

**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO**

**Dr “ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ”**

**TESIS EN OPCION AL TITULO DE MASTER EN  
BENEFICIO DE MINERALES**

**TITULO: EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE ARCILLAS DE LA  
REGION DE CENTENO, MOA**

**AUTORA: Ing DARIS E. FONSECA NAVARRO**

**TUTORES: Dr PEDRO E. BEYRIS MAZAR  
Dr JOSE A. PONS HERRERA**

**MOA, 2003**

*A José Ángel y Luis Daniel: mis hijos*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco sinceramente a todas las personas que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo.*

*A mi esposo, a mi abuela y a todos mis familiares.*

*Agradezco especialmente a los compañeros del Laboratorio de Química General y de Mecánica de Suelos del ISMM y del Laboratorio de áridos de la ECRIN.*

*A mis compañeros de los Departamentos de Mecánica y Metalurgia y de Relaciones Internacionales, por soportarme durante todo este tiempo.*

*A todos*

*MUCHAS GRACIAS*

## **RESUMEN:**

El presente trabajo muestra el estudio de las principales variables que influyen en la tecnología del tratamiento de las arcillas de la región de Centeno, Moa, para la obtención de mezclas cerámicas utilizadas en la producción de objetos cerámicos ornamentales y utilitarios.

Mediante el diseño de experimentos, se estudiaron cuatro mezclas cerámicas con diferentes dosificaciones de arcilla roja y gris (en las mismas proporciones utilizadas tradicionalmente en el Tejar de Centeno), a las cuales se les añadió Feldespato, como material desgrasante; valorando, mediante sencillos ensayos, los parámetros tecnológicos, % de contracción, % de absorción de agua y resistencia a la compresión y el comportamiento de cada una de ellas durante el secado y la cocción.

A través del análisis estadístico, comparando entre las cuatro mezclas estudiadas, se determinó la composición que debe tener una mezcla de arcillas de esta región para obtener resultados satisfactorios en la obtención de productos cerámicos.

Se estudió además el comportamiento de esta mezcla respecto a la temperatura de cocción y al tamaño de partículas, estableciéndose los modelos matemático-estadísticos que lo describen.

## INDICE

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
Introducción .....	1
Fundamentación del problema .....	2
Hipótesis .....	3
<b>CAPITULO I</b>	
<b>GENERALIDADES</b>	
I.1 Estado del arte .....	4
I.2 Características de las arcillas de la región de Centeno .....	12
I.2.1 Composición química .....	12
I.2.2 Composición molecular de las arcillas .....	15
I.2.3 Forma y tamaño de las partículas .....	15
I.3 Propiedades de las arcillas .....	16
I.3.1 Plasticidad .....	17
I.3.2 Capacidad de absorción .....	17
I.3.3 Hidratación e hinchamiento .....	18
I.3.4 Tixotropía .....	19
I.4 Consideraciones acerca de las pastas de arcilla .....	20
I.4.1 Ensayos preliminares sobre depósitos de arcilla natural .....	20
I.4.2 Adiciones a realizar a las arcillas para hacerlas útiles .....	22
I.4.3 Pastas de arcillas para tornear .....	23
I.4.4 Pastas de arcillas para barro cocido .....	24
I.4.5 Pastas de arcillas para modelar .....	24
I.5 Requerimientos tecnológicos de la arcilla para cerámica .....	25
I.5.1 Secado de la arcilla .....	26
I.5.1.1 Formas de facilitar el secado .....	27
I.5.2 Proceso de cocción .....	27
I.6 CONCLUSIONES PARCIALES .....	28
<b>CAPITULO II</b>	
<b>MATERIALES Y METODOS</b>	
II.1 Toma de muestras .....	29
II.2 Características de la tecnología empleada en el Tejar .....	29
II.2.1 Modificaciones a realizar a las mezclas tradicionales .....	30
II.3 Diseño de la investigación .....	31
II.3.1 Elección de las variables de entrada y salida .....	32
II.3.2 Elección de los niveles principal, superior e inferior .....	33
II.3.3 Número de experimentos a realizar .....	34
II.4 Metodología para la realización de los ensayos .....	36

II.4.1	Ensayo de la contracción total .....	36
II.4.2	Ensayo de la absorción de agua de la arcilla cocida .....	37
II.4.3	Ensayo de resistencia a la compresión .....	37
II.5	Elaboración de las mezclas .....	38
II.5.1	Corridas experimentales .....	39
II.6	Resultados obtenidos para las diferentes mezclas .....	39
II.6.1	Resultados del ensayo de plasticidad .....	39
II.6.2	Resultados del ensayo de contracción total .....	40
II.6.3	Resultados del ensayo de absorción .....	40
II.6.4	Resultados del ensayo de resistencia a la compresión .....	40
II.7	Valoración de la mejor mezcla respecto a la temperatura y el tamaño del grano .....	41
II.7.1	Resultados obtenidos .....	42
II.7.1.1	Parámetros tecnológicos para las mezclas de granulometría - 0.125mm .....	42
II.7.1.2	Parámetros tecnológicos para las mezclas de granulometría - 0.27+0.125mm .....	42
II.7.1.3	Parámetros tecnológicos para las mezclas de granulometría +0.27mm .....	43
II.8	CONCLUSIONES PARCIALES .....	43

