

**Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas”.
Facultad de Construcciones.**



**RESUMEN DE LA TESIS PRESENTADA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE DOCTOR EN
CIENCIAS TÉCNICAS.**

**“EVALUACION DEL USO DEL CARBONATO DE CALCIO COMO ADITIVO FUNDENTE EN
LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS DE CERAMICA ROJA. INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO”**

AUTOR: MSc. Ing. Yosvany Diaz Cardenas.

TUTORES: Dr. Sc. José F. Martirena Hernández.
Dra. Arq. Dania Betancourt Cura.

**Santa Clara
2011**

Introducción:

La humanidad en los últimos tiempos ha alcanzado niveles asombrosos en el desarrollo científico – técnico, lo cual repercute directamente en todas las esferas de la vida económica, política y social de los países. El hombre contemporáneo ha dividido el proceso evolutivo de la humanidad en macro períodos de tiempo, relacionados principalmente con los avances más significativos obtenidos en la ciencia e ingeniería de los materiales.

Aparejado a este desarrollo tecnológico, la humanidad se encuentra afectada por varios problemas y, sin dudas, podemos afirmar que la situación energética es uno de los más críticos; principalmente para países del Tercer Mundo, donde millones de personas viven en condiciones de pobreza, siendo el problema energético, tanto en Cuba como en los demás países subdesarrollados, un problema muy difícil de solucionar. Esto se debe a que gran parte de la energía es consumida, fundamentalmente, en forma de calor por la combustión de combustibles fósiles y en un menor porcentaje por el empleo de combustibles nucleares. Estas fuentes de limitadas reservas generan una elevada contaminación medio – ambiental por su uso indiscriminado, generando altas tasas de radioactividad y aumento del efecto invernadero, trayendo consigo la necesidad de alcanzar un balance entre el desarrollo y la conservación del medio ambiente.

La industria de materiales de la construcción, que agrupa variados procesos industriales tradicionales, específicamente la producción de materiales cerámicos, se ha visto afectada por los altos costos de los combustibles y en el caso específico de la industria del ladrillo rojo común, ha propiciado una sensible disminución de los niveles de producción, agudizándose en un mayor grado en los países del Tercer Mundo, donde pequeños y medianos productores se han visto afectados por el alto costo de los combustibles exigidos en el secado y la cocción.

Por otra parte, la industria cerámica se ubica entre las grandes contaminadoras que afectan al medio ambiente y a la salud humana, por los elevados consumos de energía, unido al uso de combustibles renovables y no renovables. Además, genera cambios significativos en la morfología del entorno natural debido a la extracción de la materia prima [1, 2]. Esto hace que cada vez más sea necesario lograr una mayor eficiencia energética en la industria cerámica roja, ya sea por el uso de hornos más eficientes, por la utilización de combustibles más económicos, o por la utilización de nuevas materias primas o por cualquier otra vía [3, 4].

Una de las tendencias actuales, que se encuentra en el centro de atención de investigadores y científicos es desarrollar tecnologías para la fabricación de materiales cerámicos, utilizando un

menor índice de consumo de energía, con un uso eficiente de portadores energéticos y un aprovechamiento de fuentes renovables de energía.

Una vía importante para lograr la eficiencia energética es mediante el uso de fundentes. Estos son componentes de bajo punto de fusión que al combinarse con los aluminosilicatos presentes en las arcillas, pueden reducir la temperatura de fusión de las mezclas. También son los encargados de disminuir la temperatura a la que ocurre la sinterización, durante el tratamiento térmico de las pastas cerámicas, proceso en el cual se produce la formación de fases vítreas que aportan a los materiales cerámicos la resistencia mecánica necesaria para su eficaz puesta en obra [5-8].

Desde el año 2004 y partiendo concepto del anterior, en el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) se trabaja en la utilización del CaCO_3 como fundente, en la producción de ladrillos de cerámica roja, a partir de la adición en pequeñas dosis (menores <10%) al material arcilloso que se emplea en la fabricación de ladrillos cerámicos, logrando efectos beneficiosos que permiten mantener las propiedades físico – mecánicas de los ladrillos, cuando la temperatura de cocción disminuye de 1000°C hasta 900°C , y la del consumo de combustible, en proporciones de un 20% en relación a práctica tradicional en la producción artesanal, sin que se afecte la calidad del producto cerámico final [9, 10].

Sin embargo, en anteriores trabajos [9-11], no se analiza la potencialidad del CaCO_3 , tomando en cuenta otros aspectos, como la finura o tamaño de partículas del mismo. Según algunos autores[12-15], la superficie específica del CaCO_3 adicionado al material arcilloso, influye en las propiedades finales del producto cerámico. Otro aspecto no analizado en el trabajo es lo relacionado con la influencia que podría tener el CaCO_3 sobre los procesos tecnológicos, como es el secado y la cocción. Estos procesos son de gran importancia y muy necesarios si se quiere aplicar este trabajo en la industria. Por todo esto, en esta investigación se aborda de forma precisa la utilización del CaCO_3 , como mineral fundente en la producción industrial de ladrillos de cerámica roja, con el objetivo de evaluar su influencia en los procesos tecnológicos, como el secado y la cocción, además de caracterizar la influencia del molido en su acción fundente en el producto cerámico. Para realizar este trabajo bajo las condiciones de Cuba, se utilizó la metodología que a continuación se expone.

Planteamiento y Definición del Problema:

Se detecta que el CaCO_3 posee un impacto positivo en la mejora de la eficiencia energética de la producción de ladrillos de cerámica roja, al propiciar una disminución de los costos de producción, a partir de la disminución del consumo de combustible durante el proceso de

cocción. No obstante, existen elementos que dificultan hoy la utilización del CaCO_3 como fundente en la industria, ya que no se conoce la finura más adecuada para su utilización, así como la influencia de la misma en las reacciones de sinterización que ocurren dentro de los materiales cerámicos. Por otro lado, no se han podido justificar algunos de los impactos beneficiosos de la utilización del CaCO_3 , como por ejemplo, en el tiempo de cocción, en el consumo de combustible; además, no se han analizado otros posibles impactos sobre los procesos tecnológicos como puede ser en el secado. De ahí que en esta investigación se plantea el siguiente problema científico:

¿Cómo será el comportamiento del carbonato de calcio finamente molido si se utiliza como aditivo fundente en la producción de ladrillos de cerámica roja?

El trabajo presenta como principal objeto de estudio, la producción de ladrillos de cerámica roja a escala de mediana industria, donde su principal campo de aplicación está en la utilización de aditivos fundentes para la producción de ladrillos cerámicos, con vistas a lograr mejoras en los procesos productivos.

Objetivo general:

Evaluar las características que debe tener el CaCO_3 para ser utilizado como fundente en la producción industrial de ladrillos de cerámica roja y su influencia sobre los procesos de secado y cocción.

Objetivos específicos:

1. Evaluar la influencia del tamaño de las partículas de CaCO_3 como fundente en la reacción de sinterización de los materiales cerámicos.
2. Definir los parámetros tecnológicos para el uso del CaCO_3 como aditivo fundente a escala industrial, al evaluar su efecto sobre los procesos de secado y cocción.
3. Realizar una evaluación técnica - económica de la introducción del CaCO_3 como aditivo fundente a escala industrial.

Tareas de Investigación:

Para dar un correcto cumplimiento a los objetivos trazados, se definieron las siguientes tareas de investigación:

1. Realización de un análisis bibliográfico que permita conocer el estado del arte de la temática, a través de la revisión de la literatura más actualizada sobre el tema.
2. Caracterización de las principales materias primas a emplear en la investigación.

3. Realizar estudios físico-mecánicos a las muestras elaboradas en el laboratorio bajo diferentes condiciones de fabricación.
4. Realizar estudios microestructurales de las muestras elaboradas en el laboratorio bajo diferentes condiciones de fabricación.
5. Definir el tamaño de partículas del CaCO_3 más adecuado para su uso como aditivo fundente en la producción a escala industrial.
6. Producción de ladrillos a escala industrial utilizando los mejores resultados obtenidos experimentalmente.
7. Evaluar la influencia del CaCO_3 sobre los procesos de secado y cocción de los ladrillos a escala de producción industrial.
8. Evaluación de los parámetros físico – mecánicos de los ladrillos producidos a escala real.
9. Evaluación técnico - económica del uso del CaCO_3 a escala industrial.

Hipótesis:

Si se utiliza el CaCO_3 como fundente finamente molido y adicionado en pequeñas proporciones en los materiales arcillosos utilizados para la producción de ladrillos cerámicos, se mejoran los procesos tecnológicos de secado y cocción, con una disminución del consumo energético, sin que se afecte la calidad del producto terminado.

Novedad Científica:

Se demuestra que cuando el carbonato de calcio es molido a un tamaño de partículas promedio de 150 μm , tiene una influencia positiva como fundente en la producción de ladrillos cerámicos, al facilitar un secado más rápido de los mismos, lo que permite una disminución del tiempo de cocción y del consumo de combustible.

Aportes científicos relevantes:

1. Se demuestra que la adición de carbonato de calcio finamente molido, produce cambios en la estructura de poros del ladrillo sin cocer, lo cual está dado por un aumento del tamaño promedio de poros, que permite disminuir el tiempo de secado.
2. Se demuestra que cuando el carbonato de calcio es molido a un tamaño de partículas promedio de 150 μm , tiene una influencia positiva como fundente sobre las propiedades mineralógicas de los materiales arcillosos usados en la producción de ladrillos, permitiendo mejorar sus propiedades físico – mecánicas.

Otros aportes del trabajo:

1. **En el orden teórico:** En el trabajo se demuestra que la adición de carbonato de calcio finamente molido al material arcilloso, provoca cambios en la estructura de poros del ladrillo sin cocer, obteniéndose un material más poroso. Esta es una de las causas por la cual se disminuye el tiempo de cocción de los ladrillos en los hornos, debido fundamentalmente, a una evaporación más rápida del agua durante la etapa de precalentamiento.
2. **En el orden práctico:** El principal aporte del trabajo está en el orden práctico donde se fundamenta científicamente que la utilización del carbonato de calcio contribuye a disminuir los consumos de energía en los procesos productivos, a escala industrial de los ladrillos de cerámica roja
3. **En el aspecto metodológico:** Se presenta un procedimiento que permite la utilización del carbonato de calcio como fundente para la producción de ladrillos de cerámica, a partir del uso de las tecnologías existentes en cada una de las fábricas.
4. En cuanto a la **preservación medioambiental:** Se demostró que esta adición contribuye a la disminución del consumo de combustibles fósiles como el petróleo. Ello conlleva una disminución de la emisión de gases de combustión hacia la atmósfera, lo que hace el proceso más compatible con la preservación del medio ambiente.
5. Desde el punto de vista **social:** El uso de este fundente conduce a un incremento en la producción de ladrillos de cerámica. Al disminuir el consumo energético durante los procesos térmicos, se logra obtener una mayor disponibilidad de este material en un menor tiempo, favoreciendo la construcción de obras de interés social y habitacional.
6. **En el aspecto económico:** Con la utilización del carbonato de calcio como fundente en la producción de materiales cerámicos, se evidencia que se pueden disminuir los costos por concepto de combustible, en el orden de un 27% con respecto a las producciones actuales.

