

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



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



Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en  
Ciencias Técnicas

**Autor:** Ing. Yosvany Díaz Cárdenas

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

Santa Clara  
2011

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACION DEL USO DEL CARBONATO DE CALCIO COMO  
ADITIVO FUNDENTE EN LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS HUECOS  
COCIDOS. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en  
Ciencias Técnicas

**Autor:** Ing. Yosvany Díaz Cárdenas

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

Santa Clara  
2011

*“Si supiéramos lo que estábamos haciendo, entonces no se llamaría investigación, ¿verdad?”*

*Albert Einstein.*

*A mi hija que es la razón de mi vida y la que llena mis pensamientos dándome alegría  
en los momentos tristes.*

*A mis padres, quienes me dieron la vida y me enseñaron a ir por el camino correcto.*

*A Dania y Martirena, que más que mis tutores, han sido mi guía durante toda mi vida laboral y científica.*

*A Mathieu y la profesora Karen, por su ayuda incondicional en la realización de este trabajo.*

*A Puchol y Adrian, por sus oportunos consejos.*

*A mis padres, por la paciencia y la tolerancia.*

*A Omar, Raul y Seijo por compartir su sabiduría.*

*A Quevedo, por su apoyo y confianza.*

*A mi amiga Belkis, por brindarme su apoyo incondicional.*

*A mi tía Idelma, por confiar siempre en mí y darme sabios consejos.*

*A los trabajadores del Combinado Cerámico de Manicaragua, muchas gracias por su gran ayuda.*

*A mi familia, amigos y compañeros de trabajo, por el apoyo y la preocupación.*

*A todos,*

*¡Gracias!*

## Resumen.

El presente trabajo constituye una investigación de carácter teórico – práctico sobre la utilización del carbonato de calcio, como aditivo fundente en la producción de ladrillos de cerámica roja, con el objetivo de evaluar los requerimientos físico – químicos que debe tener este material, para ser utilizado como fundente en un escalado de producción semi – industrial, así como su influencia sobre los procesos tecnológicos de obtención de ladrillo cerámico.

La investigación estuvo centrada fundamentalmente en tres cuestiones: una primera de tipo teórica y bibliográfica donde se aborda el estado del arte sobre la temática, los conceptos y principios generales. En una segunda etapa se estudia la influencia del  $\text{CaCO}_3$  como una adición fundente sobre las propiedades macro y microestructurales de los ladrillos cerámicos y se establecen los parámetros tecnológicos para su utilización (finura, dosificación y temperatura de cocción). Finalmente se investigó el comportamiento del mineral sobre los procesos tecnológicos de secado y cocción a escala semi – industrial.

Se aplicaron un grupo de técnicas instrumentales y analíticas de investigación, como análisis químico cuantitativo y por Fluorescencia de Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), técnicas de difracción de Rayos X (DRX), análisis termo gravimétrico (TGA), Porosimetría por Intrusión de Mercurio (PIM), determinándose las transformaciones mineralógicas que ocurren en los materiales arcillosos, a partir de la adición del  $\text{CaCO}_3$  y su efecto en el material cerámico.

Se demuestra que cuando dicho aditivo es molido hasta una finura de  $150\mu\text{m}$  y adicionado en una proporción granulométrica o volumétrica en un 2%, en relación a la cantidad de material arcilloso, no se afectan las propiedades físico - mecánicas de los ladrillos cuando disminuye la temperatura hasta  $800^\circ\text{C}$ , debido, fundamentalmente, a incrementos de la densidad y la formación de fases mineralógicas estables como anorthita y la albita.

A partir de un escalado de producción industrial se determinó la influencia del carbonato de calcio en los procesos tecnológicos de secado y cocción, lográndose mejoras significativas en los procesos de secado, al disminuir el tiempo de secado en un 35% y la cocción de los ladrillos experimentó un ahorro de 27% de combustible, sin que los parámetros físico – mecánicos del ladrillo de cerámica se afecten de forma significativa.

## Índice.

### Contenido

Resumen.....	1
Índice.....	2
Introducción:.....	6
Capítulo I: Utilización de fundentes en la producción de ladrillos cerámicos. Estado del arte. ...	14
1.1. Situación de la industria de ladrillos de cerámica roja. ....	14
1.2. Problemas y retos actuales que enfrenta la industria de la cerámica roja.....	14
1.2.1. Principales problemas que enfrenta la industria cerámica. ....	14
1.2.2. Situación de la industria de la cerámica roja en Cuba. ....	17
1.2.3. Retos que enfrenta la industria cerámica. ....	18
1.3. Soluciones potenciales para mejorar la problemática de la industria de la cerámica... ..	18
1.3.1. Perfeccionamiento del proceso térmico del ladrillo de barro.....	19
1.3.2. Utilización de combustibles alternativos.....	21
1.3.3. Mejoras en las materias primas. ....	23
1.4. Características de las materias primas utilizadas en la producción de materiales cerámicos. ....	27
1.4.1. Elementos plásticos ..... ..	27
1.4.2. Elementos magros o desgrasantes.....	28
1.4.3. Elementos fundentes ..... ..	28
1.5. Factores que influyen en los procesos productivos en la fabricación de materiales cerámicos. ....	30
1.5.1. Extracción y preparación de las materias primas. ....	30
1.5.2. Conformado de los elementos. ....	31
1.5.3. Transformaciones durante los procesos térmicos en los productos cerámicos.....	31
1.6. Conclusiones parciales del capítulo.....	36
Capítulo II: Influencia del $\text{CaCO}_3$ como aditivo fundente sobre las propiedades macro y microestructurales de los materiales cerámicos. ....	37
2.1 Introducción.....	37
2.2. Materiales y métodos. ....	37

2.2.1.	Materiales utilizados. ....	37
2.2.2.	Caracterización de las materias primas utilizadas. ....	38
2.2.3.	Resultados de la caracterización del material arcilloso. ....	38
2.2.4.	Resultados de la caracterización del carbonato de calcio. ....	39
2.3.	Descripción del programa experimental. ....	40
2.3.1.	Primera etapa del trabajo experimental. ....	40
2.3.2.	Segunda etapa del trabajo experimental. ....	40
2.4.	Procedimiento experimental. ....	41
2.4.1.	Diseño experimental. ....	42
2.4.2.	Caracterización estadística del diseño experimental. ....	44
2.5.	Análisis de resultados. ....	46
2.5.1.	Influencia del $\text{CaCO}_3$ a escala de la macroestructura. ....	46
2.5.1.1.	Influencia de la finura del $\text{CaCO}_3$ en las propiedades físico – mecánicas de las muestras cerámicas. ....	46
2.5.1.2.	Influencia de la temperatura y el % de $\text{CaCO}_3$ en las propiedades físico – mecánicas de las muestras cerámicas. ....	49
2.5.1.3.	Influencia de la finura y contenido de $\text{CaCO}_3$ en la durabilidad de las muestras cerámicas. ....	52
2.5.1.4.	Resultados de las pruebas estadísticas aplicadas. ....	53
2.5.2.	Influencia de la adición de $\text{CaCO}_3$ en el comportamiento microestructural de las muestras. ....	54
2.5.2.1.	Transformaciones mineralógicas durante la sinterización. ....	55
2.5.2.2.	Influencia de la finura de $\text{CaCO}_3$ en los cambios microestructurales. ....	57
2.5.2.3.	Evaluación del contenido de $\text{CaCO}_3$ en las transformaciones mineralógicas. ....	59
2.5.2.4.	Influencia de la acción fundente del $\text{CaCO}_3$ sobre la temperatura de cocción. ....	62
2.6.	Conclusiones parciales del capítulo. ....	65
Capítulo III: Implementación del $\text{CaCO}_3$ como fundente en la producción industrial de ladrillos de cerámica roja. ....		67
3.1.	Uso del carbonato de calcio en la fabricación de ladrillos. ....	67
3.2.	Características del proceso de producción de los ladrillos de cerámica roja en el combinado de Manicaragua. ....	67
3.3.	Descripción del programa experimental. ....	68
3.3.1.	Trabajo experimental en la fábrica. ....	68

---

3.4. Procedimiento experimental.....	69
3.4.1. Elaboración de los ladrillos con la adición de carbonato de calcio. ....	69
3.4.2. Diseño experimental. ....	71
3.4.3. Caracterización estadística del diseño experimental. ....	73
3.5. Análisis de resultados.....	74
3.5.1. Influencia del CaCO <sub>3</sub> en el proceso de secado de ladrillos de cerámica roja. ....	74
3.5.1.1. Influencia del CaCO <sub>3</sub> en la contracción durante el secado de los ladrillos. ....	77
3.5.2. Influencia del CaCO <sub>3</sub> en el proceso de cocción de ladrillos de cerámica roja. ....	79
3.5.2.1. Evaluación de la influencia del CaCO <sub>3</sub> sobre la temperatura, tiempo de cocción y consumo de combustible en la producción de ladrillos.....	79
3.5.2.2. Influencia del CaCO <sub>3</sub> sobre las emisiones de gases de la combustión durante la cocción. 80	
3.5.2.3. Influencia del CaCO <sub>3</sub> en la calidad del producto terminado.....	82
3.6. Análisis económico de la introducción del CaCO <sub>3</sub> en el Combinado Cerámico de Manicaragua. ....	85
3.7. Influencia medio ambiental de la utilización del CaCO <sub>3</sub> en la producción de ladrillos de cerámica roja. ....	87
3.8. Posible impacto de la introducción del carbonato de calcio como fundente en los principales combinados cerámicos del país. ....	88
3.9. Conclusiones parciales del capítulo.....	90
Conclusiones generales.....	91
Recomendaciones. ....	93
Referencias bibliográficas.....	94
Anexos .....	99



## 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  $\text{CaCO}_3$  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  $1000^\circ\text{C}$  hasta  $900^\circ\text{C}$ , 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  $\text{CaCO}_3$ , tomando en cuenta otros aspectos, como la finura o tamaño de partículas del mismo. Según algunos autores[12-15], la superficie específica del  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$ , 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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$ , 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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  como fundente en la reacción de sinterización de los materiales cerámicos.
2. Definir los parámetros tecnológicos para el uso del  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  a escala industrial.

### ***Hipótesis:***

Si se utiliza el  $\text{CaCO}_3$  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  $\mu\text{m}$ , 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  $\mu\text{m}$ , 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 porcentos y finuras de aditivo bajo diferentes condiciones de elaboración.

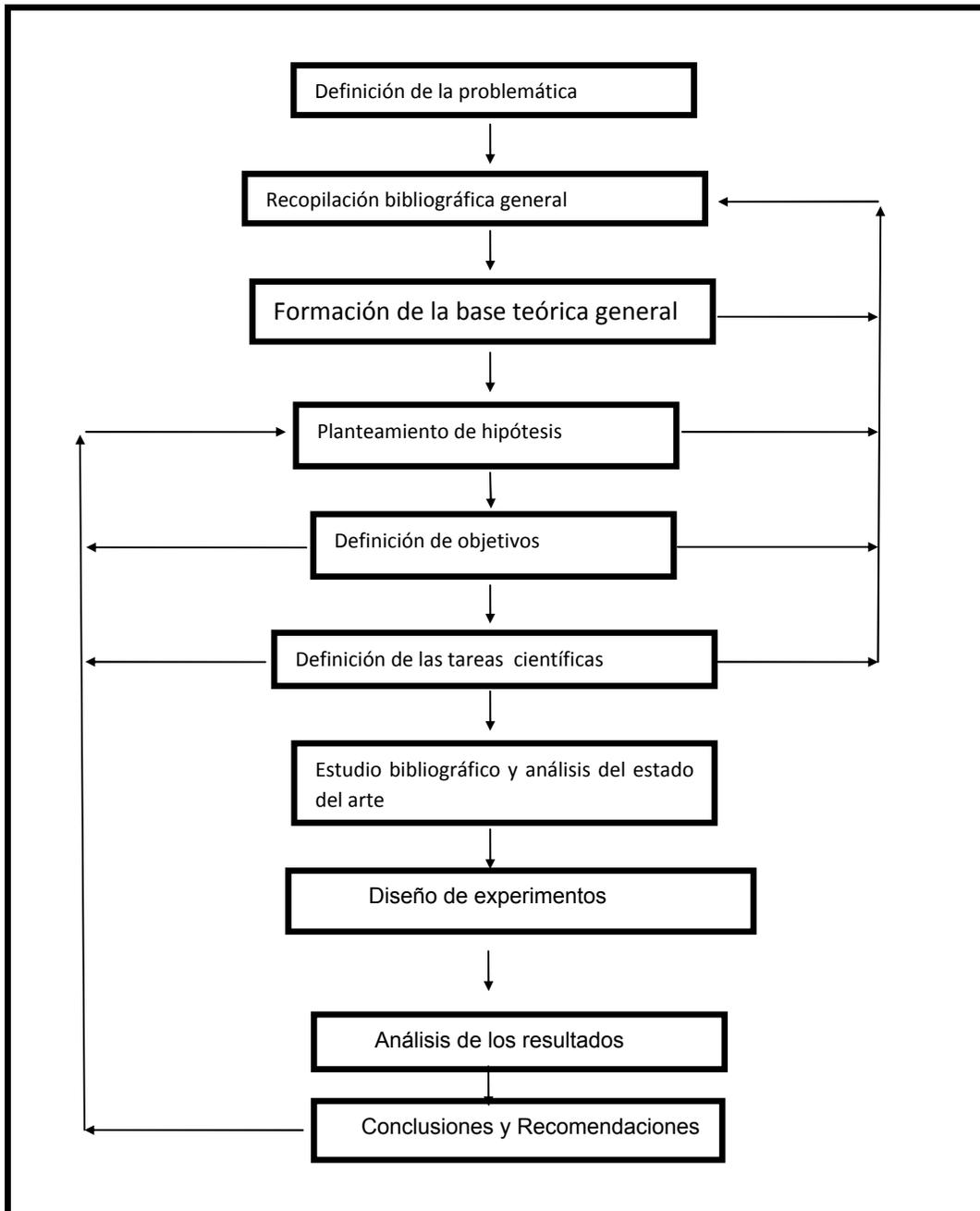
En el capítulo III, se aborda el estudio de la influencia de la adición de pequeñas dosis de carbonato de calcio, sobre los procesos de secado y cocción de ladrillos de cerámica roja elaborados a escala de producción industrial, comparando su desempeño con ladrillos elaborados bajo los mismos parámetros 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.

**Metodología de la Investigación:**



---

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

### **1.1. Situación de la industria de ladrillos de cerámica roja.**

En la actualidad, la fabricación de ladrillos de cerámica roja ha perdido competitividad en el mercado, debido a diferentes factores; primeramente podemos mencionar la competencia en el mercado con infinidad de materiales utilizados hoy en día en la fabricación de muros, los mismos los superan en calidad y costos. Otro de los factores se relaciona con el consumo elevado de energía y del costo de los combustibles, además de la contaminación medio ambiental que genera su fabricación en la industria.

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.

### **1.2. Problemas y retos actuales que enfrenta la industria de la cerámica roja.**

#### **1.2.1. Principales problemas que enfrenta la industria cerámica.**

La industria cerámica en la actualidad está afectada por varios problemas. Uno de los principales es la gran cantidad de energía térmica requerida en sus producciones, la cual es producida, para el caso de la producción industrial, a partir de la combustión de combustibles fósiles, como son el petróleo, el gas natural y el carbón de piedra [16]. Estos combustibles desde el año 2008, han elevado sus precios poniendo en peligro económico a muchas de estas empresas [17], convirtiéndose en un eslabón más en la cadena que lleva a una crisis energética en la actualidad.

En esta industria están involucrados una gran variedad de tecnologías y procesos de producción, que consumen junto con la industria del vidrio, cerca de un 6% de la energía mundial; de ella, el 85% de los costos se relaciona con el consumo de combustible utilizado para la cocción [16, 18]. Como resultado de las bajas temperaturas de cocción, el consumo varía entre 0,8 y 2,1 MJ/kg de producto obtenido [19], mientras que en los demás sectores de la

cerámica de construcción y fina, el consumo medio es notablemente mayor, pudiendo elevarse hasta 8 MJ/kg de producto [19].

Este panorama es mucho más difícil para el caso de la producción artesanal donde se carece de una tecnología moderna y se tiende a una gran ineficiencia. Esto ocurre debido fundamentalmente por los tipos de hornos utilizados (Hornos Artesanales) y el combustible más comúnmente usado es la leña, como la principal fuente de energía para las pequeñas y medianas empresas, sobre todo para los países del Tercer Mundo [20]. Los productores artesanales luchan por sobrevivir a la escasez de leña y de la competencia de las empresas de prefabricado de elementos de hormigón [17].

El consumo de leña para producir ladrillos es muy elevado. En un estudio realizado por la Red Eco SUR en el año 2009 (Ver tabla 1), en algunos países latinoamericanos como Ecuador, Bolivia, Guatemala y Cuba, el consumo se comporta de la siguiente manera [17]:

**Tabla 1. Consumo de combustible de los hornos tradicionales.**

País	Horno	Combustible	Consumo (MJ/kg)	Informado o publicado
Bolivia	tradicional	leña	4 – 6	Swisscontact 2009
Guatemala	tradicional	leña	2.25	Productores privados / Eco Sur 2009
Cuba	tradicional	leña	4	Productores privados / EcoSur 2009
Ecuador	tradicional	leña	1.2	Productores privados / EcoSur 2009

Este estudio dio como resultado que el consumo medio de leña para los hornos tradicionales es de 3,4 MJ/kg, estando en el orden de la 9,6 ton de leña para producir 20000 unidades. Se considera que un productor puede realizar un promedio de 10 quemas al año, teniendo un consumo anual de 96 ton de madera (aproximadamente la tala de 9 ha de bosque), a un costo medio aproximado de 0,02 USD/Unidad [21]; o lo que es lo mismo, 4000 USD anuales, lo que permite confirmar los altos consumos de leña, que representan un alto costo para los productores artesanales.

Por otra parte, por todos es conocido que en la industria de la cerámica roja independientemente de la situación energética que sin duda es uno de los problemas más graves, existen otras situaciones que también deben ser atendidas, como por ejemplo: los costos de las materias

primas que en los últimos tiempos han experimentado un aumento del 10 %, sobre todo a escala industrial. El 85% de las materias primas consumidas son materiales arcillosos, cuarzos, arenas, feldspatos alcalinos [22]. Este incremento de los costos está dado, principalmente, por un uso no sostenible de los recursos naturales, al provocar un agotamiento de los materiales en los yacimientos, creando una situación difícil que reclama no solo cambios en las formas de trabajar y producir, sino una nueva conciencia empresarial y social [23].

La situación medio ambiental es otro de los problemas más graves que enfrenta la industria de la cerámica roja a nivel internacional, por las grandes necesidades de energía que necesita para la cocción, las emisiones gaseosas por el humo y la explotación minera [17, 23]. Los factores que más inciden en los impactos negativos sobre el medio ambiente son:

**La tecnología de producción:** En el caso de la producción artesanal de ladrillos, la naturaleza del combustible utilizado y la ineficiencia de los hornos, contribuye a un proceso sumamente contaminante, con la consecuente generación de humo negro. Los efectos de las emisiones van desde la presencia de hollín, hasta impactos adversos a la salud, que se manifiesta en una alta incidencia de enfermedades respiratorias en los trabajadores de las fábricas y en las comunidades cercanas a ellas [1, 2].

En el caso de la producción industrial, donde se utilizan tecnologías modernas (hornos de túnel) con combustibles líquidos, se producen índices de desempeño ambiental hasta cuatro veces mejores que los de una empresa que usa tecnología ineficiente y combustible sólido. Aunque sus principales problemas se deben a los efectos negativos generados por las gases de la combustión, por el combustible utilizado, siendo las más graves las emisiones de  $SO_2$  que pueden estar en el orden de los 2 – 6 kg/t de producto, en dependencia del tipo de combustible usado, provocando severos daños sobre el medio ambiente [24, 25]

**Extracción de la materia prima:** La extracción de la materia prima provoca un deterioro considerable al medio ambiente, a partir de remover la base de los taludes o excavando y haciendo que quede un desnivel con relación a las zonas circundantes. Esto afecta grandes áreas y genera impactos negativos como la eliminación de la capa vegetal, junto con la vegetación circundante, limitando la capacidad de drenaje y sostén del terreno, incrementándose el riesgo de erosión e inestabilidad. [1, 2, 4]

### 1.2.2. Situación de la industria de la cerámica roja en Cuba.

Después de la década del 90 en la industria cubana no se han realizado inversiones de gran envergadura, las cuales se han concentrado sobre todo, en la construcción de mayor cantidad de hornos y secaderos, fundamentalmente en los combinados existentes [26].

En comparación con la estructura tecnológica de la industria de la cerámica roja a nivel mundial, que se posee dos ventajas competitivas: la primera relacionada con el suficiente tamaño de las empresas y la segunda con la disponibilidad de procesos tecnológicos avanzados; por lo cual podemos decir que las empresas cubanas se caracterizan por su reducida dimensión y por tener una tecnología bastante obsoleta[27].

En cuanto a la situación energética, la industria cubana de cerámica roja depende fundamentalmente de combustibles como el fuel oil, utilizado en los principales combinados de cerámica roja del país (Ver tabla 2). Su consumo está dado por las temperaturas con las que se trabajan en cada uno de los hornos, que oscilan entre los 950°C y los 1000°C, lográndose estas temperaturas en dependencia de factores como son: el estado técnico de los hornos, características del material arcilloso y las condiciones de secado [28]

Tabla 2. Normas de consumo de combustible en tonelada por miles de unidades de las principales fábricas de cerámica roja del país [26]

Combinado Cerámico	Producto	Norma de consumo de combustible.	Precio de la tonelada de Fuel Oil	Tipo de horno.
MANAGUA	Ladrillo Macizo.	0,28 T/Mu	671 USD	Túnel
	Bloque Ligero Cerámico	0,40 T/Mu	671 USD	
PINAR DEL RÍO	Ladrillo Macizo.	0,36 T/Mu	671 USD	Túnel
	Bloque Ligero Cerámico	1,06 T/Mu	671 USD	
CAMAGUEY	Ladrillo Macizo.	0,87 T/Mu	671 USD	Túnel
	Bloque Ligero Cerámico	0,92 T/Mu	671 USD	
BAYAMO	Ladrillo Macizo.	0,03 T/Mu	671 USD	Túnel
	Bloque Ligero Cerámico	0,72 T/Mu	671 USD	
CIEGO DE ÁVILA.	Ladrillo Macizo.	0,36 T/Mu	671 USD	Hoffman y de Llama Invertida
	Bloque Ligero Cerámico	0,72 T/Mu	671 USD	

De conjunto con la gran industria de la cerámica roja en nuestro país se cuenta con una red de más de 500 productores privados que en el año 2010, produjeron cerca 36 millones de unidades,

lo que representó un potencial de construcción de más de 8000 viviendas, en contraste con la producción industrial que tiene una inversión de casi 700 millones de dólares y solo pudo producir cerca 9 millones de unidades [29]. Sin embargo, estos productores privados producen bajo precarias condiciones con tecnologías que poco han cambiado con el paso del tiempo; trabajando en hornos pequeños, consumiendo combustibles como la leña en cantidades cercanas a los 4 MJ/kg de producción [17, 29], para un promedio de más de 80 ha de bosque talado para estos fines, provocando severos problemas al medio ambiente [21].

### **1.2.3. Retos que enfrenta la industria cerámica.**

Partiendo de la problemática anterior, relacionado principalmente con la ineficiencia energética, los problemas económicos y los impactos medio ambientales en la producción de materiales cerámicos han provocado que los mismos pierdan aceptación. Es por ello que 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.

### **1.3. Soluciones potenciales para mejorar la problemática de la industria de la cerámica.**

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.

Para el análisis de la eficiencia energética en la producción de materiales cerámicos y específicamente la de ladrillos cocidos, se debe partir de la existencia de productores, tanto artesanales como industriales. Estos últimos logran una mayor eficiencia energética, a partir de una automatización en sus producciones, panorama que es muy diferente en los productores artesanales que utilizan procesos productivos obsoletos usando combustibles y hornos ineficientes [25].

### **1.3.1. Perfeccionamiento del proceso térmico del ladrillo de barro.**

Los tratamientos térmicos son un paso esencial en la fabricación de la mayoría de los productos cerámicos. Ellos pueden dividirse en dos etapas o procesos: secado y cocción.

#### **Tecnología de secado**

El secado es una de las fases más delicadas del proceso de producción. De esta etapa depende, en gran parte, el buen resultado y calidad del material, más que nada en lo que respecta a la ausencia de fisuras. El mismo tiene la finalidad de disminuir parte del agua agregada en la fase de moldeado, para de esta manera, pasar a la fase de cocción [30-32]. Esta fase se realiza en secaderos que pueden ser de dos tipos: natural y artificial.

El secado natural se encuentra entre los más utilizados por los productores artesanales y depende fundamentalmente de las condiciones medioambientales. Una de las principales tendencias para mejorar su desempeño, es realizarlo a la sombra en naves que tengan regularmente un puntal bajo y de ser posible, tener previstos medios para limitar la entrada excesiva de fuertes vientos que puedan provocar grietas en la superficie de los ladrillos [33]. De esta forma se logra un secado bastante uniforme en las piezas, aunque su velocidad está determinada en función de la época del año, temperatura, velocidad del viento y humedad ambiental.

Otra de las tendencias actuales en este proceso tecnológico, en el caso de la producción industrial, es la sustitución de los secaderos naturales por secaderos artificiales, donde en ocasiones, se hace circular aire de un extremo a otro, por el interior del secadero y otras veces, es el material el que circula en el secadero, sin inducir corrientes de aire. Lo más normal es que la eliminación del agua, del material crudo, se lleve a cabo insuflando superficialmente al material aire caliente, con una cantidad de humedad variable. Eso permite evitar golpes termohigrométricos que puedan producir una disminución de la masa de agua a ritmos diferentes en distintas zonas del material y, por lo tanto, produzca fisuras localizadas [30, 31,

34]. Este sistema de secado presenta como principal ventaja el secado continuo, o sea, durante todo el año; además, se consigue un secado más homogéneo y los desperdicios son menores.

### **Tecnología de cocción**

La cocción es la fase más importante del proceso de fabricación de productos cerámicos. En este proceso se confiere a la pieza las propiedades deseadas; al mismo tiempo; se muestra si las fases precedentes (amasado, moldeo y secado) se han realizado correctamente o no [24]. Esta etapa se realiza en hornos que en general no son más que una cámara construida con tabiques refractarios y provistos de un equipo de calentamiento alimentado por diferentes combustibles (electricidad, fuel oil, gas, carbón, leña), y que al alcanzar altas temperaturas, hace posible el horneado o cocción de las piezas [35].

En la actualidad, sobre todo en los países del primer mundo donde predomina la producción industrializada de productos cerámicos, las principales soluciones están encaminadas a la utilización de tecnologías con un alto nivel de automatización, utilizando hornos de caldeo continuo o ininterrumpido como son los de tipo Hoffman y túnel, los cuales aprovechan el calor de los gases residuales desprendidos durante el precalentamiento de las piezas, de tal forma, que las mismas precisan una menor cantidad de combustible durante la cocción, lográndose una alta eficiencia energética [36, 37]. La principal desventaja de estos tipos de hornos es el considerable desembolso de capital.

Para los países subdesarrollados este tipo de tecnología no está al alcance, ya que la producción predominante es la artesanal en pequeñas y medianas empresas, donde no se encuentran grandes sumas de capital, por lo que se utilizan tecnologías de hornos intermitentes, presentando altos niveles de ineficiencia por pérdidas de calor, a través de las paredes y hacia la chimenea, se consumen gran cantidad de combustible para calentar la estructura en cada carga de material, así como la cantidad de calor que se pierde totalmente durante el enfriamiento [36, 37].

Es por ello que varios autores y organizaciones [17, 38, 39] dan como soluciones el uso de tecnologías de hornos más eficientes como es el caso del Horno Vertical Continuo (HVC). Este tipo de horno continuo, en forma de conducto vertical surgido en China y perfeccionado en la India, como su nombre lo indica, su principal objetivo y forma de funcionamiento es la cocción de forma ininterrumpida de los ladrillos. Puede quemar un promedio de 3000 unidades por día y funcionar sin apagarse por espacio de 6 meses. Dicho horno consta de tres cámaras: La

superior o zona de descarga del ladrillo crudo, la intermedia o zona de precalentamiento y la cámara de cocción. En la primera cámara se colocan los ladrillos crudos donde comienza la fase de precalentamiento, en la segunda se produce el secado o expulsión total del agua de amasado que queda en el ladrillo y en la tercera, se efectúa la cocción y enfriamiento lento de las piezas. El movimiento de los ladrillos dentro del horno es vertical, debido a esto y a su funcionamiento o cocción de manera continua, son las razones por las cuales ha sido llamado: Horno Vertical Continuo [17].

Este tipo de horno presenta una serie de ventajas, siendo una de las principales que se puede reducir el consumo de combustible con respecto a otros tipos de hornos utilizados, tanto a escala artesanal como industrial, en orden de un 70% (ver tabla 3). Además de que se puede realizar un mejor control de la temperatura y tiempo de cocción. Su construcción es relativamente fácil y su costo según datos de la Red EcoSur está en el rango entre los 15000 y 30000 dólares [17].

**Tabla 3. Consumo de combustible de varios tipos de hornos.**

País	Tipo de horno	Tipo de combustible	Consumo en MJ/kg	Informado o publicado
Vietnam	Túnel	Carbón	1.2 - 1.3	SDC / entec 2003
Vietnam	HVC	Carbón	0.85 - 1.1	SDC / entec 2003
Nepal	Bull trench	Carbón	1.25 - 1.7	SKAT 2003
Nepal	HVC	Carbón	0.93 - 1.1	SKAT 2003
India	HVC	Carbón	0.83 - 0.85	SDC / Gram Vikas / DA 1998
India	HVC	Carbón	0.8	SDC / DA 1998
Bolivia	Tradicional	Carbón /Aserrín	4 - 6	Swisscontact 2009
Bolivia	HVC	Gas	1,7	Swisscontact 2009
Guatemala	Tradicional	Leña	2.25	Productores privados / EcoSur 2009
Cuba	Tradicional	Leña	4	Productores privados / EcoSur 2009
Cuba	Indirecto	Fuel oil	1.9 - 4.5	EMP Granma 2009 / EcoSur
Ecuador	Tradicional	Leña	1.2	Productores privados / EcoSur 2009
Ecuador	HVC	Leña	0.81	EcoSur 2010

### 1.3.2. Utilización de combustibles alternativos.

En la producción de materiales cerámicos se utilizan múltiples y diversos combustibles como los derivados del petróleo y la leña. Las tendencias actuales a nivel mundial son la sustitución de

éstos, por combustibles alternativos como el gas natural, el carbón de piedra y los desechos agroindustriales [6, 40].

Combustibles alternativos a escala artesanal

Dentro de los combustibles alternativos más utilizados a escala artesanal es la biomasa la más utilizada en la producción de ladrillos y su obtención es principalmente, a partir de los desechos agroindustriales, como son la cascarilla de arroz, el bagazo de caña de azúcar y el aserrín.

El uso de estos desechos para quemar ladrillos se realiza principalmente de dos formas: colocándola directamente en el horno como combustible en forma de briquetas o suelto, o adicionándolo a la mezcla de material arcilloso [6]. Dichos desechos presentan una serie de ventajas como se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Forma de uso y ventajas de la utilización de combustibles agroindustriales en la producción de ladrillos.

Biomasa	Forma de uso	Ventajas
Cascarilla de arroz	Colocándolo directamente en el horno en forma de briquetas o suelto, o adicionándolo a la mezcla de material arcilloso [6]	Contribuye a evitar la emisión de aproximadamente 2400 toneladas de dióxido de carbono por año, además de la tala indiscriminada de árboles. El poder calorífico neto de la cascarilla de arroz es de 13,3 MJ/kg [6].
Aserrín.	Colocándolo directamente en el horno en forma de briquetas o suelto, o adicionándolo a la mezcla de material arcilloso [6].	Reduce el consumo de combustible (leña) en un 50%. Si para quemar 1000 ladrillos sin aserrín se requieren 600kg de leña; si se usa aserrín, se necesitan 350kg [6].
Bagazo de caña de azúcar.	Se usa generalmente en forma de briquetas aglomeradas a presión con o sin arcilla [41].	Disminuye el consumo de leña y a su vez disminuyen las emisiones de CO <sub>2</sub> a la atmósfera; su poder calorífico es muy similar al de la leña [41].

Combustibles alternativos a escala Industrial.

Otra de las tenencias debido al peligro de agotamiento de los combustibles fósiles o derivados del petróleo, sobre todo a escala industrial, es la sustitución del mismo por el gas natural, coque de petróleo y el carbón mineral (Hulla) [6, 40].

- Carbón mineral.

La hulla o carbón mineral se encuentra en estado sólido, se utiliza en el proceso de cocción ofreciendo un poder calórico neto bajo entre los 170 y 260 MJ/kg. Unido a una elevada generación de cenizas hace que su eficiencia energética sea baja, aunque se puede decir que es más económico que el gas y el coque de petróleo. El consumo de carbón en el sector cerámico está desapareciendo a favor de otros combustibles más eficientes desde el punto de vista energético y ambiental, como el gas natural [24, 42].

- Coque de petróleo.

El poder calorífico neto del coque de petróleo está entre los 320 y 340 MJ/kg. El mismo ofrece un buen rendimiento durante la combustión, es uno de los combustibles más económicos con respecto a su costo en el mercado y su uso se manifiesta, principalmente, cuando se adiciona a la mezcla de material arcilloso [24, 42].

- Gas natural.

El gas natural es uno de los combustibles que garantizan una mayor eficiencia energética, presentando un poder calórico neto superior a los 490 MJ/kg; está compuesto por Carbono (74,5%), Hidrógeno (23%), Nitrógeno (2,4%) y Oxígeno. Su uso está condicionado a la infraestructura necesaria para llevarlo a cada una de las instalaciones de las fábricas siendo utilizado en la cocción, secado y la cogeneración [43, 44]. Hay que señalar que es uno de los combustibles que generan menos emisiones contaminantes al medio ambiente [24, 42].

### **1.3.3. Mejoras en las materias primas.**

#### **Sustitución de arcillas.**

En todas las épocas, el ser humano ha usado todas las materias primas disponibles a su alcance para la fabricación de materiales cerámicos, como por ejemplo: arcillas de diferente tipo, caolines, feldespatos, calizas, talcos, cuarzos, dolomitas; sin preocuparse por la sobre explotación de los yacimientos, ni por el agotamiento de las materias primas no renovables, que en la actualidad se ven afectadas por los intensivos procesos de fabricación y la consiguiente acumulación de residuos, provocando un impacto medio ambiental creciente, además de un incremento en sus costos.