### **CAPITULO III**

#### **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS E IMPACTO AMBIENTAL**

III.1	Análisis de los resultados para las mezclas.....	44
III.1.1	Contracción total.....	44
III.1.2	Absorción de agua.....	45
III.1.3	Resistencia a la compresión.....	45
III.2	Análisis de los resultados para la mejor mezcla .....	46
III.1.1	Análisis para el tamaño de partículas -0.125mm .....	47
III.1.2	Análisis para el tamaño de partículas -1.27+0.125mm .....	48
III.1.3	Análisis para el tamaño de partículas +0.27mm .....	49
III.3	Análisis para cada uno de los parámetros tecnológicos .....	50
III.3.1	Análisis para la contracción total.....	51
III.3.2	Análisis para la absorción de agua.....	53
III.3.3	Análisis de la resistencia a la compresión .....	56
III.4	Impacto ambiental.....	61
III.4.1	Problemas ambientales en las diferentes etapas del proceso.....	61
III.4.1.1	Primera etapa: Minería de las arcillas.....	61
III.4.1.2	Segunda etapa: Beneficio de las materias primas.....	63
III.4.1.2.1	Daños por el uso de las materias primas.....	64
III.4.1.2.2	Daños por el uso de los equipos.....	64
III.4.1.2.3	Efectos nocivos que el ruido produce en el hombre.....	65
III.4.1.3	Tercera etapa: Conformación y acabado.....	66
III.5	CONCLUSIONES PARCIALES .....	69

<b>CONCLUSIONES</b> .....	70
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	71
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	72
<b>ANEXOS</b>	

## INTRODUCCIÓN

El territorio de Moa posee grandes riquezas minerales que son reconocidas internacionalmente, que lo convierte en uno de los mayores productores de Níquel y Cobalto del mundo y una de las principales vías de desarrollo económico de nuestro país. Sin embargo se conoce muy poco sobre las grandes posibilidades que tienen otros recursos minerales (no metálicos), que conforman grandes extensiones diseminadas por todo el territorio y que pudieran ser empleadas con mucho éxito. Entre estos recursos se encuentran las arcillas, que pueden ser ampliamente utilizadas en la industria de la cerámica decorativa y materiales de la construcción, entre otras.

En sus principios, la arcilla era utilizada tal y como aparece en la naturaleza, sin hacerle muchos cambios para los fines que se perseguían. Con el desarrollo de la ciencia y la técnica, el hombre ha podido descubrir que el material que resultaba tan fácil de trabajar y manipular, no es, en realidad tan sencillo, pues posee propiedades que aún no se han podido describir científicamente, a pesar de que son aprovechadas por el.

En las industrias productoras de cerámicos, por lo general, la arcilla luego de extraída del yacimiento y trasladada a la planta se mezcla con agua en cantidades suficientes para garantizar que toda ella se humedezca, en aparatos mezcladores de diferentes tipos. A continuación se tamiza para lograr el tamaño de partícula requerido y eliminar piedras y otros materiales indeseables. Esta suspensión acuosa debe ser sedimentada o filtrada para eliminar el exceso de agua y obtener una pasta de humedad adecuada para ser trabajada, ya sea en el torno alfarero o para el modelado manual de los objetos que se producirán, los cuales deben ser secados completamente antes de pasar al horno donde se cuecen y obtienen su consistencia final.

Entre los minerales más abundantes de la región se encuentran las grandes reservas de arcillas de diferentes tipos en las zonas de Centeno y las márgenes del río Cayo Guan; las cuales no han sido suficientemente valoradas para su utilización en la industria cerámica decorativa y utilitaria. Por esta razón en el presente trabajo se realiza un estudio de diferentes pastas de arcillas provenientes de la zona de Centeno, preparando diferentes mezclas con arcillas roja, gris y Feldespato como desgrasante.



## **I.2 FUNDAMENTACION DEL PROBLEMA**

La producción de objetos a partir de las arcillas tuvo sus orígenes, con el origen mismo del hombre, el cual las utiliza en su beneficio desde tiempos inmemoriales.

En la actualidad a la arcilla se le hacen adiciones de otros productos que corrigen o mejoran sus propiedades. El desarrollo actual y futuro de los cerámicos conduce a innovaciones tecnológicas importantes y capaces de sustituir industrias clásicas, reducir la dependencia en materias primas estratégicas y abarcar sectores industriales completos, aunque deben superarse barreras como son la optimización de los procesos para obtener productos competitivos que generarían amplios mercados.

La explotación de las grandes reservas de arcilla existentes en nuestro municipio es casi nula, solo aprovechándose el yacimiento de Centeno para la producción de materiales de la construcción, como ladrillos de muy baja calidad, que se rompen con gran facilidad.

En el taller de cerámica de las industrias locales de Moa, que es donde se enmarca este trabajo, se ha intentado trabajar las arcillas mencionadas, mezclándolas en las mismas proporciones y sin una preparación previa, al igual que en el Tejar, obteniéndose muy malos resultados, pues han surgido grandes dificultades con la rotura de piezas durante o después del secado y en la cocción, fundamentalmente rajaduras, explosiones de piezas dentro del horno, etc. Por esta razón, se hace necesario buscar nuevas mezclas, con la adición de otros productos o empleando una tecnología para el tratamiento diferente al ya mencionado, aplicando métodos y tecnologías científicamente argumentadas.

Por todo lo anteriormente expuesto se tiene la siguiente situación problemática:

La necesidad de establecer una tecnología para el tratamiento de las arcillas existentes en la zona de Centeno con vista a su utilización en la elaboración de mezclas cerámicas que puedan emplearse en la producción de objetos ornamentales e industriales.

## **HIPÓTESIS:**

*Con la determinación de las características físico químicas y mecánicas de las arcillas de la zona de Centeno y el establecimiento de un sistema para el tratamiento tecnológico de las mismas, es posible obtener una pasta cerámica que pueda ser utilizada en la cerámica ornamental e industrial.*

Por lo tanto se propone el siguiente **OBJETIVO:**

- Evaluar mezclas de arcillas de la región de Centeno, a partir de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas con vista a su utilización en la industria cerámica.

Para dar cumplimiento al objetivo planteado se realizaron las siguientes **TAREAS:**

1. Establecer el marco teórico de la investigación.
2. Obtener y evaluar diferentes mezclas, mediante la conformación de probetas experimentales, utilizando el feldespató como desgrasante.
3. Establecer a través de los métodos estadísticos existentes, las mezclas que ofrecen mejores resultados.
4. Analizar el comportamiento de esa mezcla respecto al tamaño de partículas y la temperatura
5. Evaluar los posibles daños del procesamiento de las arcillas al medio ambiente laboral.