Los artículos publicados sobre los resultados a que ha arribado este trabajo son los siguientes:

1. Dania Betancourt Cura, Fernando Martirena Hernández, Robert Day, Yosvany Díaz. Influencia de la adición de carbonato de calcio en la eficiencia energética de la producción de ladrillos de cerámica roja. Artículo publicado en la Revista "Ingeniería de la Construcción". No 3. Volumen 22. Págs.187-196. ISSN 0718-5073. Diciembre de 2007. Chile.

2. Yosvany Díaz Cárdenas, Dania Betancourt Cura, Fernando Martirena Hernández. Influencia de la finura de molido del carbonato de calcio en las propiedades físico mecánicas y de durabilidad de los ladrillos de cerámica roja. Artículo publicado en la Revista "Ingeniería de la Construcción". No 3. Volumen 26. Diciembre de 2011. Chile.
3. Martirena J.F, Day R.L., Betancourt D., Díaz Y., Improvement Of Engineering Properties And Energy Efficiency Of Fired Clay Bricks Through The Addition Of Calcite. Artículo publicado en la Revista "Masonry International". Journal of the British Masonry Society. Volumen 19, No.10 (octubre/noviembre 2006), Artículo No3, ISSN 0950 9615, UK (Inglaterra).
4. Yosvany Díaz, Dania Betancourt Cura, Fernando Martirena Hernández. Uso de aditivos fundentes en la producción de ladrillos de cerámica roja, 7mo Simposio Internacional de las Estructuras y los materiales de la construcción. Santa Clara. 2006
5. Yosvany Díaz, Dania Betancourt Cura, Fernando Martirena Hernández. Uso de fundentes en la producción de ladrillos cocidos. Investigación y desarrollo. Tercera Conferencia Internacional de Ecomateriales. Santa Clara. 2005
6. Dania Betancourt Cura, Fernando Martirena Hernández, Yosvany Díaz. Uso de aditivos fundentes para mejorar la eficiencia energética de la producción de ladrillos de cerámica roja. 6to Simposio Internacional de las Estructuras y los materiales de la construcción. Santa Clara, 2004

Estructura del Trabajo:

El trabajo se estructuró en: Resumen, Introducción, 3 capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

En el Capítulo I, se expone de forma clara y precisa la situación sobre el estado del arte, después de haberse hecho una amplia revisión bibliográfica de la literatura nacional e internacional más actualizada sobre el tema.

En el Capítulo II, se presenta el trabajo experimental realizado a escala de laboratorio. El mismo comprende los estudios, tanto a nivel micro como macro – estructural, a probetas cerámicas elaboradas con distintos porcentajes y finuras de aditivo bajo diferentes condiciones de elaboración.

En el capítulo III, se aborda el estudio de la influencia de la adición de pequeñas dosis de carbonato de calcio, sobre los procesos de secado y cocción de ladrillos de cerámica roja elaborados a escala de producción industrial, comparando su desempeño con ladrillos elaborados bajo los mismos parámetros de fabricación, pero sin la adición de carbonato de calcio (100% de material arcilloso). Cada capítulo cierra con conclusiones parciales.

Se realiza el análisis de los resultados más relevantes del trabajo, de los cuales se arriba a conclusiones generales. En las recomendaciones se brindan las sugerencias a tener en cuenta a la hora de aplicar los resultados en la práctica y en próximos trabajos de investigación sobre el tema.

La bibliografía se presenta de acuerdo con las normas vigentes y constituye una recopilación de la literatura consultada para la realización del trabajo.

En los anexos se plasman resultados de ensayos realizados a las muestras elaboradas durante el trabajo experimental, tanto en el laboratorio como en las fábricas donde se produjeron los ladrillos, los ensayos de caracterización a las materias primas y otras informaciones valiosas que avalan científicamente el trabajo.

Capítulo I: Utilización de fundentes en la producción de ladrillos cerámicos. Estado del arte.

En el presente Capítulo, se expone a través de la consulta de la literatura más actualizada, los problemas que afectan a la industria de ladrillo, tanto en nuestro país como a nivel internacional. Se tiene en cuenta sus principales retos, las opciones existentes en cuanto al uso de utilización de combustibles alternativos, la realización de cambios en los procesos de producción y la utilización de materias primas, así como las transformaciones mineralógicas que ocurren en los materiales arcillosos, a temperaturas inferiores a los 1000°C provocando un ahorro energético.

Primeramente se exponen los principales problemas y retos que enfrenta la industria de la cerámica roja a nivel internacional y nacional, que están dados principalmente por la gran cantidad de energía que se necesita en sus producciones y el elevado costo de las combustibles y las materias primas, además del impacto medio ambiental generado para la extracción de las materias primas y las tecnologías que se utilizan. Por lo cual la industria de la cerámica roja debe plantearse los siguientes retos:

1. Acometer soluciones para aumentar la eficiencia energética, tanto a escala industrial como artesanal. Esto se puede lograr aumentando la eficiencia en los procesos de producción, a partir de la utilización de tecnologías de hornos más eficientes, el uso de combustibles alternativos, o por la implementación de mejoras a las materias primas, a partir de adiciones minerales a las mezclas, que permitan disminuir la temperatura de cocción de los materiales arcillosos.

2. Buscar tecnologías que permitan optimizar la producción de ladrillos cerámicos a pequeña escala, teniendo en cuenta que es la más predomina y una de las más productoras.

Posteriormente se explican las posibles soluciones para mejorar los perfiles económicos y ambientales en la industria de la cerámica roja, deben ser vistas principalmente en tres dimensiones: una primera dimensión relacionada con lograr mejoras en los procesos productivos, específicamente en los procesos térmicos (secado y cocción), a partir del uso de tecnologías más sostenibles y que hagan mejor uso de los portadores energéticos. Una segunda dimensión perteneciente al uso de combustibles alternativos y una tercera referente a la utilización de materias primas económicas que permitan aumentar la eficiencia energética en la producción de materiales cerámicos

En esta parte del trabajo se tratan tópicos relacionados con el perfeccionamiento de la tecnología en los proceso de secado y cocción, sobre el uso de combustibles alternativos tanto escala artesanal como industrial y mejoras en las materias primas, presentando como una de las alternativas el uso de fundentes como el CaCO_3 .

Por la importancia que tiene este epígrafe desde el punto de vista científico como base teórica del trabajo, a continuación se muestra el contenido completo del mismo.

Mejoras en las materias primas.

Utilización de fundentes.

Una de las alternativas viables que no se ha explotado lo suficiente para introducir mejoras en las materias primas y, a su vez tenga una influencia beneficiosa sobre la eficiencia energética y la calidad de los productos de cerámica roja es el uso de fundentes como adición a las pastas cerámicas; esta podría ser una alternativa mucho más económica a través de la disminución del consumo de combustible por la reducción de las temperaturas de cocción en los hornos, provocando una disminución del impacto al medio ambiente.

Existen una gran variedad de fundentes siendo los más utilizados: los feldspatos, los silicatos, los carbonatos de calcio y magnesio y los vidrios pulverizados. Estos fundentes pueden ser usados de dos maneras fundamentales: como minerales presentes en la composición mineralógica de las arcillas o como adiciones a las mismas, durante el proceso de elaboración de la mezcla.

- **El vidrio pulverizado:** El vidrio pulverizado procedente de botellas y recipientes de vidrio. Se ha comprobado que con una adición de un 10% de vidrio pulverizado a la masa de

arcilla, se logra reducir la temperatura de cocción en 100°C, por lo cual se reduce en un 20% el consumo de combustible utilizado para la cocción y, a su vez, este fundente influye en el mejoramiento de las propiedades físico – mecánicas del material cerámico; sobre todo en el incremento de la resistencia a la compresión, en la disminución de la absorción de agua y, por ende, mejora su durabilidad [16, 17].

- **El Silicato de Sodio:** El silicato de sodio es un eficiente aditivo utilizado en la producción de productos a base de arcilla. Se usa específicamente en la extrusión de ladrillos, tejas y otros productos de arcilla cocida. Al adicionarlo en la mezcla, disminuye la cantidad de agua necesaria y aumenta la plasticidad de la misma, por lo que en la etapa de cocción disminuye la cantidad de energía necesaria para eliminar la humedad del ladrillo crudo [11, 18-21].
- **El Feldespato:** Las propiedades fundentes de los materiales feldespáticos dependen de su contenido de sílice libre y óxidos alcalinos, la relación entre el sodio y el potasio en ellos y la composición del cuerpo en el cual son introducidos. La acción fundente de los materiales feldespáticos aumenta a medida que el punto de fusión disminuye con el incremento del contenido de óxidos alcalinos. La cantidad y el tipo de material feldespático usado, depende de la naturaleza del cuerpo cerámico producido [11, 21, 22].
- **Carbonato de Calcio (CaCO_3):** Este mineral ejerce una acción fundente muy enérgica en las pastas cerámicas, rebajando la temperatura de cocción. Por la acción del calor, se descompone en CaO y desprende CO_2 , de ahí que se use también cuando se desea obtener cerámica porosa. Si aparece en la arcilla como granos grandes, la cal formada producto a la descarbonatación durante la cocción, tiende a hidratarse al salir del horno por acción del medio ambiente, produciéndose grietas en el interior y erosión en la superficie de los productos, como resultado del aumento de volumen. En las pastas crudas actúa como antiplástico, aunque no reduce el encogimiento en el secado, tanto como la sílice [23-25].

La mayoría de los fundentes mencionados son generalmente caros porque llevan un procesamiento industrial y su obtención no resulta tan simple ni tan económica para la comercialización. Se debe exceptuar a los carbonatos, ya que se obtienen de forma más económica por el procesamiento más simple (sólo moler hasta la finura deseada la piedra caliza) a lo que se agrega su abundante disponibilidad. Esto hace posible su presencia en el mercado internacional como un fundente de excelente calidad a muy bajo precio, por tanto, se convierte en una fuente muy económica que facilita el uso de fundentes en la industria cerámica en general.

Desde el año 2004 y basado en los anteriores planteamientos en el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) se ha trabajado en el uso de carbonatos como fundentes [9, 10], en la producción de ladrillos rojos, específicamente el carbonato de calcio, material muy abundante en Cuba, ya que se cuenta con varios yacimientos de rocas calizas, en un ambiente geológico favorable [26]. De manera satisfactoria se logra demostrar el efecto fundente del mismo, a partir de la adición en pequeñas proporciones (en un rango 2 – 5 %) a los materiales arcillosos utilizados en la producción de ladrillos cocidos, obteniendo efectos provechosos que permiten mantener la calidad de los mismos, cuando son cocidos a temperaturas por debajo de los 1000°C hasta los 900°C, logrando disminuciones de combustible en un 20%, en relación a la práctica tradicional en la producción artesanal. Sin embargo este análisis se hizo sobre la base de fijar el tamaño de grano en 150 µm, y no se verificó el efecto de la finura sobre su potencial reactividad. Adicionalmente, este trabajo no profundizó en los posibles efectos beneficiosos del uso del carbonato en todas las etapas del proceso de producción.

Factores que influyen en los procesos productivos en la fabricación de materiales cerámicos.