Es por ello que en la actualidad, las tendencias están encaminadas a la utilización de materias primas no convencionales, con características físico – químicas similares a las utilizadas normalmente en la producción de materiales cerámicos; tal es el caso de las cenizas volantes de

las plantas generadoras de electricidad, comúnmente conocidas como fly ash, los lodos residuales de la industria papelera, los lodos de las plantas depuradoras de aguas residuales, los residuos de la industria ladrillera, los residuos sólidos urbanos; los que se utilizan como materia prima para hacer ladrillos.

- **Las cenizas volantes:** Son residuos de las centrales termoeléctricas que queman carbón. Se distinguen por tener una fase vítrea mayoritaria y su uso en cerámica está bien extendido, como por ejemplo en la sustitución de la arcilla para la fabricación de **Ladrillos de ceniza Vidrio**, desarrollado por investigadores de la Universidad de Calgary en Canadá [45-48].
- **Lodos residuales de la industria papelera:** Estos residuos provienen del tratamiento de las aguas residuales. Se caracterizan por ser sólidos de consistencia pastosa de fácil manipulación. Son utilizados en la producción de ladrillos cerámicos, sustituyendo hasta un 15 % del material arcilloso utilizado. Con la adición del lodo papelero se obtienen ladrillos con una calidad similar a los convencionales [49].
- **Lodos de las plantas depuradoras de aguas residuales:** Los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales son muy utilizados actualmente para la fabricación de ladrillos porosos en sustitución de la arcilla. Durante la cocción de estos lodos, sus compuestos orgánicos: celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, se destruyen y en su lugar se crean poros cerrados que darán lugar a un material con una mayor porosidad. Los componentes inorgánicos: arcillas, tierras, metales pesados, quedan insertados en la matriz vítrea del cuerpo cerámico, que dará lugar a un ladrillo similar al hecho con materiales arcillosos [50].
- **Las cenizas volcánicas:** A través de la sustitución del 40 al 45% de arcilla por cenizas provenientes de erupciones volcánicas, de composición química fundamentalmente basálticas, en las condiciones de cocción de la cerámica roja (900°C - 950°C), es posible obtener ladrillos de baja densidad, en un rango entre 1,2 y 1,5 g/cm<sup>3</sup> [23].

Son múltiples las ventajas del uso de residuos industriales para la elaboración de ladrillos cerámicos, desde el punto de vista económico y medioambiental, como sustitutos de los materiales arcillosos; aunque su uso está limitado, fundamentalmente, por los volúmenes disponibles para mantener un suministro estable y por la cercanía de los depósitos residuales a los lugares donde se encuentran ubicadas las fábricas para su procesamiento.

### 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 feldespatos, 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 [45, 46].
- **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, 30, 51-53].
- **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, 53, 54].

- **Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ):** 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  $\text{CaO}$  y desprende  $\text{CO}_2$ , 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 [55-57].

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 [58]. De manera satisfactoria se logró 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 resultados provechosos que permiten mantener la calidad de los mismos, cuando son cocidos a temperaturas por debajo de los  $1000^\circ\text{C}$  hasta los  $900^\circ\text{C}$ , 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  $150\ \mu\text{m}$ , 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.

## 1.4. Características de las materias primas utilizadas en la producción de materiales cerámicos.

Es conocido que la materia prima esencial del proceso de elaboración de la cerámica, en especial de los ladrillos de cerámica roja, son los materiales arcillosos. Aparte del material arcilloso se hace preciso agregar a la pasta cerámica otros materiales, tales como fundentes u otros tipos de arcillas, que consigan un mejoramiento de sus propiedades, ya que estas arcillas raramente pueden ser utilizadas tal y como están en la naturaleza. En una pasta cerámica se hallan tres ingredientes principales, ellos son: los elementos plásticos, los magros o desengrasantes y los fundentes. La proporción y calidad de estos tres componentes determinan el producto cerámico [55, 59-61].

### 1.4.1. Elementos plásticos

Los elementos plásticos en los materiales cerámicos son las arcillas y caolines que constituyen la base de las pastas cerámicas debido a su plasticidad, los cuales están constituidos, básicamente, por una mezcla de sílico aluminatos cristalinos a los que denominamos minerales arcillosos y de otros silicatos y minerales de hierro, calcio y titanio, acompañados frecuentemente por materia orgánica, siendo su composición mineralógica determinante en el comportamiento de los procesos dentro de los materiales cerámicos [55, 59].

Actualmente, se conoce que los minerales arcillosos son numerosos y difieren entre sí por su forma, estructura, apilamiento de las capas y por la simetría de la red que forman entre sí. De acuerdo con su distribución estructural, los minerales arcillosos se pueden dividir en familias o grupos: como pueden ser los filosilicatos bilaminares encontrándose la familia de la caolinitas (figura 1. a) y los filosilicatos trilaminares, como son las Montmorillonitas y las Illitas (figura 1. b) [55, 61, 62].

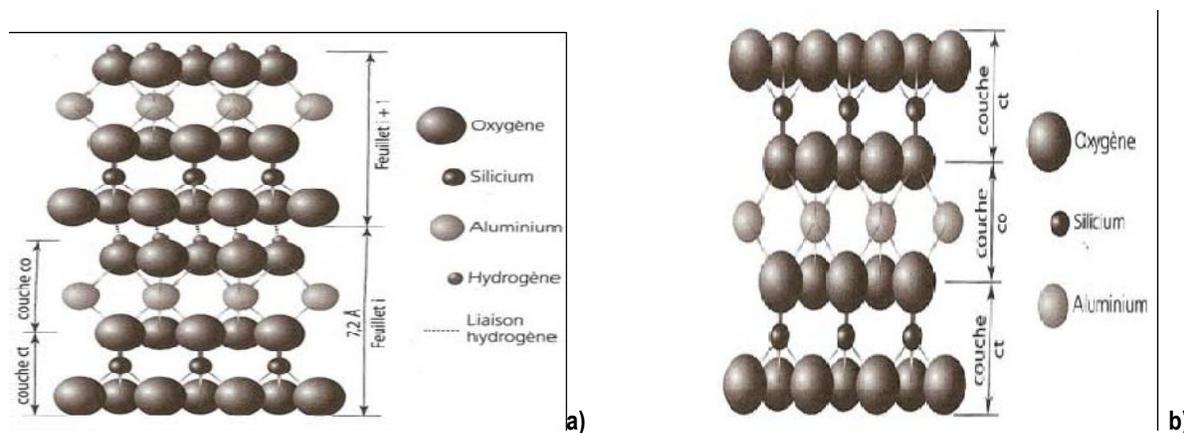


Figura 1. a) Estructura de la Caolinita, b) Estructura de la montmorillonita [62].

Ambos minerales tienen una estructura de hoja (Ver Figura 1). La Caolinita es un mineral compuesto por dos capas: una capa tetraédrica y otra octaédrica. La capa tetraédrica consta de tetraedros con un átomo de silicio en el centro y cuatro átomos de oxígeno en la parte superior. La capa octaédrica, a su vez, contiene un ion en el núcleo de aluminio y seis iones hidroxilo  $\text{OH}^-$  en la parte superior, teniendo una estructura bastante estable, ya que estas dos capas están conectadas entre sí por puentes de hidrógeno. La montmorillonita, a su vez, forma parte de las Esmectitas y se compone de tres capas: una octaédrica entre dos capas de tetraedros, y dentro de estas capas se pueden insertar las moléculas de agua [62, 63].

#### 1.4.2. Elementos magros o desgrasantes

Son los materiales encargados de disminuir la plasticidad de las arcillas y su retracción al secado, ya que no retienen el agua, al disminuir las retracciones bruscas de la masa, que conducen al agrietamiento de los elementos. Otras de sus funciones, es la de incrementar la resistencia de las piezas y los mismos deben ser añadidos finamente molidos para no quitar homogeneidad a las pastas [64-67].

Los desgrasantes son materiales que no intervienen o intervienen parcialmente en las reacciones químicas, que tienen lugar en los materiales arcillosos durante la cocción y se clasifican de la siguiente forma [30, 67]:

**Desgrasantes naturales:** Entre ellos se encuentran las arenas, la piedra pulverizada, el pedernal, las arcillas silíceas, la cáscara de arroz, el aserrín [30, 68].

**Desgrasantes artificiales:** Chamotas molidas (arcilla cocida y pulverizada), residuos molidos de ladrillos cocidos o terracota [30, 51].

**Desgrasantes que no intervienen en ninguna reacción:** Pueden ser los granos de cuarzo, que producen sensibilidad al secado y no interviene en la cocción [30].

**Desgrasantes que intervienen parcialmente:** Es el cascote de grano fino, que en las primeras etapas actúa igual que el cuarzo, pero durante la cocción acelera las reacciones y aumenta la contracción [30].

#### 1.4.3. Elementos fundentes

Los materiales fundentes, dentro de las pastas cerámicas, son componentes de bajo punto de fusión, que se combinan con los compuestos alumino-silíceos y reducen la temperatura de fusión de la masa arcillosa; son sustancias que funden y hacen que fundan otros componentes.

En otras palabras, son los encargados de bajar la temperatura de sinterización y hacen que la pasta cerámica densifique más rápidamente [11, 48, 51, 69, 70].

Como ya se señaló anteriormente, existe una gran variedad de fundentes, siendo los carbonatos uno de los más económicos, especialmente el carbonato de calcio, cuyo mineral principal es la calcita. Para su uso como fundente, se encuentra afectado principalmente por algunos factores como son: la finura de molido y el porcentaje en que debe estar contenido dentro del material arcilloso.

En el caso de la finura, algunos autores [12-14, 56] coinciden que el tamaño de partículas del  $\text{CaCO}_3$ , influye en la velocidad de la reacción de descarbonatación que ocurre cuando éste es sometido a temperaturas cercanas a los  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , a partir de un estudio de la modelación matemática de la cinética de dicha reacción [12, 13]. Además de influir en la velocidad de la descarbonatación de la calcita, se ha estudiado que la superficie específica del carbonato de calcio adicionado a la arcilla, influye en las propiedades finales del producto cerámico: resistencia a la compresión, absorción de agua, porosidad del material, densidad, entre otras. Ocurre de esta manera ya que una menor superficie específica de las partículas, quedará en la masa del producto cerámico gran cantidad de  $\text{CaO}$  sin reaccionar ni combinarse químicamente con la sílice y la alúmina presentes en las arcillas. Este último, al entrar en contacto con el vapor de agua de la atmósfera, se convierte en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Esta reacción es expansiva y produce fisuras y grietas en los productos cerámicos, afectando las propiedades físico – mecánicas y de durabilidad de los mismos [12, 71].

Por otra parte, otro de los factores de vital importancia es el porcentaje en que debe estar contenido dentro de las pastas cerámicas. Varios autores [30, 71, 72] reportan su uso en grandes cantidades (en un rango entre 15 – 30%) dirigido a combatir fluencia y baja isoterminia en los hornos. En estas condiciones, hay que tener en cuenta los cambios que introduce la presencia de carbonatos en las propiedades mecánicas de los ladrillos, que consiste básicamente en reducción de resistencia y durabilidad. Por otro lado, cuando sí se utilizan pequeñas dosis de carbonato de calcio (<10%) [9, 30, 73, 74], se mejora la eficiencia energética en el proceso de cocción de las piezas sin afectar su calidad. Este efecto se atribuye a las transformaciones que se producen en las arcillas durante el tratamiento térmico, las cuales favorecen la formación de nuevas fases: Anorthita, Gehlenita, Wollastonita, por la presencia del mineral calcita, que permite que la sinterización ocurra a temperaturas más bajas [9, 11, 74, 75].

## **1.5. 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 [76]. 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 [77]. 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.

### **1.5.1. 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, 17, 63].

#### ***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 [33, 68, 78].

### **1.5.2. 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) [33, 68, 78].

#### ***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 [33, 68, 78-80]. El moldeado 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 moldeado 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 [68, 80]. El producto moldeado deberá tener mayores dimensiones que las definitivas, puesto que la pasta durante el secado y la cocción experimenta contracciones [33, 68, 78].

### **1.5.3. 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 [31, 67, 81, 82].

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 [31, 67, 81, 82].

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 [31, 67, 81-83].

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 % [31, 67, 81, 84]. 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 [31].

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 [31, 67, 81, 83].

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, 30, 59, 72, 85]:

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, 30, 86].

La diferencia en el desarrollo de esta etapa de densificación es la que permite catalogar las cerámicas o los procesos de densificación en [30]:

- 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 [30, 60, 85].

**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, 30, 52, 85, 86].

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 [86].

- 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 [30, 60, 86].

Según Van Vlack [86], 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 [86].

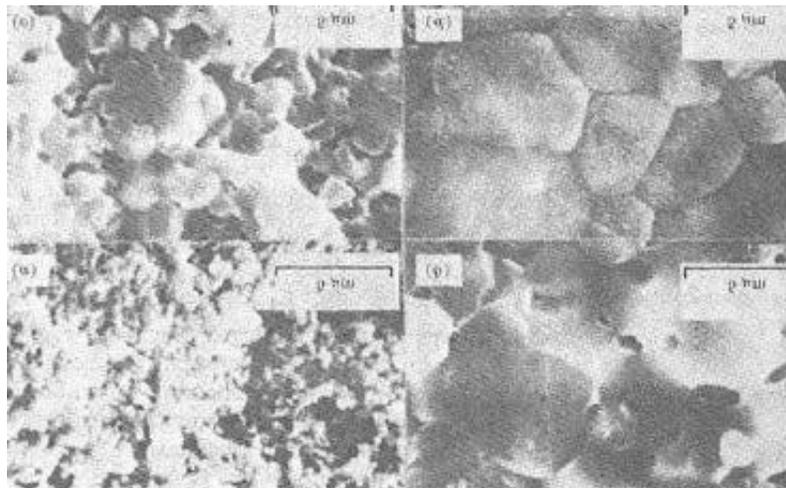


Figura 2. Evolución microestructural durante el proceso de sinterización [60].

El proceso de sinterización depende de factores como son [30, 60, 86]:

**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 más 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.

## 1.6. 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, 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  $\text{CaCO}_3$ , 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  $\text{CaCO}_3$  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 $\text{CaCO}_3$ como aditivo fundente sobre las propiedades macro y microestructurales de los materiales cerámicos.**

### **2.1 Introducción.**

En investigaciones anteriores [9, 10], se muestran las potencialidades del  $\text{CaCO}_3$  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.

### **2.2. Materiales y métodos.**

#### **2.2.1. Materiales utilizados.**

En esta investigación se empleó un material arcilloso proveniente del yacimiento Carranchola, La Moza. En un depósito de gran tamaño ubicado al noroeste de la localidad de Manicaragua, provincia de Villa Clara. Es un yacimiento con arcillas caoliníticas y montmorilloníticas de comportamiento poco hasta muy plástico y arcillas arenosas, color pardo oscuro. Su principal empleo, tanto a nivel industrial como artesanal, es en la producción local de ladrillos (ver Anexo I). El material arcilloso fue caracterizado en su forma natural, y después de ser sometido a un proceso de levigación para concentrar la fracción arcillosa. Este proceso se realizó a fin de caracterizar con mayor precisión la composición química y mineralógica del material arcilloso. El  $\text{CaCO}_3$  fue adquirido en el yacimiento de Palenque en el municipio de Remedios, provincia de Villa Clara. Este fue molido a tres finuras diferentes (300  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  y 74  $\mu\text{m}$ ), en un molino de bolas MB – 600, durante un período de tiempo que estuvo en dependencia de la finura deseada (30 min, 45 min y 60 min).

### 2.2.2. Caracterización de las materias primas utilizadas.

La caracterización del material arcilloso y del  $\text{CaCO}_3$  por Difracción de Rayos X (DRX) se realizó en un difractómetro Panalytical Xpert Pro MPD, empleando radiación  $\text{CuK}\alpha$  con una rejilla de divergencia de  $0,5^\circ$ . Las muestras fueron escaneadas entre los  $4$  y los  $70^\circ$  ( $2\theta$ ), a un paso angular de  $0,017^\circ$  y un tiempo por paso de 80 segundos. Los difractogramas fueron procesados empleando el software X Pert HighScore Plus (2004).

El material arcilloso y el  $\text{CaCO}_3$  también fueron caracterizados morfológicamente. Las mediciones de distribución y tamaño de partículas se realizaron con un granulómetro láser Malvern Mastersizer que permite mediciones dentro del intervalo de los  $0,05$  a los  $900 \mu\text{m}$ . Las partículas de arcilla fueron dispersadas en una solución al  $0,01\%$  de ácido poliacrílico por agitación ultrasónica durante 15 minutos, mientras que las partículas de carbonato de calcio fueron dispersadas mediante un tratamiento similar en solución de isopropanol.

### 2.2.3. Resultados de la caracterización del material arcilloso.

Los resultados de los análisis realizados por DRX (Figura 3.), donde se comparan los difractogramas de la materia prima en su estado de entrega (suelo arcilloso) y de la fracción arcillosa recolectada luego del proceso de levigado. La presencia de los minerales arcillosos, que se encontraban parcialmente ocultos en el patrón de DRX del suelo arcilloso, por la presencia de fases con una alta cristalinidad como cuarzo y albita, es claramente identificada en el difractograma de la fracción arcillosa. Las principales fases minerales identificadas por DRX en la fracción arcillosa son montmorillonita  $[\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})]$ , illita  $[(\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x)(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot \text{K}_x]$  y caolinita  $[\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4]$ .

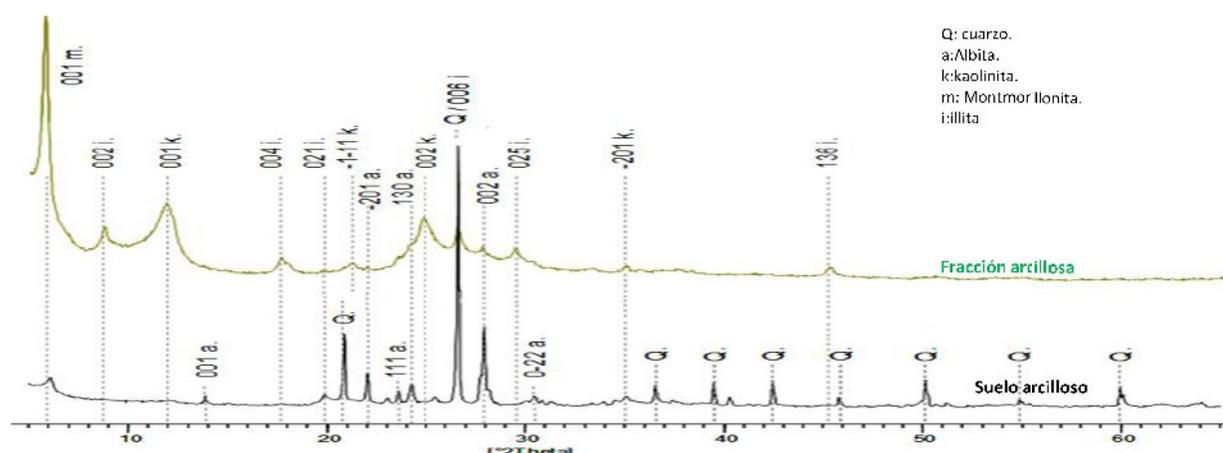


Figura 3. Resultados DRX de la comparación de fases en el suelo arcilloso y la fracción arcillosa.

El material arcilloso muestra una distribución granulométrica de tamaño de partículas con dos fracciones dominantes entre los 0,1 y los 10  $\mu\text{m}$  y otra mucho más pequeña, que aparentemente puede responder a minerales presentes en el material arcilloso que actúan como filler, y aportan principalmente a la textura del mismo (Figura 4).

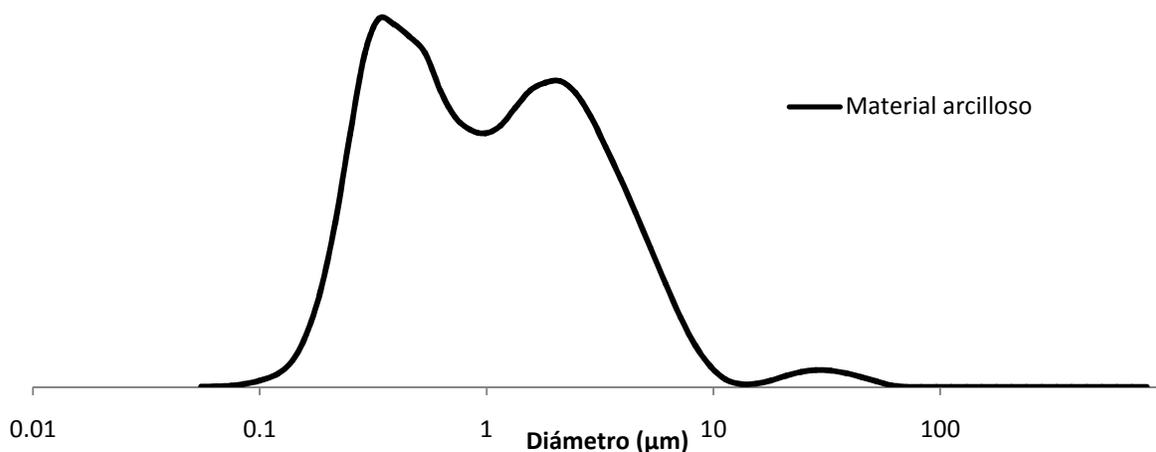


Figura 4. Distribución granulométrica del material arcilloso.

#### 2.2.4. Resultados de la caracterización del carbonato de calcio.

En los análisis realizados por DRX al  $\text{CaCO}_3$  (Figura 5.), las principales fases minerales identificadas son la calcita, además de la presencia de dolomita  $[(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)]$ , lo cual es muy común, ya que ambos minerales pueden encontrarse juntos dentro de la naturaleza.

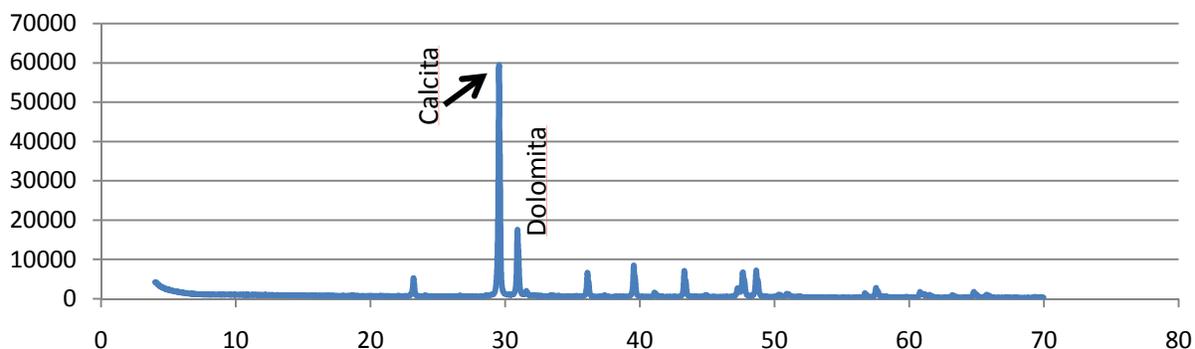


Figura 5: Resultados DRX del carbonato de calcio procedentes de la cantera de Palenque

El  $\text{CaCO}_3$  después de sometido a un proceso de molienda para obtener 3 diferentes fracciones granulométricas:  $<300\mu\text{m}$ ,  $<150\mu\text{m}$  y  $<74\mu\text{m}$ , muestra distribuciones granulométricas de tamaño de partículas que responden a la fracciones antes fijadas (Figura 6.).

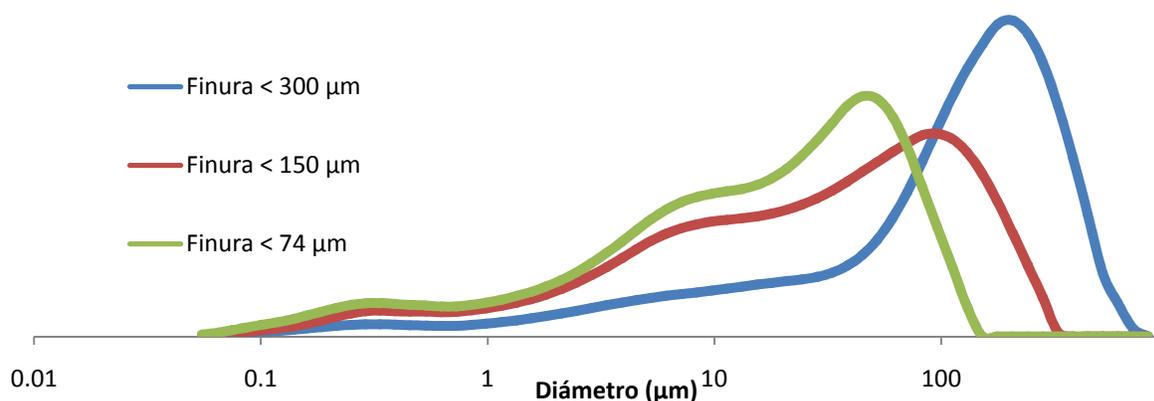


Figura 6. Resultados del ensayo de granulometría (PSD) realizado al  $\text{CaCO}_3$

## 2.3. Descripción del programa experimental.

### 2.3.1. Primera etapa del trabajo experimental.

En esta primera parte de la investigación el trabajo experimental se desarrolló a escala de laboratorio, empleando especímenes del producto cerámico elaborados en forma de probetas. Los objetivos fundamentales de esta primera parte del trabajo consistieron en evaluar el comportamiento del empleo de pequeñas dosis de carbonato de calcio inferiores del 10%, al variar la finura de molido del carbonato de calcio, a partir de lo cual podría tener efectos beneficiosos como adición mineral, al mantener el proceso de cocción a temperaturas más bajas que las normales a las que se cuecen los ladrillos.

Este análisis evalúa la influencia de tres diferentes finuras de molido de  $\text{CaCO}_3$  adicionado en pequeñas dosis al material arcilloso conformado en forma de probetas, las cuales serán cocidas a diferentes temperaturas. Para la evaluación se tomó en cuenta los cambios en las propiedades físico – mecánicas y durabilidad de las muestras.

### 2.3.2. Segunda etapa del trabajo experimental.

En la segunda etapa o estudio de la microestructura, con vistas a evaluar el comportamiento del material cerámico con adición de carbonato de calcio, la literatura [87, 88] reporta el uso diferentes métodos de ensayo, apoyados en herramientas modernas de la Ciencia de los Materiales. Cada una expresa criterios desde el punto de vista microscópico que en su conjunto permiten elaborar conclusiones acerca de las características del material objeto de estudio.

Para lograr nuestros objetivos, fueron utilizadas diferentes técnicas para estudiar el efecto de la adición de carbonato de calcio al material arcilloso y las consecuencias que esto trae en la microestructura del material cerámico, las mismas las enumeramos a continuación:

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.

La técnica operatoria de cada uno de estos ensayos aparece en el Anexo II de este trabajo.

## **2.4. Procedimiento experimental.**

### Molde empleado. Características de la probeta.

Para el experimento se tomaron moldes de acero con las siguientes dimensiones: 75mm de altura y 31 mm de diámetro, por lo cual las probetas asumen dimensiones de 60 mm de altura y 30 mm de diámetro. Para lograr la densidad requerida se utilizó un pistón que tiene 45 mm de altura y 30 mm de diámetro

### Preparación de los especímenes:

Primeramente se pusieron los materiales en la estufa a una temperatura de 105°C hasta alcanzar un peso constante. A continuación se pesaron las cantidades a utilizar en una balanza digital modelo Besme 02. Luego fueron mezcladas durante un tiempo de 10 min en una mezcladora modelo M2-01 marca CONTROLS, adicionando un 10% de agua en peso.

Los moldes fueron engrasados y una vez vertida la mezcla, ésta se compactó en tres capas con una varilla de metal. La mezcla dentro del molde se colocó en una prensa marca IBERTEST y sometida a una presión de 7 MPa. Posteriormente se desarmaron los moldes con cuidado para evitar la rotura o deformación de las probetas. Estas probetas se secaron durante tres días en el laboratorio a temperatura ambiente (28°C), seguidamente se colocaron en un horno eléctrico modelo LH 30/14, marca Nabertherm (que alcanza una temperatura hasta los 1200°C) y fueron sometidas al proceso de cocción. Dicho proceso realizado en el horno eléctrico se dividió en tres fases: a) Elevar la temperatura de forma gradual hasta los 400°C

para remover el agua de composición, b) Incrementar la temperatura gradualmente hasta llegar a la temperatura de cocción fijada (800°C, 900°C y 1000°C), c) Mantener constante la temperatura de cocción una vez alcanzada, por un período de tiempo establecido de 3 horas (Figura 7).

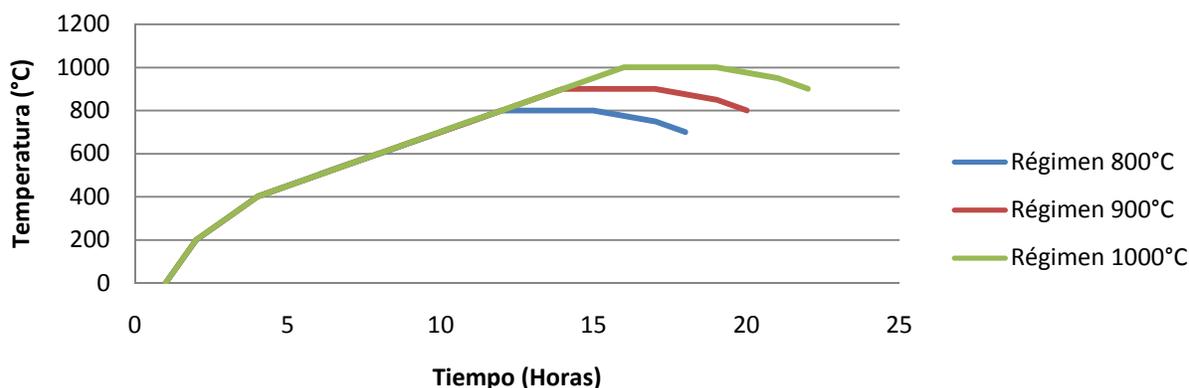


Figura 7. Regímenes de temperatura, con tiempo de cocción de 3 horas.

#### 2.4.1. 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 CaCO<sub>3</sub> 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 enmarcada 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 <sub>3</sub> (%)	0	2	5	8
Finura del CaCO <sub>3</sub> (µm)	-	<74	<150	<300

Los niveles fueron establecidos bajo los siguientes criterios:

- **Temperatura de cocción:** Los intervalos de temperatura seleccionados para el trabajo experimental responde al análisis de la literatura consultada [11, 14, 72] que plantea que las transformaciones fundamentales, cuando se emplea el carbonato de calcio como fundente y como resultado de la descarbonatación de éste último, ocurre entre los 780°C y los 900°C y que en el caso de los materiales arcillosos sin adición de fundentes o con muy bajos porcentos, estas transformaciones ocurren a partir de los 1000°C, por ello el intervalo de temperatura usado estuvo entre los 800°C y los 1000°C.
- **% de CaCO<sub>3</sub> usado:** A partir de la experiencias aportadas en la literatura [9, 10], donde demuestra que el carbonato de calcio finamente molido en pequeñas proporciones (en un rango del 2 – 5 %) tiene efectos beneficiosos en la calidad de los ladrillos de cerámica roja y en la eficiencia energética, se decidió utilizar en el trabajo esas mismas dosificaciones y comprobar cuál será la más adecuada para su posterior implementación en la industria.
- **Finura del CaCO<sub>3</sub> utilizado:** Varios autores han estudiado [12, 13] que la finura de molido del carbonato de calcio influye en la velocidad de la reacción de descarbonatación en finuras inferiores a las 300 µm, cuando éste es sometido a temperaturas cercanas a los 900°C, a partir de estudios de modelación matemática de la cinética de dicha reacción [12, 13]. Estos autores [12, 13] han estudiado que la superficie específica del carbonato de calcio adicionado a la arcilla influye en las propiedades finales del producto cerámico: Resistencia a la compresión, absorción de agua, porosidad del material. Debido a que a menor superficie específica del CaCO<sub>3</sub> dentro de la masa del producto cerámico, quedará gran cantidad de CaO sin reaccionar y combinarse químicamente con la sílice y la alúmina presentes en las arcillas, éste último, al entrar en contacto con el vapor de agua de la atmósfera, se convierte en Ca(OH)<sub>2</sub>. Esta reacción es expansiva y produce fisuras y grietas en los productos cerámicos afectando las propiedades físico – mecánicas y de durabilidad de los mismos [12, 71]. A partir de las experiencias aportadas por estos autores [12-14] y los resultados obtenidos por ellos, en está investigación se decidió utilizar un rango de finura del CaCO<sub>3</sub> entre los 74 µm y 300 µm.

***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.***

Los ensayos de Envejecimiento Acelerado simulan las condiciones de los ambientes y agentes que deterioran los ladrillos y aceleran sus efectos de forma que en un período corto de tiempo puedan medirse. Algunos de los ensayos más comúnmente realizados son: el ensayo de humedecimiento y secado, de ciclos de congelación-descongelación, el ensayo de cristalización de sales, el de simulación de la lluvia ácida o de la cámara salina, el de simulación por la acción erosiva de la lluvia, entre otros.

El envejecimiento puede definirse como el conjunto de transformaciones experimentadas por la piel de los materiales de revestimiento de las fachadas, motivadas por una serie de influencias exógenas y endógenas que suelen actuar de manera simultánea [89-91].

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.

La técnica operatoria de estos ensayos se explica detalladamente en el Anexo IV de este trabajo.

***Declaración de los parámetros de estado.***

- **Tiempo de cocción:** Además de la temperatura de cocción, el tiempo de residencia en la combustión influye en la ocurrencia de las transformaciones mineralógicas de los materiales arcillosos. Se conoce que en los hornos para la cerámica en general, es necesario mantener la temperatura de cocción escogida según el producto cerámico que se desee, por un tiempo determinado para que se completen estas transformaciones. El tiempo de cocción de 3 horas seleccionado para la cocción de los especímenes en el laboratorio, responde a los criterios de varios autores [9, 45, 71] que han trabajado el tema.

**2.4.2. 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  $\text{CaCO}_3$  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  $900^\circ\text{C}$ , 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.

Tabla 6. Resumen el diseño de experimento a escala de laboratorio. En probetas.

Temperatura de cocción.		800°C, 900°C, 1000°C			
% Adición de $\text{CaCO}_3$		0%, 2%, 5%, 8%			
Finura de molido $\text{CaCO}_3$		< 300µm, <150µm, <74µm			
# De muestras por ensayo.	Resistencia	15	15	15	15
	Absorción	15	15	15	15
	Densidad	15	15	15	15
	Ciclos de humedecido y secado	15	15	15	15
	Cristalización de sales	15	15	15	15

## **2.5. 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.

Los resultados del diseño de experimento a nivel macro se procesó estadísticamente de la siguiente manera:

Una vez que cada serie fue trabajada según lo ensayos referidos anteriormente, se calculó la media de cada una de ellas, la desviación estándar, el coeficiente de variación, entre otros estadígrafos y se verificó si el número de muestras o probetas elaboradas son significativas, atendiendo a la variabilidad de la muestra y el nivel de confianza establecido. Luego se realizó el análisis de tendencia (Gráficos de Tendencia) para cada una de las variables de respuesta (para los valores medios de cada uno de los resultados) y sus combinaciones. Más tarde, teniendo en cuenta a qué modelo responden los gráficos de tendencia, se realiza el análisis de regresión para cada unos de los gráficos analizados. Por último, se aplicaron pruebas de hipótesis con vistas a evaluar la significación de los resultados.

