4                 | 662.477 | 738.857 |
| 727.5                     | 13.9                 | 690.607 | 764.327 |
| 696.5                     | 21.3                 | 639.847 | 753.087 |
| 648.8                     | 13.4                 | 613.270 | 684.330 |
| 599.5                     | 25.4                 | 531.893 | 667.173 |
| 555.3                     | 23.2                 | 493.517 | 617.017 |
| 516.6                     | 19.0                 | 466.060 | 567.140 |
| 471.5                     | 21.8                 | 413.583 | 529.483 |
| 425.3                     | 8.6                  | 402.343 | 448.323 |
| 386.7                     | 8.9                  | 363.173 | 410.293 |
| 366.3                     | 7.8                  | 345.623 | 387.043 |
| 329.9                     | 9.0                  | 305.927 | 353.807 |
| 299.5                     | 7.6                  | 279.393 | 319.673 |
| 279.9                     | 6.4                  | 262.767 | 296.967 |
| 249.6                     | 7.6                  | 229.270 | 269.930 |
| 210.1                     | 8.4                  | 187.713 | 232.553 |
| 191.6                     | 12.6                 | 157.970 | 225.230 |
| 159.9                     | 10.0                 | 133.267 | 186.467 |
| 143.1                     | 14.0                 | 105.827 | 180.307 |

Cuadro No. 28 Rango móvil de datos utilizados para la curva de cocción de SuperBlock 3H (14x19x39)

| RM1-2 | RM2-3 | RM3-4 | RM4-5 | RM5-6 | RM6-7 | RM7-8 | RM 8-9 | RM9-10 | RM 10-11 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|----------|
| 1.9   | 3.7   | 1.3   | 0.6   | 0.9   | 5.9   | 1.9   | 4.0    | 2.0    | 0.8      |
| 6.8   | 6.0   | 6.1   | 0.3   | 0.5   | 4.4   | 1.4   | 2.5    | 4.0    | 2.7      |
| 1.2   | 7.4   | 4.0   | 0.8   | 1.0   | 1.0   | 3.0   | 6.0    | 3.4    | 9.0      |
| 0.3   | 5.0   | 3.7   | 10.3  | 12.6  | 3.3   | 8.5   | 8.0    | 7.0    | 6.6      |
| 9.0   | 4.0   | 3.0   | 5.0   | 10.0  | 8.5   | 18.3  | 4.3    | 5.7    | 8.0      |
| 6.0   | 9.0   | 1.0   | 20.0  | 14.0  | 29.0  | 15.0  | 13.0   | 17.0   | 26.0     |
| 15.0  | 0.0   | 8.0   | 5.0   | 4.0   | 13.0  | 22.0  | 7.0    | 11.0   | 7.0      |
| 8.0   | 1.0   | 7.0   | 9.0   | 18.0  | 5.0   | 4.0   | 4.0    | 5.0    | 5.0      |
| 8.0   | 10.0  | 5.0   | 12.0  | 16.0  | 20.0  | 3.0   | 6.0    | 4.0    | 3.0      |
| 25.0  | 14.0  | 17.0  | 61.0  | 28.0  | 72.0  | 5.0   | 3.0    | 10.0   | 13.0     |
| 6.0   | 3.0   | 4.0   | 9.0   | 74.0  | 79.0  | 4.0   | 7.0    | 12.0   | 7.0      |
| 25.0  | 35.0  | 12.0  | 34.0  | 29.0  | 55.0  | 18.0  | 2.0    | 24.0   | 5.0      |
| 8.0   | 7.0   | 29.0  | 13.0  | 47.0  | 88.0  | 1.0   | 9.0    | 6.0    | 8.0      |
| 3.0   | 0.0   | 2.0   | 70.0  | 5.0   | 72.0  | 4.0   | 2.0    | 1.0    | 16.0     |
| 2.0   | 5.0   | 2.0   | 17.0  | 30.0  | 40.0  | 0.0   | 15.0   | 15.0   | 24.0     |
| 16.0  | 7.0   | 3.0   | 110.0 | 80.0  | 10.0  | 1.0   | 22.0   | 18.0   | 10.0     |
| 14.0  | 8.0   | 12.0  | 63.0  | 5.0   | 45.0  | 1.0   | 8.0    | 10.0   | 11.0     |
| 15.0  | 6.0   | 7.0   | 132.0 | 104.0 | 45.0  | 17.0  | 1.0    | 6.0    | 1.0      |
| 13.0  | 17.0  | 14.0  | 118.0 | 79.0  | 27.0  | 0.0   | 9.0    | 11.0   | 6.0      |
| 2.0   | 2.0   | 2.0   | 99.0  | 68.0  | 42.0  | 0.0   | 11.0   | 7.0    | 3.0      |
| 3.0   | 1.0   | 2.0   | 135.0 | 72.0  | 50.0  | 5.0   | 7.0    | 7.0    | 4.0      |
| 14.0  | 11.0  | 17.0  | 37.0  | 23.0  | 1.0   | 1.0   | 0.0    | 4.0    | 1.0      |
| 7.0   | 8.0   | 14.0  | 20.0  | 8.0   | 15.0  | 1.0   | 15.0   | 6.0    | 3.0      |
| 2.0   | 4.0   | 8.0   | 27.0  | 2.0   | 4.0   | 12.0  | 12.0   | 0.0    | 5.0      |
| 2.0   | 5.0   | 2.0   | 2.0   | 40.0  | 43.0  | 3.0   | 7.0    | 1.0    | 7.0      |
| 5.0   | 10.0  | 5.0   | 20.0  | 19.0  | 12.0  | 1.0   | 3.0    | 8.0    | 11.0     |
| 4.0   | 12.0  | 3.0   | 5.0   | 6.0   | 1.0   | 5.0   | 8.0    | 9.0    | 7.0      |
| 0.0   | 33.0  | 4.0   | 5.0   | 8.0   | 30.0  | 2.0   | 10.0   | 2.0    | 5.0      |
| 7.0   | 33.0  | 3.0   | 10.0  | 5.0   | 10.0  | 1.0   | 4.0    | 6.0    | 8.0      |
| 2.0   | 8.0   | 1.0   | 45.0  | 20.0  | 60.0  | 3.0   | 0.0    | 4.0    | 5.0      |
| 2.0   | 21.0  | 13.0  | 29.0  | 5.0   | 28.0  | 6.0   | 0.0    | 1.0    | 15.0     |

## Apéndice J: Pruebas realizadas a materia prima y al ladrillo cocido

Gráfico No. 21 Prueba de resistencia a la compresión realizada en SuperBlock 3H (14x19x39)



Gráfico No. 21 Fractura realizada por la fuerza aplicada al ladrillo



Gráfico No. 22 Instrumento utilizado para determinar el límite líquido de la muestra de barro Specker



Gráfico No. 23 Surco realizado a la muestra de barro