En la actualidad, en cualquier fábrica de productos cerámicos se llevan a cabo una serie de procesos estándar, que comprenden desde la elección del material arcilloso hasta el proceso de empaquetado final [27]. Existen dos formas de producción, la artesanal y la industrial. Estas dos formas de producción tienen los mismos pasos o secuencia productiva, únicamente diferenciada en los instrumentos, métodos y herramientas utilizadas para la producción [28]. Por lo que se puede afirmar que la tecnología de producción de ladrillos consiste en una serie de subprocesos, entre los que se encuentran:

- Preparación del material.
- Moldeado y/o conformación.
- Tratamientos térmicos por secado y cocción.

Extracción y preparación de las materias primas.

Extracción de la arcilla:

Existe una gran variedad de arcillas, de hecho cada yacimiento contiene arcillas de propiedades distintas y, por idénticas que parezcan, se debe hacer un análisis de su composición mineralógica, ya que jamás tienen un comportamiento igual y su laborabilidad puede ser muy diferente. El material clasificado es acopiado y dejado reposar por un período de dos o más meses, para lograr de esta manera el grado de humedad requerido para el proceso productivo [7, 29, 30].

Preparación de la pasta o mezclado de las materias primas.

Las arcillas se trituran mediante molinos; pues generalmente vienen acompañadas de piedras y arenas. Se pueden preparar por vía húmeda o por vía seca. La preparación por vía seca se reduce a la pulverización por medio de molinos de diversos tipos. Mientras que por vía húmeda, se mezcla el material arcilloso con agua en tanque con agitadores (impulsados por la fuerza animal en el caso de la producción artesanal y mecánicos en la producción industrial), quedando la arcilla en suspensión en el agua y las impurezas se van al fondo o flotan, se cuelan al pasarla a otro tanque y se repite la operación varias veces, hasta conseguir la arcilla de la finura y pureza requeridas [31-33].

Conformado de los elementos.

Amasado

El amasado se hace con el fin de lograr una masa que sea bastante uniforme en su composición y plasticidad. Varias son las maneras de realizar la operación, según la mayor o menor finura del material, la cantidad que se necesite elaborar y el tipo de fabricación del ladrillo, ya sea artesanal, en la cual se realiza vertiendo la arcilla en una pista circular, amasándola con los pies o con caballerías, describiendo una especie de espiral desde el centro hacia la periferia; o industrialmente, mediante el empleo de máquinas, como son molinos de rulos o cilindros. Para el amasado se aprovecha la humedad que ya tiene el material o se humedece ligeramente para facilitar esta operación (valores entre 12 y 15% de humedad) [31-33].

Moldeado de los elementos.

En la operación de conformación se le da a la arcilla la forma que ha de tener el producto cerámico después de la cocción, pudiendo hacerlo mediante moldes de metal o madera en el caso de la producción artesanal o por extrusión en las grandes industrias [31-35]. El moldeo de forma artesanal se hace vertiendo la arcilla amasada con consistencia muy plástica dentro de unos moldes llamados gradillas, constituidos por un bastidor de madera reforzada con chapas metálicas. El operario comprime la masa con las manos y después pasa un listón de madera para quitar el exceso de material cerámico. El moldeo a máquina puede hacerse con la pasta húmeda o seca. En la máquina extrusora se hace al vacío, pues se obtiene la ventaja de que se rompen menos piezas [33, 35]. El producto moldeado deberá tener mayores dimensiones que las definitivas, puesto que la pasta durante el secado y la cocción experimenta contracciones [31-33].

Transformaciones durante los procesos térmicos en los productos cerámicos.

Los tratamientos térmicos son un paso esencial en la fabricación de la mayoría de los productos cerámicos. En esta subdivisión se consideran como procesos térmicos: el secado y la cocción.

Transformaciones durante el secado.

Si bien la cocción es la operación básica para el desarrollo de los productos cerámicos, el proceso de secado es de fundamental importancia dentro de las etapas de elaboración de los mismos. Durante este proceso se producen diversas transformaciones de las dimensiones y características físicas de las piezas, las que de no transcurrir dentro de ciertas condiciones, producen defectos irreversibles tales como fisuras y deformaciones. Razón por la cual es necesario optimizar en lo posible la calidad de esta etapa [36-39].

El agua contenida en el cuerpo cerámico puede encontrarse de las siguientes maneras:

- Agua intersticial.
- Agua higroscópica.
- Agua de cristalización y/o composición

El agua intersticial es la que se encuentra entre las partículas de arcilla, débilmente adheridas a las mismas y con posibilidades de migración desde el interior del cuerpo hacia su superficie, por efecto de un gradiente de humedad en el cuerpo. Esta agua es eliminada del cuerpo desde su superficie, por efecto de su disolución en el aire circulante a su alrededor; es decir, que la velocidad de secado está controlada, en primera instancia, por las condiciones de humedad del aire de secado [36-39].

La característica más importante del agua intersticial es que al eliminarse del cuerpo cerámico, genera una contracción de la misma, lo cual lleva a la producción de fisuras. Esto ocurre cuando el movimiento del agua desde el interior del cuerpo cerámico hacia su superficie, no es suficientemente lento como para mantener un gradiente adecuado. Al superar una cierta velocidad de secado, o bien al generarse una determinada desuniformidad, se empiezan a producir grietas de secado. Estas grietas tienen características bien definidas, tanto por su posición como por su forma en la pieza, según los inconvenientes que se produzcan al inicio o al final del secado; es decir, que la velocidad de secado de esta etapa es muy difícil de aumentar y es la etapa dominante del secado [36-40].

Cuando se ha eliminado el agua intersticial, debe eliminarse el agua higroscópica, cuyo porcentaje puede ser significativo. Esta agua puede estar en una proporción del orden del 12 % [36-38, 41]. El secado o eliminación del agua higroscópica está controlado por la temperatura. Una variable secundaria de control está dada por la naturaleza de la arcilla que compone la

pieza. Si el cuerpo cerámico no se calienta, no se seca más allá de ciertos porcentajes de humedad, aún cuando la pieza se deje por tiempos relativamente largos. Es la temperatura la que hace que el agua se desprenda de las partículas de arcilla y salga a la superficie de la pieza [36].

Por ello, el agua residual en las piezas cerámicas dependerá de factores como:

- Naturaleza de las arcillas.
- Temperatura del sistema.
- Tiempo de secado.

Lo que ocurre en general, es que para determinada calidad de arcilla, existe una humedad de equilibrio con una cierta temperatura. Esta humedad se mantiene constante sin interesar el tiempo de exposición, y su valor de equilibrio dependerá de la temperatura final de la pieza [36-38, 40].

En la generalidad de los casos, la problemática de los secaderos está constituida por:

- Fisuras.
- Falta de secado.
- Necesidad de aumentar la producción del secadero.
- Aparición de fisuras al tratar de aumentar la velocidad de secado.

Un deficiente secado puede traer consigo posteriores problemas en la etapa de cocción del ladrillo. La no eliminación del agua higroscópica no genera contracción, pero pretender eliminarla en el horno puede generar inconvenientes graves, tales como retrasos en el horno, lo cual es de suma importancia si se desea lograr una mayor eficiencia energética del mismo.

Transformaciones durante la cocción.

La cocción es la fase más importante y delicada del proceso de fabricación de productos cerámicos [42]. Las piezas se cuecen en hornos, a una temperatura que va desde 900° C hasta algo más de 1000°C. Los enlaces atómicos ceden y se inicia la formación de fase amorfa, parte de la cual funde y se va introduciendo en los intersticios reduciendo el volumen de poros [42]. Durante la cocción se someten las piezas a altas temperaturas que originan una serie de reacciones en su masa, quedando finalmente el producto con una consistencia pétreo.

Los cambios de la composición mineralógica de las arcillas ocurren generalmente de acuerdo con los intervalos de temperatura que aparecen a continuación [10, 19, 43-45]:

1. De 0-400°C: Eliminación de residuos de agua, combustión de la materia orgánica. El material se dilata hasta los 100°C y luego, a 250°C sufre una retracción, para volver a dilatarse después. No se producen cambios químicos ni estructurales.
2. De 400-600°C: Se desprende el agua de composición, se descomponen las arcillas en

óxidos, cesa la dilatación y se inicia la contracción de volumen.

3. De 600-900°C: Se produce un metacaolín muy inestable que tiende a formar alúmina. Es muy higroscópico.
4. De 900-1000°C: En este período reacciona la alúmina con la sílice y se forma el silicato aluminico, $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, del que existen tres estados alotrópicos en la naturaleza: Sillimanita, Andalucita y Distena.
5. A más de 1000°C: El silicato $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ tiende a transformarse en $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (mullita, de gran dureza, pequeño coeficiente de dilatación, que cristaliza en agujas muy finas).
6. Fusión: La fusión ocurre a temperaturas por encima de 1700° C. Las arcillas funden a 1780°C; la Sillimanita, a 1880 °C y la Mullita, a 1930°C.

Proceso de densificación: La densificación es la esencia del proceso cerámico. En la cerámica convencional, que es aquella cuya ceramización tiene lugar con la fase líquida como promotora, las partículas, próximas unas a otras, gracias a la etapa de conformación, empiezan a tender puentes (reacción en estado sólido) o enlaces, ayudadas por las fuerzas del tipo de Van der Waals [11, 19, 46].

La diferencia en el desarrollo de esta etapa de densificación es la que permite catalogar las cerámicas o los procesos de densificación en [19]:

- Sinterizaciones
- Ceramizaciones
- Fusiones o vitrificaciones

Desde el punto de vista del ahorro de energía en los materiales cerámicos, se puede decir que la etapa de sinterización es una de las más importantes, ya que la misma ocurre a temperaturas más bajas [19, 45, 47]

Proceso de sinterización: Los materiales cerámicos en general adquieren la resistencia mecánica, a través del tratamiento térmico de la arcilla empleada, en un proceso conocido como sinterización, el cual consiste básicamente en que los puntos de contacto de los granos adyacentes, se funden en una fase vítrea y se unen a través de ésta. Este proceso conocido como sinterización vítrea, comienza a los 800°C y continúa hasta temperaturas cercanas a los 1200°C, cuando tiene lugar la fusión y recristalización de los materiales [11, 19, 20, 45, 46].

La sinterización es un proceso de calentamiento, cuya finalidad es aglomerar pequeñas partículas en un todo. Para que ocurra la sinterización debe desarrollarse una unión [46].

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

En la fabricación de cerámicas este tratamiento térmico se basa en la transformación de un producto poroso en otro compacto y coherente. La formación de contacto entre partículas es proporcional $a = c \times t^m$ donde t es el tiempo m y c es una constante característica de una partícula. En la figura 3 se muestra la evolución de los contactos entre partículas a lo largo del proceso de sinterización [19, 46, 47].

Según Van Vlack [46], la sinterización vítrea ocurre al comenzar a formarse un silicato vítreo cuando el material es calentado arriba del sólido. El vidrio no se cristaliza en el enfriamiento, pero forma una unión fuerte entre las partículas remanentes [46].