### **2.5.1. Influencia del $\text{CaCO}_3$ a escala de la macroestructura.**

#### **2.5.1.1. Influencia de la finura del $\text{CaCO}_3$ en las propiedades físico – mecánicas de las muestras cerámicas**

La figura 8 muestra la relación entre la resistencia media a la compresión de los cilindros ensayados con la temperatura máxima de cocción y la finura de molido del carbonato de calcio adicionado, para cada uno de los % de adición.

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  $<150 \mu\text{m}$  y  $<74 \mu\text{m}$  y se experimenta una caída de la resistencia en las probetas ensayadas para la finura de molido de  $<300 \mu\text{m}$ .

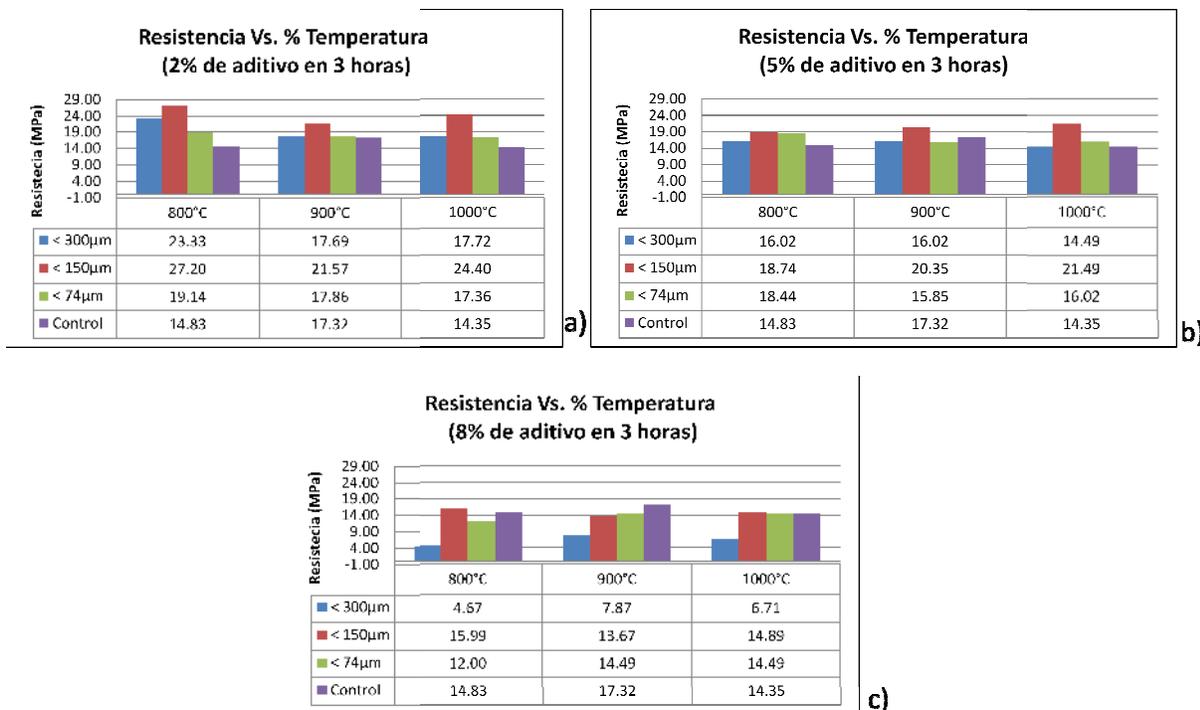


Figura 8. Gráfico de tendencia Temperatura vs. Resistencia, a) 2% de aditivo; b) 5% de aditivo; c) 8% de aditivo.

Cuando 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 (Figura 9).

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.

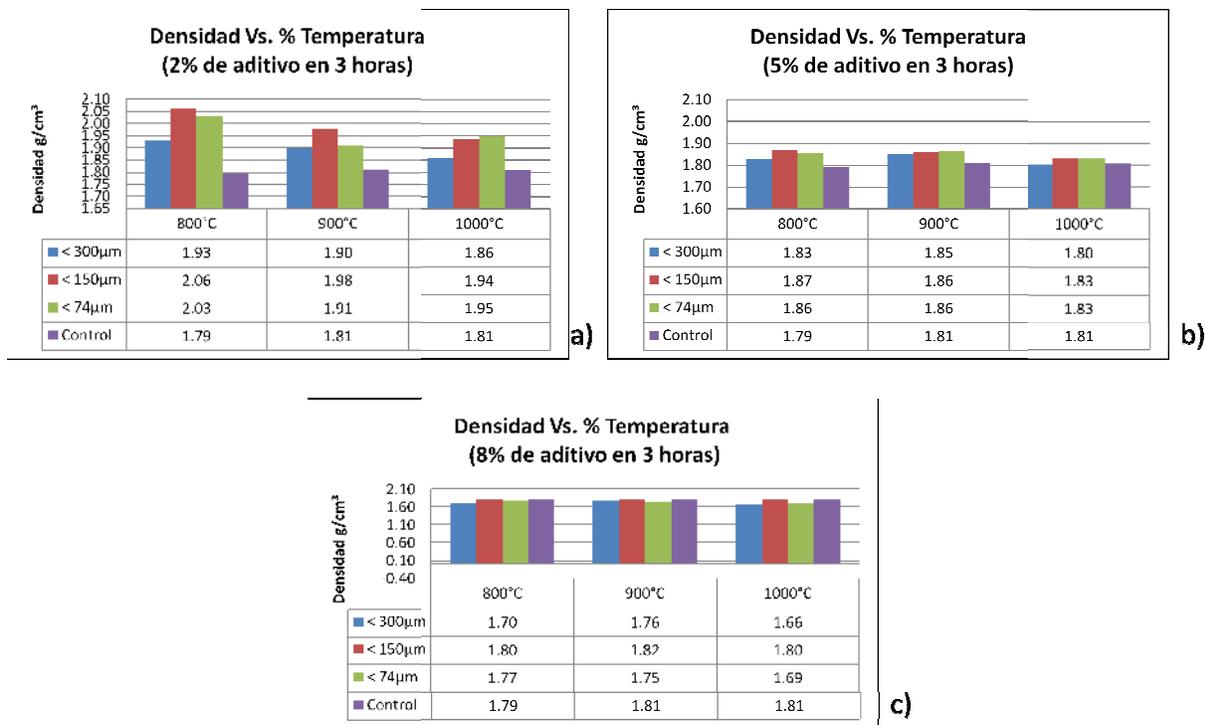


Figura 9. Gráfico de tendencia Temperatura vs. Densidad, a) 2% de aditivo; b) 5% de aditivo; c) 8% de aditivo.

La figura 10 muestra el 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 µm 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].

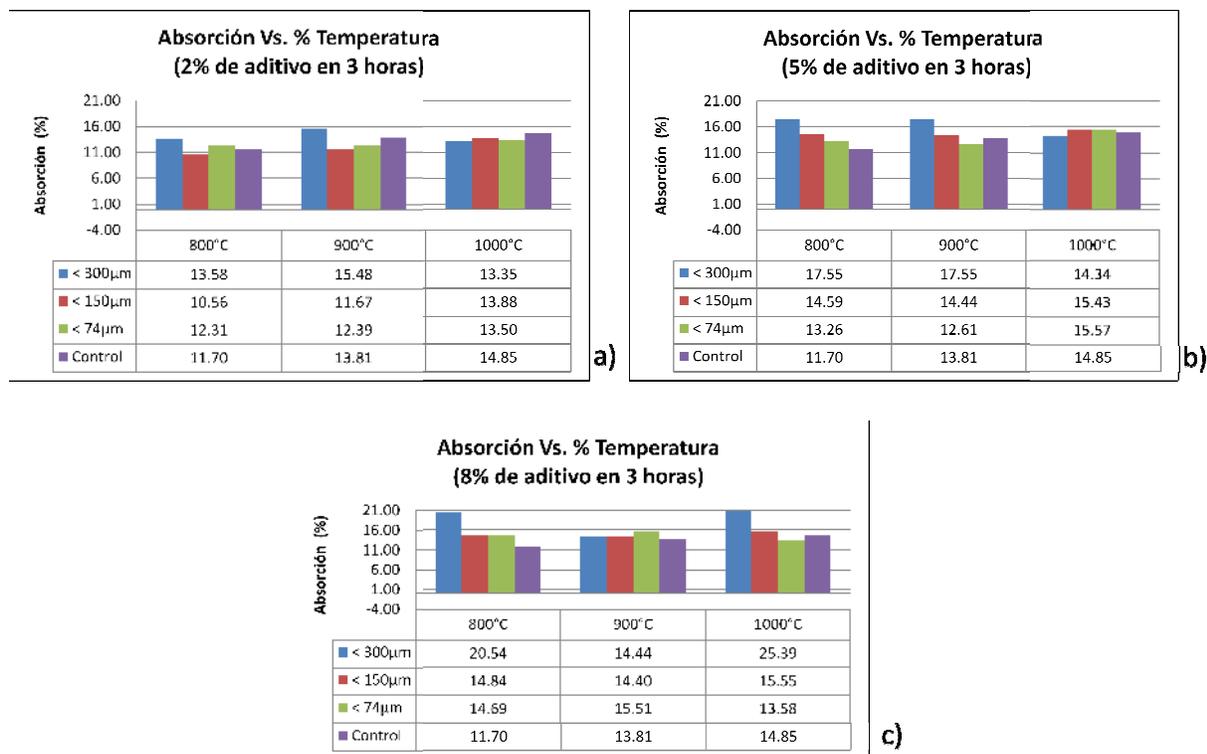


Figura 10. Gráfico de tendencia Temperatura vs Absorción, a) 2% de aditivo; b) 5% de aditivo; c) 8% de aditivo.

### 2.5.1.2. Influencia de la temperatura y el % de CaCO<sub>3</sub> en las propiedades físico – mecánicas de las muestras cerámicas.

La figura 11 muestra los resultados del comportamiento de la variable resistencia a compresión de especímenes con adición de carbonato de calcio quemados a diferentes temperaturas.

Los resultados presentados son consistentes con los de los autores que han estudiado el tema [9, 14, 30, 72]. Ellos coinciden en que cuando se adicionan pequeñas cantidades de aditivo en una proporción del 2%, resulta beneficioso mejorando considerablemente los valores de resistencia a la compresión relativos a la muestra control. A medida que aumenta el % de adición de CaCO<sub>3</sub> cercano al 10 %, comienza una caída considerable de la resistencia a la compresión, incluso por debajo de la muestra control. Nótese en la figura 11, que los valores de resistencia obtenidos por las probetas ensayadas con adiciones del 8 % para el caso de las tres temperaturas utilizadas se observan valores por debajo de los obtenidos por la muestra control (0% de CaCO<sub>3</sub>).

Por el contrario, los resultados obtenidos de resistencia media a compresión de los especímenes elaborados con adiciones del 2% de carbonato de calcio, muestran una mayor

resistencia a la compresión para las tres temperaturas de quema (800°C, 900°C y 1000°C), siendo superior para las muestras quemadas a una temperatura de cocción de 800°C.

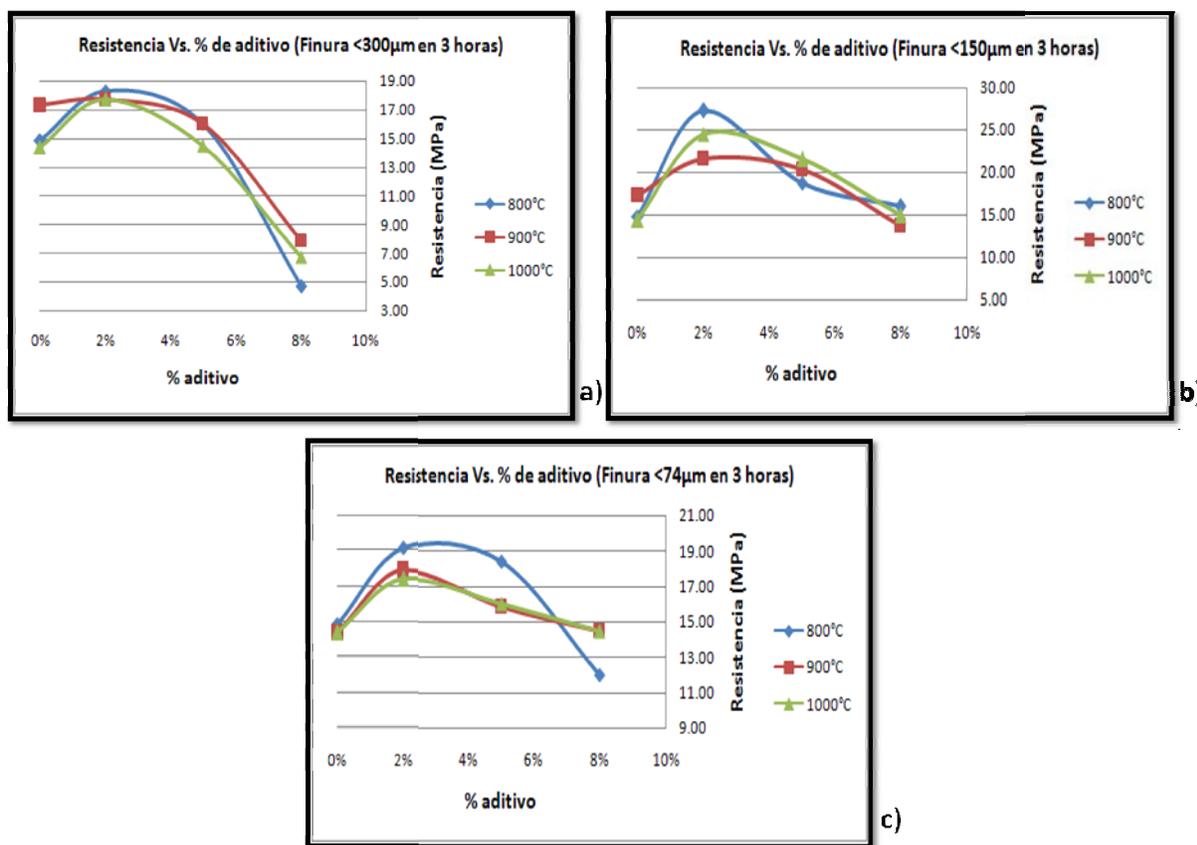


Figura 11. Gráfico de tendencia % de aditivo vs. Resistencia a la Compresión, a) Finura <math><300\mu\text{m}</math>; b) Finura <math><150\mu\text{m}</math>; c) Finura <math><74\mu\text{m}</math>.

Los resultados antes expuestos demuestran que con una adición del 2% de  $\text{CaCO}_3$ , se garantiza un mejor comportamiento cuando la cocción ocurre a temperaturas bajas; sobre todo para 800°C sin que se afecte la resistencia del material.

Los resultados de los ensayos de densidad que se muestran en la figura 12, son consistentes con los del ensayo de resistencia a la compresión. La relación entre densidad y resistencia es directamente proporcional, por tanto las caídas de resistencia ya explicadas en el gráfico anterior, se corresponden con la disminución de la densidad de las probetas a medida que aumenta el % de adición de carbonato de calcio.

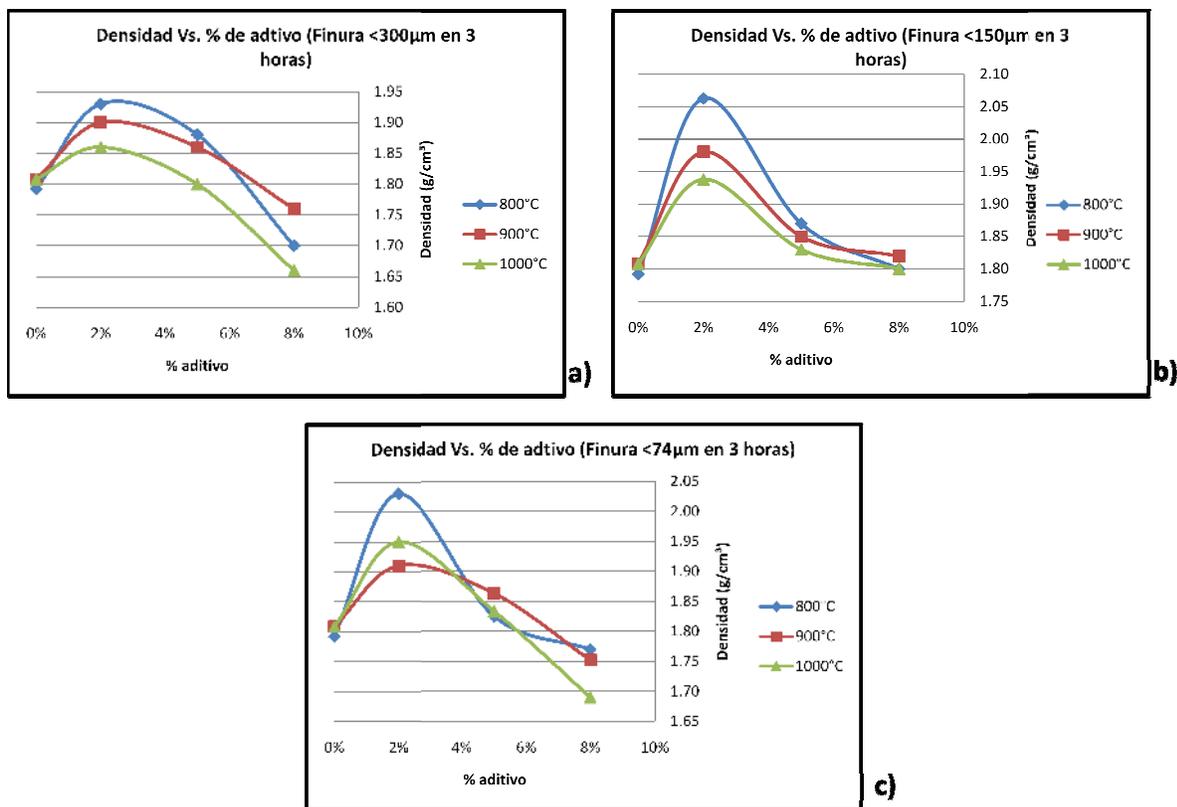


Figura 12. Gráfico de tendencia % de aditivo vs Densidad, a) Finura <300µm; b) Finura <150µm; c) Finura <74µm.

La figura 13 presenta los resultados del ensayo de absorción. Se observa claramente que en la medida que aumenta el contenido de  $\text{CaCO}_3$  se producen incrementos de la absorción para todas las temperaturas principalmente para los casos entre un 5 y 8% de adición. Nótese que los valores de las muestras elaboradas con una finura <300µm y con un 8 % de adición, muestran los mayores valores de % de absorción de agua con respecto a la muestra control. No siendo así con los especímenes elaborados entre el 2 y el 5% de adición para todas las finuras y temperaturas donde experimentan valores más bajos de absorción.

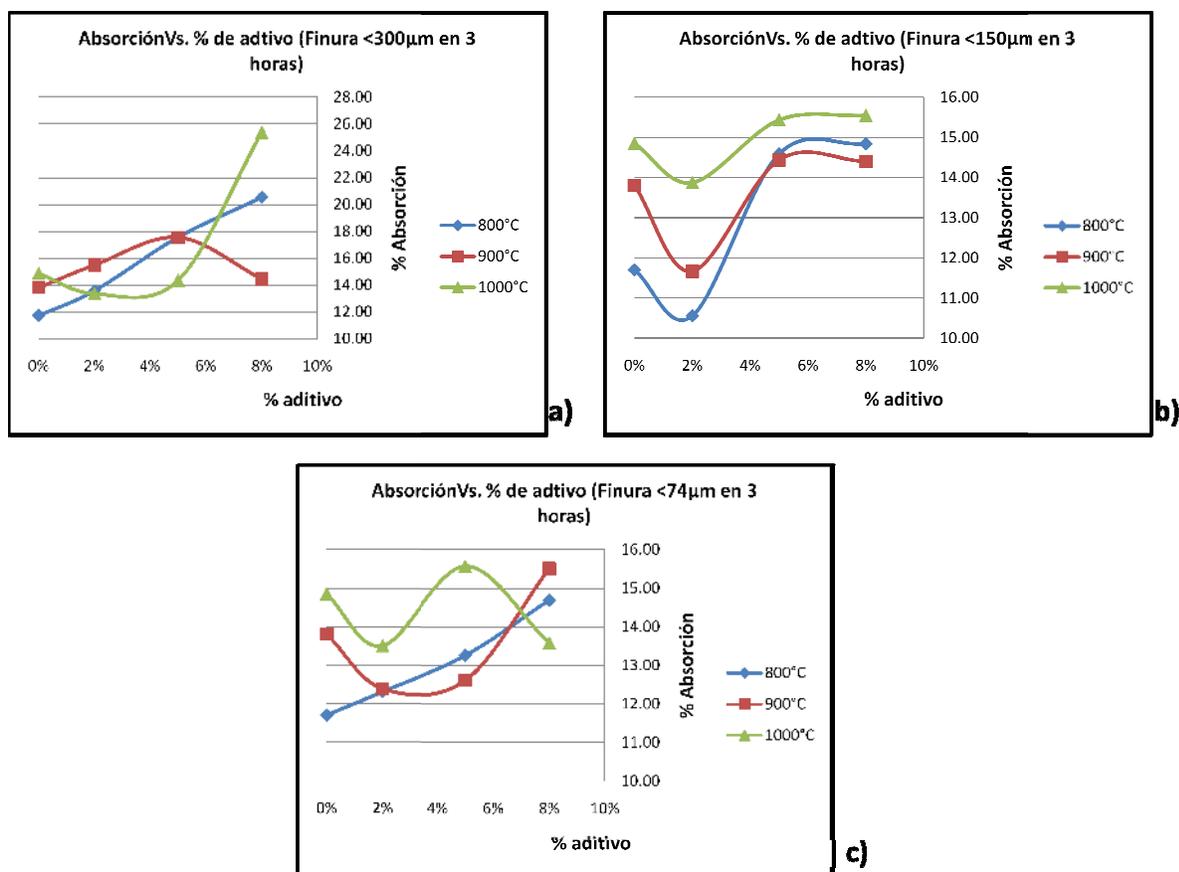


Figura 13. Gráfico de tendencia % de aditivo vs. Absorción, a) Finura <300µm; b) Finura <150µm; c) Finura <74µm.

### 2.5.1.3. Influencia de la finura y contenido de CaCO<sub>3</sub> 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 µm, 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 µm y 74 µm. 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<sub>3</sub>, 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.

Tabla 7. Resultados de los ensayos de Envejecimiento acelerado

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

Tal y como se muestra en la tabla anterior, los cilindros fabricados con finura de molido de 150 $\mu$ m y 72  $\mu$ m 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.

#### 2.5.1.4. Resultados de las pruebas estadísticas aplicadas.

Para validar científicamente todos los resultados obtenidos en esta fase experimental a escala macroestructural, se aplicaron las técnicas de pruebas de hipótesis siguientes: **t-Student** , **F-**

**Fisher y U de Mann-Whitney.** Los resultados de la aplicación de estas pruebas son los siguientes:

1. Las mejoras en la resistencia de las muestras quemadas a 800°C con una finura de molido del CaCO<sub>3</sub> comprendido en un rango <150µm - <74µm y con un 2% de adición son consistentes con el incremento de la densidad de estos especímenes.
2. Se demuestra que existe diferencia significativa en cuanto a los valores de densidad entre las muestras elaboradas con una finura del CaCO<sub>3</sub> <300µm y <150µm. Se verifica que los aumentos o disminuciones de resistencia se relacionan perfectamente con aumentos o disminuciones de la densidad.
3. Se corrobora que la adición de un 2% de CaCO<sub>3</sub> garantiza un mejor comportamiento físico – mecánico que las muestras fabricadas sin la adición de CaCO<sub>3</sub> cuando la temperatura de cocción se baja de 1000°C a 800°C.
4. El resultado del estudio indica que con una finura de molido de CaCO<sub>3</sub> 150µm, adicionado a la mezcla en proporciones de un 2% y 800°C de temperatura de cocción, se logran las mejores condiciones de fabricación de las muestras cerámicas, con adición de CaCO<sub>3</sub> como fundente.
5. La adición de CaCO<sub>3</sub> para las temperaturas de cocción evaluadas, puede implicar cambios en la estructura de la cerámica estudiada, ya que se aumenta la absorción. Estos cambios son mayores a temperaturas más bajas. No obstante, las muestras quemadas a 800°C con 2% de CaCO<sub>3</sub> logran niveles de absorción inferiores a los de la muestra control.

### **2.5.2. Influencia de la adición de CaCO<sub>3</sub> en el comportamiento microestructural de las muestras.**

Los resultados obtenidos en los estudios macro-estructurales se confirman con los estudios puntuales de los cambios que se producen en la microestructura. Para el estudio de la microestructura, las muestras evaluadas fueron analizadas para cada una de las variables de estudio (Finura de molido del CaCO<sub>3</sub>, % de adición y temperatura); siendo tomadas las muestras que se someten a ensayos mecánicos, escogiendo los mejores resultados. Estas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Muestras sometidas a los ensayos de la micro - estructura.

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Temperatura	800° C						900° C					
% de CaCO <sub>3</sub>	2%	5%	8%	2%	5%	8%	2%	5%	8%	2%	5%	8%
Finura	150 μm			74μm			150μm			74μm		

### 2.5.2.1. Transformaciones mineralógicas durante la sinterización.

Las transformaciones mineralógicas se monitorean a través de los ensayos de difracción de Rayos X, ensayos de microanálisis químico (EDX), técnicas de microscopia de barrido (SEM), para determinar las fases cristalinas formadas sobre todo durante la cocción, permitiendo distinguir las fases cristalinas de las amorfas, así como su evolución dentro del material cerámico asociado a la adición del CaCO<sub>3</sub> como material fundente.

- Observación de la microestructura por Rayos X

El patrón de difracción de Rayos X, presentado en la figura 14, tomando como ejemplo las muestras elaboradas a una temperatura de 800°C, con una finura del CaCO<sub>3</sub> de <150μm y un % de adición del 5%, mostró la presencia predominante de cuarzo, anorthita y albita.

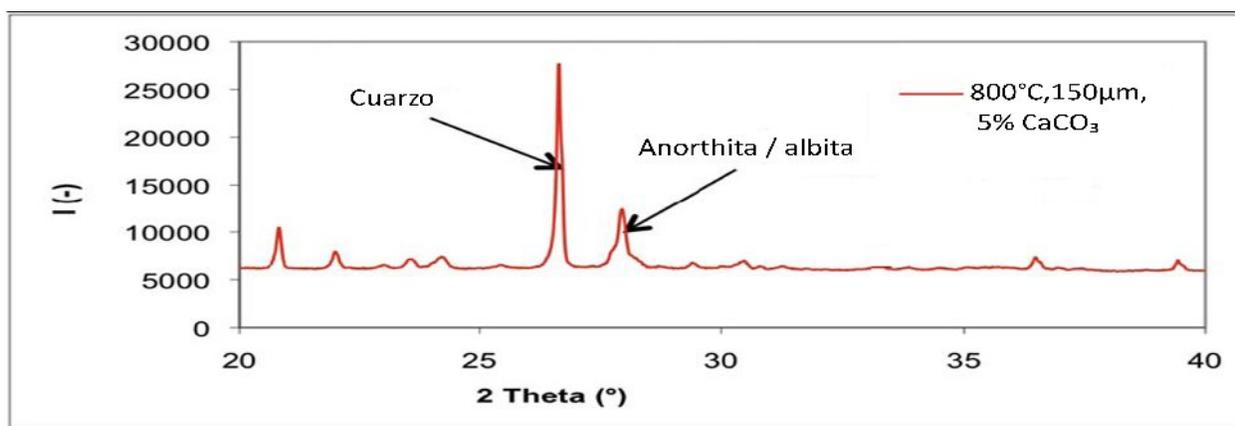


Figura 14. Diagramas de difracción de Rayos X del espécimen fabricado a 800°C con finura de <150μm del CaCO<sub>3</sub> y con un 5% de adición.

En las muestras estudiadas aparece la formación de fases mineralógicas como la anorthita, Esta fase, que normalmente es reportada formando áreas densas dentro del material, puede ser parcialmente responsable del aumento de las propiedades mecánicas en las muestras. La formación de anorthita está ligada al contenido de calcio dentro de las muestras, ya sea el que está presente dentro del material arcilloso como impureza o el que proviene del carbonato de calcio adicionado [56, 57, 73, 93].

La formación de albita está ligada a la de anorthita. De hecho, estas dos especies químicas representan dos extremos de la gama de las plagioclasas, desde el punto de vista de su composición química. La albita es normalmente rica en sodio, mientras que en la anorthita es el calcio el catión predominante en su composición. En otras palabras, las estructuras de estas dos especies son similares; exceptuando la sustitución de átomos de calcio para la anorthita por átomos de sodio en la albita. La formación de albita puede explicarse a partir de los fenómenos de difusión que ocurren en el material durante su calcinación [56, 57, 73, 93].

- Observación de la microestructura por microanálisis químico (EDX)

Mediante esta técnica es posible observar la distribución de las diferentes fases mineralógicas de las muestras estudiadas. Para ello se tomaron diferentes imágenes de las fases que se formaron dentro de las muestras, eligiendo como ejemplo, las elaboradas a una temperatura de 800°C, con una finura del CaCO<sub>3</sub> de <74µm y un % de adición del 5% (Ver figura 14)

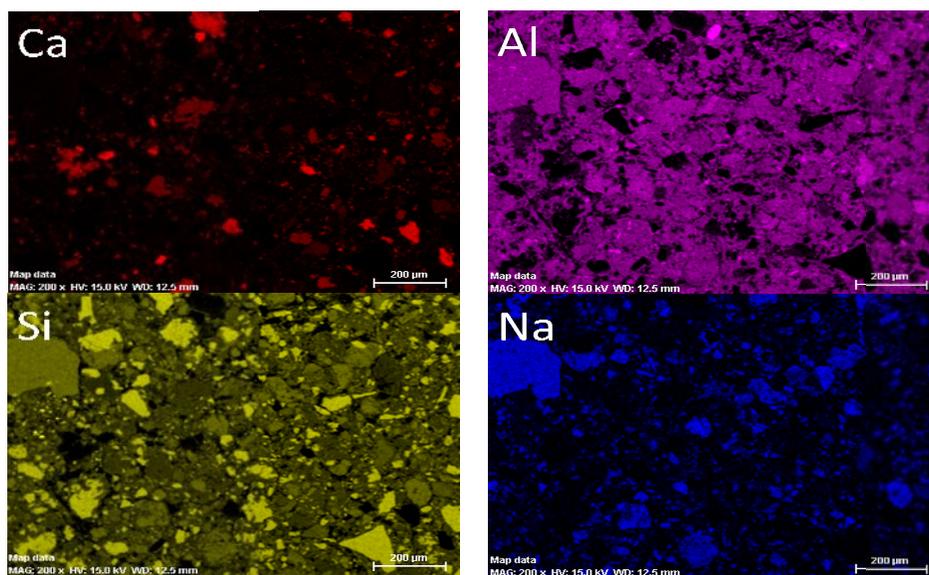


Figura 15. Secciones pulidas observadas con microscopio electrónico, a) Calcio, b) Aluminio, c) Silicio, d) Sodio

Mediante técnicas de procesamiento de imágenes, a partir del análisis por EDX es posible establecer las relaciones entre los diferentes elementos químicos presentes en las muestras, como las relaciones aluminio/sodio y silicio/aluminio, lo cual permite establecer con una mayor precisión las fases presentes (ver figura 15).

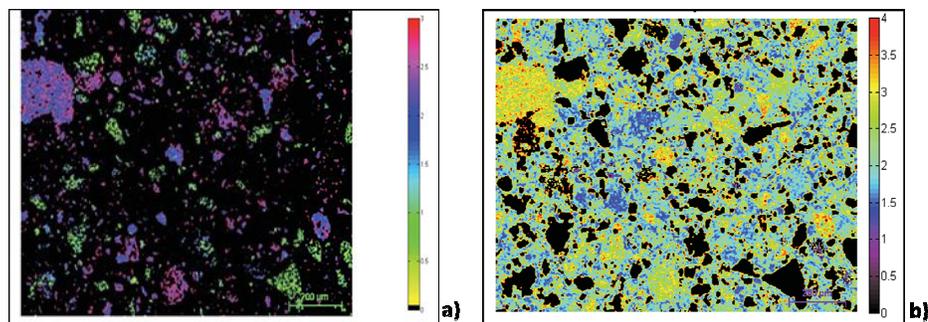


Figura 16. Procesamiento de imágenes, a) Aluminio/Sodio (Al / Na), b) Silicio/Aluminio (Si / Al)

En la figura 16 a) perteneciente a la relación Al / Na, se observa la presencia de zonas azules que son asignadas a la fase mineralógica Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), lo cual se confirma en la imagen 16 b) perteneciente a la relación Si / Al. De acuerdo con la fórmula química de la Albita, hay tres veces más átomos de Si que de Al y, por lo tanto, de acuerdo con los colores de este espectro se evidencia la presencia de granos de Albita resaltados en amarillo. En esta misma imagen también se distinguen los granos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), ya que no contienen Aluminio (zonas en negro).

En la figura 15, es posible identificar áreas donde la anorthita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) o calcita están presentes, analizando la imagen del calcio se observan zonas rojas que se iluminan mostrando la presencia de calcio y comparando con la imagen del Silicio, se observan algunos granos de Calcio que no contienen Silicio; esto sugiere la presencia de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y para los otros granos de Calcio que contienen Silicio, sugiere la presencia de anorthita.

#### 2.5.2.2. Influencia de la finura de $\text{CaCO}_3$ en los cambios microestructurales.

Los ensayos de Porosimetría por Intrusión de Mercurio (PIM) muestran resultados muy similares para las distribuciones de tamaño de poros en las muestras elaboradas a partir del  $\text{CaCO}_3$  con finura de molido de 74 y de 150  $\mu\text{m}$ , (ver figura 17). Este resultado es consecuente con los obtenidos de los ensayos de la macroestructura, por lo tanto, la diferencia entre los valores de las propiedades mecánicas para ambas finuras, debe estar relacionada con otros factores, como pueden ser la formación de una mayor cantidad de fases vítreas en las muestras elaboradas con una finura de 150  $\mu\text{m}$  (ver figura 18). Este resultado nos confirma que no es necesario moler el  $\text{CaCO}_3$  a una finura 74  $\mu\text{m}$ .