## **CAPÍTULO I. GENERALIDADES**

### **I.1 ESTADO DEL ARTE**

Inicialmente, el desarrollo de nuevos productos cerámicos se efectuó en gran parte en la industria automovilística. Uno de los productos más antiguos de la cerámica industrial es la bujía de encendido de los motores de combustión [41].

En Cuba la industria cerámica ha tenido un amplio desarrollo a partir de 1959, sin embargo, este desarrollo y sobre todo, las investigaciones, estudios y los resultados a los que se ha llegado, no han quedado en la memoria escrita de nuestros archivos.

Existen actualmente muchas normas técnicas para la producción y el control de la calidad de ladrillos, azulejos y otros productos de la industria de los materiales de la construcción, sin embargo no existe mucha información sobre los productos cerámicos utilitarios y ornamentales, los cuales a pesar de tener características similares, no presentan los mismos requerimientos de calidad que los primeros.

Investigadores del territorio (Orozco, 1995; Leyva, 1996) determinaron el origen geológico de las arcillas de Moa el cual está dado por la existencia de manifestaciones de arcillas caoliniticas, de las cuales una parte considerable se encuentra relacionada con cuerpos de gabros de diversas dimensiones. Algunas de ellas se describen a continuación [31].

#### Manifestaciones de Centeno:

Se encuentran aflorando en el talud a ambos lados de la carretera Moa- Sagua. Posee una extensión aproximada de mas de 50 m y un espesor medio entre 6 y 8 km. Esta manifestación constituye la materia prima fundamental del Tejar de Centeno. En este afloramiento se observa que el color del material varía, desde tonalidades más blancas (mayor contenido de caolín) hasta tonalidades amarillentas y rojizas.

A 100 m, hacia el sur del área del Tejar se localiza una arcilla de color amarillenta que también ha sido utilizada como materia prima.

### Manifestaciones de Cayo Guan:

En las márgenes del río Cayo Guan, a unos 4 km de la carretera Moa Baracoa y a un lado del molino de piedras de la planta de beneficio de la Empresa Cromo Moa, se localiza, a 200 m aproximadamente, un afloramiento con grandes taludes donde se pueden diferenciar sectores con variedad de tonalidades, desde blanco-amarillentas, amarillo- pardo y otras. Estos afloramientos tiene mas de 100m de extensión y un espesor promedio de 200 m. [31].

Orozco (1995), escogiendo un corte muy bien expuesto de este yacimiento, concluyó que en la base del corte afloran gabros muy intemperizados alterados a un material de color blanco y aspecto terroso- arcillosos al tacto, muy deleznable y con una alta plasticidad. Hacia la parte superior existe una transición gradual a materiales parecidos a los de la base del corte formando una corteza de meteorización de colores variables desde el rosado hasta el rojo intenso, lo que indica un incremento en el contenido de hierro.

A través de un análisis por difracción de RX, en este mismo trabajo [30], se llegó a la conclusión de que la muestra era una caolinita desordenada, o sea una caolinita tipo d ó fireclay mineral y el análisis químico arrojó que durante el proceso de alteración hubo un incremento considerable de Alúmina y la consecuente migración del Fe, Ca y Mg para la formación de la caolinita como mineral residual, la cual tuvo su origen en la meteorización de cuerpos de gabros formando potentes capas que constituyen depósitos de gran extensión.

Según el mismo autor, los depósitos residuales de caolinita a partir de gabros están poco reportados en la literatura especializada. Sin embargo en ninguno de sus trabajos estos autores se refieren al potencial de minerales arcillosos en la región, ni se dan localizaciones exactas de los mismos.

Pons y Leyva (1996), determinaron la composición química de las arcillas ferrocaoliníticas gibbsíticas del yacimiento de Centeno, con el objetivo de caracterizarlas para su utilización como material refractario en la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi), concluyendo que los depósitos de arcillas estudiadas tuvieron su origen en la meteorización de cuerpos de gabros, los cuales forman parte del complejo ofiolítico de la región y son perfectamente utilizables como material refractario [32, 33].

A partir de estos estudios se corrobora que las arcillas presentes en los principales yacimientos del municipio poseen las características desde el punto de vista químico físico y mineralógico que permite utilizarlas, con previos estudios, como material refractario en las industrias de la región y como materia prima para la obtención de objetos cerámicos.

Actualmente los grandes yacimientos de arcillas de las márgenes del río Cayo Guan no están siendo explotados, no ocurriendo lo mismo con las de Centeno, con las cuales se producen materiales para la construcción.

Todos los trabajos realizados hasta el momento sobre las arcillas del territorio han contribuido a enriquecer el conocimiento de las características de un material que está siendo poco aprovechado, sin embargo, ninguno de estos autores se han referido a las propiedades físico químicas, mecánicas y mineralógicas que pueden ser la base para la producción de objetos cerámicos, así como otras aplicaciones industriales de este versátil material.

Actualmente se está desarrollando una nueva clase de cerámicas estructurales de baja densidad, con alta porosidad y de malla continua que originan una amplia área superficial, los cuales pueden utilizarse como filtros de alta temperatura para aleaciones fundidas y líquidos corrosivos. [41].

La producción y desarrollo de cerámicas a nivel mundial están concentradas en:

- **Japón:** Invierte aproximadamente US\$ 530 millones/año en investigación y desarrollo de materiales, de los cuales US\$ 200 millones corresponden a cerámicas con una participación en el mercado mundial del 65%. Las principales compañías y organizaciones en cerámicas son: Ministerio de Industria y Comercio (MITI), Imperial Chemical Industries, Asahi Glass Co., Toshiba, Nippon Steel Corporation, Toyota y Mitsubishi. Hay más de 170 empresas dedicadas a los cerámicos.
- **Estados Unidos:** Invierten aproximadamente US\$ 340 millones/año en investigación de materiales, cerca de US\$ 100 millones corresponden a cerámicas con una participación del 25% en el mercado mundial. Las principales empresas y

organizaciones dedicadas a las cerámicas son los Departamentos de Energía, de Defensa y de Comercio, la NASA, 3M Corp, la General Motors y la Ford Co.