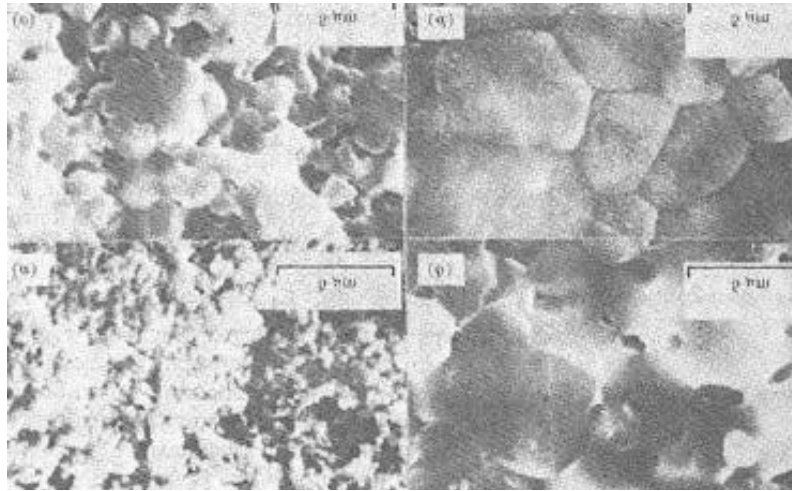


Figura 2. Evolución microestructural durante el proceso de sinterización [47].

El proceso de sinterización depende de factores como son [19, 46, 47]:

La superficie específica de los granos en contacto: A mayor superficie específica, la reacción tendrá lugar más rápido, al triturar las partículas a tamaños más pequeños.

El contacto entre las partículas: A mayor contacto entre las partículas, la reacción que tendrá lugar será mas completa. La consolidación con la presión de moldeo permite lograr esto.

Tiempo de la residencia: Según la literatura, puede variar de 20 min a 4 horas, dependiendo de los aspectos ya mencionados.

La temperatura: Normalmente entre 900 – 1100 °C

Y por último se exponen se hace un análisis de los principales impactos del uso de fundentes bajo las condiciones cubanas sobre todo desde el punto de vista económico y ambiental.

Luego se dan las conclusiones parciales del capítulo:

Conclusiones parciales del capítulo.

1. En la actualidad tanto en Cuba como a nivel internacional, la industria cerámica está afectada por varios problemas relacionados, principalmente, con la gran cantidad de energía que demanda, producida por combustibles renovables y no renovables, que en la actualidad han elevado sus precios.
2. En esta industria cerámica existen grandes diferencias entre los países desarrollados y subdesarrollados. En países del primer mundo se posee tecnologías automatizadas y con alta eficiencia, a diferencia de los países del Tercer Mundo, donde todavía utilizan prácticas que no son eficientes ni ecológicas en el caso de la producción artesanal. Por lo cual es necesario buscar alternativas de tecnologías que permitan potenciar la producción sostenible de materiales cerámicos a pequeña escala.
3. Las soluciones potenciales para mejorar el perfil económico y ambiental de la industria de la cerámica roja, deben estar encaminadas a lograr mejoras en los procesos térmicos (secado y cocción), a partir del uso de tecnologías sostenibles y potenciando el uso de combustibles alternativos y el empleo de adiciones fundentes a las materias primas tradicionales, que permitan aumentar la eficiencia energética.
4. El uso de fundentes como el CaCO_3 , puede representar una alternativa viable, para alcanzar una mejora en la eficiencia energética en la producción de ladrillos cerámicos, en las condiciones cubanas. Esto no exige para su implementación, grandes cambios tecnológicos y los porcentajes en que deben ser utilizados son bajos (<10%), lo cual no implicaría aumentos significativos en los costos de producción y transportación, que se compensan con la disminución del consumo de combustible.
5. El tamaño de partículas del CaCO_3 influye en la velocidad de la reacción de descarbonatación cuando éste es sometido a temperaturas cercanas a los 900 °C. Por lo cual, se deben establecer parámetros de tamaño de partículas debido a que, una mayor o menor superficie específica del mismo, puede influir positiva o negativamente sobre las propiedades finales de los materiales cerámicos.

Capítulo II: Influencia del CaCO_3 como aditivo fundente sobre las propiedades macro y micro estructurales de los ladrillos de cerámica roja.

En investigaciones anteriores [9, 10], se muestran las potencialidades del CaCO_3 como fundente en la producción de ladrillos de cerámica roja, logrando demostrar que su adición en

pequeñas cantidades (<10%) a los materiales arcillosos, permite mantener las propiedades físico – mecánicas de los ladrillos, cuando la temperatura y tiempo de cocción disminuyen.

En el presente capítulo, se presentan los resultados de laboratorio a nivel macro y microestructural, donde se analizó la influencia del tamaño de partículas de carbonato de calcio adicionado a los materiales arcillosos, sobre las propiedades físico – mecánicas y de durabilidad de las muestras cerámicas. Además, en este capítulo se establecen los parámetros tecnológicos para su futura utilización como fundente en la industria de ladrillos de cerámica roja.

Diseño experimental.

Los factores considerados en el diseño de experimento fueron delimitados de la siguiente manera: La temperatura máxima se trabajó en tres niveles: 800°C, 900°C, 1000°C, el % de CaCO₃ se delimitó en tres niveles y adicionalmente se elaboró un patrón de estudio con 0% de adición y la finura del carbonato, al igual que las anteriores variables fue enmarcado en tres niveles. Las variables dependientes que se evaluaron son: Resistencia a Compresión, Densidad y Absorción para el caso del estudio de las propiedades físico – mecánicas. En el estudio de durabilidad fueron las siguientes: pérdida de peso, presencia de fisuras y grietas y desintegración de los especímenes. Los aspectos anteriores definieron el diseño experimental siguiente

Declaración de las variables independientes y sus niveles.

Tabla 5. Variables independientes y sus niveles.

Variables	Niveles			
	Patrón	Bajo	Medio	Alto
Temperatura(° C)	-	800	900	1000
% de CaCO ₃ (%)	0	2	5	8
Finura del CaCO ₃ (µm)	-	<74	<150	<300

Declaración de las variables dependientes, relacionadas con las propiedades físico – mecánicas.

- Resistencia a compresión.
- Absorción de agua.
- Densidad.

Declaración de las variables dependientes, relacionadas con la durabilidad.

Las muestras con adición de carbonato de calcio fueron sometidas a los ensayos de ciclos de humedecimiento y secado y de cristalización de sales [92], en los cuales se midieron las siguientes variables:

- Pérdida de peso de las muestras.
- Presencia de fisuras y grietas.
- Desintegración de las muestras.

Caracterización estadística del diseño experimental.

2.2.1. Caracterización estadística del diseño experimental.

La caracterización estadística del diseño experimental se hizo de la siguiente forma: a) Se determinó la estadística descriptiva (Ver Anexo III) de cada una de las variables de respuesta, b) para cada corrida experimental se halló un tamaño de muestra (Ver Anexo III) que fuera representativo de la población (delimitándose una cantidad máxima igual para todas las corridas, cumpliendo el requisito de representatividad de la población).

Antes de procesar el diseño de experimento se realizó una representación gráfica de los resultados, a partir de los valores medios de cada una de las variables de respuesta y se procedió a realizar una interpretación física de los mismos apoyándose en técnicas de análisis de tendencia. Este aspecto permitió delimitar el comportamiento de cada uno de los factores con respecto a las variables de respuesta. Posteriormente, se aplicó la técnica de análisis de regresión múltiple para procesar estadísticamente el diseño de experimento (Anexo II). Por último para validar y justificar científicamente los objetivos de este diseño experimental, se procedió a la aplicación de diferentes técnicas de Pruebas de Hipótesis. En este caso se emplearon las siguientes pruebas: **t-Student** , **F-Fisher** y **U** de **Mann-Whitney**. Los objetivos de este diseño de experimento fueron los siguientes:

1. Evaluar la influencia de los factores delimitados en cada una de las variables de respuesta.
2. Establecer un rango de finura del CaCO_3 más adecuado donde se afecten en menor grado las propiedades físicas – mecánicas con respecto al patrón.
3. Evaluar si se puede llegar a emplear temperaturas cercanas a los 900°C , a partir de la utilización del carbonato de calcio como aditivo fundente.
4. Evaluar el % de adición de carbonato de calcio más adecuado para su posterior implantación en la industria.

Análisis de resultados.

En este epígrafe se expone el análisis de resultados obtenidos del estudio a la macroestructura y posteriormente su comprobación en los estudios de la microestructura, ya que los cambios en esta última está ligada a las transformaciones que ocurren en la primera.

Influencia del CaCO₃ a escala de la macroestructura.

Tal y como se observa en la figura, para las tres temperaturas de cocción, los valores más altos de resistencia a la compresión se obtienen con la finura del carbonato de calcio de <150 μm y <74 μm y se experimenta una caída de la resistencia en las probetas ensayadas para la finura de molido de <300 μm .

Quando el porcentaje de adición de carbonato de calcio aumenta de un 2% hasta un 8%, la resistencia a compresión decrece para todas las muestras ensayadas. Dicha caída se hace muy significativa para las fabricadas con finura de molido del aditivo de <300 μm , tal y como se muestra en las figuras 8 b) y 8 c).

Algo similar ocurre en el caso de la densidad, a medida que aumenta la finura de molido del fundente, ocurre un aumento significativo de la densidad de las muestras y la diferencia significativa se manifiesta entre las finuras <300 μm y <150 μm .

Los resultados de los ensayos de densidad que se muestran, son consistentes con los de resistencia a la compresión. La relación entre densidad y resistencia es directamente proporcional, por tanto los aumentos de resistencia ya explicadas en el gráfico anterior se corresponden con el aumento de la densidad de las

probetas, a medida que aumenta la finura de molido del carbonato de calcio.

Los resultados del ensayo de absorción muestra un considerable aumento de la absorción de agua que ocurre cuando la finura de molido aumenta. Se aprecia que los especímenes fabricados con finura de molido de $<300 \mu\text{m}$ para las temperaturas de cocción de 800°C y 900°C , alcanzan los valores máximos de absorción de agua y son superiores a lo de la muestra control. Al aumentar la temperatura hasta 1000°C (muestras con 2 y 5% de adición), disminuyen los valores de absorción para las tres finuras del aditivo, debido a que a esta temperatura y a la adición de calcita, comienza la vitrificación del material y disminuye la cantidad de poros [9, 14, 85].

Influencia de la finura y contenido de CaCO_3 en la durabilidad de las muestras cerámicas.

Los resultados obtenidos en los ensayos de Envejecimiento acelerado son consecuentes con los alcanzados en el estudio de las propiedades mecánicas. Para el caso de las probetas fabricadas con finura del aditivo de $300 \mu\text{m}$, todos los especímenes para las tres temperaturas de cocción estudiadas, se destruyeron al pasar el primer ciclo de ambos ensayos debido a la presencia de gran cantidad de caliche en las muestras.

Muy diferente a ese comportamiento fue el mostrado por las probetas fabricadas con las finuras de carbonato de calcio de $150 \mu\text{m}$ y $74 \mu\text{m}$. Todos los especímenes resistieron los 15 ciclos de inmersión en Sulfato de sodio decahidratado al 14% en el caso del ensayo de Cristalización de sales.

En el estudio de durabilidad, además de ensayar las probetas fabricadas con la adición de carbonato de calcio, se fabricaron dos series de probetas con 0% de adición de CaCO_3 , las que se identifican en la Tabla 7 como muestra Control, con el objetivo de comparar el comportamiento de las series elaboradas con adición, con las probetas fabricadas sin adición de carbonato de calcio.