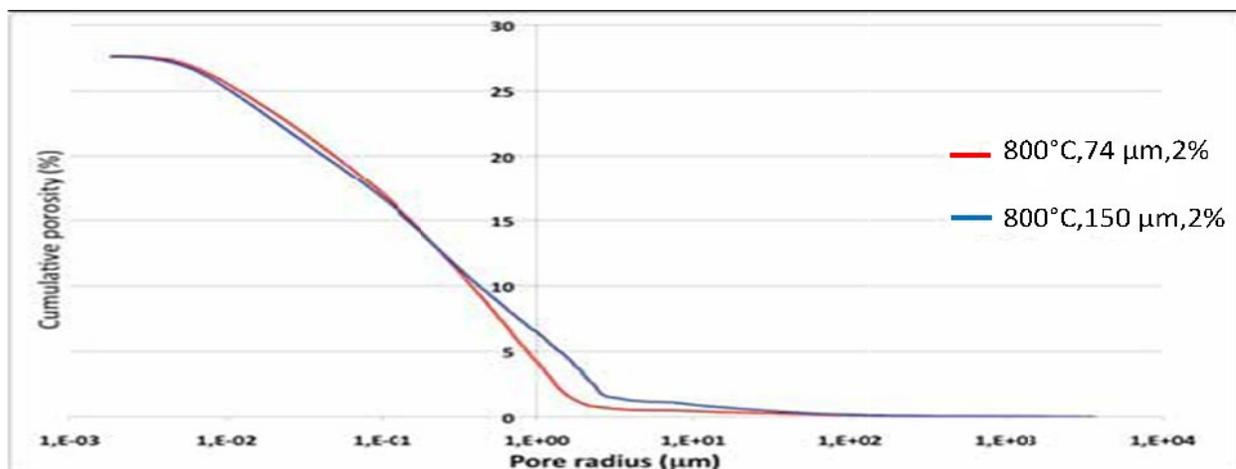


Figura 17. Influencia de la finura de molido del  $\text{CaCO}_3$  en la porosidad.

Para entender la influencia del tamaño de granos de las partículas de  $\text{CaCO}_3$  en la formación de las fases mineralógicas y verificar su comportamiento en las propiedades físico –mecánicas macroestructurales, se realizaron análisis por difracción de Rayos X, los cuales se muestran en la figura 18. Se observa que los picos de cuarzo mantienen similares intensidades para ambas finuras de molido. Por el contrario, la intensidad de los máximos correspondientes a las fase albíta y anorthita, se muestran ligeramente superiores para las muestras elaboradas con una finura  $<150\mu\text{m}$ . Esto lo que se relaciona con un predominio de estas fases cristalinas en dicho sistema. El contenido de anorthita en muestras de cerámica roja calcinada se correlaciona positivamente con las propiedades mecánicas, lo cual permite explicar la mejora de las mismas, en el sistema que contiene  $\text{CaCO}_3$  con una finura  $<150\mu\text{m}$  [56, 57, 73, 93].

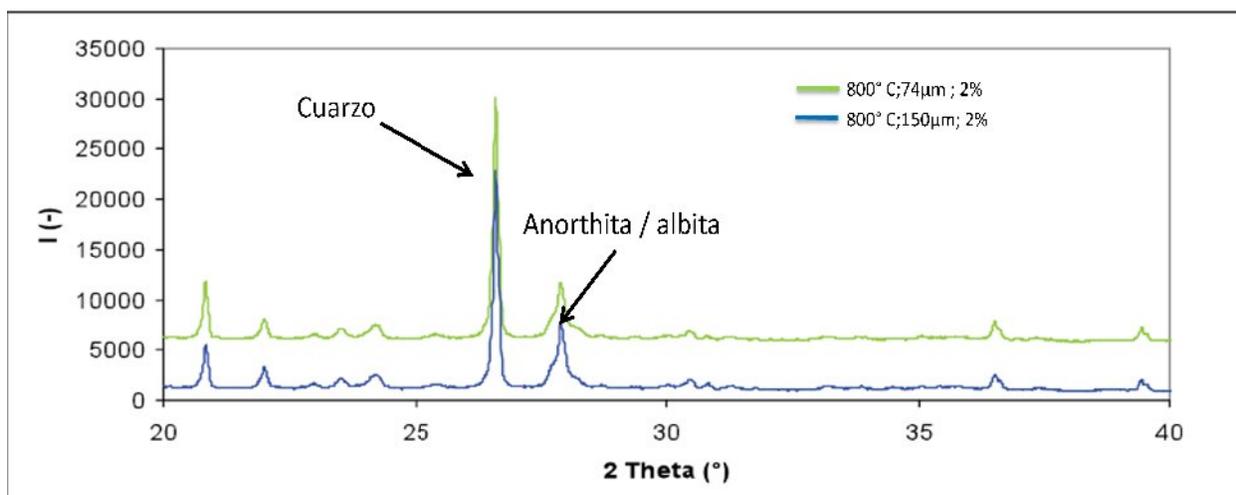


Figura 18. Variación de la intensidad de los picos en función de la finura de molido del  $\text{CaCO}_3$

### 2.5.2.3. Evaluación del contenido de $\text{CaCO}_3$ en las transformaciones mineralógicas.

Los cambios en la estructura de poros ayudan a entender el proceso de sinterización y la forma en la que éste ha sido influenciado por la adición de  $\text{CaCO}_3$ . La figura 19 muestra los resultados del ensayo de Porosimetría por intrusión de Mercurio (PIM), realizado a las probetas cilíndricas ensayadas, para diferentes valores de % de  $\text{CaCO}_3$  añadido como fundente.

En primer lugar, se señala que para todas las distribuciones la porosidad se mostró principalmente en 2 zonas de distribución de los tamaños de poros, correspondientes a  $0,1\mu\text{m}$  y  $1\mu\text{m}$ . Esta distribución es bastante común en este tipo de material [9, 53].

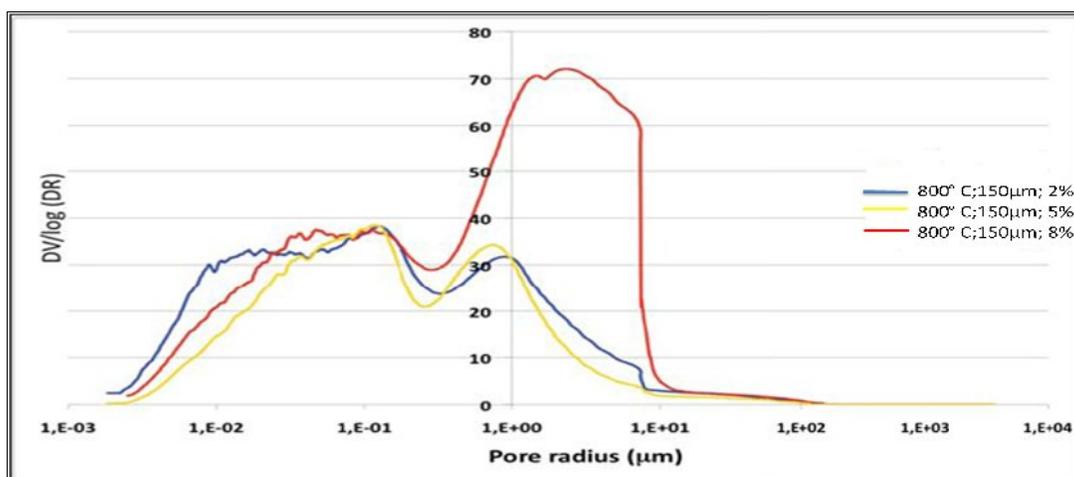


Figura 19. Variación de volumen de poros en función de % de  $\text{CaCO}_3$

Las muestras fabricadas con un 8% de  $\text{CaCO}_3$ , muestran una distribución de poros superior en comparación con las muestras con un 2 y 5% de adición. En especial se observa un incremento de la cantidad de poros superiores a  $1\mu\text{m}$ , con el consecuente aumento de la porosidad en las muestras. Esto resulta consistente con los incrementos de los valores de absorción observados en los estudios macro-estructurales. Este incremento en la distribución de poros en el sistema, puede estar directamente asociado a la formación y posterior expansión y difusión, de los gases que se producen durante la reacción de descomposición del  $\text{CaCO}_3$  [9, 11, 14].

Las muestras fabricadas con un 2 y 5% de  $\text{CaCO}_3$ , muestran una mayor presencia de poros inferiores a  $0,1\mu\text{m}$ . Estas zonas de pequeños tamaños de poros, se encuentran presentes también en las muestras fabricadas con un 8% de  $\text{CaCO}_3$ , los cuales pueden haberse generado por el  $\text{CaO}$ , sin reaccionar o por microfisuras que se producen durante la hidratación del  $\text{CaO}$  siendo estos resultados reportados en la literatura por otros autores [9, 11, 14].

Es de señalar que la porosidad no es el único factor que influye en las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos. Existe también otro factor y es la naturaleza de las fases presentes en las muestras, así como el grado o nivel de conectividad entre ellas. Una forma de analizar estas fases es mediante el empleo de la técnica de Difracción de Rayos X, como se muestra en la figura 20 en muestras cerámicas elaboradas con una finura de  $\text{CaCO}_3 < 150\mu\text{m}$ .

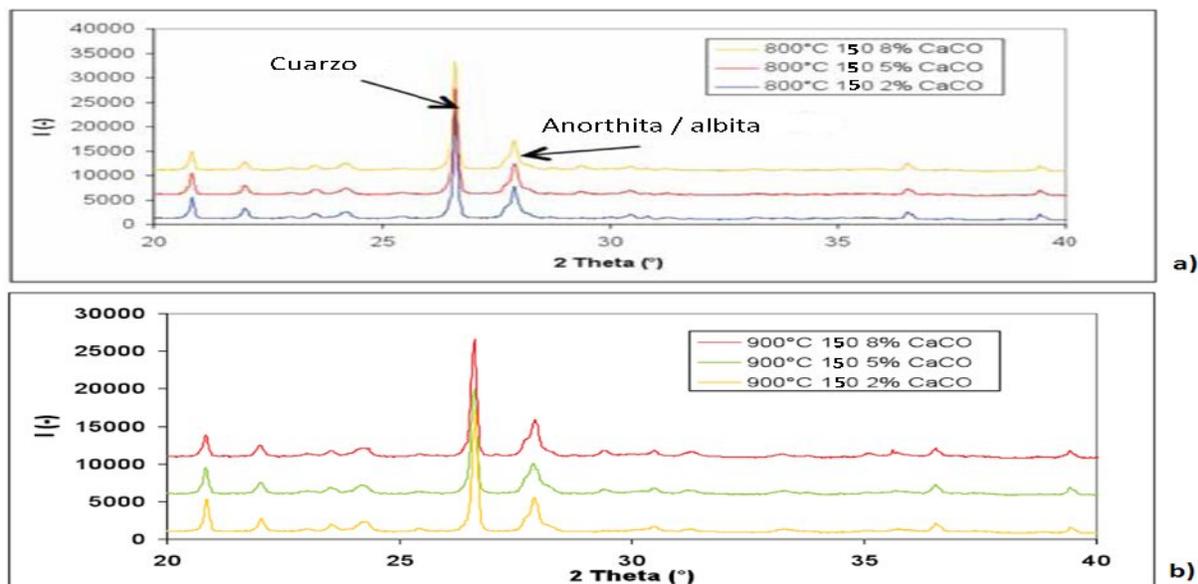


Figura 20. Variación de la intensidad de los picos en función del % de  $\text{CaCO}_3$ , a) muestras elaboradas a 800°C, b) muestras elaboradas a 900°C

Para todos los trazados de curvas para las diferentes temperaturas de cocción de 800°C como a 900°C, los picos de cuarzo presentan similares intensidades. Sin embargo, la intensidad de los máximos correspondientes a las fases albita y anorthita disminuyen en la medida que aumenta el porcentaje del fundente empleado, siendo inferior en las muestras elaboradas con un 8% de  $\text{CaCO}_3$ ; por tanto las propiedades físico - mecánicas serán inferiores en comparación con las obtenidas para 2 y 5% de adición, donde se aprecia una menor cantidad de fases cristalinas.

Otro factor de gran interés y que también influye en las propiedades mecánicas en relación con el % de adición, es conocer qué porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  añadido ha sido capaz de reaccionar totalmente. En la reacción, este material se convierte en óxido de calcio a temperaturas cercanas a los 800°C. El nuevo material presenta una estructura muy desordenada y muestra una alta tendencia a reaccionar con los minerales de arcilla, que también han cedido a tal

temperatura el agua de composición y se forman en compuestos de estructura muy desordenada.

Una forma de cuantificar si el  $\text{CaCO}_3$  no se ha sido capaz de combinarse, es mediante el estudio de las pérdidas de peso que se producen con el incremento de la temperatura, a través del ensayo termo gravimétrico (TGA). Si se formó  $\text{CaO}$  y éste se combinó con agua para formar  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , debería observarse una caída de peso cerca de los  $500^\circ\text{C}$ , atribuida a la deshidroxilización del calcio. Si el  $\text{CaCO}_3$  no se transformó por alguna razón, o el hidróxido formado se carbonató, debe observarse una caída de peso a los  $930^\circ\text{C}$ , que corresponde con la descarbonatación del  $\text{CaCO}_3$  [9, 74, 85]. La figura 21 muestra el diagrama de termo gravimetría de las muestras elaboradas para los tres % de adición para una finura del  $\text{CaCO}_3 < 150\mu\text{m}$ .

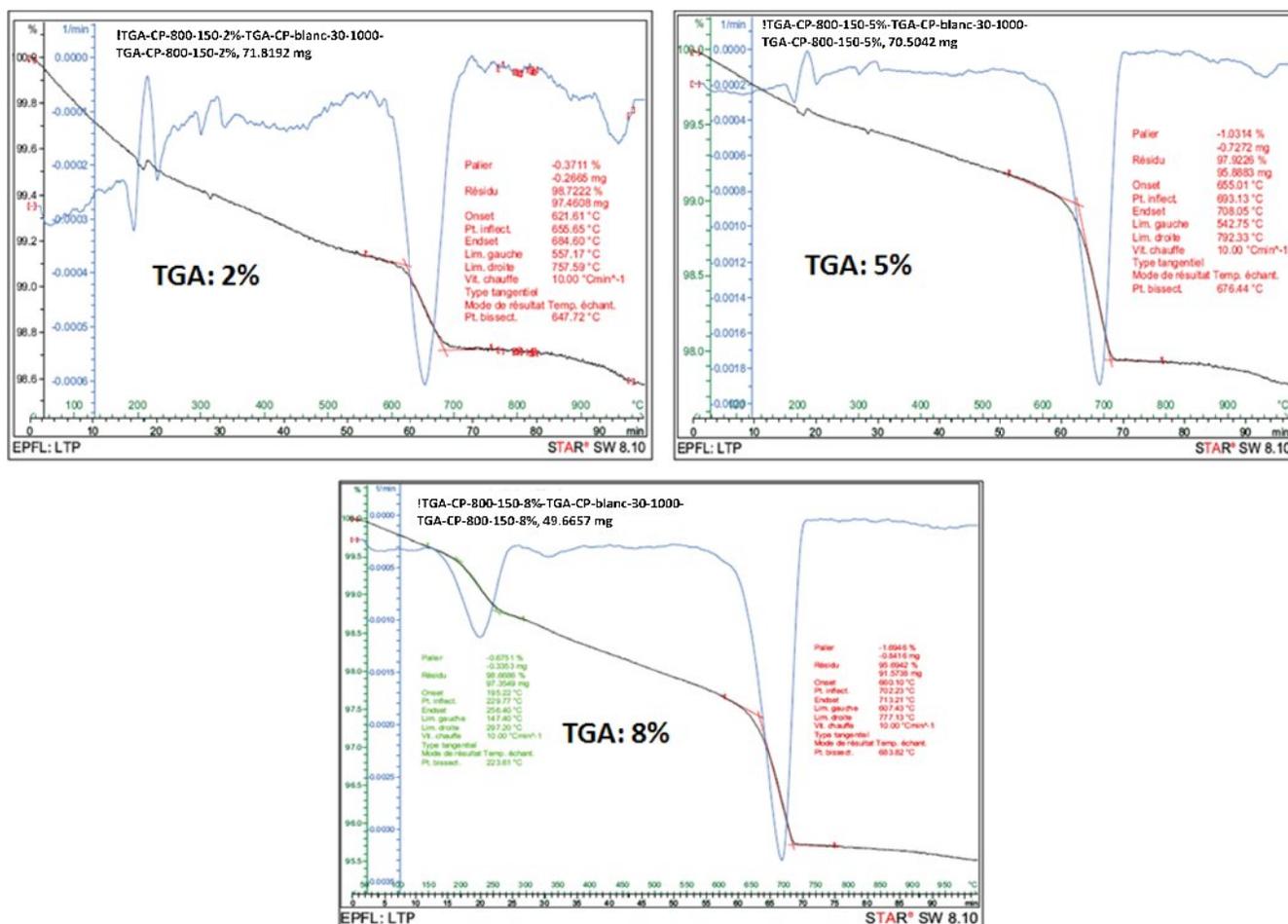


Figura 21. Termo diagramas de los especímenes quemados a  $800^\circ\text{C}$  con y % de  $\text{CaCO}_3$  de 2, 5 y 8% con una finura  $< 150\mu\text{m}$

En el análisis de los resultados del ensayo termogravimétrico para todos los casos se observa una diferencia apreciable, especialmente en el rango de temperatura de 650°C, donde la pérdida de masa por descarbonatación es superior para las muestras elaboradas con un 8% de CaCO<sub>3</sub>, siendo inferior para las muestras con un % de adición menor (2 y 5% de adición) (ver tabla 9).

Tabla 9. Pérdidas de masa por descarbonatación.

Muestra	800 °C – 150µm – 2 %	800 °C – 150µm – 5 %	800 °C – 150µm – 8 %
Pérdida de masa (%)	-0,37	-1,03	-1,69
% de CaCO <sub>3</sub> que reaccionó	42,75	46,69	48,14

Esto indica, que una mayor cantidad de CaCO<sub>3</sub> añadido se ha combinado con los minerales arcillosos dando lugar a nuevas fases, siendo superior en el caso de las muestras elaboradas con un 2% de adición y, por lo tanto, se corrobora el mejoramiento de las propiedades mecánicas con relación a las muestras con 5 y 8% de CaCO<sub>3</sub>.

**2.5.2.4. Influencia de la acción fundente del CaCO<sub>3</sub> sobre la temperatura de cocción.**

En la literatura consultada [9, 52, 57, 72], varios autores coinciden en que la temperatura de cocción influye en las transformaciones mineralógicas que ocurren en las arcillas, principalmente cuando se utiliza CaCO<sub>3</sub> como fundente, donde estas transformaciones ocurren a temperaturas más bajas, entre los 700°C y 900°C.

La figura 22 muestra los diferentes difractogramas para los porcentos de adición utilizados (2, 5 y 8% de CaCO<sub>3</sub>), mostrándose una intensidad superior de los picos de albita/anorthita para las muestras fabricadas a una temperatura de cocción de 800°C, en comparación con las muestras procesadas a 900°C. Esto evidencia la mayor formación de estas fases cristalinas a temperaturas inferiores a 900°C. Los resultados del análisis son consistentes con los obtenidos en los estudios macroestructurales, donde las propiedades físico – mecánicas reportan los mejores resultados, a una temperatura de cocción de 800°C.

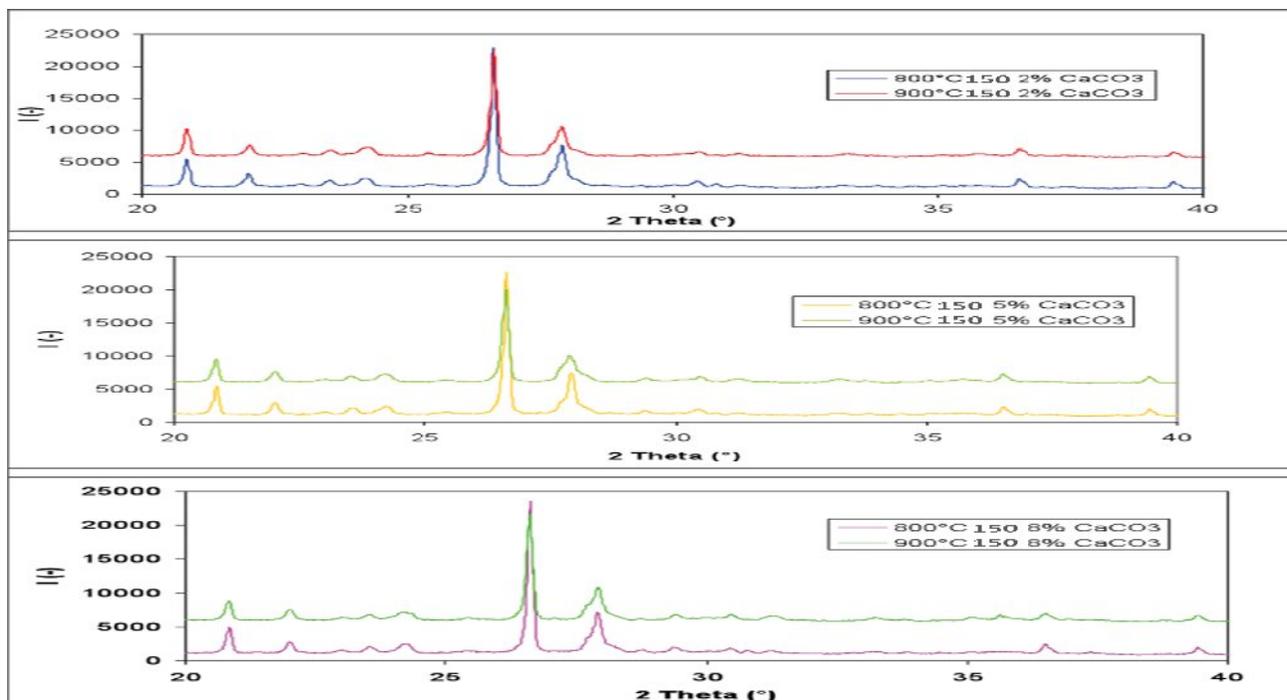


Figura 22. Variación de la intensidad de los picos en función de la temperatura de cocción

Otra cuestión de gran importancia es la concerniente a la porosidad como muestra la figura 23. Se observa un mayor tamaño de poros para las muestras cocidas a 800°C, en comparación con las muestras cocidas a 900°C, donde se observa un incremento de poros más finos, inferiores a 0.1  $\mu\text{m}$ . Este resultado es consecuente con los reportados en la literatura [9, 14, 74], lo cual podría estar asociada que con el aumento de la temperatura, se produce una vitrificación, provocando la formación de poros más pequeños.

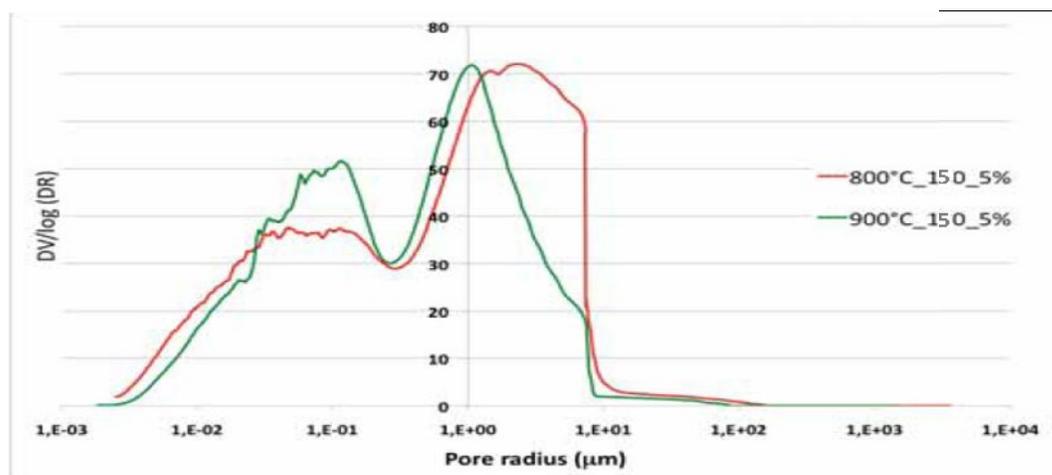


Figura 23. Influencia de la temperatura en la porosidad.

Los poros pequeños pueden haberse formado, ya sea porque el CaO que queda sin reaccionar produce un sistema con poros más pequeños, o producto de las microfisuras producidas durante la hidratación del CaO, descritas en la literatura [9, 11, 14, 85]. De existir, este CaO puede ser detectado en el estudio de termo gravimétrico (TGA), como se muestra en la figura 24, donde se realizaron los ensayos de TGA a las muestras elaboradas con 5% de CaCO<sub>3</sub> y con una finura del mismo <150µm.

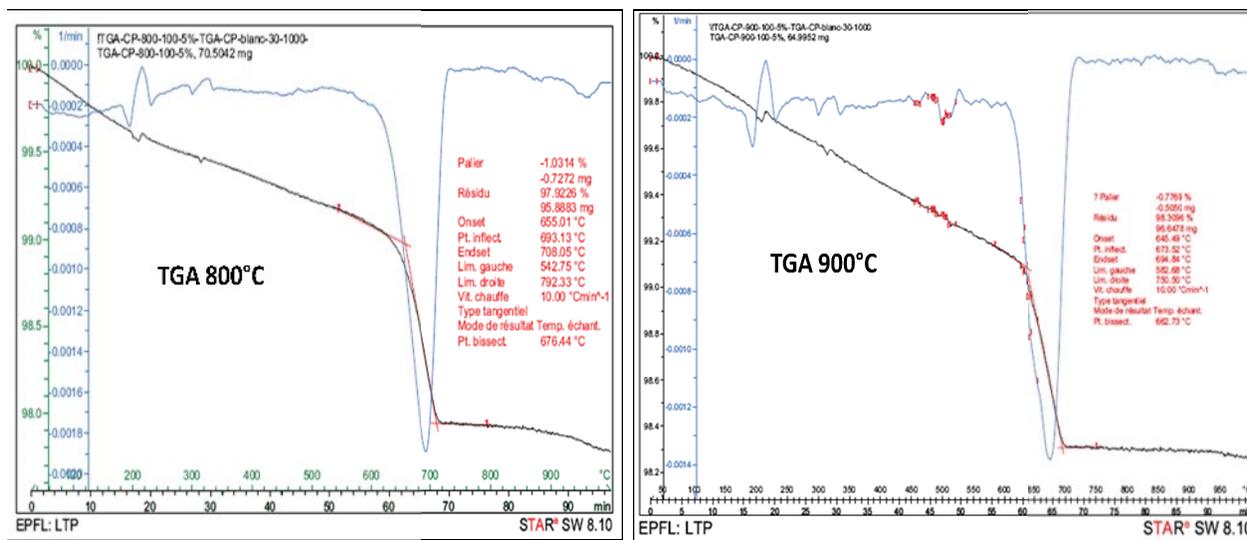


Figura 24. Termo diagramas de los especímenes quemados a 800 y 900°C con 5 % de CaCO<sub>3</sub> y con una finura del mismo <150µm

El análisis por termogravimetría mostró que la pérdida de masa por descarbonatación, es menor para las muestras fabricadas a una temperatura de 900°C con – 0,78%, contra – 1,03% de las muestras elaboradas a 800°C, mostrando la presencia de CaO residual a temperaturas más bajas. Estos resultados son verificables en las mediciones de porosidad, ya que el número de poros es mayor a una temperatura de 800°C que a 900°C.

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  $\text{CaCO}_3$  contribuye a la formación de nuevas fases estables, en específico la Anorthita ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) / Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ). Estas fases se observan claramente en todas las muestras ensayadas con diferentes porcentajes de  $\text{CaCO}_3$ .
3. Los ensayos de termo gravimetría realizados arrojan que las dosificaciones con un 2% de adición, el  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$   $<150\mu\text{m}$ , 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  $\text{CaCO}_3$ .

## 2.6. Conclusiones parciales del capítulo.

1. Los resultados de este estudio indican que con un 2% de adición de  $\text{CaCO}_3$  molido a una finura  $<150\mu\text{m}$  y utilizando una temperatura de cocción de  $800^\circ\text{C}$ , 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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$ , 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  $\text{CaCO}_3$ , 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  $\text{CaCO}_3$  adicionado en pequeñas dosis, comienza a ser eficiente a partir de las  $150\mu\text{m}$ , 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  $\text{CaCO}_3$  de  $150\ \mu\text{m}$  y  $74\ \mu\text{m}$  para los diferentes porcentos de adición utilizados, nos indican que no es necesario moler el  $\text{CaCO}_3$  a una finura inferior a las  $150\ \mu\text{m}$ , para mantener las propiedades físico – mecánicas del producto cerámico.

## **Capítulo III: Implementación del $\text{CaCO}_3$ como fundente en la producción industrial de ladrillos de cerámica roja.**

### **3.1. Uso del carbonato de calcio en la fabricación de ladrillos.**

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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  y una finura de molido del  $\text{CaCO}_3$  inferior a 150  $\mu\text{m}$ . 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.

### **3.2. Características del proceso de producción de los ladrillos de cerámica roja en el combinado de Manicaragua.**

El Combinado de cerámica de Manicaragua ubicado en la provincia de Villa Clara, clasifica como de mediana industria, por su industrialización parcial del proceso productivo de ladrillos de cerámica roja, logrando una automatización total, solo para el caso del conformado del ladrillo verde. Esto posibilita una adecuada calidad de las piezas ante los procesos térmicos (secado y cocción), los cuales responden a las siguientes características:

**Proceso de Secado:** El material conformado se coloca en secaderos naturales cubiertos (Ver figura 25), en naves que protegen de la lluvia y de la incidencia directa de los rayos del sol, lo cual permite una regulación adecuada y constante de las corrientes de aire y de la radiación solar. El tiempo de secado de los elementos normalmente tarda entre 8 y 10 días, a una temperatura ambiente entre 23 y 33°C, pero puede aumentar en dependencia de las condiciones climatológicas, hasta 15 días. La humedad requerida en las piezas para dar por concluido este proceso y poder pasar a la cocción, se encuentra entre un 6% y un 8 %.



Figura 25. Secadero natural a la sombra.

**Proceso de cocción:** La fábrica dispone de tres hornos discontinuos, con capacidades de producción (6800, 16000 y 32000 unidades, respectivamente), con un consumo de combustible en dependencia de la capacidad de horno entre los 3600 y 8000 litros de Fuel Oil. En el caso específico de estos hornos, no existe la posibilidad de controlar el flujo del combustible ni de controlar la temperatura, por lo que ambas se realizan de forma empírica, teniendo en cuenta la experiencia del personal (hornero) (Ver figura 26), donde el tiempo de cocción oscila entre 20 y 36 horas, en función de la capacidad del horno utilizado.



Figura 26. a) Horno artesanal, b) disposición de los quemadores

### 3.3. Descripción del programa experimental.

#### 3.3.1. 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  $\text{CaCO}_3$ , 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.

### 3.4. Procedimiento experimental.

#### 3.4.1. Elaboración de los ladrillos con la adición de carbonato de calcio.

- **Mezclado de las materias primas:** El mezclado de las materias primas se realiza en un molino de paletas, para lograr la homogenización adecuada de la pasta de material arcilloso más el aditivo fundente. La dosificación para la mezcla de los ladrillos se realizó con respecto al volumen del material arcilloso, adicionando un 2 % de  $\text{CaCO}_3$  a un 98 % de material arcilloso. Para añadir el carbonato de calcio, se utilizó un recipiente de  $0.01\text{m}^3$  de capacidad, con el objetivo de medir la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  que se debe suministrar al material arcilloso acumulado en el mezclador ( $0.7\text{m}^3$ ), suministrando  $0.014\text{m}^3$  de carbonato de calcio por cada amasada (Ver figura 27).



a)



b)

Figura 27. Adición del  $\text{CaCO}_3$  al material arcilloso, a) Mezcla de material arcilloso más  $\text{CaCO}_3$ , b) Adición del  $\text{CaCO}_3$

- **Conformado de los ladrillos:** Los ladrillos fueron conformados y prensados en una extrusora al vacío, donde se le aplicó una presión de 7 MPa, para lograr con esta acción un aumento de la superficie de contacto entre las partículas de las distintas materias primas. Los ladrillos después de conformados durante el proceso de extrusión, salen con una

humedad inicial entre 15 y 17%, con dimensiones establecidas de 28 cm de largo, 11 cm de ancho, 7.5 cm de espesor

- **Proceso de secado:** El proceso de secado de las piezas con y sin adición de  $\text{CaCO}_3$ , se desarrolló bajo condiciones similares en naves techadas, con una humedad relativa del 90 % y una temperatura ambiente de  $30^\circ\text{C}$ .
- **Proceso de cocción:** Durante la cocción se utilizó un horno pequeño con capacidad para 6800 unidades, realizando dos procesos de cocción, un primero que sirvió como patrón o control, que se tomó como parámetro de comparación para el segundo proceso de cocción donde se utilizó la adición de  $\text{CaCO}_3$  como fundente. Para ambos procesos de cocción de los ladrillos, se efectuaron mediciones de la temperatura y emisiones de gases, en puntos ubicados en las puertas del horno. El control de la temperatura se realizó mediante la introducción de un sensor de temperatura tipo K marca METRA – 202, colocado en tres orificios ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ), situados en las puertas del horno (Ver Figura 28), en la cual se realizaron mediciones con una frecuencia de una hora, para observar cada una de las etapas de cocción (precalentamiento y cocción). Para medir las emisiones producidas en la combustión, se utilizó un analizador de gases modelo RBR – ECOM – SG PLUS, el cual nos permitió la medición simultánea de los gases resultantes de la combustión del combustible durante la cocción, así como la eficiencia de la combustión.

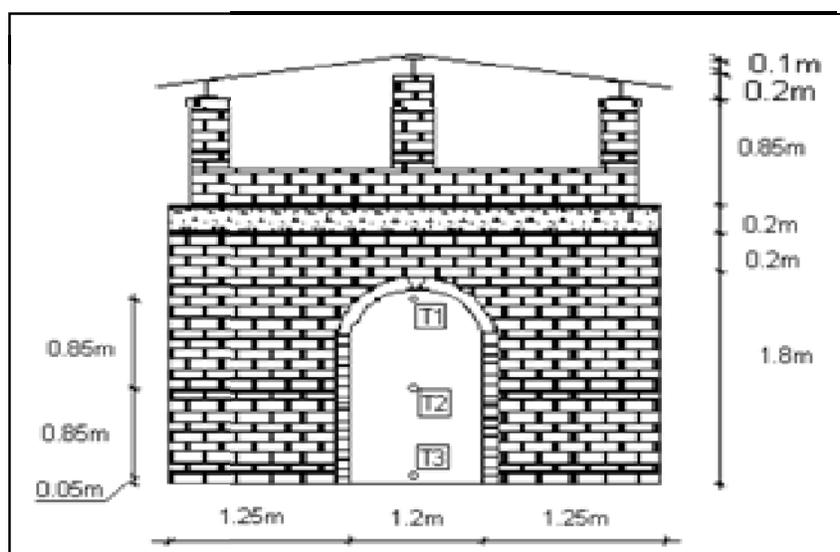


Figura 28. Esquema del horno de combinado cerámico de Manicaragua.