- **Alemania y Francia:** Se encuentran en tercer lugar en el desarrollo de cerámicas con un atraso de cerca de 5 años respecto a Japón y Estados Unidos. En Alemania se invierten US\$ 970 millones/año en materiales. Algunos centros de investigación de Alemania son el Ministerio de Investigación y Tecnología, el Instituto Max Planck, y el Ministerio de Defensa. [41]
- **España e Italia:** La fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos en España ha experimentado cambios considerables. En 2000 la producción de baldosas fue alrededor de 621 millones de metros cuadrados, cifra que lo sitúa como primer país del mundo junto a volumen de producción junto con Italia. Esto ha repercutido en una mayor automatización del proceso y en una mejora de la calidad del producto.

Debido a las excelentes propiedades de los materiales cerámicos, las investigaciones se centran en superar sus grandes limitaciones como son entre otras, la fragilidad; obtención de materiales 100% puros, libre de porosidades o con elementos que sirvan de atenuadores y reguladores de las grietas; obtención de material base (polvos) más uniformes y pequeños, por métodos diferentes al tradicional de molienda, que garantiza material con una estructura más fina y uniforme; y desarrollo de uniones e interfases con otros materiales como metales y plásticos para alcanzar propiedades combinadas. Se trabaja además en llevar a procesos industriales muchos logros que se han desarrollado en el laboratorio y que necesitan ser obtenidos a gran escala y a costos razonables.

Para evitar la fragilidad en lo posible de las cerámicas tenaces, se debe controlar perfectamente el proceso de fabricación en todas sus fases y en especial el control físico/químico de las materias primas, preparación de polvos y mezclas, relaciones de equilibrios de fases a elevadas temperaturas y en la fase de cocción. [13].

Para eliminar los defectos que provocan las grietas se parte de polvos finísimos de alta pureza química obtenidos por plasma o láser de alta potencia, empaquetados antes de ser sinterizados, produciéndose cerámicas con densidades próximas a las teóricas, sin huecos

entre los granos. Se está experimentando un nuevo proceso, en una planta piloto, para la producción de granos (polvos) cerámicos de los más finos conocidos, 0.05 a 0.1  $\mu\text{m}$ , combinando un soplete térmico de plasma y un método de presión reducida.

Teniendo en cuenta que con operaciones de molienda de elevado número de etapas escalonado, solo pueden obtenerse polvos submicrómicos de decenas de micrones, con el inconveniente de tener que eliminar ciertas partículas procedentes de los elementos mecánicos de los molinos, lo que resulta un proceso largo y costoso. [13]

En el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), se ha desarrollado un método para precipitar partículas de una solución uniforme de titania, u óxido de titanio, con un diámetro inferior al micrómetro. El material cerámico policristalino que resulta tras el empaquetamiento controlado y la sinterización de las partículas tiene una densidad muy próxima a la teórica. Debido a esta microestructura libre de huecos, el material es muy resistente y tenaz. [13].

En el MIT, también ha sido desarrollado otro método para producir partículas diminutas de alta pureza química, el cual se basa en calentar un compuesto gaseoso de silicio e hidrógeno mediante un láser de dióxido de carbono de alta potencia. La breve e intensa aplicación de calor descompone el gas, liberando el silicio en forma de partículas extremadamente finas. Suspendiendo estas partículas en una solución que permita controlar su carga eléctrica, se puede conseguir empaquetarlas estrechamente en una estructura libre de defectos [13].

Otra vía prometedora en la que se está empezando a investigar para reforzar la tenacidad, consiste en intercalar finas fibras cerámicas en una matriz cerámica o vítrea; de esta manera las fibras cerámicas eliminan las grietas, impidiendo su posterior ensanchamiento y crecimiento. Los compuestos resultantes han mostrado una resistencia significativa a la rotura frágil, que no se distinguía precisamente a los materiales cerámicos monolíticos. [41].

### **I.1.1 Aplicaciones de los productos cerámicos**

Los grandes avances en los procesos y técnicas para la obtención de materiales cerámicos y sus aplicaciones, han conllevado al desarrollo de un grupo de cerámicas denominadas técnicas o tenaces. [41]

Por sus excelentes propiedades mecánicas, ópticas, eléctricas, refractariedad y elevada resistencia a los agentes corrosivos, constituyen uno de los nuevos materiales que, a pesar de sus inconvenientes (fragilidad, dificultad de obtención de piezas complejas, difícil reproductibilidad, dificultad en unión de piezas, etc.), más se están desarrollando durante los últimos años, comenzando a sustituir a polímeros y metales en algunas aplicaciones [40].

Los materiales cerámicos han adquirido gran importancia en una variedad de aplicaciones industriales. Se destaca, por ejemplo su aplicación en el campo de los sensores o en el campo de la medicina, también como protectores de calor y aislantes eléctricos, imanes de ferrita para núcleos magnéticos de memoria, fibras ópticas de sílice para sistemas de telecomunicación, como combustible nuclear y para implantación de huesos [13].

Entre las aplicaciones más importantes que se han introducido últimamente están las siguientes:

- **Recubrimientos cerámicos para mejorar la resistencia al desgaste y a la abrasión.**

En general, los procesos de adhesividad termoquímica producen recubrimientos cerámicos que mejoran no solamente la resistencia al desgaste y a la abrasión, sino también, a la corrosión y a las altas temperaturas de la mayoría de los substratos inorgánicos (material al que se le hace el recubrimiento). Este proceso puede aplicarse a la mayoría de los metales.