Resultados de los ensayos de Envejecimiento acelerado

Muestra	Temperatura	% Aditivo	Finura	Ensayo de Humedecido y Secado.	Ensayo de Cristalización de Sales.
				Δ Peso seco medio (g)	Δ peso seco medio (g)
Control	800°C	0	/	-0.6	-2.40
M -1.1	800°C	2	74 μm	-0.3	-0.60
M -1.2	800°C	5	74 μm	-1	-2.12
M -1.3	800°C	8	74 μm	-1.8	-2.80
Control	900°C	0	/	-0.5	-1.70
M -2.1	900°C	2	74 μm	-0.33	-1.33
M -2.2	900°C	5	74 μm	-1.42	-2.22
M -2.3	900°C	8	74 μm	-2	-2.90
Muestra	Temperatura	% Aditivo	Finura	Δ Peso seco medio (g)	Δ Peso seco medio (g)
Control	800°C	0	/	-0.6	-2.40
M -3.1	800°C	2	150 μm	-0.5	-0.80
M -3.2	800°C	5	150 μm	-1.5	-2.40
M -3.3	800°C	8	150 μm	-2	-3.70
Control	900°C	0	/	-0.5	-1.70
M -4.1	900°C	2	150 μm	-0.5	-1.50
M -4.2	900°C	5	150 μm	-1.8	-2.60
M -4.3	900°C	8	150 μm	-2.5	-3.60

Tal y como se muestra en la tabla anterior, los cilindros fabricados con finura de molido de 150μm y 72 μm mostraron un comportamiento favorable en ambos ensayos, no mostrando diferencias significativas a las elaboradas en iguales condiciones de fabricación sin adición de carbonato de calcio, excepto las muestras elaboradas con un 8 % de adición, donde su desempeño es ligeramente más deficiente que el resto de las muestras, incluyendo los patrones o series de control.

Influencia de la adición de CaCO₃ en los procesos micro – estructurales.

Entre los ensayos que reporta la literatura y que fueron realizados para estudiar el efecto de la adición de carbonato de calcio a la arcilla y las consecuencias que esto trae en la microestructura del material cerámico, se encuentran los siguientes:

1. Análisis mineralógico por difracción de Rayos X (DRX), con el fin de determinar las fases cristalinas que se han formado sobre todo durante la sinterización.

2. Observación de las superficies pulidas de las muestras en el Microscopio electrónico de barrido (MEB).
3. Microscopía electrónica de barrido con microanálisis de Rayos X (EDX).
4. Porosimetría por Intrusión de Mercurio (PIM), con el fin de medir la porosidad del material.
5. Análisis Térmico Gravimétrico (TGA) en muestras quemadas con adición de carbonato de calcio.

En general, los estudios de micro-estructura realizados arrojan las siguientes conclusiones:

1. Los estudios a escala microestructural confirman los resultados obtenidos de los ensayos físico – mecánicos, al mostrar los mejores resultados para las muestras elaboradas a 800°C, con un contenido del 2% de carbonato de calcio y finura inferior a las 150µm.
2. La adición de CaCO₃ contribuye a la formación de nuevas fases estables, en específico la Anorthita (CaO.AL₂O₃.2SiO₂)/ Albita (NaAlSi₃O₈). Estas fases se observan claramente en todas las muestras ensayadas con diferentes porcentajes de CaCO₃.
3. Los ensayos de termo gravimetría realizados arrojan que las dosificaciones con un 2% de adición, el CaCO₃ adicionado tienen una superior reacción con los minerales arcillosos presentes en las muestras.
4. La proporción de las fases albita/anorthita resulta ser superior para una finura de molido del CaCO₃ <150µm, mostrando una mayor intensidad de tales fases cristalinas, lo que propicia una mejora en las propiedades físico – mecánicas de las muestras estudiadas.
5. Los cambios en la porosidad observados a escala microestructural son consistentes con los cambios en la estructura de poros asociados con el % de adición siendo superior para las muestras con 8% de CaCO₃.

Conclusiones parciales del capítulo.

1. Los resultados de este estudio indican que con un 2% de adición de CaCO₃ molido a una finura <150µm y utilizando una temperatura de cocción de 800°C, son las condiciones de fabricación adecuadas para su uso como fundente en la producción de ladrillos de cerámica roja, permitiendo mantener las propiedades físico – mecánicas de los mismos.
2. Los estudios microestructurales indican que el CaCO₃ adicionado se combina con los minerales arcillosos, llegando a formar otras fases mineralógicas. En este estudio, las

fases Albita/Anorthita, fueron las responsables de las mejoras en las propiedades físico – mecánicas del material cerámico.

3. Los cambios observados en la porosidad a escala macro, son consistentes con los cambios observados en la micro – estructura, asociados fundamentalmente con el % de adición, temperatura de cocción y finura de molido del CaCO_3 , cuando es adicionado a los materiales arcillosos estudiados.
4. Se verifica que los cambios que se producen en las propiedades de las muestras, cuando se adiciona CaCO_3 , en específico la resistencia, son consistentes con aumentos de la densidad, lo que explica las mejoras producidas en las propiedades mecánicas del ladrillo.
5. Se demuestra cómo la finura de molido del CaCO_3 adicionado en pequeñas dosis, comienza a ser eficiente a partir de las 150 μm , lo cual se ve reflejado en la mejora de las propiedades físico – mecánicas.
6. Las diferencias que se observan entre las finuras de molido del CaCO_3 de 150 μm y 74 μm para los diferentes porcentos de adición utilizados, nos indican que no es necesario moler el CaCO_3 a una finura inferior a las 150 μm , para mantener las propiedades físico – mecánicas del producto cerámico.

Capítulo III: Impactos del uso del CaCO_3 en la producción industrial de ladrillos de cerámica roja.

Este estudio presenta un escalado del proceso, que brinda la información necesaria para la introducción de esta tecnología en la producción industrial de ladrillos de cerámica roja. El mismo permitió evaluar bajo condiciones de escala semi – industrial de producción, la influencia del CaCO_3 sobre los procesos térmicos (Secado y Cocción), además del impacto económico de su utilización como aditivo fundente en la producción de ladrillos de cerámica roja.

El trabajo experimental se implementó utilizando los resultados obtenidos en las muestras ensayadas en el laboratorio, específicamente, con un porcentaje de adición del 2% de CaCO_3 y una finura de molido del CaCO_3 inferior a 150 μm . El material arcilloso utilizado para este estudio, es el mismo que fue utilizado a escala de laboratorio en el capítulo anterior, lo que permitirá validar los resultados obtenidos para la mezcla de minerales, donde predominan fundamentalmente la motmorillonita, mineral muy presente en los suelos arcillosos cubanos.

Descripción del programa experimental.

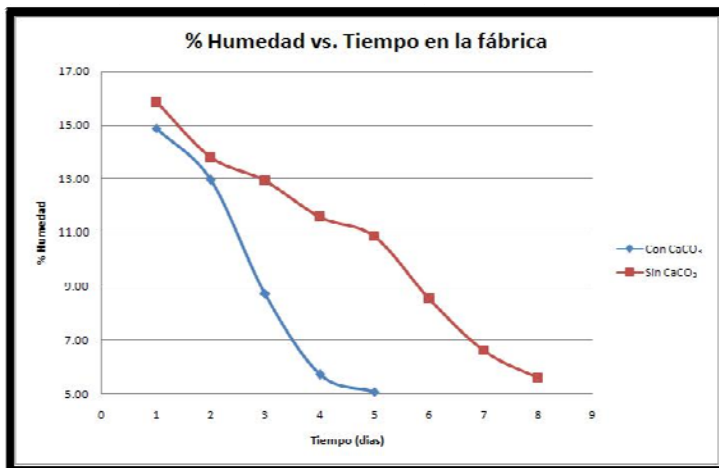
Trabajo experimental en la fábrica.

Para la evaluación del proceso y obtención del ladrillo, se tomaron en cuenta los factores de mayor influencia antes estudiados, durante los procesos térmicos. En una primera etapa, se analizaron los factores que influyen durante el secado de los ladrillos, a partir de la adición de un 2% de CaCO_3 , con una finura de $150 \mu\text{m}$ y en una segunda etapa, la repercusión de esta adición durante el proceso de cocción del ladrillo. En este análisis se estudiaron primeramente, los cambios provocados en el tiempo de secado, asociados a cambios de la humedad del material y a la contracción volumétrica que experimenta el ladrillo. En una segunda etapa, se estudiaron los cambios producidos en las propiedades físico – mecánicas de los ladrillos, asociados principalmente a los regímenes de temperatura y tiempo de cocción. Otro de los factores evaluados es el consumo de combustible, el cual se asocia fundamentalmente a la eficiencia en la combustión.

Análisis de resultados.

Influencia del CaCO_3 en el proceso de secado de ladrillos de cerámica roja.

En la figura, se muestra la evolución de la variación porcentual de la humedad con respecto al tiempo, tanto para las muestras elaboradas con la adición de CaCO_3 , como las elaboradas sin el aditivo, ambas secadas en un secadero natural a temperatura ambiente.



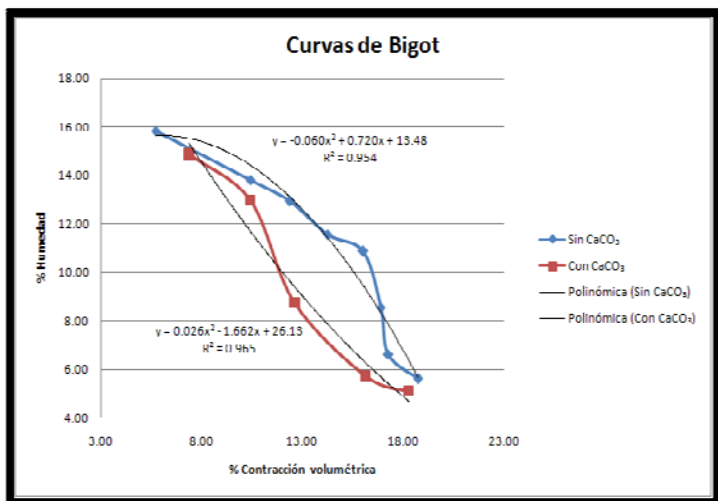
Claramente se puede observar en las gráficas que el porcentaje de humedad eliminado por unidad de tiempo, está fuertemente ligado al contenido de CaCO_3 , encontrándose que el % de humedad disminuye desde aproximadamente un 16% (humedad de salida de la extrusora), hasta un 5% (humedad adecuada para entrar al horno) en un tiempo de

5 días, para el caso del secado de ladrillos con adición de CaCO_3 y en 8 días, para el caso de los ladrillos sin adición.

A partir de este resultado, se demuestra que el rendimiento alcanzado durante el secado de ladrillos con la adición de CaCO_3 , es superior en más de un 35% del tiempo, con respecto al secado de ladrillos sin adición. Este resultado, según los autores consultados [30, 82, 84, 94], podría indicar una influencia de las materias primas no plásticas como el CaCO_3 en las pastas cerámicas, mejorando el conformado y reestructurando la estructura de los capilares hacia la formación de poros de mayor longitud y conectividad, facilitando el secado y la eliminación del agua de composición, durante el precalentamiento en la etapa de cocción de los ladrillos, lo cual propicia una posible disminución del consumo energético.

Influencia del CaCO_3 en la contracción durante el secado de los ladrillos.