**3.4.2. Diseño experimental.**

Para el diseño experimental se utilizó como único factor el porcentaje de adición de  $\text{CaCO}_3$  molido a una finura de  $150 \mu\text{m}$ , el mismo se estableció en dos niveles, un nivel bajo con un 0% de adición y un nivel alto con un 2% de  $\text{CaCO}_3$ . Por otra parte, las variables dependientes que se estudiaron quedaron definidas para los dos procesos evaluados en la investigación (Secado y Cocción). Los aspectos anteriores definieron el siguiente diseño experimental.

***Declaración de las variables independientes y sus niveles.***

En la tabla 10 se muestra un diseño de experimento donde se analiza un solo factor en 2 niveles: diseño que estudió los efectos del mismo en 2 ejecuciones:

**Tabla 10. Variables independientes y sus niveles.**

<i>Variable</i>	<i>Niveles</i>	
	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>
% de $\text{CaCO}_3$	2	0

Los niveles fueron establecidos bajo los siguientes criterios:

- **% de  $\text{CaCO}_3$  usado:** En el capítulo II de este trabajo se explicaron los resultados de la influencia del %  $\text{CaCO}_3$  obtenidos a escala de laboratorio, permitiéndonos establecer el % de adición más adecuado para ser utilizado a escala de producción real. A partir de estos resultados, se decidió trabajar con 2% de adición de  $\text{CaCO}_3$ , verificando así los resultados obtenidos en el laboratorio, en una implementación a escala de producción industrial.

***Declaración de las variables dependientes.***

Las variables dependientes quedaron definidas para cada uno de los procesos, en los cuales se evaluó la influencia del  $\text{CaCO}_3$ . Estos procesos son el secado y la cocción.

Variables dependientes en proceso de secado

- **Tiempo de secado:** En el caso del tiempo de secado, según la bibliografía consultada [30, 83] se refiere que está fuertemente ligado al tipo de secado que se utilice, permitiendo establecer, según la teoría clásica del secado, los tres periodos bajo los cuales transcurre dicho proceso: el primero es la eliminación del agua de poros (1ra etapa del secado), la eliminación del agua residual y eliminación del agua adsorbida (2da etapa de secado). En el caso del uso del carbonato de calcio finamente molido, la literatura [30, 81, 94] refiere que

actúa dadas sus características físicas y granulométricas, como un desgrasante natural que interviene parcialmente, en las reacciones que ocurren dentro de los ladrillos, regulando, en una primera fase, el tiempo de secado y posteriormente acelerando las reacciones que ocurren durante la cocción [30].

- **Contracción Volumétrica:** La contracción volumétrica de las piezas cerámicas está íntimamente ligada a la pérdida de humedad durante el secado, donde parte de la misma es eliminada por el flujo capilar y por la evaporación dentro de los poros. A medida que se desarrolla el proceso de secado, el agua superficial es remplazada por el agua del interior de la pieza, por lo cual las partículas de arcilla se van acercando, produciendo una contracción inicial, que en las primeras etapas de secado es igual al volumen de agua eliminada. Luego continúa la eliminación de agua a una velocidad mayor, propiciando un superior acercamiento entre las partículas, llegándose a la contracción máxima; por tanto, esta relación es directamente proporcional [67, 81, 95, 96]. En el caso del carbonato de calcio finamente molido, podría actuar como un regulador de las contracciones, aumentando la conductividad capilar y acelerando la velocidad de secado [30, 94].

#### Parámetros de estado en proceso de secado.

- **% de humedad:** Sobre el secado de los productos cerámicos, la literatura [30, 83, 94] exige controlar dos variables fundamentales: la humedad y la temperatura. La primera definida en dos aspectos fundamentales, por un lado la humedad residual dentro de los ladrillos que debe estar en un rango, entre el 5 – 10% para pasar al proceso de cocción y por otro, la humedad dentro de la nave de secado, donde en el caso de los secaderos naturales está definida por las condiciones medio ambientales. La temperatura juega un papel fundamental como el vehículo que ingresa energía para secar las piezas, que en el caso del secado natural está definido por la temperatura ambiente y por la velocidad del flujo de aire circundante.

#### VARIABLES DEPENDIENTES EN PROCESO DE COCCIÓN

- **Temperatura de cocción:** El presente trabajo pretende verificar si la adición de carbonato produce una disminución o reducción de la temperatura de cocción en un horno artesanal, ya que resulta en extremo difícil un control riguroso de la temperatura y que solo es posible medir empíricamente por el hornero.

- **Emisiones de gases producto de la combustión:** Estas emisiones según la literatura consultada [20, 97] están referidas primeramente, al combustible utilizado y en segundo lugar, a la descomposición y transformación de los carbonatos presentes en la masa de los ladrillos.
- **Consumo de combustible:** Con la utilización de fundentes, según la literatura consultada [9, 14, 85] puede llevar a una disminución del consumo de combustible, a partir de una disminución del tiempo y temperatura de cocción, logrando una adecuada combustión.
- **Calidad del producto terminado:** La calidad del ladrillo obtenido, a partir de la adición de  $\text{CaCO}_3$  va a depender fundamentalmente, de variables tales como régimen de cocción, % de adición y finura de molido del carbonato de calcio.

#### Parámetros de estado en proceso de cocción

- **Condiciones de fabricación de los ladrillos:** Las condiciones de fabricación de los ladrillos fueron las mismas, tanto para los ladrillos con adición, como los que no tenían adición; principalmente, presión de moldeo (7MPa), tipo de horno discontinuo (capacidad de 6800 unidades) y el mismo tipo de combustible (Fuel oil).

#### **3.4.3. Caracterización estadística del diseño experimental.**

La caracterización estadística del diseño experimental se hizo de la siguiente forma: a) Se determinó la estadística descriptiva de cada una de las variables de respuesta analizadas, en función de cada proceso de estudio, como son el secado (Ver Anexo V) y la cocción (Ver Anexo VI), b) Para cada corrida experimental, se halló un tamaño de muestra 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. Finalmente, para validar y justificar científicamente los objetivos de este diseño experimental, se procedió a la aplicación de diferentes técnicas de Pruebas de Hipótesis.

Los objetivos de este diseño de experimento fueron los siguientes:

1. Evaluar la influencia de la adición de carbonato de calcio como fundente, para cada uno de los factores delimitados en las variables de respuesta.
2. Estudiar el tiempo total transcurrido del proceso de secado natural de ladrillos, con adición de carbonato de calcio.
3. Establecer una comparación entre el tiempo de secado obtenido por ladrillos, con adición y sin adición de  $\text{CaCO}_3$  sometidos al secado natural.
4. Evaluar las contracciones volumétricas que experimentan los ladrillos con y sin adición de carbonato de calcio, durante el proceso de secado.
5. Evaluar la influencia de la adición de carbonato de calcio sobre la temperatura y el consumo de combustible en la cocción de ladrillos, en los hornos artesanales del combinado de cerámica roja de Manicaragua.
6. Evaluar las emisiones gaseosas que se experimentan durante la cocción, a partir de la adición del carbonato de calcio como fundente y el impacto ambiental generado por las mismas.

### **3.5. Análisis de resultados.**

En este epígrafe se muestran los resultados obtenidos, a partir del estudio de la influencia del  $\text{CaCO}_3$ , en los procesos térmicos (secado y cocción). Primeramente se exponen los resultados obtenidos durante el proceso de secado y posteriormente, los obtenidos durante la etapa de cocción; debido a los cambios de esta última etapa, los cuales están ligados en gran parte a las transformaciones que ocurren durante el secado.

#### **3.5.1. Influencia del $\text{CaCO}_3$ en el proceso de secado de ladrillos de cerámica roja.**

En la figura 29, se muestra la evolución de la variación porcentual de la humedad con respecto al tiempo, tanto para las muestras elaboradas con la adición de  $\text{CaCO}_3$ , como las elaboradas sin el aditivo, ambas secadas en un secadero natural a temperatura ambiente.

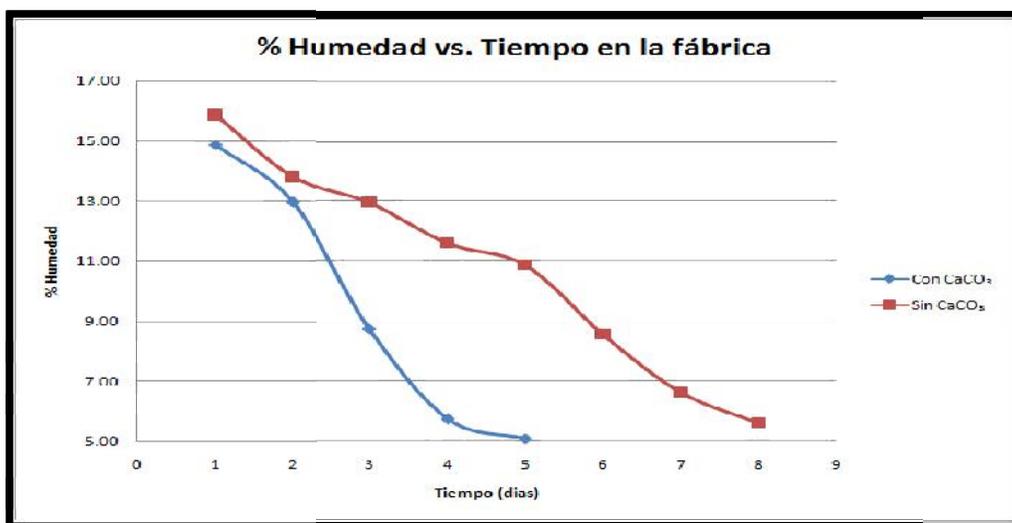


Figura 29. Gráfico de tendencia de % Humedad vs. Tiempo de secado de los ladrillos en la fábrica.

Claramente se puede observar en las gráficas que el porcentaje de humedad eliminado por unidad de tiempo, está fuertemente ligado al contenido de  $\text{CaCO}_3$ , 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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$ , 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  $\text{CaCO}_3$  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.

Para verificar de una manera sencilla la anterior aseveración, relacionada principalmente con el fenómeno de capilaridad y tamaño de poros, se hace uso de un ensayo edométrico, el cual se aplica en muestras de suelo con y sin adición de  $\text{CaCO}_3$  (ver Anexo VII). En este se relacionan la relación de vacíos ( $e$ ) contra una presión ( $P$ ), lo que permite aplicando las ecuaciones físicas relacionadas con los efectos capilares provocados por la tensión superficial [94]; de ahí que se pueda determinar un diámetro de poros equivalente ( $D_0$ ) para cada una de las muestras con y sin la adición de  $\text{CaCO}_3$ . Los principales resultados se muestran a continuación.

Tabla 11. Relación de vacíos equivalente ( $e_0$ ) en ladrillos.

Relación de vacíos ( $e_0$ ) ladrillos		
Datos	0% de $\text{CaCO}_3$	2% de $\text{CaCO}_3$
Peso promedio húmedo $W_s$ (g)	3270	3180
Volumen promedio seco $V_1$ ( $\text{cm}^3$ )	1940.08	1957.18
$\delta d = W_s/V$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.69	1.62
GS ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.63	2.63
Relación de vacíos ( $e_0$ ) $e = (GS/\delta d) - 1$	0.56	0.62

La tabla 11 muestra la relación de vacíos obtenida ( $e_0$ ) para cada una de las muestras de ladrillos ensayadas. Al comparar ambos resultados se observó que los ladrillos con una adición del 2% de  $\text{CaCO}_3$ , muestran un ligero incremento de la relación de vacíos (0.62), en comparación con las muestras sin la adición (0.56). Esto manifiesta un aumento de la porosidad en los ladrillos elaborados con el empleo de la adición de  $\text{CaCO}_3$ .

A partir de las relaciones de vacíos obtenidas de los ladrillos con y sin adición de  $\text{CaCO}_3$  y utilizando las curvas del ensayo edométrico (ver Anexo VII), se determinó la presión que debe aplicarse para llegar a cada una de las relaciones de vacíos determinadas anteriormente; la cual nos permite determinar un diámetro equivalente de poros, aplicando las ecuaciones de Terzaghi, como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Diámetro equivalente ( $D_0$ ) en ladrillos.

Diámetro equivalente de poros ( $D_0$ )		
Datos	Sin $\text{CaCO}_3$	Con $\text{CaCO}_3$
$T_0$ (g/cm)	0.074	0.074
Presión (P) ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	4000.00	500.00
$D_0$ (cm) $D_0 = 4 \cdot T_0/P$	0.000074	0.000592
$D_0$ ( $\mu\text{m}$ )	0.74	5.92

Al comparar los resultados, podría indicarse que la adición  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$ ; de forma tal, que proporciona una mejor eliminación del agua de poros, siendo está una de las posibles razones por las que disminuye el tiempo de secado. Estos resultados han

sido obtenidos por un ensayo que induce el diámetro de poros, a partir de la presión de compactación. Si se deseara llegar a conclusiones definitivas sobre este efecto, se requeriría realizar observaciones microscópicas del material en estado verde, que pudieran ayudar a confirmar el efecto beneficioso del carbonato de calcio.

### 3.5.1.1. Influencia del $\text{CaCO}_3$ 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  $\text{CaCO}_3$  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.

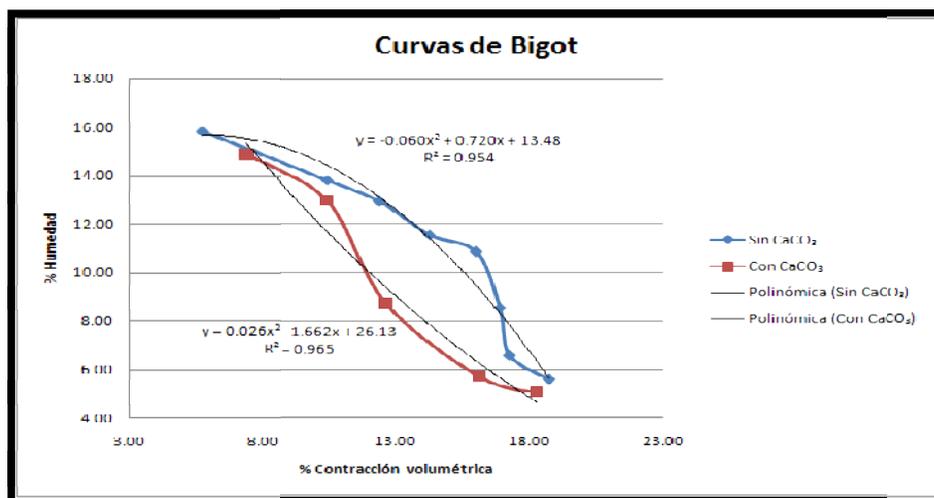


Figura 30. Gráfico de % de Humedad vs. % Contracción volumétrica (curva de Bigot).

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  $\text{CaCO}_3$ , 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.

Para entender la influencia del  $\text{CaCO}_3$  en la plasticidad y poder aclarar y/o confirmar la hipótesis hecha anteriormente, se decidió, entonces realizar un ensayo de plasticidad (Límites de Atterberg) (ver Anexo VIII) a muestras de suelo arcilloso con y sin la adición de  $\text{CaCO}_3$ . Los resultados se muestran en la tabla 13.

**Tabla 13. Límites de plasticidad de muestras de suelo arcilloso con y sin  $\text{CaCO}_3$**

LIMITES	Muestra con 2% de $\text{CaCO}_3$	Muestra sin $\text{CaCO}_3$
Límite líquido (%)	32.2	34.1
Límite plástico (%)	19.1	16.9
Índice de plasticidad (%)	13.2	17.2

Al comparar los resultados, se observó que las muestras de material arcilloso mezcladas con un 2% de  $\text{CaCO}_3$  experimentan una disminución en sus índices de plasticidad en un 23,3 %, en comparación con las muestras de suelo arcilloso sin aditivo; por lo tanto, con el aumento del contenido de  $\text{CaCO}_3$ , la plasticidad es menor y la contracción disminuye. Este resultado es consecuente con los obtenidos en los ladrillos en la fábrica y con la bibliografía consultada [30, 94, 96].

En general, los resultados obtenidos del estudio del proceso de secado, a partir de la adición de carbonato de calcio a los materiales arcillosos utilizados en la producción de ladrillos de cerámica roja son los siguientes:

1. Se demuestra que la adición de un 2% de  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$ .
4. Los resultados de las curvas de Bigot y los ensayos de plasticidad del suelo, indican que la adición del  $\text{CaCO}_3$  actúa en las pastas cerámicas como un desgrasante, regulando las contracciones experimentadas por el ladrillo durante el secado.

### 3.5.2. Influencia del $\text{CaCO}_3$ en el proceso de cocción de ladrillos de cerámica roja.

#### 3.5.2.1. Evaluación de la influencia del $\text{CaCO}_3$ sobre la temperatura, tiempo de cocción y consumo de combustible en la producción de ladrillos.

A continuación, en la figura 31 se muestra la evolución de la temperatura con respecto al tiempo, tanto de la cocción de ladrillos elaborados con un 2% de  $\text{CaCO}_3$  como los elaborados sin la adición.

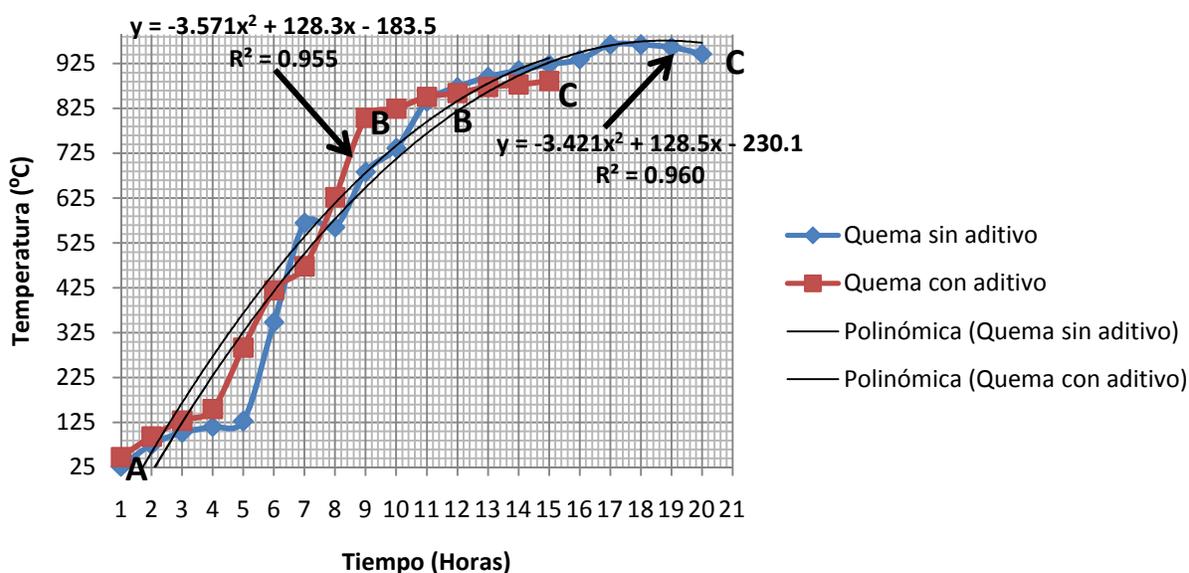


Figura 31. Curvas de Temperatura de Cocción Vs. Tiempo de las quemas con y sin adición de  $\text{CaCO}_3$

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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  (ver Anexo VI), 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.

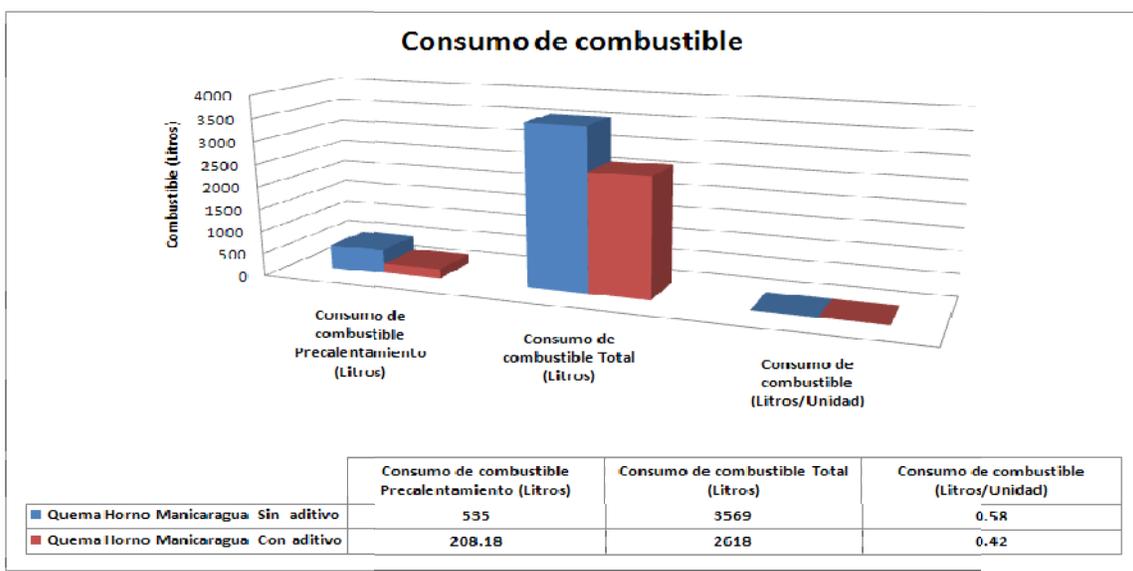


Figura 32. Consumo de combustible.

### 3.5.2.2. Influencia del $\text{CaCO}_3$ sobre las emisiones de gases de la combustión durante la cocción.

La medición de las emisiones de gases durante la etapa de cocción, permitió verificar la eficiencia energética de la combustión para cada uno de los procesos de cocción, así como la composición de los gases que intervienen por la combustión del combustible (Fuel Óil) y a la cocción de los ladrillos.

Estas emisiones originadas durante la cocción de los ladrillos de cerámica, proceden fundamentalmente de la combustión del combustible y del proceso de cocción de los ladrillos. Para el caso específico de los procesos de cocción realizados, el origen de las emisiones es como se expresa a continuación en la tabla 14.

Tabla 14. Origen de las emisiones de gases del proceso de cocción[100].

Etapa de Cocción	Origen de las emisiones
Pre calentamiento	Combustión
Incremento de la temperatura	Combustión y proceso de cocción
Cocción	Combustión y proceso de cocción

Según el criterio de varios autores [20, 97, 100], los gases principales que intervienen en los procesos de combustión son el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el monóxido de carbono (CO) y su balance es un indicador de la eficiencia de la combustión. En las mediciones realizadas durante el proceso de combustión se observó, que en la quema de los ladrillos con adición de carbonato de calcio, se altera el balance existente entre el dióxido de carbono y el monóxido de carbono; es decir, se produce una disminución del monóxido de carbono provocada por el aumento del dióxido de carbono, posiblemente debido a la descarbonatación del carbonato de calcio [97, 100]. De lo anteriormente dicho, se deduce que se produjo un mayor aprovechamiento del combustible, o lo que es lo mismo, que la combustión fue más eficiente logrando una eficiencia  $ETA = 95.2 \%$  (ver Anexo IX), lo cual produce una disminución del consumo de combustible, pues para llegar a las mismas temperaturas en la combustión, se utiliza una menor cantidad de éste (Ver figura 32 y 33).

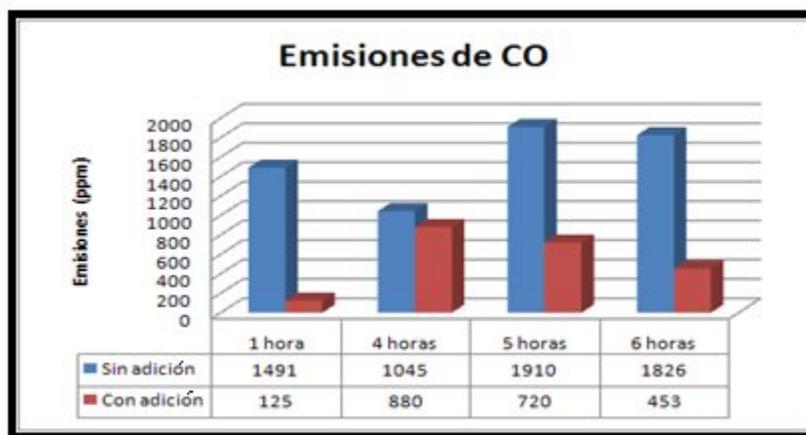


Figura 33. Comparación de las emisiones de monóxido de carbono en las quemas con y sin adición de  $CaCO_3$

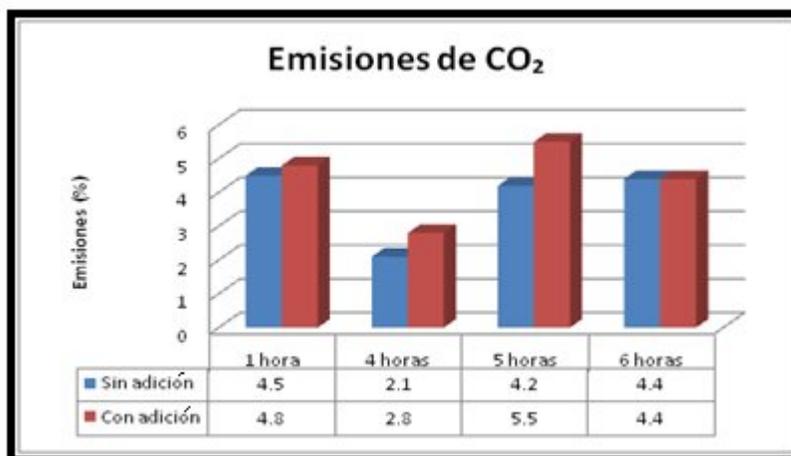


Figura 34. Comparación de las emisiones de dióxido de carbono en las quemas con y sin adición de CaCO<sub>3</sub>

### 3.5.2.3. Influencia del CaCO<sub>3</sub> en la calidad del producto terminado

La calidad de los ladrillos producidos en cada una de las quemas llevadas a cabo en la fábrica, se verificó usando los procedimientos que establecen los ensayos de la norma cubana [101]. Los ensayos que incluye este procedimiento son los siguientes: Resistencia a la compresión, absorción, alabeo, determinación de la masa y determinación de las dimensiones. Las muestras de ladrillos a ensayar se tomaron usando criterios estadísticos buscando representatividad de la población. Si los ladrillos producidos con adición de CaCO<sub>3</sub> a temperaturas por debajo de 900°C cumplen con estos requisitos, esto podría indicar que la adición produce efectos positivos en las propiedades de los ladrillos.

Los resultados de calidad se procesaron estadísticamente, los pasos seguidos en dicho procedimiento fueron, a) Se determinó el tamaño de muestra que fuera representativo de la población, b) Se calculó la estadística descriptiva de cada una de las variables de respuesta, c) En el procesamiento estadístico de las variables de respuesta, se aplicaron pruebas de chequeo de normalidad y se aplicaron pruebas de hipótesis **t-Student**, **F-Fisher** y **U de Mann-Whitney** (Ver Anexo VI).

Para la selección de muestra, se asumió un muestreo aleatorio estratificado, subdividiéndose el horno en tres zonas: Una primera correspondiente a la zona central de horno, una segunda en la parte superior y una tercera en la parte inferior; para incluir en el proceso de la investigación las fluctuaciones en la temperatura y, a su vez, la influencia de esta en la calidad de los ladrillos.

Resultados de los ensayos de calidad de los 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 CaCO<sub>3</sub> 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.

Tabla 15. Resultado de los ensayos de calidad para los ladrillos sin adición de CaCO<sub>3</sub>

<i>Parámetros</i>	<i>Absorción de agua</i>	<i>Resistencia a la compresión</i>	<i>Densidad aparente</i>
<i>% aditivo</i>	0%	0%	0%
<i>Desviación estándar</i>	0,97	0,39	0,06
<i>Coefficiente de variación</i>	0,09	0,04	0,03
<i>Valor medio obtenido</i>	<b>11,2 %</b>	<b>9,8 MPa</b>	<b>1,90 g/cm<sup>3</sup></b>

Tabla 16. Resultado de los ensayos de calidad para los ladrillos con adición de CaCO<sub>3</sub>

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

Lo anterior ratifica el efecto beneficioso del CaCO<sub>3</sub> 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], como se muestran en la figura 35.

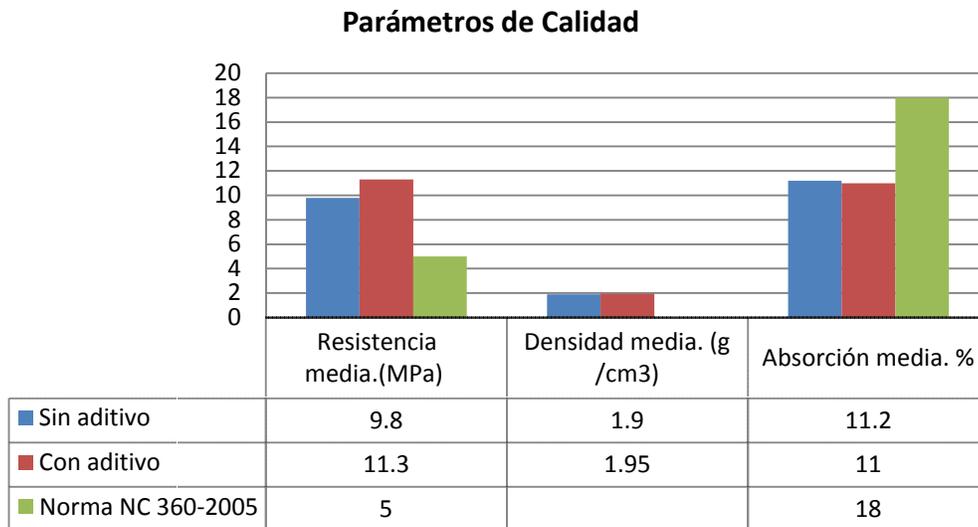


Figura 35. Comparación de los parámetros de calidad de ladrillos obtenidos en la fábrica con la norma cubana

En general, los resultados obtenidos en el proceso de cocción, a partir de la adición de carbonato de calcio como fundente en la producción de ladrillos cerámicos, son los siguientes:

1. 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 [102].
2. 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.
3. 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.
4. 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.

### 3.6. Análisis económico de la introducción del $\text{CaCO}_3$ en el Combinado Cerámico de Manicaragua.

#### Influencia en del $\text{CaCO}_3$ en los costos de combustible.

El análisis económico se basa principalmente en la reducción del costo de producción del ladrillo, por la disminución del consumo de combustible que se produce como consecuencia de lograr una combustión más eficiente y disminuir el tiempo de cocción, a partir de la descomposición del  $\text{CaCO}_3$  adicionado a los ladrillos.

El cálculo de la reducción del costo de producción del ladrillo, se hizo como se muestra en la tabla 17, a partir de los resultados de consumo de combustible obtenidos en la cocción de ladrillos, con la adición de  $\text{CaCO}_3$  y su comparación con los ladrillos producidos sin la adición. Este análisis comprende los costos de combustible al producir 1000 unidades.

Tabla 17. Costos de combustible para 1000 ladrillos

Quema	Consumo de combustible (Litros/mil unidades)	Costo del Combustible (CUC)
Ladrillos sin Adición	580	18.99
Ladrillos con Adición	420	13.75
Ahorro por mil unidades	160	5.24

Los resultados de este análisis demuestran, que la introducción del  $\text{CaCO}_3$  como fundente provoca una disminución beneficiosa en los costos, por concepto de combustible en la fabricación de ladrillos de cerámica roja. De ahí que logra un ahorro por cada 1000 unidades de 5.24 CUC; por lo tanto, teniendo en cuenta la producción mensual en la fábrica dada por los productores que está en un orden de las 90 000 unidades, el ahorro mensual será de 471,6 CUC experimentando un significativo ahorro de un 27 %, con respecto a los ladrillos producidos normalmente sin la adición de  $\text{CaCO}_3$ .

#### Influencia del $\text{CaCO}_3$ en los costos de producción del ladrillo.

Los cálculos de este estudio se basaron en las fichas de costo dadas por la Empresa de Materiales de Construcción de la provincia de Villa Clara (Ver Anexo X), donde a partir de la misma se elaboró una propuesta de ficha de costo, para la producción de ladrillos con la adición de  $\text{CaCO}_3$  (Ver Anexo X). Se tuvo en cuenta, el costo del mismo y su repercusión en la

disminución de los costos de combustible. Los resultados se muestran a continuación haciendo un análisis para producir 1000 unidades (Ver Tablas 18 y 19).

**Tabla 18. Resumen de Costos de producción de ladrillos sin adición de CaCO<sub>3</sub>**

Costos de producción de ladrillos sin CaCO <sub>3</sub> (análisis para producir 1000 unidades)		
Concepto de Gastos	Moneda Total (MN)	Moneda Convertible (CUC)
<b>Materias primas y materiales</b>		
-Materias Primas (Material arcilloso)	364.1	80.48
-Combustibles y Lubricantes	18.99	18.99
-Energía Eléctrica	0.49	0.00
<b>Total de gastos de materias primas</b>	<b>383.58</b>	<b>99.47</b>
<b>Gastos de Fuerza de Trabajo</b>	<b>127.41</b>	<b>0.00</b>
<b>Gastos Indirectos de Producción</b>	<b>144.39</b>	<b>0.00</b>
<b>Gastos Generales de Administración</b>	<b>44.17</b>	<b>0.00</b>
<b>Gastos Totales o Costo de Producción</b>	<b>699.55</b>	<b>99.47</b>

**Tabla 19. Resumen de Costos de producción de ladrillos con adición de CaCO<sub>3</sub>**

Costos de producción de ladrillos con CaCO <sub>3</sub> (análisis para producir 1000 unidades)		
Concepto de Gastos	Moneda Total (MN)	Moneda Convertible (CUC)
<b>Materias primas y materiales</b>		
-Materias Primas (Material arcilloso + CaCO <sub>3</sub> )	365.55	80.99
-Combustibles y Lubricantes	13.75	13.75
-Energía Eléctrica	0.49	0.00
<b>Total de gastos de materias primas</b>	<b>379.79</b>	<b>94.74</b>
<b>Gastos de Fuerza de Trabajo</b>	<b>127.41</b>	<b>0.00</b>
<b>Gastos Indirectos de Producción</b>	<b>144.39</b>	<b>0.00</b>
<b>Gastos Generales de Administración</b>	<b>44.17</b>	<b>0.00</b>
<b>Gastos Totales o Costo de Producción</b>	<b>695.76</b>	<b>94.74</b>

La introducción del carbonato de calcio como fundente, representa una sensible disminución de los costos con respecto a los ladrillos producidos sin adición, mostrándose este ahorro, sobre todo en la moneda en divisas, con un ahorro por cada 1000 unidades de 4.73 CUC. Esto indicaría un ahorro anual de 5108.4 CUC, provocado principalmente por la disminución en los costos de combustible.