- **Cerámicas reforzadas.**

Aptas para utilizarse en herramientas de corte, componentes de motores térmicos y para componentes de procesos industriales en los que se hayan presentes, desgastes, ambientes corrosivos y altas temperaturas. Estas cerámicas se obtienen adicionando fibras largas o cortas para que bloqueen el crecimiento de grietas, aumentando su tenacidad. [41]

- **Compuesto cerámico electroconductor resistente al calor.**

Los cerámicos electroconductores se han desarrollado con el objetivo de reemplazar las aleaciones metálicas en sus aplicaciones como elementos de calor (resistencias ohmicas). Pueden soportar 30.000 ciclos, desde la temperatura ambiente hasta 1200 °C, con un promedio de velocidad de crecimiento de la temperatura de 1000 °C/s., con menos del 3% de variación de la resistencia eléctrica [41].

- **Materiales cerámicos con nuevas estructuras.**

Actualmente se están desarrollando una nueva clase de cerámicas estructurales de baja densidad, con alta porosidad y de malla continua que originan un amplia área superficial. Estos materiales pueden utilizarse como filtros de alta temperatura para aleaciones fundidas y líquidos corrosivos. [41]

### **I.1.2 Aplicaciones futuras**

El desarrollo en centros de investigación y empresas norteamericanas, alemanas, inglesas, japonesas y francesas, países con un gran desarrollo en esta temática, permitirá obtener resultados favorables en los siguientes aspectos: [41]

- **Material compuesto (sandwich).** Buscando un procedimiento de reducción del peso de las cerámicas sin sacrificar su resistencia, se está investigando sobre un material compuesto (sandwich) constituido por un núcleo de alúmina porosa y dos "placas" de alúmina densificada (compacta). Las aplicaciones del material "sandwich" de alúmina serían: en aeronáutica, aislador de la radiación de alta frecuencia; implantaciones dentales y óseas, duras exteriormente y porosas interiormente; cerámicas muy porosas como filtros.

- **Cerámica para alta temperatura.** Se están llevando a cabo estudios sobre una cerámica tenaz transformada que resulta lo suficientemente estable a elevadas temperaturas, para aplicarse en el desarrollo y construcción de cilindros para motores Diesel ligero, camisas de cilindros, cabezas de pistón, turbinas de gas adiabático y recuperador e intercambiador de calor. Una cerámica con estas características ha sido ensayada a 1200 °C durante 300 horas sin mostrar degradación alguna, y al parecer podría mantenerse a la misma temperatura durante 600 horas.
- **Cerámicas superplásticas.** Al igual que ciertas aleaciones metálicas, ciertas cerámicas pueden conformarse y forjarse obteniéndose cerámicas estructurales con mejores propiedades mecánicas que las obtenidas por métodos convencionales.

Se obtienen productos prácticamente sin defectos, de elevada densidad y con buenos acabados superficiales, aumentando especialmente la resistencia a la fatiga del material. Así, en todos los sentidos las piezas obtenidas son más resistentes que las obtenidas por fusión. Esta técnica es adecuada para la obtención de piezas como discos de turbinas de gas, cojinetes, válvulas, herramientas de corte. Por ejemplo, se estima que sería más rentable y de superiores características la obtención de la pista de rodadura de un cojinete, que actualmente se produce por mecanizado con diamante. Los usos potenciales de las cerámicas superplásticas incluyen componentes de motores de explosión y equipamiento de reactores nucleares. [41]

- **Procesos de adherencia cerámica - metal.** Cada vez resulta más interesante la obtención de recubrimientos, capas protectoras que permitan mejorar las propiedades del material base (substrato). Lo esencial en el proceso sea cual sea el método empleado (sistemas de metalización, soldaduras, deposición de vapor químico o físico, etc.) es poder conseguir superficies de contacto completamente lisas, sin poros, perfectamente adherentes y compatibles. Recientemente se ha comprobado que se pueden obtener prácticamente entre cualquier cerámica y cualquier metal, utilizando sistemas de metalización. Lo que realmente diferencia este proceso del convencional es que la capa metálica se adhiere al substrato fuertemente gracias a la cohesión atómica. Lo más probable es que la evolución hacia el motor de explosión adiabático se lleve a cabo en la

presente década después de que los investigadores hayan encontrado la manera de unir las cerámicas al acero.

- **Cerámicas conductoras estables para altas temperaturas en células de combustible.** Se están comenzando a ensayar ciertos materiales cerámicos constituidos por carbonatos fundidos, que se piensan comercializar para la producción de las interesantes "células de combustible" (sistema de generación masiva de electricidad a partir de combustibles fósiles, por un nuevo concepto electroquímico que evita el paso térmico intermedio de los sistemas convencionales). Hasta el presente, la vida de los carbonatos es de unas 20.000 horas de operación y se busca ampliarla hasta 40.000 horas de funcionamiento para que el sistema sea rentable.

- **Cerámicas con conductividades metálicas.** Se está experimentando una cerámica con base de titania ( $\text{TiO}_2$ ) con una conductividad eléctrica aproximada a la de un metal, y que podría utilizarse en aplicaciones electroquímicas. Esta cerámica resiste bien a las altas temperaturas y a la corrosión química y electrolítica. Puede fundirse, extruirse y ser moldeada por inyección.

- **Obtención de carburo de silicio (SiC) esponjoso con porosidad del 97%.** Recientemente se ha experimentado esta esponja que resiste altas temperaturas e impacto. Las aplicaciones previstas son, en los conos de misiles, motores de explosión, escudos de reentrada de las aeronaves en la atmósfera, etc. Dicha porosidad convierte al material resultante en un producto ligero. Su temperatura máxima de utilización continua alcanza los 2200 °C.