Los resultados anteriores se verifican a partir de la relación entre las variables % de humedad, contracción volumétrica y de la confección de las curvas de Bigot [98], como se muestra en la figura 30. En primer lugar, a pesar de que las curvas de Bigot guardan estrecha relación con la granulometría del material arcilloso [99], en estos resultados se observó una profunda dependencia con el uso del CaCO_3 como aditivo sobre el mecanismo de secado, pues a pesar de que se trabajó con el mismo tipo de secado, la relación de la contracción versus la variación porcentual de la pérdida de humedad, siguen trayectorias diferentes.

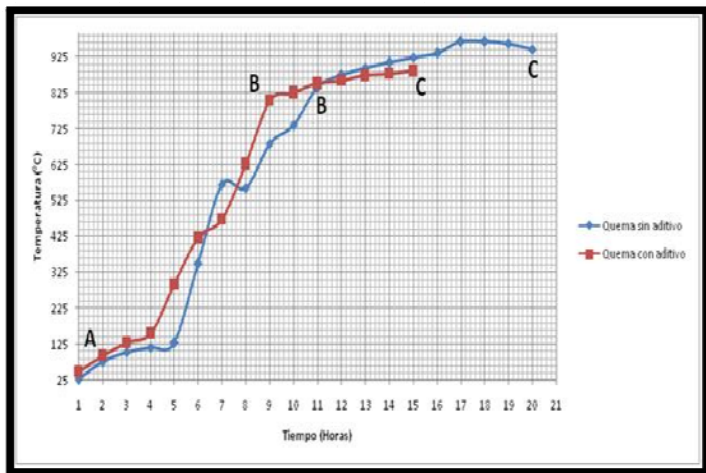


A partir de estas curvas se puede observar, que para eliminar un mismo porcentaje de humedad, hay una menor contracción en los ladrillos elaborados con adición de carbonato de calcio, en comparación con los ladrillos sin la adición; aunque ambos tienen una contracción final similar. Estos resultados podrían indicar, según la literatura consultada [30, 83, 94, 99], una reformulación de la pasta

cerámica, a partir de la adición del mineral CaCO_3 , que actúa como desgrasante o material no plástico, que baja la plasticidad de la pasta y disminuye la contracción debido fundamentalmente a que los desgrasantes pierden agua sin contraer [30, 94]. Por lo tanto un suelo arcilloso con un aumento del contenido de desgrasante presentará una menor contracción.

Influencia del CaCO_3 en el proceso de cocción de ladrillos de cerámica roja.

A continuación, en la figura se muestra la evolución de la temperatura con respecto al tiempo, tanto de la cocción de ladrillos elaborados con un 2% de CaCO_3 como los elaborados sin la adición.

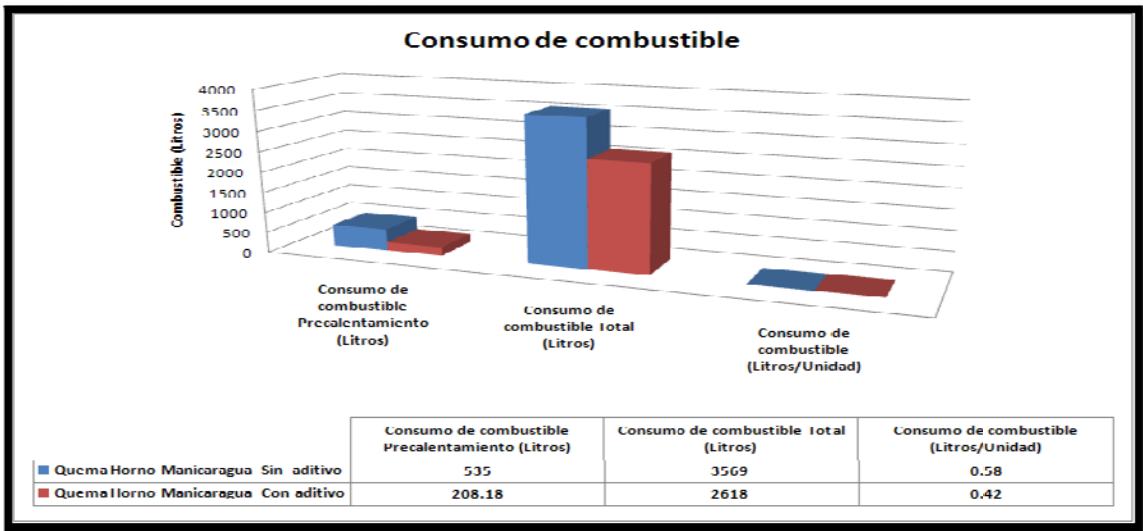


En las graficas se observa para ambos procesos de cocción, la existencia de dos zonas bien definidas y con diferentes interpretaciones. La primera correspondiente a la etapa de precalentamiento, caracterizada fundamentalmente por un incremento gradual de la temperatura (Tramo A – B) y la segunda etapa, correspondiente a la cocción definida

por una temperatura constante que oscila entre los 800 y 950 °C (Tramo B – C). Cada una de estas etapas describe el proceso de cocción, las cuales están asociadas con la eliminación del agua cristalográfica (Tramo A – B), y la formación de las fases cristalinas dándole dureza a los ladrillos (Tramo B – C) [9, 14, 67, 72].

Como se puede apreciar en las curvas, existen diferencias en cuanto a la duración del proceso de cocción. En dicho proceso en los ladrillos con adición de carbonato de calcio, se mostró una reducción del tiempo en 5 horas, en comparación con la quema de ladrillos sin la adición, corroborándose la efectividad del CaCO_3 como fundente en los ladrillos de cerámica roja, cuando se utilizan pequeñas dosis del mismo.

En cuanto al consumo de combustible, en la figura 32 se muestran los resultados para cada una de las quemas. Se observó una significativa disminución de un 27 % del consumo de combustible para la cocción de ladrillos con la adición de un 2% de CaCO_3 , lo que significa un ahorro de combustible con respecto a la quema control o sin aditivo, de 951 litros de combustible por quema. Este resultado es consecuente con la disminución del tiempo de cocción.



Influencia del CaCO₃ en la calidad del producto terminado

Resultados de los ensayos de calidad de lo ladrillos

Las tablas 15 y 16 muestran los resultados de los ensayos de calidad de los ladrillos elaborados en ambos procesos de cocción, que demuestran que la calidad de los ladrillos con la adición de un 2% de CaCO₃ no se ve afectada debido a la inclusión del mismo como fundente, ya que los valores de resistencia media a la compresión, de absorción de agua y de densidad, son similares para ambos grupos de ladrillos.

Resultado de los ensayos de calidad para los ladrillos sin adición de CaCO₃

Parámetros	Absorción de agua	Resistencia a la compresión	Densidad aparente
% aditivo	0%	0%	0%
Desviación estándar	0,97	0,39	0,06
Coefficiente de variación	0,09	0,04	0,03
Valor medio obtenido	11,2 %	9,8 MPa	1,90 g/cm³

Resultado de los ensayos de calidad para los ladrillos con adición de CaCO₃

Parámetros	Absorción de agua	Resistencia a la compresión	Densidad aparente
% aditivo	2%	2%	2%
Desviación estándar	0,54	0,32	0,03
Coefficiente de variación	0,05	0,03	0,01
Valor medio obtenido	11,0 %	11,3 MPa	1,95 g/cm³

Lo anterior ratifica el efecto beneficioso del CaCO₃ en pequeñas dosis, en las quemadas de ladrillos en hornos de la mediana industria. Es de gran importancia mencionar que los ladrillos extraídos del horno, tanto de la quema con adición como sin la adición, están por encima de los valores establecidos por la norma cubana NC 360 – 2005 [101, 102].

Los resultados más relevantes de la aplicación del CaCO_3 en la producción de los ladrillos en le combinado cerámico de Manicaragua son:

1. Se demuestra que la adición de un 2% de CaCO_3 a la pasta arcillosa utilizada para la fabricación de ladrillos, disminuye el tiempo de secado significativamente en más de un 35% con respecto a los ladrillos elaborados sin la adición.
2. Podría indicarse que la adición de CaCO_3 al suelo arcilloso utilizado para la fabricación de ladrillos, provoca que los capilares faciliten el flujo de la humedad desde el interior hacia el exterior, al encontrarse más abiertos en muestras que contienen un 2% de CaCO_3 de forma tal, que proporciona una mejor eliminación del agua de poros. Esta es una de las posibles razones por las que disminuye el tiempo de secado, aunque sería interesante comprobarlo a través de la observación de la microestructura.
3. Los resultados de contracción volumétrica por unidad de tiempo son consecuentes con la pérdida de humedad, teniendo una velocidad superior en los ladrillos elaborados con un 2% de CaCO_3 .
4. Los resultados de las curvas de Bigot y los ensayos de plasticidad del suelo, indican que la adición del CaCO_3 actúa en las pastas cerámicas como un desgrasante, regulando las contracciones experimentadas por el ladrillo durante el secado.
5. Los ensayos de calidad realizados a las muestras demostraron que el empleo de carbonato de calcio (como aditivo fundente en la elaboración de los ladrillos), no produce afectaciones en la calidad del producto terminado. Todos los ladrillos ensayados con el 2% de adición de carbonato de calcio, cumplen con los parámetros de calidad establecidos por la Norma Cubana.
6. La adición de carbonato de calcio al suelo arcilloso con el que se fabricaron los ladrillos, provocó una disminución del consumo de combustible en un 27 %, ahorrándose 951 litros de fuel oil y el tiempo de cocción disminuyó en 5 horas, en comparación con estos mismos parámetros medidos en la quema patrón o de control.
7. La adición de carbonato de calcio a la mezcla de los ladrillos de cerámica roja del combinado de Manicaragua, disminuye las emisiones de monóxido de carbono, favoreciendo de esta forma la reducción del consumo de combustible empleado y se traduce en un aumento de la eficiencia energética de la producción de los ladrillos.
8. Por todo lo anteriormente expresado, queda demostrado que la inclusión en el proceso de fabricación de los ladrillos cerámicos del combinado de cerámica roja de

Manicaragua de un 2% de carbonato de calcio, aumenta la eficiencia energética de la etapa de cocción.

Conclusiones parciales del capítulo.

1. Se demuestra que la adición de un 2% de CaCO_3 a la pasta arcillosa utilizada para la fabricación de ladrillos, disminuye el tiempo de secado significativamente, en un 35% con respecto a los ladrillos elaborados sin la adición.
2. Los resultados de los ensayos de contracción y plasticidad indicaron que el CaCO_3 actúa en las pastas cerámicas como un desgrasante, regulando las contracciones y facilitando la pérdida de humedad.
3. Los resultados logrados indican que la adición CaCO_3 al suelo arcilloso utilizado para la fabricación de ladrillos, provoca que los capilares faciliten el flujo de la humedad desde el interior hacia el exterior, al encontrarse más abiertos en muestras que contienen un 2% de CaCO_3 ; de forma tal, que proporciona una mejor eliminación del agua de poros, siendo esta una de las posibles razones por las que disminuye el tiempo de secado.
4. La adición de CaCO_3 al suelo arcilloso utilizado en la fabricación de ladrillos cocidos, provocó una disminución del tiempo de cocción, lo cual influye en la consiguiente disminución del consumo de combustible en un 27%, en comparación con los ladrillos cocidos sin la adición.
5. Con la adición del CaCO_3 como fundente a la pasta cerámica utilizada en la fabricación de ladrillos, se altera el balance existente entre el dióxido y el monóxido de carbono, favoreciendo una combustión más eficiente, lo que provoca un mejor aprovechamiento del combustible utilizado para la cocción.
6. Los ensayos de calidad realizados a las muestras de ladrillos, demostraron que el empleo del CaCO_3 como fundente en la producción de ladrillos cocidos, no produce afectaciones en la calidad del producto terminado, cumpliendo con los parámetros que se establecen en la norma cubana NC – 360 2005.
7. Desde el punto de vista ecológico, la introducción del CaCO_3 posee un efecto beneficioso, al disminuir el consumo de combustible y, a su vez, actúa como un posible depurador de emisiones de SO_2 derivadas del mismo combustible, favoreciendo un menor impacto medio ambiental en la producción de ladrillos cocidos.