### 3.7. Influencia medio ambiental de la utilización del $\text{CaCO}_3$ en la producción de ladrillos de cerámica roja.

La tabla 20 muestra los principales resultados de impacto medio ambiental, producidos por la influencia de la introducción del  $\text{CaCO}_3$  como fundente, en la producción de ladrillos cocidos. Estos impactos están relacionados con la disminución de combustible y la generación de gases de la combustión

Tabla 20. Aspectos ecológicos de la producción de ladrillos con adición de  $\text{CaCO}_3$

Quema	Consumo de combustible (litros)	Tiempo (Horas)	Emisiones de gases promedio		
			CO (%)	CO <sub>2</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)
Ladrillos sin Adición	3569	20	1568	3.80	453.5
Ladrillos con Adición	2618	15	544.5	4.38	143.75
Diferencia	951	5	1024	-0.58	310

Las mediciones realizadas indicaron el efecto favorable del uso del carbonato de calcio, a pesar de que se trabajó con un horno artesanal (ver figura 35). Se logra disminuir el tiempo de cocción en 5 horas y un ahorro de combustible de 951 litros, en comparación con la cocción de ladrillos sin la adición.



Figura 36. Horno del combinado cerámico de Manicaragua

Otro resultado obtenido está relacionado con las emisiones de  $\text{SO}_2$ , lo que podría indicar que el carbonato de calcio adicionado a la mezcla de los ladrillos, actúa como un depurador del dióxido de azufre emitido, producto de su presencia en el combustible utilizado [12, 97, 100], pues las emisiones de este compuesto es significativamente menor en la cocción de ladrillos con adición de carbonato de calcio, con respecto a la cocción de los ladrillos que no presentan la adición (ver figura 37).

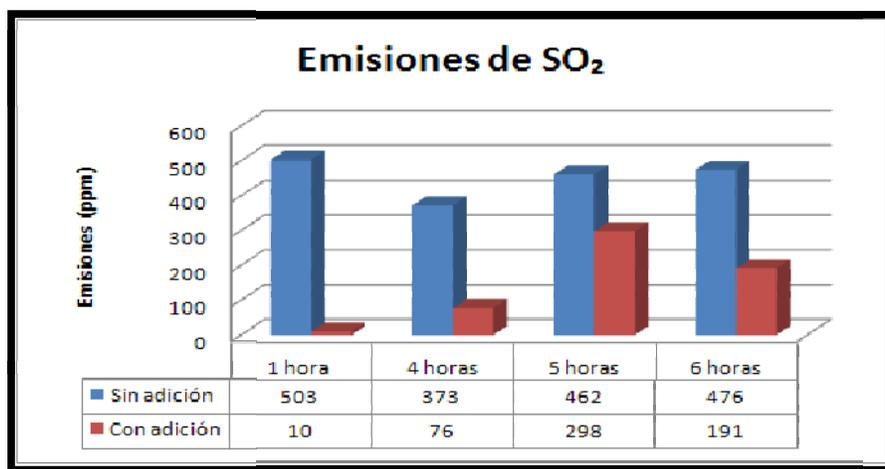


Figura 37. Comparación de las emisiones de dióxido de azufre en los procesos de cocción con y sin adición de  $\text{CaCO}_3$

El resultado anterior indica, según la bibliografía consultada[97, 100, 103], que el carbonato de calcio de la mezcla está absorbiendo o depurando parte del  $\text{SO}_2$ , formando anhídrita ( $\text{CaSO}_4$ ) que es estable térmicamente a temperaturas elevadas de cocción (rango entre 800 y 1000°C)[97, 100, 103], no afectando la calidad del producto terminado, según los ensayos de resistencia a la compresión y la absorción. Esta retención es muy importante desde el punto de vista medioambiental pudiendo reducir notablemente las emisiones de  $\text{SO}_2$  en los hornos (en un rango del 50%) [97, 100, 103].

### 3.8. Posible impacto de la introducción del carbonato de calcio como fundente en los principales combinados cerámicos del país.

Los resultados de los estudios en el Combinado Cerámico de Manicaragua evidenciaron que, indudablemente, al adicionar carbonato de calcio a las pastas cerámicas durante el proceso de elaboración del ladrillo, influye notablemente sobre los procesos térmicos y por eso, se reduce el consumo de energía por este concepto, este resultado podría tener mayor repercusión en la gran industria, en hornos de producción continua donde la temperatura y regulación del combustible es monitoreada eficazmente.

Por todo lo anteriormente expresado, a continuación se muestra un análisis preliminar de lo que podría significar la adición de  $\text{CaCO}_3$  en los principales combinados del país, en los que se usan indistintamente para la cocción hornos Túneles, Hoffman y de Llama invertida.

Dicho estudio partió del índice de consumo de combustible que se brinda en las fichas de costo, de algunos de los principales combinados de cerámica roja [26], de los cuales se conocen el tipo de horno y el consumo de combustible por cada mil unidades producidas, así como el precio de la tonelada de fuel oil en el mercado internacional (671 dólares); este último, es el combustible utilizado en las grandes fábricas del país [26].

Partiendo de que se puedan bajar los índices de consumo de combustible en un 27 %, por la adición de CaCO<sub>3</sub> como fundente a las pastas cerámicas, se halló la posible reducción de consumo de combustible por este concepto y cuánto representaría esta disminución en el costo del combustible (Ver tabla 21).

**Tabla 21. Reducción de los consumos y costos de combustible por cada mil unidades en los principales combinados del país.**

Combinado Cerámico	Tipo de horno.	Producto	Producción sin aditivo		Producción con aditivo	
			Costo del combustible (USD/Mu)	Índice de consumo (t/Mu).	Costo del combustible (USD/Mu)	Índice de consumo (t/Mu)
MANAGUA	Túnel	Ladrillo Macizo.	187.88	0.28	137.15	0.20
		Bloque Ligero Cerámico	268.4	0.4	195.93	0.29
PINAR DEL RÍO	Túnel	Ladrillo Macizo.	241.56	0.36	176.34	0.26
		Bloque Ligero Cerámico	711.26	1.06	519.22	0.77
CAMAGUEY	Túnel	Ladrillo Macizo.	583.77	0.87	426.15	0.64
		Bloque Ligero Cerámico	617.32	0.92	450.64	0.67
BAYAMO	Túnel	Ladrillo Macizo.	20.13	0.03	14.69	0.02
		Bloque Ligero Cerámico	483.12	0.72	352.68	0.53
CIEGO DE ÁVILA.	Hoffman y de Llama Invertida	Ladrillo Macizo.	241.56	0.36	176.34	0.26
		Bloque Ligero Cerámico	483.12	0.72	352.68	0.53

El ahorro de combustible promedio que significaría para el país, si esta tecnología es aplicada, es de 0.42 t/Mu. Lo que podría significar, si tomamos como base la producción del año 2010 que fue de 9 millones de unidades [29], un ahorro de 3780 toneladas de fuel oil, lo que se traduce, si tenemos en cuenta lo que le cuesta al país este combustible, que ronda en los 671

dólares la tonelada, en el mercado internacional, se podría evitar gastar de las arcas nacionales, aproximadamente unos 2 536 380 dólares, por concepto de combustible para la cocción de ladrillos y bloques cerámicos.

### 3.9. Conclusiones parciales del capítulo.

1. Se demuestra que la adición de un 2% de  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$ ; 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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  posee un efecto beneficioso, al disminuir el consumo de combustible y, a su vez, actúa como un posible depurador de emisiones de  $\text{SO}_2$  derivadas del mismo combustible, favoreciendo un menor impacto medio ambiental en la producción de ladrillos cocidos.

## Conclusiones generales.

1. El uso del fundente  $\text{CaCO}_3$ , 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  $\text{CaCO}_3$  adicionado en pequeñas dosis a los materiales arcillosos, resulta ser efectiva a partir de las 150  $\mu\text{m}$ , 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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  (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  $\text{CaCO}_3$ , de forma tal que proporciona una mejor eliminación del agua de los poros.
4. Se constata que la adición de  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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, 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  $\text{CaCO}_3$  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 ( $\text{CaSO}_4$ ) en los ladrillos debido a la reacción del carbonato de calcio y el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) 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 [cited 2007; Available from: <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/eco/ladribsas.htm> .
3. *Manual de buenas prácticas. Eficiencia energética*. 2000 [cited 2004; 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 [cited 2009; Available from: [http://apuntes.rincondelvago.com/materiales-ceramicos\\_4.html](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/enseñanzas-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 combustion 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. Gavría 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](http://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 [cited 2007; Available from: [www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=259](http://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 ceramica 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 esperto 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. 1ra Parte. Introducción al comportamiento de las pastas cerámicas*. 2004; Available from: [www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID57.pdf](http://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.l.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 [cited 2006; Available from: <http://www.xtec.es/~aromero8/pagina70.htm>].
36. *Cochura Portada Historia Tecnología y Sociedad*. 2009 [cited 2009; Available from: <http://www.xtec.net/~cgarci38/ceta/historia/cochura.htm>].
37. *Hornos para coser manufacturas bastas*. 2004 [cited 2006; Available from: [www.xtec.cat/~aromero8/hornos.htm](http://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 [cited 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 [cited 2009; Available from: [http://www.pqcorp.com/TechnicalService/..%5Cliterature%5Cbuletin\\_12-33.pdf](http://www.pqcorp.com/TechnicalService/..%5Cliterature%5Cbuletin_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 [cited 2009; Available from: <http://www.meliestrada.com/Glosario.htm>.
66. *Glosario de términos cerámicos*. 2004 [cited 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 [cited 2007; 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 construccion 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 [cited 2007; Available from: <http://www.cprac.org>.
80. Sisti, M. *La extrusión segunda parte*. 2003; Available from: [www.negosiosolavarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas](http://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. 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 [cited 2004; Available from: [http://www.brickbydesign.com-cbpi\\_research\\_paper\\_10.pdf\\_2.pdf](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. UNE 7-136-58. *Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 2: Piezas de arcilla cocida*.
93. K. Traoré, P.B., *Caractérisation physicochimique et mécanique de matériaux céramiques obtenus à partir d'une argile kaolinitique 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. Juárez Badillo, E., Alfonso, Rico Rodríguez, *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 CO<sub>2</sub>*, 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. NC 359:2005. *Ladrillos y bloques de arcilla cocida—Métodos de ensayo*.
102. NC 360 : 2005. *Ladrillos cerámicos de arcilla cocida— requisitos*.
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.

# **Anexos**

**Anexo I. Caracterización del yacimiento Carranchola-La Moza.**

**Carranchola**



<b>Nombre</b>	Carranchola		<b>Materia Prima</b>		Arcillas		
<b>Coordenadas</b>	<b>X</b> 802600	<b>Y</b> 260253	<b>Siste.</b> Norte	<b>Hoja 50000</b> 4132-II	<b>Area</b> 0,57km <sup>2</sup>	<b>Explotación</b> Si	<b>Tamaño</b> Grande

**Ubicación Geográfica:** A NW del poblado de Manicaragua, al N de la carretera Cta Cara- Cumanayagua. La distancia que separa las d

**Caracte. de la Materia prima** Arcillas caoliniticas y montmorillonitas poco hasta muy plásticas y arcillas arenosas , arenas arcillosasa color pardo oscuro

**Geología** Son arcillas producto del intemperismo de los granitoides. En superficie y entre las capas aparecen capas de arcillas poco plásticas o arenas con alto cont de frag de feldespatos o cuarzo. En prof arcillas arenosas o grandioritas muy alteradas.

**Tectónica** No afectada.

**Cond.Téc-Min**

**Relieve**

**Observacione** Por características análogas aparecen como un solo Yacimiento Carranchola-La Moza (1146-1230)

**Perspectivida** Sin Datos

<b>Estadio</b> Exploración Detallada	<b>Génesis</b> Residual	<b>Tipo</b> Sin Datos
<b>Usos</b> Cerámica roja	<b>Provincia</b> Villa Clara	<b>Municipio</b> Manicaragua

<b>Alteraciones</b>	Au	0	0	0.4
Montmorillonización				
Caolinitización				
Cuarzificación				

<b>Mineralogía</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Pro</b>	<b>Un</b>
Carbonato	0.0	0.0	0.0	%
Clorita	0.0	0.0	0.0	%
Antfo	0.0	0.0	0.0	%
Mica	0.0	0.0	0.0	%
Feldespatos	0.0	0.0	0.0	%
Mineriales de Fe	0.0	0.0	0.0	%
Calcite	0.0	0.0	0.0	%
Montmorillonita	0.0	0.0	0.0	%
Halloysita	0.0	0.0	0.0	%
Cuarzo	0.0	0.0	0.0	%
Geothita	0.0	0.0	0.0	%

<b>Prop. física</b>	<b>Grado</b>	<b>Tipo Lit.tecno.</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Pro</b>	<b>Un.</b>
Absorción			6.4	47	0	%
Agua Plástica			4.5	7.3	0	%
Contracción	al secado		1.5	13	0	%
Contracción	tctal		9.9	22	0	%
Granulometría	< 0,05 mm		6.3	12	0	%

<b>Sector</b>	<b>Reservas</b>		<b>Recursos</b>			<b>Conce-sionado</b>	
	<b>Probadu</b>	<b>Probulte</b>	<b>Medido</b>	<b>Indicado</b>	<b>Inferido</b>	<b>UM</b>	<b>Entidad</b>
Carranchola - La Moza	0	0	12.65	1060.00	3320.11	x10(3)m <sup>3</sup>	No
Carranchola ( La Moza )	0	0	104.3	300.62	0	x10(3)m <sup>3</sup>	Sí Mat Const V. Clara

**Bibliografía**

Inf. Sistematización y Generalización de las materias primas No- Metalicas Prov. Villa Clara, Cienfuegos, S. 3ptimus.Terra 0108.	1950	Blanca Delgado Jorge
		Denis Pablo Coutin Correa Miroslav Marek Stanislav Magdalen Zulema González
Informe final Exploración Orientativa y Detallaca arcilla Carranchola-La Moza	1990	Ileana Orozco Pérez José L. Darias Luis Rivero María Angeles Alfonso
Balance de reservas 1999.	2000	ONRM

## ANEXO II. Técnicas de ensayos aplicadas a las probetas hechas en el laboratorio a nivel macro y microestructural.

### Métodos de ensayos a los especímenes a nivel macro.

Los ensayos realizados a las probetas después de su conformación y luego de la cocción fueron los siguientes:

#### Resistencia a compresión.

Este ensayo se realiza después de la cocción. El procedimiento a seguir es el que establece la **NC 359-2005: Ladrillos y bloques cerámicos de arcilla cocida— métodos de ensayo** el cual se describe a continuación: las probetas se sometieron a una fuerza que provocó su ruptura, medida a través de la prensa digital marca CONTROLS. Se obtuvo un valor de resistencia a compresión, a las 24 horas de haberse realizado la cocción.



Ensayo de resistencia a la compresión.

La fórmula empleada para el cálculo fue:

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

Donde:

R: resistencia de las muestras en MPa.

*Rup.* : Valor de fallo de la muestra en KN.

A: Área de la muestra en cm<sup>2</sup>.

#### Absorción.

Este ensayo se realiza con el objetivo de obtener la cantidad de agua que es capaz de absorber el material; se expresa en porcentaje. El procedimiento a seguir según la norma antes usada es el siguiente: se introducen las muestras en una estufa a temperatura de 105 a 110°C por espacio de 24 horas; posteriormente se dejan enfriar durante 5 minutos y se pesan, para determinar su masa seca.



Ensayo de absorción.

Se colocan las muestras en un recipiente y se cubren con agua hasta aproximadamente 5 cm por encima de estas; se mantienen sumergidas durante 24

horas, posteriormente se sacan y se secan superficialmente con un paño y seguidamente se pesan para determinar su masa (masa húmeda).

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

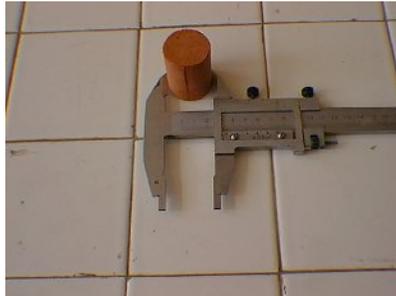
$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} * 100, (\%), \text{ donde:}$$

A: Absorción de agua de la muestra = (%).

$M_1$  : Masa seca de la muestra = (g).

$M_2$  : Masa húmeda de la muestra = (g).

### **Densidad Aparente.**



**Ensayo de densidad aparente.**

El objetivo principal de este ensayo es conocer la relación existente entre la masa y el volumen de las muestras; para ello se pesó cada una de las muestras después de realizada la quema y se midieron sus dimensiones para hallar su volumen. El cálculo de la densidad se hizo de la siguiente manera:

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

### **Métodos de ensayos a los especímenes a nivel micro.**

En la segunda etapa o estudio de la microestructura, con vistas a evaluar el comportamiento del material cerámico con adición de carbonato de calcio, la literatura reporta el uso combinado de diferentes métodos de ensayo, apoyados en herramientas modernas de la Ciencia de los Materiales. Cada una expresa criterios desde el punto de vista microscópico que en su conjunto permiten elaborar conclusiones acerca de las características del material objeto de estudio.

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 (SEM).
3. Microscopía electrónica de barrido con microanálisis de Rayos X (EDX).
4. Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP), con el fin de medir la porosidad del material.
5. Análisis Térmico Gravimétrico (TGA) en muestras quemadas con adición de carbonato de calcio.

#### **Análisis mineralógico por difracción de Rayos X (DRX):**

Los rayos-x son ondas electromagnéticas cuyas longitudes son 5000 a 10000 veces menores que la de la luz ordinaria; se obtienen cuando los electrones del cátodo son acelerados, debido a una diferencia de potencial y chocan contra el ánodo de un tubo de rayos-x. Se produce una radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida entre la radiación gamma ( $> 0.01\text{Å}$ ) y la ultravioleta ( $< 800\text{Å}$ ), siendo la magnitud de la longitud de onda del orden de  $10^{-10}\text{m}$  ( $1\text{Å}$ ). Este método de investigación representa una valiosa herramienta para estudiar sustancias cristalinas, debido a que cada sustancia cristalina produce su diagrama de difracción característico y único y la intensidad es proporcional al contenido de la fase en la mezcla.

Este ensayo se utilizó con el objetivo de identificar las fases formadas durante el tratamiento térmico de la arcilla debido a la adición de mineral Calcita. Se empleó un difractómetro Panalytical Xpert Pro MPD empleando radiación  $\text{CuK}\alpha$  con una rejilla de divergencia de  $0,5^\circ$ . Las muestras fueron escaneadas entre los  $4^\circ$  y los  $70^\circ$  ( $2\theta$ ), a un paso angular de  $0,017^\circ$  y un tiempo por paso de 80 segundos. Los difractogramas fueron procesados empleando el software X Pert HighScore Plus (2004). Se partió del supuesto teórico que se forman nuevas fases mineralógicas como la Anordhita y la Gelhenita (aluminosilicatos de Calcio) debido a la adición de piedra caliza como fuente de Carbonato de Calcio.

---

### **Microscopía electrónica de barrido con microanálisis de Rayos X (EDX).**

Cuando un haz de electrones primarios se encuentra con un cuerpo sólido, los electrones pueden ser reflejados (dispersos) o absorbidos, y se producen varias señales. Los electrones incidentes se dispersan dentro de un volumen del sólido. Los electrones secundarios y re-dispersos, Rayos X, electrones de Auger, y otras respuestas se producen. Se pueden usar entonces diferentes métodos de observación o micro-análisis en el objeto de estudio. Los métodos más frecuentes tienen que ver con la captura de electrones secundarios o re-dispersos, mientras que las técnicas analíticas más comunes se basan en la detección de los Rayos X; son los análisis de energía dispersiva de rayos X y análisis de frecuencia dispersiva. Los microscopios modernos están usualmente equipados con detectores EDX (energía dispersiva de rayos X)

La intensidad de los electrones reflejados es proporcional al número atómico de las sustancias en el objeto y la densidad del material. El nivel de energía de los electrones primarios está en el orden de 50 eV, y de esta forma son los electrones dispersos. El haz de electrones se forma en el emisor, y es sucesivamente condensado en los lentes proyectados y los lentes objetivo (magnéticos), hasta una dimensión entre 5-100 nm de diámetro en el plano del espécimen.

Cualquier objeto puede ser observado microscópicamente siempre que sea conductor de electrones. El contraste que se forma por las señales recogidas se origina en diferencias en la topografía y en la composición. Estos métodos son ampliamente usados en la investigación de materiales.

### **Porosimetría por Intrusión de Mercurio**

Se han desarrollado diferentes métodos para estudiar la estructura de poros de ciertos materiales; la mayoría de ellos se basa en la introducción de un fluido en el interior de la estructura del material bajo una cierta presión, el cual luego se retira.

La Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP) es un método ampliamente usado para medir la distribución del tamaño de poros y estimar la durabilidad de elementos aglomerados. Se basa en el hecho de que el líquido no humedece el sólido poroso, sino que solo entra a presión en sus poros.

Se considera que la presión ( $p$ ) que se requiere para introducir un líquido en un poro de diámetro ( $d$ ) es inversamente proporcional al diámetro de este poro. Se supone que

los poros son cilíndricos y se emplea la relación de Washburn (Laplace):

$$P = -4(\sigma) \cos(\theta)/d$$

Donde:

( $\sigma$ ) Tensión superficial del líquido

( $\theta$ ) Ángulo de contacto entre el líquido y la muestra.

La fracción de porosidad ocupada por poros que tienen diámetros en el intervalo ( $d; d+\delta d$ ) se deduce a partir del volumen de mercurio en el rango de presión ( $p; p+\delta p$ ); suponiendo que todos los poros están directamente conectados a la fuente de mercurio. Para los ensayos se empleó un Porosímetro tipo Phillips, el ángulo de contacto entre el mercurio y la muestra fue de  $141.3^\circ$ , con una tensión superficial del mercurio de 485 dyn/cm.

### **Análisis Térmico Gravimétrico (TGA).**

Para el análisis del comportamiento térmico mediante Análisis Termogravimétrico (ATG) se utilizó un instrumento Mettler-Toledo TGA/SDTA 851, a una velocidad de calentamiento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  desde los  $30$  hasta los  $1\ 000^\circ\text{C}$ . Las pérdidas de masa fueron calculadas utilizando el método de integración del área de pico.

### ANEXO III. Matriz, gráficos de tendencia y análisis de regresión (probetas)

#### Estadística descriptiva y chequeo del tamaño de muestra.

#### **Matriz del ensayo de Resistencia a la Compresión.**

Cantidad de muestras ensayadas (N) = 15

$$= \frac{(\quad)}{(\quad) \cdot (\quad)}$$

Precisión ( $\delta$ ) = 0.02     $\alpha$  (0.05) = 1.833

$$n_{\text{calc.}} \leq N_{\text{real}} = 15$$

Resistencia media (MPa)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (v)	% aditivo	Temperatura	Finura CaCO <sub>3</sub>	Muestras necesarias (n)
14.83	0.51	0.03	0%	800°C	0	8
17.32	0.29	0.02	0%	900°C	0	3
14.35	0.37	0.03	0%	1000°C	0	8
18.33	0.51	0.02	2%	800°C	< 300µm	4
16.02	0.32	0.02	5%	800°C	< 300µm	3
4.67	0.20	0.04	8%	800°C	< 300µm	15
17.69	0.47	0.03	2%	900°C	< 300µm	6
16.02	0.25	0.02	5%	900°C	< 300µm	3
7.87	0.29	0.04	8%	900°C	< 300µm	12
17.72	0.44	0.02	2%	1000°C	< 300µm	5
14.49	0.54	0.04	5%	1000°C	< 300µm	11
6.71	0.19	0.03	8%	1000°C	< 300µm	7
27.20	0.39	0.02	2%	800°C	< 150µm	3
18.74	0.33	0.02	5%	800°C	< 150µm	3
15.99	0.46	0.03	8%	800°C	< 150µm	7
21.57	0.43	0.02	2%	900°C	< 150µm	3
20.35	0.51	0.03	5%	900°C	< 150µm	5
13.67	0.51	0.04	8%	900°C	< 150µm	12
24.40	0.41	0.02	2%	1000°C	< 150µm	2
21.49	0.35	0.02	5%	1000°C	< 150µm	3
14.89	0.61	0.04	8%	1000°C	< 150µm	14
19.14	0.55	0.03	2%	800°C	< 74µm	7
18.44	0.47	0.02	5%	800°C	< 74µm	4
12.00	0.47	0.04	8%	800°C	< 74µm	13
17.86	0.49	0.03	2%	900°C	< 74µm	9
15.85	0.49	0.03	5%	900°C	< 74µm	8
14.49	0.37	0.03	8%	900°C	< 74µm	5
17.36	0.51	0.03	2%	1000°C	< 74µm	10
16.02	0.43	0.03	5%	1000°C	< 74µm	6
14.49	0.24	0.02	8%	1000°C	< 74µm	3

**Gráficos de tendencia:**

**Influencia de la finura del CaCO<sub>3</sub> en las propiedades físico – mecánicas de las muestras cerámicas**

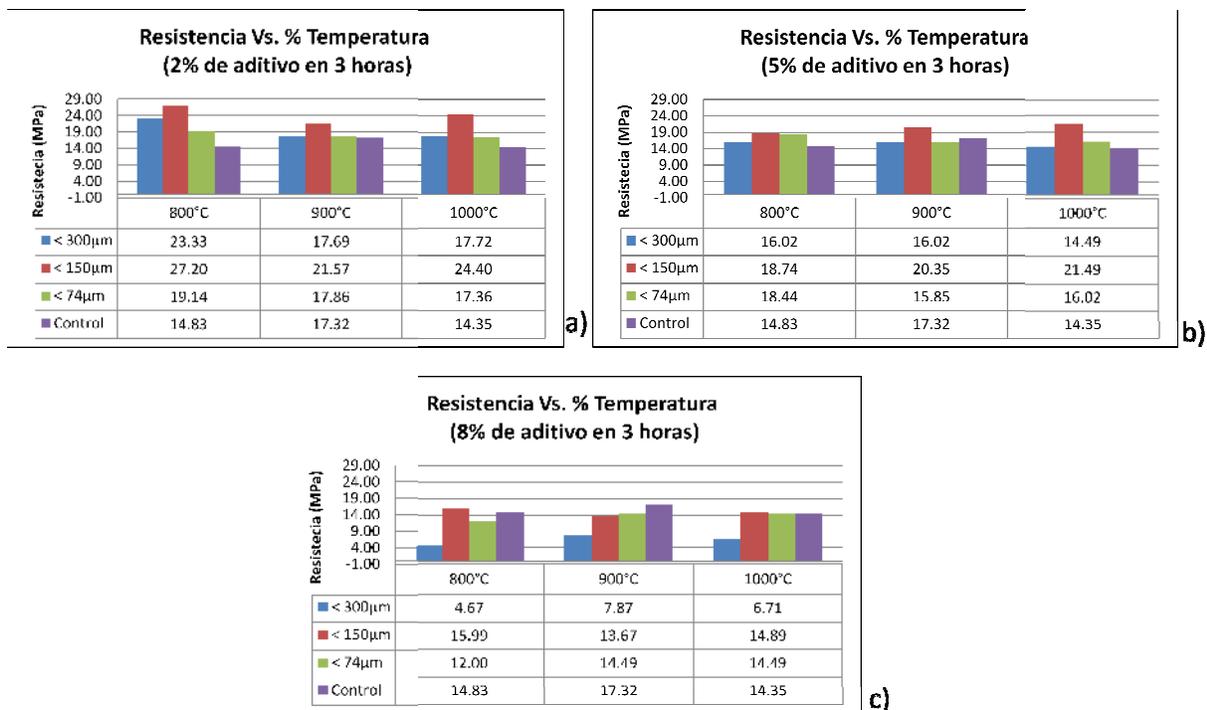


Figura 7. Gráfico de tendencia Temperatura VS. Resistencia, a) 2% de aditivo; b) 5% de aditivo; c) 8% de aditivo.

**Influencia de la temperatura y el % de CaCO<sub>3</sub> en las propiedades físico – mecánicas de las muestras cerámicas.**

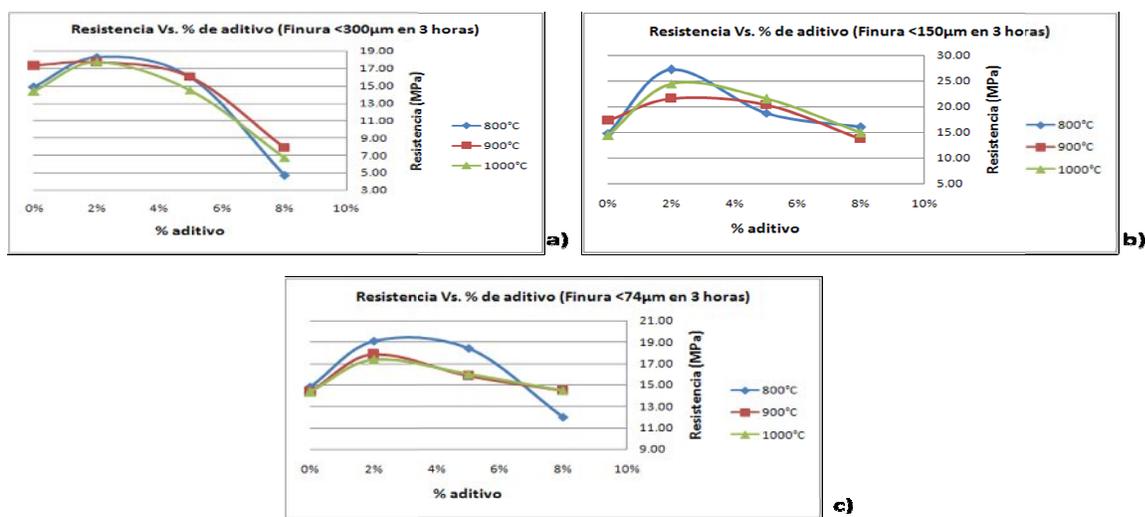


Figura 10. Gráfico de tendencia % de aditivo vs Resistencia a la Compresión, a) Finura <300µm; b) Finura <150µm; c) Finura <74µm.

**Análisis de regresión Resistencia:**

Resumen	
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9016
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.8129
R <sup>2</sup> ajustado	0.7739
Error típico	2.2904
Observaciones	30.0000

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5.0000	546.9643	109.3929	20.8523	5.02784 <sup>-8</sup>
Residuos	24.0000	125.9057	5.2461		
Total	29.0000	672.8700			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	18.9721	4.7702	3.9772	0.0006	9.1268	28.8173	9.1268	28.8173
% aditivo (X1)	-0.4571	0.8527	-0.5360	0.5969	-2.2170	1.3029	-2.2170	1.3029
% aditivo (X1) <sup>2</sup>	-0.1082	0.0865	-1.2506	0.2232	-0.2868	0.0704	-0.2868	0.0704
temperatura (°C) (X2)	-0.0042	0.0051	-0.8240	0.4181	-0.0148	0.0064	-0.0148	0.0064
Finura CaCO <sub>3</sub> (µm) (X3)	0.1197	0.0238	5.0212	0.0000	0.0705	0.1690	0.0705	0.1690
Finura CaCO <sub>3</sub> (µm) (X3) <sup>2</sup>	-0.0004	0.0001	-5.5430	0.0000	-0.0005	-0.0002	-0.0005	-0.0002

---

El análisis de regresión muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre resistencia y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Resistencia a la compresión} = 18.9721 + -0.4571 \% \text{ aditivo (X1)} + -0.1082\% \text{ aditivo (X1)}^2 + -0.0042\text{temperatura (}^\circ\text{C) (X2)} + 0.1197\text{Finura CaCO}_3 \text{ (X3)} + -0.0004\text{Finura CaCO}_3 \text{ (}\mu\text{m) (X3)}^2$$

Dado que el valor crítico de F en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95 %.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 81.29% de la variabilidad en resistencia. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferente números de variables independientes, es 77.39%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 2.28993.

**En este experimento es el % de adición el factor que más influye en la variable de respuesta,**

**Matriz del ensayo de Densidad.**

Cantidad de muestras ensayadas (N) = 15

$$= \frac{(\quad)}{(\quad) \cdot (\quad)}$$

Precisión ( $\delta$ ) = 0.03     $\alpha$  (0.05) = 1.833

$$n_{\text{calc.}} \leq N_{\text{real}} = 15$$

Densidad media (g/cm <sup>3</sup> )	Desviación estándar	Coefficiente de variación	% aditivo	Temperatura	Finura CaCO <sub>3</sub>	Muestras necesarias (n)
1.79	0.45	0.03	0%	800°C	0	4
1.81	0.24	0.02	0%	900°C	0	1
1.81	0.31	0.02	0%	1000°C	0	2
1.93	0.43	0.03	2%	800°C	< 300µm	3
1.88	0.35	0.02	5%	800°C	< 300µm	2
1.70	0.49	0.03	8%	800°C	< 300µm	4
1.90	0.32	0.02	2%	900°C	< 300µm	2
1.86	0.43	0.03	5%	900°C	< 300µm	3
1.76	0.24	0.02	8%	900°C	< 300µm	1
1.86	0.61	0.03	2%	1000°C	< 300µm	4
1.80	0.45	0.03	5%	1000°C	< 300µm	3
1.66	0.69	0.05	8%	1000°C	< 300µm	8
2.06	0.54	0.03	2%	800°C	< 150µm	3
1.87	0.42	0.02	5%	800°C	< 150µm	2
1.80	0.40	0.02	8%	800°C	< 150µm	2
1.98	0.42	0.03	2%	900°C	< 150µm	3
1.85	0.47	0.03	5%	900°C	< 150µm	3
1.82	0.35	0.02	8%	900°C	< 150µm	2
1.94	0.38	0.02	2%	1000°C	< 150µm	2
1.83	0.41	0.03	5%	1000°C	< 150µm	2
1.80	0.46	0.03	8%	1000°C	< 150µm	4
2.03	0.55	0.03	2%	800°C	< 74µm	3
1.83	0.41	0.02	5%	800°C	< 74µm	2
1.77	0.47	0.03	8%	800°C	< 74µm	3
1.91	0.61	0.04	2%	900°C	< 74µm	5
1.86	0.26	0.02	5%	900°C	< 74µm	1
1.75	0.21	0.01	8%	900°C	< 74µm	1
1.95	0.48	0.03	2%	1000°C	< 74µm	4
1.83	0.22	0.02	5%	1000°C	< 74µm	1
1.69	0.21	0.02	8%	1000°C	< 74µm	1

**Gráficos de tendencia:**

**Influencia de la finura del CaCO<sub>3</sub> en las propiedades físico – mecánicas de las muestras cerámicas**

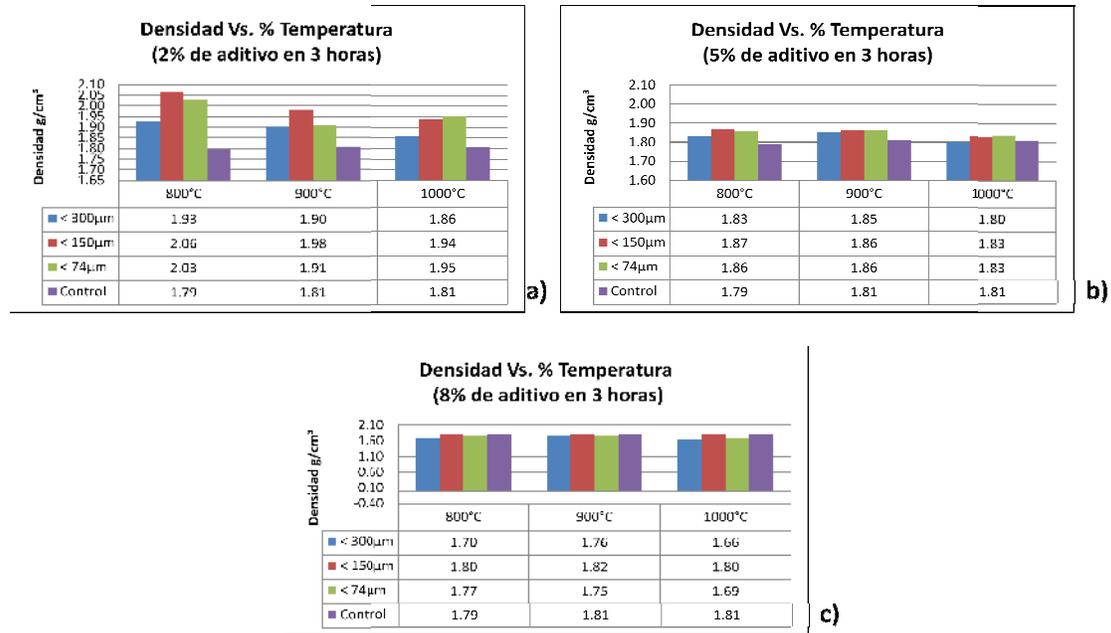


Figura 8. Gráfico de tendencia Temperatura VS Densidad, a) 2% de aditivo; b) 5% de aditivo; c) 8% de aditivo.