- **Vidrios transparentes a la radiación infrarroja.** La necesidad de estos vidrios para sensores y ventanas para detección térmica, utilización de laceres industriales y médicos, etc., ha generado un gran esfuerzo de desarrollo sobre una variedad de materiales como fluoruros, antimonio, selenio, diferentes a los usados actualmente.

- **Vidrios de bajo punto de fusión.** Se están poniendo a punto para utilizarlos en cierres herméticos con plásticos, metales ligeros y madera. Pueden utilizarse también en el encapsulado de circuitos integrados, sin posibilidad de averías y resistentes a la humedad. Las temperaturas de transición de estos vidrios serían de 75-150 °C. Sus propiedades barrera son mejores que las de los polímeros utilizados para estas aplicaciones.

- **Desarrollo de nuevos sensores.** Estos pueden cambiar sus propiedades eléctricas cuando se exponen a ciertos productos químicos, líquidos o gaseosos. Podrían, por ejemplo, detectar la presencia de metano, lo cual puede mejorar la seguridad en los hogares. Inclusive un solo artefacto cerámico puede servir como sensor de temperatura, presión, luz y calor además de ciertos agentes químicos, que acoplándolo a un microprocesador permitiría controlar las máquinas en el hogar, los transportes y las fábricas.
- **Motores piezoeléctricos.** Se obtienen por conversión en movimiento traslacional o rotacional de la pieza cerámica cuando se expone a un campo eléctrico. Estos motores son compactos, ligeros y simples, ya que no requieren cables para dirigir el campo. Pueden detenerse y comenzar sin deslizamiento, proporcionando además un par elevado a bajas velocidades permitiendo mover lenta y precisamente altas cargas. Un prototipo desarrollado por la empresa de electricidad industrial Shinse, de Japón, es un motor lineal de conducción directa. La masa a mover se coloca sobre un riel fijo de cerámica piezoeléctrica. La aplicación de voltaje de alta frecuencia sobre el riel produce "rizos" en su superficie, capaces de dirigir la masa hacia adelante o hacia atrás sobre el riel. [41].

## § I.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ARCILLAS DE LA REGION DE CENTENO.

### I.2.1 Composición química

La arcilla, que constituye la materia prima fundamental de la obtención de productos cerámicos en Moa, tiene su origen en el envejecimiento geológico de la superficie de la Tierra y debido a que este proceso es continuo y se produce en todas partes, la arcilla es un material extremadamente sencillo, barato y abundante en la naturaleza. Con frecuencia puede encontrarse en la tierra ya suavizado por la humedad y listo para ser trabajado [35].

Las arcillas difieren de todas las rocas, más por su estado físico que por su constitución química. Algunas arcillas tales como el caolín y la arcilla plástica tienen un porcentaje relativamente bajo de hierro y otras impurezas. Debido a que la arcilla está constituida predominantemente de alúmina y sílice, todos los otros óxidos presentes pueden considerarse impurezas.

La sustancia de arcilla pura se conoce con el nombre mineralógico caolinita, a pesar de que existen otros minerales arcillosos como la illita y la montmorillonita.

La composición química de la arcilla es muy similar a la composición química promedio de la superficie de la tierra como conjunto. Haciendo una comparación entre la composición de una arcilla roja común con los porcentajes aproximados de óxidos en la superficie de la tierra como un todo, se tiene [35]:

Tabla I.1 Composición química de una arcilla roja común y la tierra como un todo

Compuestos Químicos.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Tierra como un todo (%)	59.14	15.34	06.88	03.49	05.08	03.84	03.13	01.15	01.05
Arcilla roja común (%)	57.02	19.15	06.70	03.08	04.26	02.38	02.03	03.45	00.91

A pesar de que han sido poco estudiadas, la composición química de las arcillas de Moa, muy similar a la de una arcilla roja común (Tabla I.1), ha sido determinada por investigadores del ISMM (Orozco, 1995; Pons y Leyva, 1996), con la finalidad de establecer su origen geológico y su posible utilización en las industrias niquelíferas del territorio.

Los grandes yacimientos de arcillas rojas y grises de la región de Centeno, descritas en la introducción de este trabajo, presentan la siguiente composición química.

Tabla I.2 Composición química de las arcillas roja y gris de la región de Centeno

Compuestos	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	PPI
Arcilla roja (%)	31.65	28.87	13.86	0.50	-	No	0.18	0.31	17
Arcilla gris (%)	39.03	29.50	7.46	0.56	2.08	No	0.18	0.25	15

Otros estudios realizados posteriormente [32, 33] con arcillas rojas de esa misma región, con vistas a su utilización como material refractario, arrojaron resultados muy similares:

Tabla I.3 Composición química de la arcilla roja de Centeno determinada en otras investigaciones

Compuestos	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
(%)	35.65	29.50	10.25	0.55	2.0	-	0.18	0.28

De la composición química mostrada en las tablas anteriores se infiere que estas arcillas están enriquecidas de Sílice y Alúmina lo que les da un carácter semirrefractario.

Respecto a la arcilla roja común (Tabla I.1), las arcillas de Moa (Tablas I.2 y I.3) presentan un contenido de alúmina mucho mayor y de sílice mucho menor. Además un alto contenido de Hierro, el cual es considerado como una impureza, lo cual se debe a la presencia en los suelos de Moa de incontables minerales metálicos ricos en Hierro, Níquel, Cobalto, entre otros. Además se destaca el bajo contenido de óxidos alcalinos y alcalinotérreos. Sin embargo se ha demostrado el carácter refractario (Orozco, 1995 y Pons, 1996) que poseen y que son perfectamente utilizables en la producción de objetos cerámicos decorativos, siempre que pueda ser establecido el método de tratamiento mas conveniente con vistas a eliminar los problemas que se presentan durante la producción y que se deben fundamentalmente a las propiedades que le imprimen su composición química y mineralógica.