Conclusiones generales.

1. El uso del fundente CaCO_3 , se presenta como una alternativa viable, para mejorar la eficiencia energética en la producción de materiales cerámicos, específicamente en la fabricación de los ladrillos huecos cocidos, no requiriendo para su implementación de cambios tecnológicos de consideración y los porcentajes en que deben ser utilizados son bajos (2 %); por lo que no implica aumentos significativos en los costos de producción, que se compensan con la disminución del consumo de combustible.
2. Se demuestra que la finura de molido del CaCO_3 adicionado en pequeñas dosis a los materiales arcillosos, resulta ser efectiva a partir de las 150 μm , lo cual se ve reflejado en la mejora de las propiedades físico – mecánicas, por los cambios que ocurren en la microestructura, a partir de la formación de fases mineralógicas como la anorthita y la albita.
3. Con la adición de CaCO_3 al material arcilloso utilizado en la fabricación de ladrillos de barro, se disminuye el tiempo de secado en un 35% en comparación con lo ladrillos elaborados sin la adición. Esto indica que la adición CaCO_3 (al suelo arcilloso utilizado para la fabricación de ladrillos), provoca que los capilares faciliten el flujo de la humedad porque se encuentran más abiertos en los ladrillos que contienen un 2% de CaCO_3 , de forma tal que proporciona una mejor eliminación del agua de los poros.
4. Se constata que la adición de CaCO_3 al material arcilloso utilizado en la fabricación de ladrillos, provoca un reordenamiento en la estructura de poros de los ladrillos sin quemar, hacia la formación de poros de mayor diámetro, facilitando la pérdida del agua intersticial y la eliminación del agua de composición, durante el precalentamiento en la etapa de cocción de los ladrillos, y propicia una disminución del consumo de combustible.
5. La adición de CaCO_3 al suelo arcilloso utilizado en la fabricación de ladrillos huecos cocidos, provocó una disminución del tiempo de cocción, lo cual influye en la consiguiente disminución del consumo de combustible en un 27%, en comparación con los ladrillos cocidos sin la adición.
6. Los ensayos de calidad realizados a las muestras de ladrillos, demostraron que el empleo de CaCO_3 como fundente en la producción de ladrillos cocidos, no produce afectaciones en la calidad del producto terminado, cumpliendo con los parámetros que se establecen en la norma cubana NC – 360 2005.

7. La reducción de los costos de producción observadas en las pruebas, en el Combinado Cerámico de Manicaragua, están en el orden de un 27%. Esta disminución se atribuye principalmente, al ahorro de combustible. Lo que podría significar, si esta tecnología es aplicada en los principales combinados del país, se podría evitar el gasto de las arcas nacionales, aproximadamente unos 2 536 380 dólares, por concepto de combustible para la cocción de ladrillos y bloques cerámicos.

Recomendaciones.

1. Completar el estudio de la influencia del carbonato de calcio en el proceso de secado, mediante ensayos de microestructura.
2. Continuar el estudio de las emisiones gaseosas provocadas durante la cocción de los ladrillos y verificar las potencialidades del CaCO_3 contenido en los mismos, en su acción como posible depurador de las emisiones de azufre provocadas por la combustión de los combustibles.
3. Verificar la presencia de sulfato de calcio (CaSO_4) en los ladrillos debido a la reacción del carbonato de calcio y el dióxido de azufre (SO_2) proveniente del combustible y analizar las posibles consecuencias sobre la calidad del producto terminado.
4. Evaluar con mayor profundidad el impacto económico, ecológico y social de la adición de carbonato de calcio como fundente en la fabricación de ladrillos de cerámica, a partir de un estudio de factibilidad económica.

Referencias bibliográficas.

1. Piñeiro, M.C., *Procesos de producción más limpia en ladrilleras de Arequipa y Cuzco. Diagnóstico Situacional. Preparado por PRAL*. 2005: Lima, Perú.
2. *El estado municipal en los procesos de degradación ambiental. El caso de la actividad ladrillera en la provincia de Buenos Aires*. 2004; Available from: <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/eco/ladribsas.htm>.
3. *Manual de buenas prácticas. Eficiencia energética*. 2000; Available from: <http://www.medioambiente.gov.ar/?idarticulo=348>.
4. *Nueva Política de Producción: Reducen Contaminación en Fábricas de Ladrillos.*, in *Revista Bit*. enero 2004.
5. *Productos Cerámicos*. 2003; Available from: http://apuntes.rincondelvago.com/materiales-ceramicos_4.html.
6. Mauricio Geneco., J.M., *Ladrillos que ahorran energía. Manual para pequeños productores de ladrillos.*, ITDG, Editor. 2000: Lima, Peru.
7. Otero, A.V. *Ciencia y tecnología de los materiales. Tema 4 Materiales ceramicos*. 2008; Available from: <http://ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%204-%20MATERIALES%20CERAMICOS.pdf>.
8. C. M. F. Vieira, P.R.N.d.S., F. T. da Silva, J. L. Capitaneo, S. N. Monteiro, *Microstructural Evaluation and Properties of a Ceramic Body for Extruded Floor Tile*, in *Revista Matéria*. 2005. p. 526 - 536.
9. Betancourt, D., *Utilización del carbonato de calcio como adición mineral en la producción de ladrillos de cerámica roja*, in *Facultad de Construcciones*. 2008, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara.
10. Martirena, J.F., Day, R.L., Betancourt, D., Díaz, Y. *Improvement Of Engineering Properties And Energy Efficiency Of Fired Clay Bricks Through The Addition Of Calcite*. in *7th International Masonry Conference*. 2006. London, Inglaterra.
11. Mayoral, M.C., Izquierdo, M: T, Andrés J.M., Rubio, B, *Aluminosilicates transformation in combustión fallwed by DSC*. *Termochimica acta* 373 2001: p. 173-180.
12. García, F.J., *Descomposición durante la cocción del carbonato de calcio contenido en el soporte crudo de azulejos*, in *Departamento de ingeniería química*. 2005, Universitat Jaumei de Castello: Castellon. p. 1-217.
13. Gaviría J.P, Q.D., Fouga G, Bohé A, Pasquevich D, *Estudio Cinético de la Descomposición del Carbonato de Calcio por Cromatografía Gaseosa*, in *Revista Matéria*. 2005. p. 170 – 177.
14. Cultrone, G., et, al., *Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks*. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004. **24**: p. 547-564.
15. Borgwardt, R.H., *Calcination Kinetics and surface area of dispersed limestone particles*, in *AIChEJ*. 1985. p. 103-111.
16. Gutiérrez, C.A.G., *Modelación y simulación de un horno de túnel industrial* in *Facultad de Minas*. 2010, Escuela de Procesos y Energía Universidad Nacional de Colombia: Colombia. p. 56.
17. EcoSUR, R. *Producción ecológica y económicamente sustentable de ladrillos en Chambo, Ecuador*. 2010 [cited 2010; Available from: www.ecosur.org].

18. O. B. Gol'tsova, V.S.K., O. B. Nagovitsin, and S. V. Antonychev, *Heat losses in a tunnel kiln for brick firing*. Glass and Ceramics, 2006. **63**: p. 127-129.
19. *Impactos Ambientales y Actividades Productivas. Cerámica fina y de producción*. 2007; Available from: www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=259.
20. Arteaga, C. *Producción y Comercialización del ladrillo en Colombia*. 2005 [cited 2009; Available from: <http://www.monografias.com/trabajos14/ladrillocolomb/ladrillocolomb.shtml>.
21. EcoSUR, R., *Apuntes sobre ladrillos*. 2009.
22. E.Sánchez, J.G.-T., M.Regueiro, *Materias para la industria cerámica española.Situación actual y perspectivas*. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio., 2006. **45**: p. 1-12.
23. Roberto, H. *Materias primas no convencionales en cerámica*. 2005; Available from: <http://www.empremin.org.ar>.
24. *Prevención de la contaminación en el sector cerámico estructural*. 2006 [cited 2009; Available from: <http://www.cprac.org>.
25. *Determinación de la eficiencia energética del Subsector industrial de ladrillo, vidrio y cerámica. República de Colombia*, M.d.M.y. Energía, Editor. 2001, Unidad de Planeación Minero Energética. (UPME).
26. Zambrana, O.F.S., *Tomado de la entrevista al experto en cerámica de la Empresa "COREPMA" del Ministerio de la Construcción de Cuba*. noviembre de 2007 Ciudad de La Habana.
27. Jesús Manuel Tur Chacón, M.d.C.A.A. (Febrero, 2005) *El aprendizaje tecnológico y la innovación en la industria de materiales de construcción. Experiencias del Combinado de Cerámica Roja de Ciudad de la Habana*. Folletos-Gerenciales **2**, 32-40.
28. Juncosa, E., *Tomado de la entrevista a experto del grupo de Desarrollo de la Industria de Materiales de la Construcción*. GEICON. abril de 2008 Ciudad de La Habana.
29. CIDEM, *La ciencia del ladrillo*, C.M. Alexis Boentes, Jose Jasan Nieves, Editor. 2010.
30. Xavier, E. *Optimización de procesos cerámicos industriales. Ira Parte. Introducción al comportamiento de las pastas cerámicas*. 2004; Available from: www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID57.pdf.
31. Sisti, M. *Optimización del proceso de secado*. 2002; Available from: <http://www.negosiosolavarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas>.
32. Vieira, C.M.F., Monteiro, S. N. , *Evaluation of a Plastic Clay from the State of Rio de Janeiro as a Component of Porcelain Tile Body*, in *Revista Matéria*,. 2007. p. 1 - 7.
33. Toraya, J.d.I.C., *Manual Técnico para la producción artesanal de ladrillos de barro*. 2010: Ciudad de la Habana.
34. *Ceramic structural*. 2009 [cited 2011; Available from: <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/eco/ceramica>ht>.
35. *Cerámica Artística y Acuarelas. Cerámica*. 2004; Available from: <http://www.xtec.es/~aromero8/pagina70.htm>.
36. *Cochura Portada Historia Tecnología y Sociedad*. 2009; Available from: <http://www.xtec.net/~cgarci38/ceta/historia/cochura.htm>.
37. *Hornos para coser manufacturas bastas*. 2004; Available from: www.xtec.cat/~aromero8/hornos.htm.
38. Jones, T., Vieweg, Braunschweig, *The Basics of Brick Kiln Technology*. 1995.
39. Jones, T., *The Basics of Brick Kiln Technology in GATE*. 1996.