**Influencia de la temperatura y el % de CaCO<sub>3</sub> en las propiedades físico – mecánicas de las muestras cerámicas.**

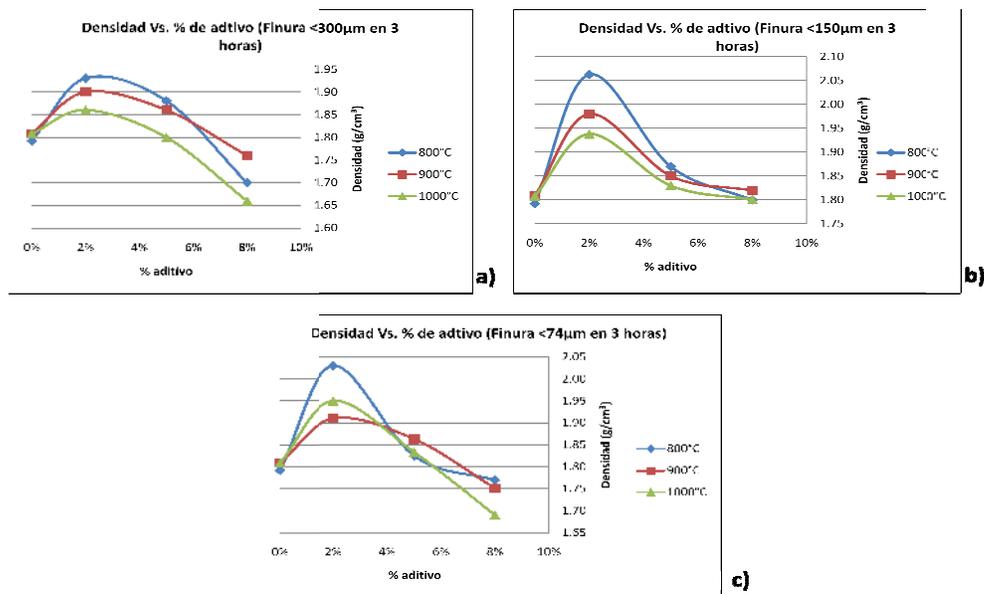


Figura 11. Gráfico de tendencia % de aditivo vs Densidad, a) Finura <300µm; b) Finura <150µm; c) Finura <74µm.

**Análisis de regresión Densidad**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.91905
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.84465
R <sup>2</sup> ajustado	0.81228
Error típico	0.04025
Observaciones	30.00000

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5.00000	0.21136	0.04227	26.09722	0.00000
Residuos	24.00000	0.03887	0.00162		
Total	29.00000	0.25023			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	2.04249	0.08382	24.36747	0.00000	1.86949	2.21548	1.86949	2.21548
% aditivo (X1)	-0.01441	0.01498	-0.96147	0.34591	-0.04533	0.01652	-0.04533	0.01652
% aditivo (X1) <sup>2</sup>	-0.00173	0.00152	-1.13623	0.26708	-0.00487	0.00141	-0.00487	0.00141
temperatura (°C) (X2)	-0.00024	0.00009	-2.71819	0.01200	-0.00043	-0.00006	-0.00043	-0.00006
Finura CaCO <sub>3</sub> (µm) (X3)	0.00226	0.00042	5.40422	0.00001	0.00140	0.00313	0.00140	0.00313
Finura CaCO <sub>3</sub> (µm) (X3) <sup>2</sup>	-0.00001	0.00000	-5.60872	0.00001	-0.00001	0.00000	-0.00001	0.00000

El análisis de regresión muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre densidad y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Densidad} = 2.04249 + -0.01441\% \text{ aditivo (X1)} + -0.00173\% \text{ aditivo (X1)}^2 + -0.00024 \text{ temperatura (}^\circ\text{C) (X2)} + 0.00226 \text{ Finura CaCO}_3 \text{ (X3)} + -0.00001 \text{ Finura CaCO}_3 \text{ (}\mu\text{m) (X3)}^2$$

Dado que el valor crítico de F en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95 %.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 84.44% de la variabilidad de la densidad. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 81,22%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0.04025.

**En este experimento es el % de adición el factor que más influye en la variable de respuesta,**

**Matriz del ensayo de absorción:****Cantidad de muestras ensayadas (N) = 15**

$$= \frac{(\quad)}{(\quad) \cdot (\quad)}$$

**Precisión ( $\delta$ ) = 0.03     $\alpha$  (0.05) = 1.833**

$$n_{\text{calc.}} \leq N_{\text{real}} = 15$$

Absorción media (%)	Desviación estándar	Coefficiente de variación	% aditivo	Temperatura	Finura CaCO <sub>3</sub>	Muestras necesarias (n)
11.70	0.39	0.03	0%	800°C	0	3
13.81	0.48	0.04	0%	900°C	0	6
14.85	0.35	0.02	0%	1000°C	0	1
13.58	0.41	0.03	2%	800°C	< 300µm	3
17.55	0.18	0.02	5%	800°C	< 300µm	1
20.54	0.28	0.02	8%	800°C	< 300µm	1
15.48	0.35	0.02	2%	900°C	< 300µm	2
17.55	0.32	0.02	5%	900°C	< 300µm	1
14.44	0.24	0.02	8%	900°C	< 300µm	1
13.35	0.36	0.03	2%	1000°C	< 300µm	3
14.34	0.24	0.02	5%	1000°C	< 300µm	1
25.39	0.15	0.02	8%	1000°C	< 300µm	1
10.56	0.65	0.04	2%	800°C	< 150µm	7
14.59	0.14	0.02	5%	800°C	< 150µm	1
14.84	0.60	0.06	8%	800°C	< 150µm	12
11.67	0.71	0.05	2%	900°C	< 150µm	9
14.44	0.40	0.03	5%	900°C	< 150µm	3
14.40	0.21	0.02	8%	900°C	< 150µm	1
13.88	0.27	0.02	2%	1000°C	< 150µm	1
15.43	0.28	0.02	5%	1000°C	< 150µm	1
15.55	0.25	0.02	8%	1000°C	< 150µm	1
12.31	0.43	0.03	2%	800°C	< 74µm	3
13.26	0.39	0.03	5%	800°C	< 74µm	3
14.69	0.20	0.02	8%	800°C	< 74µm	1
12.39	0.26	0.02	2%	900°C	< 74µm	1
12.61	0.34	0.03	5%	900°C	< 74µm	3
15.51	0.24	0.02	8%	900°C	< 74µm	1
13.50	0.20	0.02	2%	1000°C	< 74µm	1
15.57	0.36	0.02	5%	1000°C	< 74µm	2
13.58	0.31	0.02	8%	1000°C	< 74µm	2

**Gráficos de tendencia:**

**Influencia de la finura del CaCO<sub>3</sub> en las propiedades físico – mecánicas de las muestras cerámicas**

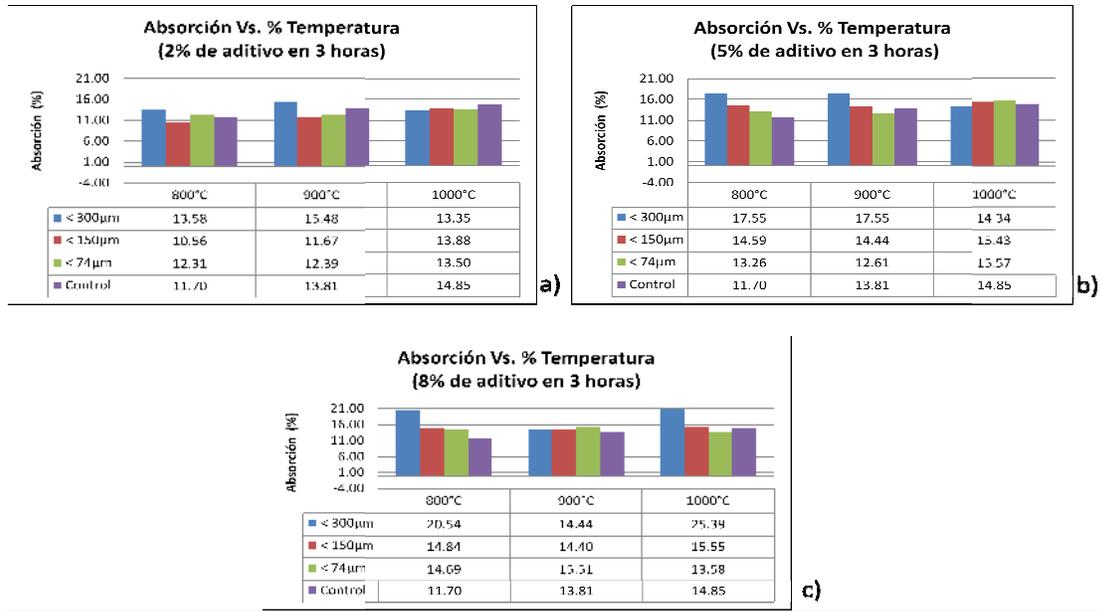


Figura 9. Gráfico de tendencia Temperatura vs Absorción, a) 2% de aditivo; b) 5% de aditivo; c) 8% de aditivo.

**Influencia de la temperatura y el % de CaCO<sub>3</sub> en las propiedades físico – mecánicas de las muestras cerámicas.**

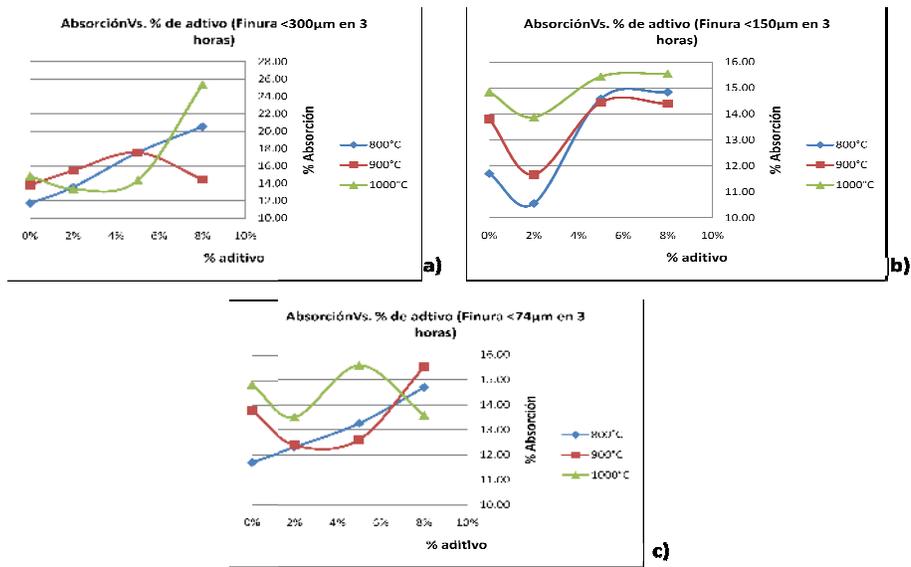


Figura 12. Gráfico de tendencia % de aditivo vs Absorción, a) Finura <300µm; b) Finura <150µm; c) Finura <74µm.

**Análisis de regresión Absorción:**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.73990
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.54745
R <sup>2</sup> ajustado	0.45317
Error típico	2.07439
Observaciones	30.00000

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5.00000	124.93268	24.98654	5.80667	0.00119
Residuos	24.00000	103.27388	4.30308		
Total	29.00000	228.20656			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	7.76500	4.32028	1.79734	0.08488	-1.15161	16.68161	-1.15161	16.68161
% aditivo (X1)	0.43983	0.77229	0.56951	0.57430	-1.15410	2.03376	-1.15410	2.03376
% aditivo (X1) <sup>2</sup>	0.01225	0.07838	0.15628	0.87712	-0.14952	0.17402	-0.14952	0.17402
temperatura (°C) (X2)	0.00591	0.00464	1.27439	0.21473	-0.00366	0.01548	-0.00366	0.01548
Finura CaCO <sub>3</sub> (µm) (X3)	-0.03062	0.02160	-1.41796	0.16906	-0.07520	0.01395	-0.07520	0.01395
Finura CaCO <sub>3</sub> (µm) (X3) <sup>2</sup>	0.00012	0.00006	2.03000	0.05358	0.00000	0.00023	0.00000	0.00023

El análisis de regresión muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre densidad y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Densidad} = 7.76500 + 0.43983\% \text{ aditivo (X1)} + 0.01225 \% \text{ aditivo (X1)}^2 + 0.00591 \text{ temperatura (}^\circ\text{C) (X2)} + -0.03062 \text{ Finura CaCO}_3 \text{ (X3)} + 0.00012 \text{ Finura CaCO}_3 \text{ (}\mu\text{m) (X3)}^2$$

Dado que el valor crítico de F en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95 %.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 54,74 % de la variabilidad del % absorción. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 45,32%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0.04025.

**En este experimento es el % de adición el factor que más influye en la variable de respuesta,**

---

## **ANEXO IV: Técnicas de ensayos de durabilidad realizados a las muestras de laboratorio.**

### ***Ensayos de envejecimiento acelerado.***

#### **Ciclos de humedad-sequedad.**

En este ensayo se simula la alternancia de días secos y húmedos, y también los cambios de temperatura y humedad relativa entre el día y la noche. Se hace con el objetivo de estudiar los efectos de la humedad y las expansiones y contracciones que resultan de los cambios de temperatura sobre los ladrillos. Los daños se atribuyen fundamentalmente a la acción disgregadora y disolvente del agua. Según lo establecido en la norma **UNE 7-136-58**, cada muestra se somete a treinta ciclos de humedad-sequedad, donde cada ciclo de 24 horas de duración consta de tres fases:

- inmersión en agua durante 16 horas a temperatura ambiente (20 °C)
- desecación forzada en estufa a 100 °C durante 6 horas
- enfriamiento a temperatura ambiente (20 °C) durante 2 horas.

Los resultados del ensayo se miden por la pérdida de peso de los ladrillos, por la presencia de fisuras, grietas, desconchados o desintegración de las muestras.

#### **Ensayo de cristalización de sales.**

El ensayo de cristalización de sales estudia los efectos dañinos de las sales solubles que están presentes en el agua y que pueden cristalizar en los poros y fisuras del ladrillo. Según el procedimiento establecido en la norma **UNE 7-136-58**; las muestras se someten a un total de 15 ciclos de 24 horas cada uno. Cada ciclo consta de tres fases:

- Inmersión en solución de  $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  al 14% a 20 °C durante 4 horas
- Secado en estufa a 100 °C durante 16 horas
- Enfriamiento a temperatura ambiente (20 °C) durante 4 horas.

Se utiliza el sulfato de sodio decahidratado por su elevada capacidad de aumentar su volumen, pues la transición de la fase anhidra a la fase hidratada viene acompañada por un aumento de volumen de hasta 240 veces.

Los resultados de este ensayo se miden por la pérdida de peso, el aumento de volumen de las muestras y su posible desintegración total o parcial después de los 10 ciclos. Es necesario aclarar que en el caso específico de este ensayo, los ladrillos se someten a condiciones extremas, puesto que se trata de una prueba sumamente

agresiva; por tanto, su análisis es eminentemente comparativo y debido a estas condiciones a las que se someten los ladrillos los resultados se interpretan como índices a través de los cuáles se estima la durabilidad del material.

## ANEXO V: Matriz, gráficos de tendencia y Prueba de hipótesis (Ladrillos)

Estadística descriptiva y chequeo del tamaño de muestra.

Matriz para la determinación del tiempo de secado en función de la humedad.

Cantidad de ladrillos ensayados diariamente (hasta humedad de secado  $\leq 6\%$ ) (N) = 10

Nreal. = 10

GL=n-1 = 9

ta 90% = 1.38

Precisión ( $\delta$ ) = 0.06

$$= \frac{(\quad)}{(\quad) \cdot (\quad)}$$

n<sub>calc.</sub>  $\leq$  N<sub>real</sub> = 10

Dias	Aditivo %	Humedad media (%)	Contracción volumétrica Media (%)	Desviación estándar	Coefficiente de Variación (v)	Muestra (n)
1	0%	15.83	5.71	0.37	0.02	1
2	0%	13.79	10.43	0.42	0.03	1
3	0%	12.93	12.39	0.72	0.06	2
4	0%	11.57	14.26	0.91	0.08	3
5	0%	10.86	16.03	0.87	0.08	3
6	0%	8.54	16.90	0.73	0.09	4
7	0%	6.62	17.26	0.56	0.08	4
8	0%	5.6	18.73	0.72	0.13	9
1	2%	14.86	7.39	0.55	0.04	1
2	2%	12.95	10.42	0.5	0.04	1
3	2%	8.73	12.65	0.43	0.05	1
4	2%	5.72	16.14	0.5	0.09	4
5	2%	5.08	18.29	0.59	0.12	7

$$\%Humedad = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

siendo:  $m_i$ : masa inicial $m_f$ : masa final

$$\%ContracciónVol = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100$$

siendo:  $V_i$ : volumen inicial $V_f$ : volumen final

**Gráficos de tendencia:**

- **Influencia del  $\text{CaCO}_3$  en el proceso de secado de ladrillos de cerámica roja.**

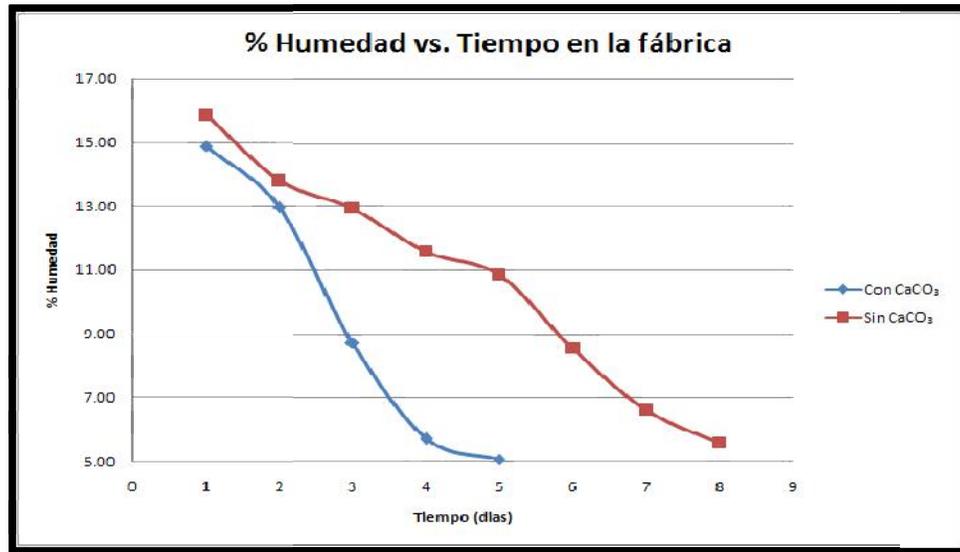


Figura 28. Gráfico de tendencia de % Humedad vs. Tiempo de secado de los ladrillos en la fábrica.

- **Influencia del  $\text{CaCO}_3$  en la contracción durante el secado de los ladrillos.**

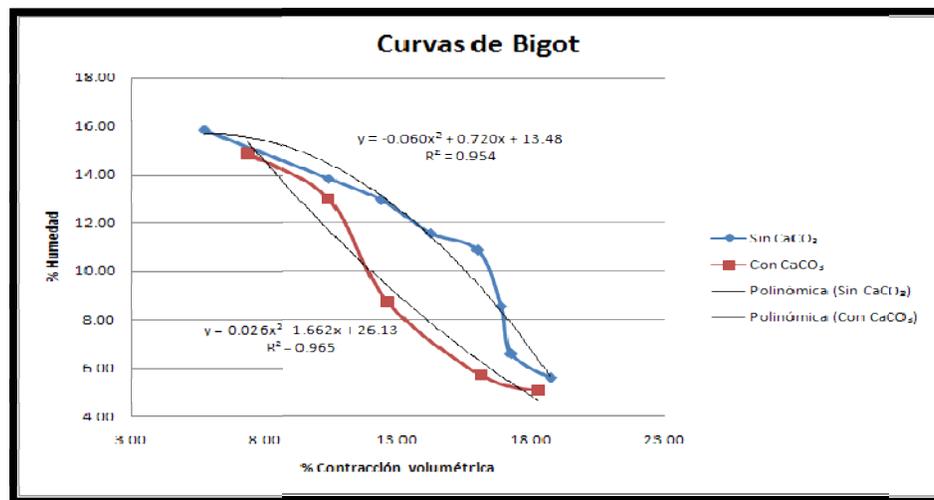


Figura 30. Gráfico de % de Humedad vs. % Contracción volumétrica (curva de Bigot).

**Comparación de muestras de ladrillos con y sin adición de  $\text{CaCO}_3$  con respecto al % de humedad medio para un tiempo de secado de 5 días**

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales

Tiempo (días)	Cant. de ladrillos	% Humedad	
		Ladrillos con $\text{CaCO}_3$	Ladrillos sin $\text{CaCO}_3$
5	1	5.3	8.3
	2	5.8	10.9
	3	4.9	9.7
	4	5.5	10.7
	5	5.7	10.7
	6	6.1	11.0
	7	5.4	10.1
	8	5.1	9.7
	9	5.7	10.5
	10	5.7	9.5

Resumen Estadístico

	Con carbonato	Sin Carbonato
Frecuencia	10	10
Media	5.52	10.11
Varianza	0.126222	0.694333
Desviación típica	0.355278	0.833267
Mínimo	4.9	8.3
Máximo	6.1	11.0
Rango	1.2	2.7
Asimetría tipi.	-0.360817	-1.43381
Curtosis típificada	-0.113778	0.767157

-----

Esta tabla muestra el resumen estadístico para las dos muestras de datos. Donde pueden observarse que las diferencias entre las dos muestras son estadísticamente significativas. De particular interés está la asimetría estandarizada y la curtosis estandarizada que puede usarse para determinar si las muestras proceden de distribuciones normales. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican salidas significativas de normalidad que tendería a invalidar las pruebas que comparan las desviaciones normales. En este caso, ambos valores de asimetría estandarizada están dentro del rango esperado. Ambos valores de curtosis estandarizada están dentro del rango esperado.

## Comparación entre las Medias:

Comparación de Medias

```
95.0% intervalo de confianza para la media de Con carbonato: 5.52 +/- 0.254151 [5.26585,5.77415]
95.0% intervalo de confianza para la media de Sin Carbonato: 10.11 +/- 0.596084 [9.51392,10.7061]
95.0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:
suponiendo varianzas iguales: -4.59 +/- 0.601818 [-5.19182,-3.98818]
```

contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alt.: media1 <> media2

suponiendo varianzas iguales: t = -16.0235 P-Valor = 4.25038E-12

Al ejecutar un T de Student para comparar las medias de las dos muestras. Se establecen los intervalos de confianza o los límites para cada media y para la diferencia entre las medias. De particular interés está el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde 5.19182 hasta -3.98818. Dado que el intervalo no contiene el valor 0.0, existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95.0%.

También puede aplicarse un t-test para probar una hipótesis específica sobre la diferencia entre las medias de las poblaciones de las que proceden las dos muestras. En este caso, el test se ha realizado para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0.0 frente a la hipótesis alternativa en la que la diferencia no es igual 0.0. Puesto que el p-valor calculado es inferior a 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula en favor de la alternativa.

**Comparación entre las desviaciones típicas:**

## Comparación de Desviaciones Típicas

	Con carbonato	Sin Carbonato
Desviación Típica	0.355278	0.833267
Varianza	0.126222	0.694333
GL	9	9

Cociente de varianzas = 0.181789

## 95.0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de Con carbonato: [0.244372, 0.648599]

Desviación Típica de Sin Carbonato: [0.57315, 1.52122]

Cociente de varianzas: [0.0451538, 0.731882]

## Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 <> \sigma_2$

F = 0.181789 P-Valor = 0.0182212

Al ejecutar un F-test para comparar las varianzas de las dos muestras. Se establecen los intervalos de confianza o los límites para cada desviación típica y para el ratio de varianzas. De particular interés está el intervalo de confianza para el ratio de las varianzas, el cual se extiende desde 0.0451538 hasta 0.731882. Dado que el intervalo no contiene el valor 1.0, existe diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones típicas de las dos muestras para un nivel de confianza del 95.0%.

También puede utilizarse un F-test para probar una hipótesis específica sobre las desviaciones típicas de las poblaciones de las que proceden las dos muestras. En este caso, el test se ha realizado para determinar si el ratio de las desviaciones típicas son iguales 1.0 frente a la hipótesis alternativa en la que el ratio no es igual 1.0. Puesto que el p-valor calculado es inferior a 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula en favor de la alternativa.

## ANEXO VI: Matriz, gráficos de tendencia y Prueba de hipótesis (Ladrillos)

Estadística descriptiva.Tabla. Resultados del ensayo de Resistencia a la compresión para ladrillos con y sin adición de CaCO<sub>3</sub>.

Muestra	Resistencia 0 % CaCO <sub>3</sub> (MPa)	Resistencia 2 % CaCO <sub>3</sub> (MPa)
1	10,10	11,85
2	9,80	11,57
3	9,80	11,19
4	9,10	11,28
5	9,80	10,96
6	10,60	11,83
7	9,90	11,20
8	9,60	11,50
9	10,20	11,37
10	9,90	10,97
<b>Resistencia media (MPa)</b>	<b>9,88</b>	<b>11,37</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,39</b>	<b>0,32</b>
<b>Coefficiente de variación</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>

Tabla. Resultados del ensayo de Densidad para ladrillos con y sin adición de CaCO<sub>3</sub>.

Muestra	Densidad 0% CaCO <sub>3</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad 2% CaCO <sub>3</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
1	1,95	1,9
2	1,91	1,91
3	1,86	1,95
4	1,94	1,93
5	1,91	1,98
6	1,90	1,98
7	1,88	1,97
8	1,96	1,95
9	1,95	1,96
10	1,93	1,97
<b>Densidad media (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>1,90</b>	<b>1,95</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>
<b>Coefficiente de variación</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>

Tabla. Resultados del ensayo de Absorción para ladrillos con y sin adición de  $\text{CaCO}_3$ .

Muestra	Absorción 0% $\text{CaCO}_3$ (%)	Absorción 2 % $\text{CaCO}_3$ (%)
1	9,63	11,33
2	12,10	10,17
3	11,69	10,95
4	10,79	10,99
5	11,85	10,43
6	11,75	10,89
7	11,11	11,17
8	9,66	11,84
9	12,15	11,05
10	12,17	11,92
<b>Absorción media (%)</b>	<b>11,29</b>	<b>11,07</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,97</b>	<b>0,55</b>
<b>Coefficiente de variación</b>	<b>0,09</b>	<b>0,05</b>

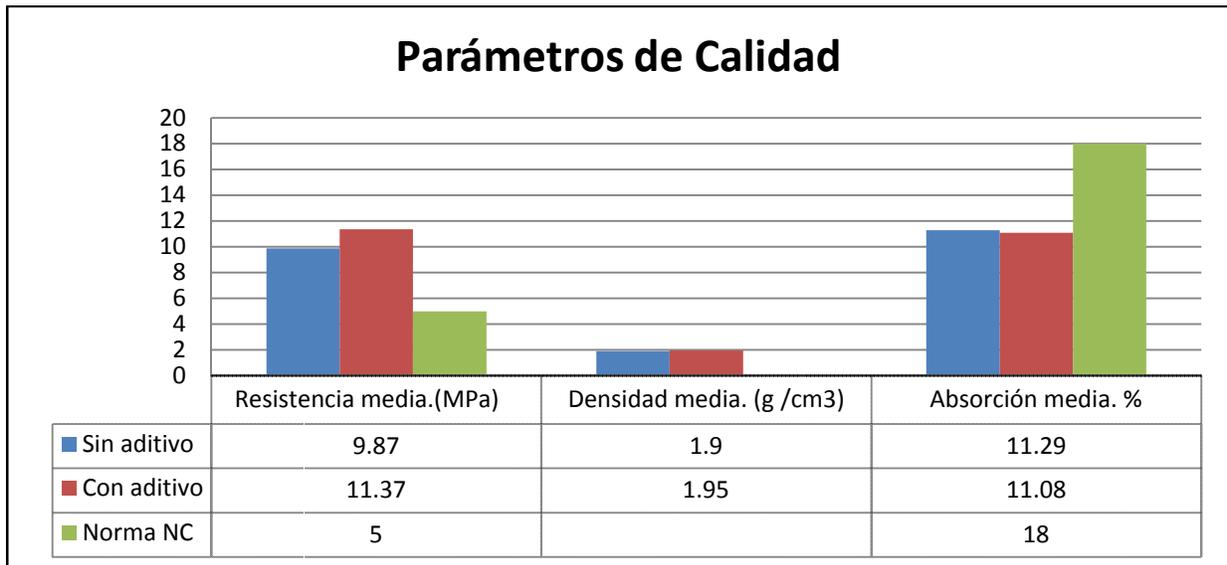


Figura . Comparación de los parámetros de calidad de ladrillos obtenidos en la fábrica con la norma cubana

**Comparación de muestras de ladrillos con y sin adición de CaCO<sub>3</sub>.**• ***Resistencia a la compresión***

## Resumen Estadístico

	con carbonato	sin carbonato
-----	-----	-----
Frecuencia	10	10
Media	11.372	9.88
Varianza	0.0995956	0.152889
Desviación típica	0.315588	0.39101
Mínimo	10.96	9.1
Máximo	11.85	10.6
Rango	0.89	1.5
Asimetría tipi.	0.389926	-0.244028
Curtosis típicada	-0.599774	1.16472
-----	-----	-----

Esta tabla muestra el resumen estadístico para las dos muestras de datos. Donde pueden observarse que las diferencias entre las dos muestras son estadísticamente significativas. De particular interés está la asimetría estandarizada y la curtosis estandarizada que puede usarse para determinar si las muestras proceden de distribuciones normales. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican salidas significativas de normalidad que tendería a invalidar las pruebas que comparan las desviaciones normales. En este caso, ambos valores de asimetría estandarizada están dentro del rango esperado. Ambos valores de curtosis estandarizada están dentro del rango esperado.

## Comparación de Medias

-----

95.0% intervalo de confianza para la media de con carbonato: 11.372 +/- 0.225758 [11.1462,11.5978]  
 95.0% intervalo de confianza para la media de sin carbonato: 9.88 +/- 0.279712 [9.60029,10.1597]  
 95.0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:  
 suponiendo varianzas iguales: 1.492 +/- 0.333832 [1.15817,1.82583]

## contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alt.: media1 <> media2

suponiendo varianzas iguales: t = 9.3897 P-Valor = 2.33265E-8

Al ejecutar un T de Student para comparar las medias de las dos muestras. Se establecen los intervalos de confianza o los límites para cada media y para la diferencia entre las medias. De particular interés está el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde 1.15817 hasta 1.82583. Dado que el intervalo no contiene el valor 0.0, existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95.0%.

También puede aplicarse un t-test para probar una hipótesis específica sobre la diferencia entre las medias de las poblaciones de las que proceden las dos muestras. En este caso, el test se ha realizado para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0.0 frente a la hipótesis alternativa en la que la diferencia no es igual 0.0. Puesto que el p-valor calculado es inferior a 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula en favor de la alternativa.

#### Comparación de Desviaciones Típicas

	con carbonato	sin carbonato
Desviación Típica	0.315588	0.39101
Varianza	0.0995956	0.152889
GL	9	9

Cociente de varianzas = 0.651424

#### 95.0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de con carbonato: [0.217072,0.57614]

Desviación Típica de sin carbonato: [0.26895,0.713832]

Cociente de varianzas: [0.161805,2.62263]

#### Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 <> \sigma_2$

F = 0.651424 P-Valor = 0.533275

Al ejecutar un F-test para comparar las varianzas de las dos muestras. Se establecen los intervalos de confianza o los límites para cada desviación típica y para el ratio de varianzas. De particular interés está el intervalo de confianza para el ratio de las varianzas, el cual se extiende desde 0.161805 hasta 2.62263. Dado que el intervalo no contiene el valor 1.0, existe diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones típicas de las dos muestras para un nivel de confianza del 95.0%.

También puede utilizarse un F-test para probar una hipótesis específica sobre las desviaciones típicas de las poblaciones de las que proceden las dos muestras. En este caso, el test se ha realizado para determinar si el ratio de las desviaciones típicas son iguales 1.0 frente a la

hipótesis alternativa en la que el ratio no es igual 1.0. Puesto que el p-valor calculado es inferior a 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula en favor de la alternativa.