### I.2.2 Composición molecular de la arcilla

Como mineral la arcilla tiene la siguiente formula:



En esta fórmula las cantidades relativas de los óxidos presentes se establecen como relación molecular más que en porcentaje de peso. En la arcilla una molécula de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> está asociada a dos moléculas de SiO<sub>2</sub> y dos moléculas de H<sub>2</sub>O. Esta formula, que es típica, prescinde de la compleja disposición de otros compuestos siempre presentes en las muestras reales [35].

Los minerales arcillosos se clasifican por su estructura en:

- laminares
- fibrosos.

El grupo laminar comprende los subgrupos de la caolinita, la montmorillonita y micas, cuyas estructuras están formadas por un gran número de planos paralelos idénticos entre sí, formando gran cantidad de columnas agrupadas. Los minerales arcillosos de estructura fibrosa son no plásticos [40].

Generalmente los minerales arcillosos se encuentran en la naturaleza impurificados por diversos cuerpos procedentes de la roca que los originó, como el cuarzo y el feldespato. Las impurezas debidas al carbonato cálcico, sulfatos sódicos y calcio, hidróxido de hierro y sustancias orgánicas las adquiere durante el traslado y sedimentación [21].

### **I.2.3 Forma y tamaño de las partículas**

Muchas arcillas tienen un gran porcentaje de partículas por debajo de 1  $\mu\text{m}$  de diámetro, las cuales pueden considerarse como cristales simples de arcilla. A través del examen en el microscopio electrónico se ha podido determinar que las partículas de arcilla tienen forma plana, alargada en dos dimensiones y delgada en la otra dimensión, como se muestra en la Figura I.1 [10].



Figura I.1 Hojuela de arcilla amplificada 15 000 veces

En la Figura I.2, observada con una mayor amplificación, se muestra el borde de la hojuela formado por una serie de láminas apiladas una encima de la otra, que al ponerse en

contacto con el agua, se separan unas de otras, abriéndose; y al secarse, se unen contrayéndose el espacio interlaminar. [10]

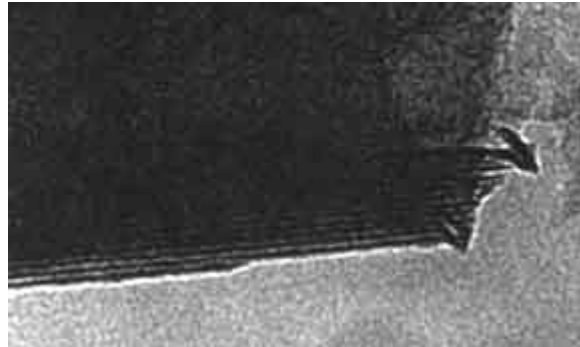


Figura I.2 Borde de la hojuela amplificado 20 000 veces

### § I.3 PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS

La gran variedad de usos y aplicaciones de las arcillas se deben fundamentalmente a sus propiedades, de las cuales, algunas no han podido ser explicadas por el hombre.

Entre otras, las arcillas poseen las siguientes propiedades:

#### I.3.1 Plasticidad

La arcilla, cuando se humedece con la cantidad adecuada de agua, tiende a mantener cualquier forma que se le de. Esta propiedad se conoce como plasticidad y es una de las principales cualidades del material que hace posible la fabricación de la infinita variedad de figuras de los objetos cerámicos [35].

Una arcilla es plástica, cuando, previa humectación de la misma, puede con facilidad moldearse en bolas que, comprimidas en una dirección cualquiera, no origina grieta alguna en la pasta cuando el diámetro se ha reducido a su mitad en el sentido de la presión; o cuando la pasta arrollada en cilindro y curvada en forma de anillo no se produzca tampoco grietas, o cuando estirada una tira, se deja notar visiblemente una reducción de la sección antes de producirse la rotura.

Según los datos de Prikloński [16], la plasticidad de las arcillas, determinadas por el método de Casagrande, se caracteriza por los valores mostrados en la siguiente tabla:



Tabla I.4 Clasificación de las arcillas según su plasticidad

Arcillas	Número de plasticidad
De alta plasticidad	Mayor que 17
Plásticas	7 - 17
De baja plasticidad	0 - 7

### I.3.2 Capacidad de absorción

La capacidad de absorción de agua está determinada por la mayor o menor facilidad de humectación que produce el esponjamiento de las partículas de arcilla, que impiden el paso del agua en mayor cantidad cuando la arcilla es grasa y facilitarán paso a aquella cuando es magra. Al secarse, la arcilla cede el agua, primero la higroscópica, eliminándose a través de los poros de la superficie seca. Las arcillas magras secan con mas facilidad y mejor que las grasas [40].

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate.

La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

En la Tabla I.5 se muestran algunos valores de Contracción total y Absorción de agua a diferentes temperaturas para algunas arcillas de alfarería [35], en la cual se observa la influencia de la temperatura a la cual ha sido cocida la pasta.

Tabla I. 5 Contracción total y Absorción de agua a diferentes temperaturas para algunas arcillas de alfarería

Arcillas	Cocida al cono 010		Cocida al cono 06		Cocida al cono 4	
	% C	% A	% C	% A	% C	% A
Roja de Ohio	11.5	3.9	12.5	0	Hinchada	
Roja	11.0	9.7	15.0	3.4	15.0	0
De loza	9.0	12.2	10.5	8.4	12.0	3.2
De loza	6.5	16.8	8.5	11.6	10.5	5.3
Plástica inglesa	14.0	16.0	18.0	15.0	18.0	2.0
Refractaria	8.0	11.7	10.0	8.9	11.0	6.3
Caolín de Florida	12.5	25.2	16.5	12.7	18.5	6.5
Caolín de Georgia	8.0	29.6	9.0	26.9	12.0	22.9

### I.3.3 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlamilar son propiedades características de las esmectitas, y su importancia es crucial en los diferentes usos industriales.

Aunque la hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación está unido a la naturaleza del catión interlamilar y a la carga de la lámina [3].

La absorción de agua en el espacio interlamilar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlamilar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida [20].