40. Emilio, M.T., Sánchez. . *Uso eficiente de la energía en la producción de ladrillos a pequeña escala. Programa de energía ITDG Perú.* in Artículo presentado en el “VII Simposio Peruano de energía solar. 1998. Piura-Perú.
41. Martirena, J.F., *Combustion of waste biomass for the manufacture of building materials. The energy-efficiency at small-scale production,* in *BASIN NEWS.* November 1999. p. 23-27.
42. *Prevención de la contaminación en el sector cerámico estructural. Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL).* 2006; Available from: <http://www.cprac.org>.
43. *Junta de Andalucía. Guía de notificación de las emisiones de la industria de fabricación de elementos de construcción 2005.*
44. *Instituto Regional de Fomento. Estudio Medioambiental del sector de los materiales.* 1999.
45. Day, R.L. (28 February;1994) *A Fly Ash Masonry Unit.* Department of Civil Engineering the University of Calgary 64p.
46. Day, R.L., *Engineering and Microstructural studies of Wesrtern-Canadian fly ash bricks.* Department of Civil Engineering the University of Calgary. Materials Research Society., December, 1986. **65**: p. 11p.
47. Day, R.L. *Fly Ash a Substitute for clay in brick Manufacture.* Department of Civil Engineering the University of Calgary. in *8th International Brick/Block Masonry Conference.* 19-21 September, 1988. Dublin, Ireland
48. T.W. Cheng, T.H.U., Y.S. Chen, J.P. Chiu, *Production of glass-ceramic from incinerator fly ash.* Ceramics International, 2002. **28**: p. 779–783.
49. Leyla, Y.J., Sandra, Carolina Agudelo., *Desechos con potencial industrial,* in *Revista Colombia, Ciencia y Tecnología de Colciencias.* 2007. p. 3p.
50. Xavier, E. *Generación de Residuos y Valoración.* 2004; Available from: <http://www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID56.pdf>.
51. *Sodium silicate-Extrusion additive for clay products.* 2005; Available from: http://www.pqcorp.com/TechnicalService/..%5Cliterature%5Cbulletin_12-33.pdf.
52. Tulyaganov, D.U., Rubeiro M.J., Labincha, J.A, *Development of glass ceramics by sintering and crystallization of fine pauders of calcium – magnesium aluminosilicate glass.* Journal of the European Ceramic Society 2002. **22**: p. 1775 - 1782.
53. Giuseppe Cultrone, E.S., Kerstin Elerta, Maria Jose de la Torre, Olga Cazalla, Carlos Rodriguez–Navarro, *Mineralogical and physical behaviour of solid bricks with additives.* 2005: Departamento Mineralogica y Petrologia, Universidad de Granada, Spain. Elsevier.
54. Tanacan, L. *Investigation of the production of lightweight and high strength masonry bricks by using by-product and recycled additives.* in *Ira Conferencia Internacional de Ecomateriales y Hábitat Sostenible.* 1998. La Habana.
55. Bernal, I., H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica & J. Quintero, *Análisis próximo de arcillas para cerámica,* in *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 2003. p. 569-578.
56. F. Gonzalez-Garcia, V.R.-A., G. Garcia-Ramos and M. Gonzalez-Rodriguez, *Firing transformations of mixtures of clays containing illite, kaolinite and calcium carbonate used by ornamental tileindustries.* Applied Clay Science, 1990. **5**(361-375.).
57. K. Traoré, P.B., *Structural transformation of a kaolinite and calcite mixture to gehlenite and anorthite.* 2002: Laboratoire de physico-chimie et de Technologie des Matériaux, UFR-SEA. Université de Ouagadougou et GEMH, ENSCI, Limoges.

58. Batista González, R.G.C., Domingo, *Valoración del potencial de los recursos minerales, para la industria de los materiales de construcción a nivel municipal en la república de Cuba*. 2008: Ciudad de la Habana Cuba.
59. García Romero, E. *Las Arcillas: Propiedades y Usos*. 2003; Available from: <http://www.segemar.gov.ar>.
60. Eduardo, D.N.V., *Mecánica avanzada de los materiales cerámicos y vidrios*,. 2004.
61. Duitama, L., Espitia, C., Mojica, J., Quintero, J. & Romero, F., *Composición mineralógica y química de las arcillas empleadas para cerámica roja en las zonas de Medellín, Itagüí y Amagá*, in *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 2004. p. 555 - 563.
62. Kornmann, M., *Matériaux de Construction des Tuiles et Briques*, ed. . 2005, Paris: Editions Septima.
63. Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G., *Handbook of Clay Science*. 2006.
64. *La arcilla. clases y propiedades*. 2005 [cited 2009; Available from: <http://html.rincondelvago.com/arcilla.html>.
65. *Glosario y diccionario Inglés /Español sobre la cerámica*. 2003; Available from: <http://www.meliestrada.com/Glosario.htm>.
66. *Glosario de términos cerámicos*. 2004; Available from: <http://www.ceramica.info/glosario.htm> .
67. Xavier, E. *Optimización de procesos cerámicos industriales. 3ra Parte. la fabricacion de los materiales ceramicos*. 2001; Available from: <http://www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID57.pdf>.
68. Orus Asso, F., *Materiales de Construcción 1977*, La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
69. *Recycled Glass as a Ceramics Raw Material. Technology Brief # GL-97-6*. 2006; Available from: <http://www.cwc.org/glass/gl976fs.pdf>.
70. L.Mbumbia, *Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures: a case study of Cameroon*. *Construction and Building Materials* 2000. **14**: p. 121-131.
71. Cultrone, G., et al. , *Behaviour of brick samples in aggressive environments. Water, Air, and Soil Pollution* 2000(119): p. 191–207.
72. Jordan Vidal, M.m.T.S., M.S. Hernández-Crespo , M.B. Almendro-Candela, E. García-Sánchez, *Aptitudes cerámicas de una arcilla tipo modificada por la adición de un residuo rico en carbonato cálcico*. *Materiales de construcción* 2001. **51**(261): p. 5-19.
73. K.Traoré, T.S., *Gehlenite and anorthite crystallisation from kaolinite and calcite mix*. 2002: Laboratoire de physico-chimie et de Technologie des Matériaux, UFRSEA, Université de Ouagadougou, Burkina Faso, GEMH, Ecole Nationale Supérieure de Ceramique Industrielle (ENSCI), Limoges. Elsevier.
74. K. Traore, G.V.O., P. Blanchart , J.-P. Jernot , M. Gomina, *Influence of calcite on the microstructure and mechanical properties of pottery ceramics obtained from a kaolinite-rich clay from Burkina Faso*. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007. **27**: p. 1677–1681.
75. Jorge Martín-Marquez, A.G.D.I.T., Miguel A. G. Aranda, Jesus Ma Rincon, and Maximina Romerow,, *Evolution with Temperature of Crystalline and Amorphous Phases in Porcelain Stoneware*. The American Ceramic Society, 2009. **92**(1): p. 229 - 234.
76. Sequeira, J.E., *Temas sobre materiales de construcción*. 1989, La Habana: Ministerio de Educación.

77. Autores, C.d., *Manual de Capacitación*. 2009.
78. Manuel, C.P., *Elaboración de límites máximos permisibles de emisiones para la industria ladrillera*. 2010.
79. *Prevención de la contaminación en el sector cerámico estructural. Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL)*. 2006; Available from: <http://www.cprac.org>.
80. Sisti, M. *La extrusión segunda parte*. 2003; Available from: www.negosiosolavarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas.
81. Sisti, M. *El secado en la Industria Cerámica*. 2004; Available from: <http://www.negosiosolavarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas>.
82. Berteli, M.N.a.J., A.M., *Evaluation of short cut pasta air dehydration assisted by microwaves as compared to the conventional drying process*. Journal of Food Engineering, 2005. **68**: p. 75-183.
83. Carolina Cárdenas, R.R., Jorge García-Sucerquia, Jairo Marin, Claudia García, *Las microondas como una alternativa para el secado de materiales cerámicos tradicionales*, in *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 2009: Colombia. p. 427-432.
84. Minke, G., *Manual de construcciones con tierra*. 2001.
85. Karaman, S., Ersahin, Sabit., Gunal, Hikmet., *Firing Temperature and firing time influence on mechanical and physical properties of clay bricks*. Journal of Scientific industrial Research, 2006. **65**: p. pp. 153-159.
86. Lawrence H, V.V., *Materiales para Ingeniería*. 1991, Compañía Editorial Continental, S.A. México – España – Argentina – Chile: Departamento de Química y Metalurgia, Universidad de Michigan.
87. A.Hessler-Wyser, P., *Introduction à l'EDX, Cours de microscopie électronique*. 2010.
88. A.Hessler-Wyser, P., *Microscopie électronique à balayage, Cours de microscopie électronique*. EPFL. 2010.
89. Bielza de Ory, J.M. *Revestimientos en la edificación*. 2005; Available from: <http://users.movinet.com.uy/~ingeobra/revestimientos>
90. *CBPI Techniques. Durability of Brickwork*. 2000; Available from: http://www.brickbydesign.com-cbpi_research_paper_10.pdf_2.pdf.
91. Vallejo, J.L. *Maestría de Rehabilitación. Capítulo 2. Tema 7. Ensuciamiento físico de fachadas. Limpieza y prevención*. 2003 [cited 2010; Available from: <http://www.arquitectura-tecnica.org>.
92. *Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 2: Piezas de arcilla cocida*. UNE 7-136-58.
93. K. Traoré, P.B., *Caractérisation physicochimique et mécanique de matériaux céramiques obtenus à partir d'une argile kaolinique du Burkina Faso*. 2006: Laboratoire de physicochimie et de technologie des matériaux, UFR-SEA, université de Ouagadougou ; Ecole nationale supérieure de céramique industrielle (ENSCI) Limoges.
94. Juarez Badillo, E., Alfonso, Rico Rodriguez, *Mecánica de Suelos*. Vol. 1. 1972, La Habana: Editorial: Pueblo y Educación. 443.
95. *Secado de productos ceramicos. Variables a controlar*. 2009.
96. Sisti, M. *Parte II. El secado – Comportamiento de las arcillas*. 2004; Available from: <http://www.negosiosolavarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas>.

97. Mezquita, A., E. M., *Sector azulejero y comercio de emisiones: reducción de emisiones de CO₂*, in *Cerámica y Vidrio*. 2011.
98. Tari, G.a.F., J.M.F., *Curve di Bigot: Un metodo pratico ed efficaci di caratterizzazione di composti crudi attenuti per cologgio*. Ceramagia, 1997. **27**: p. 363-368.
99. Fernández, M. *Fabricación y control de calidad de los materiales de arcilla cocida*. in *En seminario Internacional Fabricación y Control de calidad de los materiales de arcilla cocida*. 1990. Medellín, Colombia: LUNSA.
100. E. Monfort, A.M., R. Granel, E. Vaquer, A. Esc rig, A. Miralles, V. Zae ra, *Análisis de consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas*. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio., 2010. **49**(4): p. 303-310.
101. *Ladrillos y bloques de arcilla cocida-Métodos de ensayo*. NC 359:2005.
102. *Ladrillos cerámicos de arcilla cocida— requisitos*. NC 360 : 2005.
103. E. Monfort, A.M., R. Granel, E. Vaquer, A. Esc rig, A. Miralles, V. Zae ra, *Reducción de las emisiones de azufre de un horno túnel*. Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 2010. **49**(5): p. 343-350.