- **Densidad.**

#### Resumen Estadístico

	con carbonato	sin carbonato
Frecuencia	10	10
Media	1.95	1.919
Varianza	0.0008	0.00107667
Desviación típica	0.0282843	0.0328126
Mínimo	1.9	1.86
Máximo	1.98	1.96
Rango	0.08	0.1
Asimetría tipi.	-0.998453	-0.679697
Curtosis típicada	-0.397192	-0.436431

Esta tabla muestra el resumen estadístico para las dos muestras de datos. Donde pueden observarse que las diferencias entre las dos muestras son estadísticamente significativas. De particular interés está la asimetría estandarizada y la curtosis estandarizada que puede usarse para determinar si las muestras proceden de distribuciones normales. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican salidas significativas de normalidad que tendería a invalidar las pruebas que comparan las desviaciones normales. En este caso, ambos valores de asimetría estandarizada están dentro del rango esperado. Ambos valores de curtosis estandarizada están dentro del rango esperado.

#### Comparación de Medias

```

95.0% intervalo de confianza para la media de con carbonato: 1.95 +/- 0.0202334 [1.92977,1.97023]
95.0% intervalo de confianza para la media de sin carbonato: 1.919 +/- 0.0234728 [1.89553,1.94247]
95.0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:
suponiendo varianzas iguales: 0.031 +/- 0.0287809 [0.0022191,0.0597809]

```

#### contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 - media2

Hipótesis alt.: media1 <> media2

suponiendo varianzas iguales: t = 2.26291 P-Valor = 0.0362418

Al ejecutar un T de Student para comparar las medias de las dos muestras. Se establecen los intervalos de confianza o los límites para cada media y para la diferencia entre las medias. De particular interés está el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde 0.0022191 hasta 0.0597809. Dado que el intervalo no contiene el valor 0.0, existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95.0%.

También puede aplicarse un t-test para probar una hipótesis específica sobre la diferencia entre las medias de las poblaciones de las que proceden las dos muestras. En este caso, el test se ha realizado para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0.0 frente a la hipótesis alternativa en la que la diferencia no es igual 0.0. Puesto que el p-valor calculado es inferior a 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula en favor de la alternativa.

#### Comparación de Desviaciones Típicas

	con carbonato	sin carbonato
Desviación Típica	0.0282843	0.0328126
Varianza	0.0008	0.00107667
GL	9	9

Cociente de varianzas = 0.743034

#### 95.0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de con carbonato: [0.0194549,0.0516361]

Desviación Típica de sin carbonato: [0.0225697,0.059903]

Cociente de varianzas: [0.184559,2.99145]

#### Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 0.743034 P-Valor = 0.665327

Al ejecutar un F-test para comparar las varianzas de las dos muestras. Se establecen los intervalos de confianza o los límites para cada desviación típica y para el ratio de varianzas. De particular interés está el intervalo de confianza para el ratio de las varianzas, el cual se extiende desde 0.184559 hasta 2.99145. Dado que el intervalo contiene el valor 1.0, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones típicas de las dos muestras para un nivel de confianza del 95.0%.

También puede utilizarse un F-test para probar una hipótesis específica sobre las desviaciones típicas de las poblaciones de las que proceden las dos muestras. En este caso, el test se ha realizado para determinar si el ratio de las desviaciones típicas son iguales 1.0 frente a la

hipótesis alternativa en la que el ratio no es igual 1.0. Puesto que el p-valor calculado no es inferior a 0.05, no podemos rechazar la hipótesis nula.

- **Absorción.**

#### Resumen Estadístico

	con carbonato	sin carbonato
Frecuencia	10	10
Media	11.074	11.29
Varianza	0.296227	0.950022
Desviación típica	0.544267	0.974691
Mínimo	10.17	9.63
Máximo	11.92	12.17
Rango	1.75	2.54
Asimetría tipi.	0.0645223	-1.32641
Curtosis tipificada	-0.0681398	-0.231378

Esta tabla muestra el resumen estadístico para las dos muestras de datos. Donde pueden observarse que las diferencias entre las dos muestras son estadísticamente significativas. De particular interés está la asimetría estandarizada y la curtosis estandarizada que puede usarse para determinar si las muestras proceden de distribuciones normales. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican salidas significativas de normalidad que tendería a invalidar las pruebas que comparan las desviaciones normales. En este caso, ambos valores de asimetría estandarizada están dentro del rango esperado. Ambos valores de curtosis estandarizada están dentro del rango esperado.

#### Comparación de Medias

95.0% intervalo de confianza para la media de con carbonato: 11.074 +/- 0.389346 [10.6847,11.4633]  
 95.0% intervalo de confianza para la media de sin carbonato: 11.29 +/- 0.697253 [10.5927,11.9873]  
 95.0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:  
 suponiendo varianzas iguales: -0.216 +/- 0.741674 [-0.957674,0.525674]

contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alt.: media1 <> media2

suponiendo varianzas iguales: t = -0.611859 P-Valor = 0.548282

Al ejecutar un T de Student para comparar las medias de las dos muestras. Se establecen los intervalos de confianza o los límites para cada media y para la diferencia entre las medias. De particular interés está el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde 5.19182 hasta -3.98818. -0.957674 hasta 0.525674. Dado que el intervalo contiene el valor 0.0, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95.0%.

También puede aplicarse un t-test para probar una hipótesis específica sobre la diferencia entre las medias de las poblaciones de las que proceden las dos muestras. En este caso, el test se ha realizado para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0.0 frente a la hipótesis alternativa en la que la diferencia no es igual 0.0. Puesto que el p-valor calculado no es inferior a 0.05, no podemos rechazar la hipótesis nula.

#### Comparación de Desviaciones Típicas

	con carbonato	sin carbonato
Desviación Típica	0.544267	0.974691
Varianza	0.296227	0.950022
GL	9	9

Cociente de varianzas = 0.31181

#### 95.0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de con carbonato: [0.374366, 0.99362]

Desviación Típica de sin carbonato: [0.670427, 1.77941]

Cociente de varianzas: [0.0774493, 1.25535]

#### Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 0.31181 P-Valor = 0.0975606

Al ejecutar un F-test para comparar las varianzas de las dos muestras. Se establecen los intervalos de confianza o los límites para cada desviación típica y para el ratio de varianzas. De particular interés está el intervalo de confianza para el ratio de las varianzas, el cual se extiende desde 0.0774493 hasta 1.25535. Dado que el intervalo contiene el valor 1.0, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones típicas de las dos muestras para un nivel de confianza del 95.0%.

También puede utilizarse un F-test para probar una hipótesis específica sobre las desviaciones típicas de las poblaciones de las que proceden las dos muestras. En este caso, el test se ha realizado para determinar si el ratio de las desviaciones típicas son iguales 1.0 frente a la

hipótesis alternativa en la que el ratio no es igual 1.0. Puesto que el p-valor calculado no es inferior a 0.05, no podemos rechazar la hipótesis nula.

**Prueba de Hipótesis para comparar medias con varianza desconocida, para el consumo de Fuel Oil.**

Ho:  $\mu = \mu_0$

H1:  $\mu \neq \mu_0$

Ho Los parámetros de consumo de combustible de las muestras con aditivos son = a las muestras sin aditivo.

H1 Los parámetros de consumo de combustible de las muestras con aditivos son  $\neq$  a las muestras sin aditivo.

$\mu_0$  Valor medio de consumo de combustible de ladrillos de cerámica con aditivo.

$\mu$  Valor medio de consumo de combustible de ladrillos de cerámica sin aditivo.

**Análisis del combustible**

Muestras	% de aditivo	Consumo de combustible	Desviación Estándar	
Muestras con CaCO <sub>3</sub>	2	2802		$\mu_0$
Muestras sin CaCO <sub>3</sub>	0	3569	434,1	Y

n=12

Y	$\mu_0$	S
3398,4	2618	434,1

**Prueba t de Student**

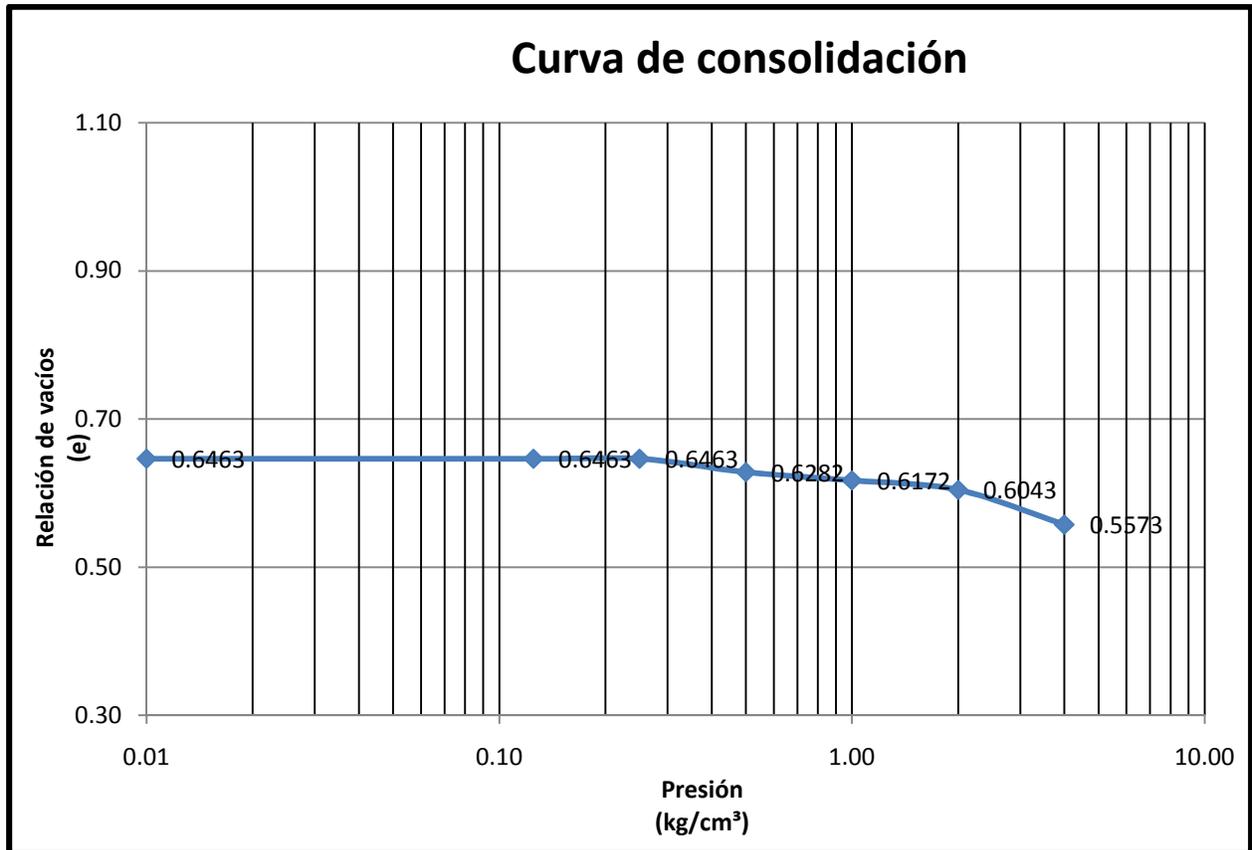
**to**  
7,589

$$= \frac{-}{\sqrt{}}$$

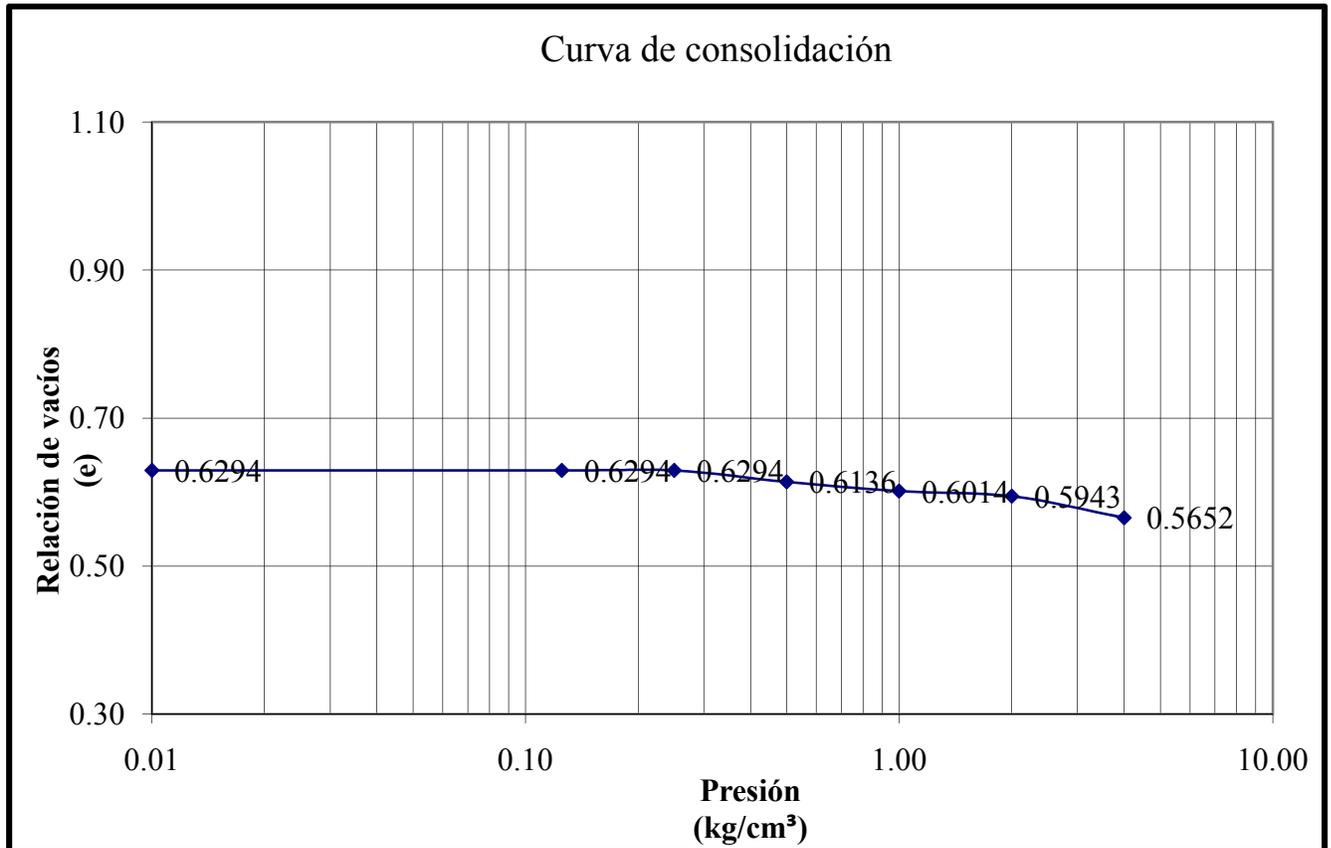
$\alpha$	Grados de libertad
0,05	11,00

**ta**  
1,796

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DATOS INICIALES Y FINALES.					
Obra:	Combinado Cerámico de Manicaragua			Registro:	
Cala:				Profundidad:	
Aparato:	3	Anillo No:	3m	Fecha:	
Operador:	Odalys		Calculista:	Yoania	
Humedad Inicial					
Pesafiltro No	28	16	Natural		Remoldeada
S. Húmedo	91.67	86.95	Sin inundar		
S. Seco	90.24	85.70	Inundada al inicio		
Tara	21.95	21.31	Inundar en la carga de		kg
W	2.09	1.94	Carga geológica		kg
W promedio	2.0		Indicador de esfera.	0.01	mm
Datos de compactación					
W	16.0	%	Peso específico (gs)	2.63	
$\gamma_f$	1.879	g/cm <sup>3</sup>	s inicial		kg
$\gamma_d$	1.620	g/cm <sup>3</sup>	s máx		kg
Hinchamiento libre					
Sin hinchamiento					
Datos		Iniciales		Finales	
Wh + tara		221.19		217.46	
Ws + tara				200.48	
Tara		83.68		83.68	
Wh=(Wh+tara)-tara		137.51		133.78	
Ws=(Ws+tara)-tara				116.8	
Ww=Wh-Ws		20.71		16.98	
W=(Ww/Ws)*100		17.73		14.54	
Altura (h)		1.90		1.80	
Dh				0.1027	
Área (A)		38.48			
Volumne (V=A*h)		73.11		69.16	
gf=Wh/V		1.881		1.934	
gd=Ws/V		1.598		1.689	
e=(gs/gd)-1		0.646		0.557	
S=(W*gs)/e		72		69	
Hs=H/(1+e)		1.1541		1.1541	
Descripción:	Material Arcilloso con CaCO <sub>3</sub>				

**Curva de consolidación Material Arcilloso con  $\text{CaCO}_3$ .**

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DATOS INICIALES Y FINALES.					
Obra:	Combinado cerámico de Manicaragua			Registro:	
Cala:				Profundidad:	
Aparato:	10	Anillo No:	33m	Fecha:	
Operador:	Odalys		Calculista:	Yoania	
Humedad Inicial					
Pesafiltro No	28	16	Natural		Remoldeada
S. Húmedo	91.67	86.95	Sin inundar		
S. Seco	90.24	85.70	Inundada al inicio		
Tara	21.95	21.31	Inundar en la carga de		kg
W	2.09	1.94	Carga geológica		kg
W promedio	2.0		Indicador de esfera.	0.01	mm
Datos de compactación					
W	16.0	%	Peso específico (gs)	2.63	
$\gamma_f$	1.948	$g/cm^3$	s inicial		kg
$\gamma_d$	1.680	$g/cm^3$	s máx		kg
Hinchamiento libre					
Sin hinchamiento					
Datos			Iniciales	Finales	
Wh + tara			224.85	220.13	
Ws + tara				200.47	
Tara			82.46	82.46	
Wh=(Wh+tara)-tara			142.39	137.67	
Ws=(Ws+tara)-tara				118.01	
Ww=Wh- Ws			24.38	19.66	
W=(Ww/Ws)*100			20.66	16.66	
Altura (h)			1.90	1.83	
Dh				0.0748	
Área (A)			38.48		
Volumne (V=A*h)			73.11	70.23	
$g_f=Wh/V$			1.948	1.960	
$g_d=Ws/V$			1.614	1.680	
$e=(g_s/g_d)-1$			0.629	0.565	
$S=(W*g_s)/e$			86	78	
$H_s=H/(1+e)$			1.1661	1.1661	
Descripción:	Material Arcilloso				

**Curva de consolidación Material Arcilloso con  $\text{CaCO}_3$ .**



**EMPRESA NACIONAL DE INVESTIGACIONES APLICADAS.  
INVECONS**

Dirección General y Unidades Empresariales de Base

**INFORME DE ENSAYO**

**UIC Villa Clara**  
Carretera central # 441 Rto Birninia.  
Codigo Postal: 50100

Cod: \_\_\_\_\_

---

<b>NORMA CUBANA</b>	<b>REFERENCIA</b>	<b>Registro de obra No:</b>	<b>GEOTECNIA. DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS</b>
NC 58:2000	ASTM D 4318		

OBRA: \_\_\_\_\_ **Arcilla con Ca CO3**

CALA: \_\_\_\_\_ MUESTRA: \_\_\_\_\_ PROFUNDIDAD (m): \_\_\_\_\_ FECHA \_\_\_\_\_

DESCRIPCION: \_\_\_\_\_ **Arcilla de color pardo.**

**TIPO DE EQUIPO UTILIZADO**

MANUAL _____	SUELO CON PLASTICIDAD <input checked="" type="checkbox"/>
ELECTRICO <input checked="" type="checkbox"/>	SUELO NO PLASTICO (NP) <input type="checkbox"/>

**DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO**

No. de golpes	35	30	25	20	16
Recipiente No	100	99	112	181	93
Masa húmeda mas recipiente (g)	28.62	28.74	26.06	26.87	24.92
Masa seca mas recipiente (g)	26.52	26.50	23.68	24.95	22.92
Masa del recipiente (g)	19.94	19.52	16.28	19.05	16.78
% Humedad	31.9	32.1	32.2	32.5	32.6

**RESULTADOS DEL ENSAYO**

LIMITE LIQUIDO (%) 32.2

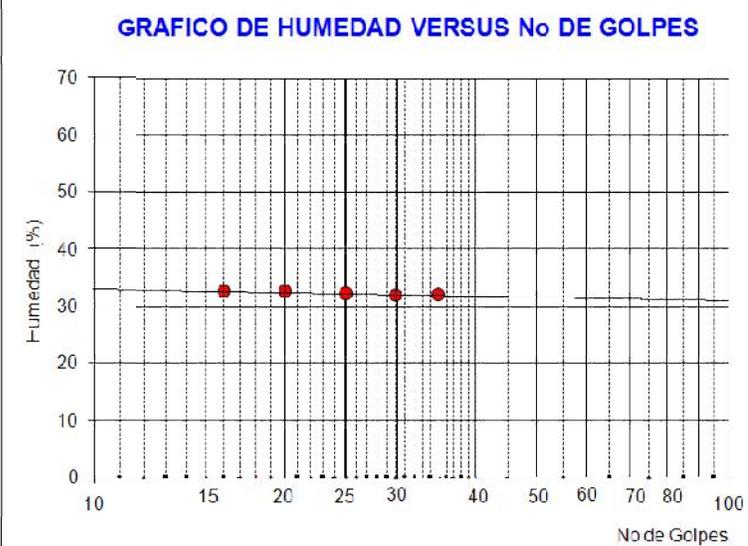
LIMITE PLASTICO (%) 19.1

INDICE DE PLASTICIDAD (%) 13.2

**DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO**

Recipiente No	22	62
Masa húmeda mas recipiente (g)	41.18	43.92
Masa seca mas recipiente (g)	37.22	40.14
Masa del recipiente (g)	17.51	19.18
% Humedad	20.1	18.0
% Humedad promedico	19.1	

**GRAFICO DE HUMEDAD VERSUS No DE GOLPES**



<b>Realizado por:</b>	<b>Calculado por:</b>	<b>Revisado y Aprobado por:</b>
Nombre: <b>Mirtha León</b>	Nombre: <b>Yoania Lozano</b>	Nombre: <b>Ing. Nelson Padrón</b>
Firma: _____	Firma: _____	Firma: _____
Cargo: <b>Laboratorista</b>	Cargo: <b>Laboratorista</b>	Cargo: <b>Jefe del Laboratorio</b>

	<b>EMPRESA NACIONAL DE INVESTIGACIONES APLICADAS.</b> <b>INVECONS</b> Direccion General y Unidades Empresariales de Base <b>INFORME DE ENSAYO</b> <b>UIC Villa Clara</b> Carretera central # 441 Rto Birnia. Codigo Postal: 50100		Cod:	
	<b>NORMA CUBANA</b>	<b>REFERENCIA</b>		Registro de obra No:
	NC 58:2000	ASTM D 4318		

OBRA: Arcilla  
 CALA: \_\_\_\_\_ MUESTRA: \_\_\_\_\_ PROFUNDIDAD (m): \_\_\_\_\_ FECHA: \_\_\_\_\_  
 DESCRIPCION: Arcilla con algo de arena fina de color pardo.

**TIPO DE EQUIPO UTILIZADO**

MANUAL	<input type="checkbox"/>	SUELO CON PLASTICIDAD	<input checked="" type="checkbox"/>
ELECTRICO	<input checked="" type="checkbox"/>	SUELO NO PLASTICO (NP)	<input type="checkbox"/>

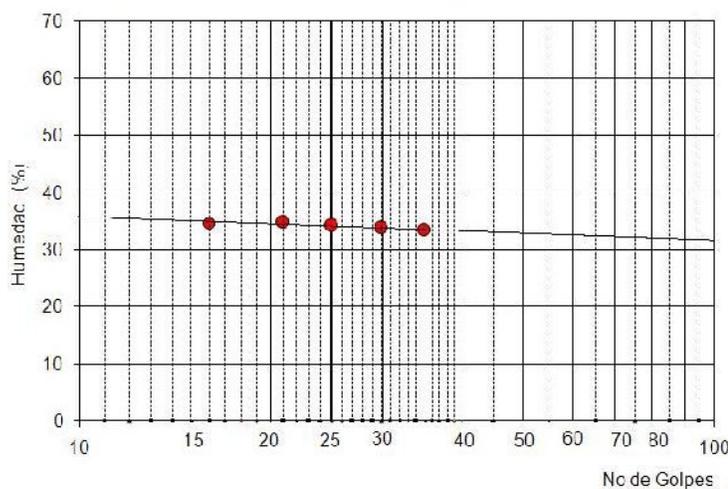
DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO					
No. de golpes	35	30	25	21	16
Recipiente No	72	121	38	157	109
Masa humeda mas recipiente (g)	25.49	26.23	27.60	25.58	25.97
Masa seca mas recipiente (g)	23.50	24.04	25.48	23.64	23.72
Masa del recipiente (g)	17.55	17.55	19.28	18.06	17.23
% Humedad	33.4	33.7	34.2	34.8	34.7

DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO		
Recipiente No	32	154
Masa humeda mas recipiente (g)	41.48	39.29
Masa seca mas recipiente (g)	37.86	36.39
Masa del recipiente (g)	17.73	18.02
% Humedad	18.0	15.8
% Humedad promedio	16.9	

**RESULTADOS DEL ENSAYO**

LIMITE LIQUIDO (%) 34.1  
 LIMITE PLASTICO (%) 16.9  
 INDICE DE PLASTICIDAD (%) 17.2

**GRAFICO DE HUMEDAD VERSUS No DE GOLPES**



<b>Realizado por:</b> Nombre: <b>Mirtha León</b>	<b>Calculado por:</b> Nombre: <b>Yoania Lozano</b>	<b>Revisado v Aprobado por:</b> Nombre: <b>Ing. Nelson Padrón</b>
Firma:	Firma:	Firma:
Cargo: <b>Laboratorista</b>	Cargo: <b>Laboratorista</b>	Cargo: <b>Jefe del Laboratorio</b>

## ANEXO IX: Influencia del $\text{CaCO}_3$ sobre las emisiones de gases de la combustión durante la cocción.

Emisiones producidas en la combustión durante proceso de cocción de ladrillos sin adición.

<b>Quema sin adición</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>1 hora</b>	<b>4 horas</b>	<b>5 horas</b>	<b>6 horas</b>
O <sub>2</sub>	15.1	18.2	15.3	14.9
CO	1491	1045	1910	1826
CO <sub>2</sub>	4.5	2.1	4.2	4.4
NO	10	32	70	65
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0
NO <sub>x</sub>	11	34	72	68
SO <sub>2</sub>	503	373	462	476
T gas	64	69	99	105
T. ambiente	30	33	38	38
$\lambda$	3.56	7.5	3.68	3.44
<b>ETA</b>	<b>89.2</b>	<b>89</b>	<b>89.6</b>	<b>91.8</b>
Perdidas	3	6.8	8.4	19.6

Eficiencia en la combustión

Emisiones producidas en la combustión durante proceso de cocción de ladrillos con adición.

<b>Quema con adición</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>1 hora</b>	<b>4 horas</b>	<b>5 horas</b>	<b>6 horas</b>
O <sub>2</sub>	19.9	17.2	12.5	14.2
CO	125	880	720	453
CO <sub>2</sub>	0.8	2.8	5.5	4.4
NO	11	34	69	53
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0
NO <sub>x</sub>	12	35	67	52
SO <sub>2</sub>	10	76	298	191
T gas	41	51	81	187
T. ambiente	35	43	35	34
$\lambda$	19	35	3.04	3.62
<b>ETA</b>	<b>97</b>	<b>93.2</b>	<b>95.1</b>	<b>95.4</b>
Perdidas	4.8	6.1	5	8.2

Eficiencia en la combustión

**ANEXO X: Ficha para determinar el precio y su componente en pesos convertibles de los ladrillos con y sin adición de CaCO<sub>3</sub>**

**Costos de producción de ladrillos sin adición de CaCO<sub>3</sub>**

FICHA PARA DETERMINAR EL PRECIO Y SU COMPONENTE EN PESOS CONVERTIBLES			
<b>EMPRESA: Materiales de la Construcción VC</b>	<b>Descripción del Producto:</b>		
	<b>Ladrillo de barro 280x100x70 sin adición de CaCO<sub>3</sub></b>		
<b>Organismo: MICONS</b>			
<b>PRECIO EN CUC:</b>	<b>UM: MU</b>		
<b>COMPONENTE EN DIVISAS:</b>	<b>CÓDIGO: 3889-107</b>		
Volúmen de Producción Para la Ficha de costo:			
Capacidad Instalada:	<b>Real 2011</b>	<b>Real 2011</b>	<b>Real 2011</b>
Nivel de Producción:			
<b>Concepto de Gastos</b>	<b>Fila</b>	<b>Moneda Total</b>	<b>Moneda Convertible</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3.00</b>	<b>4.00</b>
<b>Materias Primas y Materiales</b>	<b>1</b>	<b>383.58</b>	<b>99.47</b>
-Materias Primas y Materiales Fundamentales	1.1	364.10	80.48
-Combustibles y Lubricantes	1.2	18.99	18.99
-Energía Eléctrica	1.3	0.49	0.00
-Agua	1.4	0.00	0.00
<b>Sub total ( Gastos de Elaboración)</b>	<b>2</b>	<b>315.97</b>	<b>0.02</b>
<b>Otros Gastos Directos</b>	<b>3</b>	<b>0.00</b>	<b>0.02</b>
-Depreciación	3.1	0.00	0.00
-Arrendamiento de Equipos	3.2	0.00	0.00
-Ropa y Calzado (Trabajadores Directos)	3.3	0.00	0.00
<b>Gastos de Fuerza de Trabajo</b>	<b>4</b>	<b>127.41</b>	<b>0.00</b>
-Salarios	4.1	84.94	
-Impuesto por la Utilización de la Fuerza de Trabajo	4.2	23.16	
-Contribución a la Seguridad Social	4.4	11.58	
-Estimulación en Pesos Convertibles	4.5	0.00	0.00
<b>Gastos Indirectos de Producción</b>	<b>5</b>	<b>144.39</b>	<b>0.00</b>
-Depreciación	5.1	0.00	0.00
-Mantenimiento y Reparación	5.2	0.00	0.00
<b>Gastos Generales de Administración</b>	<b>6</b>	<b>44.17</b>	<b>0.00</b>
-Combustibles y Lubricantes	6.1	0.00	0.00
-Energía Eléctrica	6.2	0.00	0.00
-Depreciación	6.3	0.00	0.00
-Ropa y Calzado(Trabajadores Indirectos )	6.4	0.00	0.00
-Alimentos	6.5	0.00	0.00
-Otros	6.6	44.17	0.00

<b>Gastos de Distribución y Ventas</b>	<b>7</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
-Combustibles y Lubricantes	7.1	0.00	0.00
-Energía Eléctrica	7.2	0.00	0.00
-Depreciación	7.3	0.00	0.00
-Ropa y Calzado	7.4	0.00	0.00
-Otros	7.5	0.00	0.00
<b>Gastos Bancarios</b>	<b>8</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>Gastos Totales o Costo de Producción</b>	<b>9</b>	<b>699.55</b>	<b>99.49</b>
Margen de Utilidad (Según Base Autorizada)	10	15.00	
<b>PRECIO SEGÚN LO ESTABLECIDO POR EL MFP</b>	<b>11</b>	<b>746.95</b>	<b>0.00</b>
% Sobre el Gasto en Divisas (Hasta un 10%)	12		9.95
<b>COMPONENTE TOTAL EN PESOS CONVERTIBLES</b>	<b>13</b>	<b>0.00</b>	<b>109.44</b>

### Costos de producción de ladrillos con adición de CaCO<sub>3</sub>.

FICHA PARA DETERMINAR EL PRECIO Y SU COMPONENTE EN PESOS CONVERTIBLES			
<b>EMPRESA: Materiales de la Construcción VC</b>	<b>Descripción del Producto:</b>		
	<b>Ladrillo de barro 280x100x70 con adición de CaCO<sub>3</sub></b>		
<b>Organismo: MICONS</b>			
<b>PRECIO EN CUC:</b>	<b>UM: MU</b>		
<b>COMPONENTE EN DIVISAS:</b>	<b>CÓDIGO: 3889-107</b>		
Volúmen de Producción Para la Ficha de costo:			
Capacidad Instalada:	<b>Real 2011</b>	<b>Real 2011</b>	<b>Real 2011</b>
Nivel de Producción:			
	<b>Fila</b>	<b>Moneda Total</b>	<b>Moneda Convertible</b>
<b>Concepto de Gastos</b>			
<b>1</b>	<b>2.0</b>	<b>3.00</b>	<b>4.00</b>
<b>Materias Primas y Materiales</b>	<b>1.0</b>	<b>379.79</b>	<b>94.74</b>
-Materias Primas y Materiales Fundamentales	1.1	365.55	80.99
-Combustibles y Lubricantes	1.2	13.75	13.75
-Energía Eléctrica	1.3	0.49	0.00
-Agua	1.4	0.00	0.00
<b>Sub total ( Gastos de Elaboración)</b>	<b>2.0</b>	<b>315.97</b>	<b>0.00</b>
<b>Otros Gastos Directos</b>	<b>3.0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
-Depreciación	3.1	0.00	0.00
-Arrendamiento de Equipos	3.2	0.00	0.00
-Ropa y Calzado (Trabajadores Directos)	3.3	0.00	0.00
<b>Gastos de Fuerza de Trabajo</b>	<b>4.0</b>	<b>127.41</b>	<b>0.00</b>
-Salarios	4.1	84.94	
-Impuesto por la Utilización de la Fuerza de Trabajo	4.2	23.16	
-Contribución a la Seguridad Social	4.4	11.58	
-Estimulación en Pesos Convertibles	4.5	0.00	0.00
<b>Gastos Indirectos de Producción</b>	<b>5.0</b>	<b>144.39</b>	<b>0.00</b>

-Depreciación	5.1	0.00	0.00
-Mantenimiento y Reparación	5.2	0.00	0.00
<b>Gastos Generales de Administración</b>	<b>6.0</b>	<b>44.17</b>	<b>0.00</b>
-Combustibles y Lubricantes	6.1	0.00	0.00
-Energía Eléctrica	6.2	0.00	0.00
-Depreciación	6.3	0.00	0.00
-Ropa y Calzado(Trabajadores Indirectos )	6.4	0.00	0.00
-Alimentos	6.5	0.00	0.00
-Otros	6.6	44.17	0.00
<b>Gastos de Distribución y Ventas</b>	<b>7.0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
-Combustibles y Lubricantes	7.1	0.00	0.00
-Energía Eléctrica	7.2	0.00	0.00
-Depreciación	7.3	0.00	0.00
-Ropa y Calzado	7.4	0.00	0.00
-Otros	7.5	0.00	0.00
<b>Gastos Bancarios</b>	<b>8.0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>Gastos Totales o Costo de Producción</b>	<b>9.0</b>	<b>695.76</b>	<b>94.74</b>
Margen de Utilidad (Según Base Autorizada)	10.0	15.00	
<b>PRECIO SEGÚN LO ESTABLECIDO POR EL MFP</b>	<b>11.0</b>	<b>746.95</b>	<b>0.00</b>
% Sobre el Gasto en Divisas (Hasta un 10%)	12.0		9.95
<b>COMPONENTE TOTAL EN PESOS CONVERTIBLES</b>	<b>13.0</b>	<b>0.00</b>	<b>109.44</b>