### **I.3.4 Tixotropía**

Al añadir una pequeña proporción de arcilla al agua, ésta permanece flotando sobre el líquido, alcanzando el estado coloidal. Sin embargo, si se añade aún más, el líquido se torna viscoso y se resiste a fluir; en cambio, si se agita vigorosamente la suspensión, el líquido recupera su fluidez, perdiéndola nuevamente al cesar la agitación. A esta propiedad se le llama tixotropía, y es típica de muchas de las arcillas comunes. Tiene su base en la afinidad por el agua, así como en la capacidad de hinchamiento del espacio interlaminar, el cual puede alcanzar hasta quince veces el volumen original [40].

Debido a esta propiedad ocurre el fenómeno de pérdida de resistencia de la masa de arcillas (coloide), al amasarla, y su posterior recuperación con el tiempo.

Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se les deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico [20].

## **§ I.4 CONSIDERACIONES ACERCA DE LAS PASTAS DE ARCILLAS**

La composición química real de las arcillas, aunque es necesario conocerla, tienen pocas veces algún interés en el proceso de formulación de la mezcla, siendo lo más importante y de mayor interés el carácter físico de las materias primas, tales como: la plasticidad, la estructura de grano y su comportamiento térmico; así como su contracción y fusibilidad.

Una pasta de arcilla no es más que una mezcla de arcillas, o arcilla y otras sustancias minerales terrosas, que se mezclan para lograr una finalidad cerámica determinada [35].

Las arcillas empleadas en la cerámica no pertenecen a una especie mineral única, estando formadas por la asociación de varias, que se comunican sus propiedades y características [3].

Para conseguir mejores resultados en la producción de objetos cerámicos, la arcilla es beneficiada de acuerdo con las técnicas de producción a emplear y el fin que se persiga. Así la producción se diversifica ampliamente en la actualidad.

Muchas arcillas, se pueden utilizar sin dificultades tal y como se encuentran en la naturaleza. En la fabricación de ladrillos, por ejemplo, sería antieconómico tener que hacer demasiado mezclado de materias primas. De hecho la arcilla que puede utilizarse para la fabricación de ladrillos corrientes se encuentra en muchos lugares. Igualmente muchas arcillas pueden extraerse del suelo, amasarse con la cantidad adecuada de agua y transformarse en objetos sin hacer ninguna adición [35].

#### **I.4.1 Ensayos preliminares sobre depósitos de arcilla natural**

Después de localizado el depósito de material arcilloso, deben realizarse ensayos previos para determinar su posible uso en cerámica. Esto está definido por la aparición en las arcillas de algunas sustancias que se consideran contaminantes, cuya presencia puede incluso, inhabilitarlas para ser usadas. Algunas de estas sustancias son por ejemplo los álcalis solubles, los cuales pueden detectarse por las costras o coloración blanca de la arcilla seca [20].

La cal es otra sustancia que no debe contener la arcilla debido a que cuando se cuecen cambian de carbonato a óxido cálcico, el cual es inestable en la atmósfera porque absorbe agua y se hincha provocando la rotura de las piezas a los pocos días o incluso a meses de cocida la pasta. La presencia de mucha materia orgánica es perjudicial, ya que torna la arcilla demasiado pegajosa cuando se endurece. [11]

#### **I) Inspección visual y de textura**

El color de la arcilla natural no es un indicador de su comportamiento luego de la cochura. No todas las arcillas conservan su color después de cocidas.

El color no define directamente el uso de una arcilla, pues aunque los objetos finos son predominantemente blancos, muchos bellos artículos de arte tienen un color rojo intenso; de modo semejante, aunque los productos de arcilla pesados se fabrican generalmente a partir de arcillas rojas o amarillas tras la cochura, los refractarios son a menudo de color muy claro [40].

La textura de la arcilla natural es útil solamente si es blanda, cuya finura relativa puede apreciarse al tacto. Sin embargo, muchos materiales de grano fino se presentan en masa duras que han de prepararse antes de que se puedan determinar sus propiedades. [11]

## **II) Tamizado**

Primeramente es necesario triturar los conglomerados de arcilla hasta lograr el tamaño natural y luego tamizarla. Si la mayor parte de ella queda sobre el tamiz de 18 mallas por pulgada, es improbable que el material contenga mucha sustancia de arcilla y es útil solamente para fines especializados en cerámica. Si queda un pequeño residuo sobre el tamiz de 18 mallas y residuos apreciables sobre los tamices de 60, 100 y 200 mallas, el material será probablemente adecuado para productos cerámicos bastos y una vez molido puede ser bueno para productos finos. [11]

## **III) Plasticidad**

Puede comprobarse por un ensayo de plasticidad, mezclando agua gradualmente por amasado a mano con la arcilla pulverizada y haciendo una estimación de la misma, la cual puede resultar, nula, pobre, mediana, buena, excepcional [13].

## **IV) Ensayos químicos**

1. Determinación de carbonatos.
2. Determinación de Hierro.
3. Alúmina libre
4. Ensayo de impurezas solubles

## **V) Ensayos físicos**

1. Ensayo para determinar las posibles zonas de temperaturas de cocción del material y su color de cocción.
2. Ensayo de la contracción y absorción en muestras cocidas a distintas temperaturas [20].

### **I.4.2 Adiciones a las arcillas para hacerlas útiles**

Generalmente es necesario hacer adiciones o mezclas a la arcilla natural para ajustarla a las necesidades de conformación y cocción de acuerdo con las finalidades prácticas, sobre todo en arcillas con alto contenido de Hierro, como las existentes en la región de Centeno.

Tales exigencias pueden ser por ejemplo; plasticidad excepcional para hacer la arcilla adecuada para el torneado, o una densidad completa a una temperatura de cocción determinada, o blancura y translucidez cuando está cocida o el desarrollo de ciertos colores y texturas deseados.

Para llegar a obtener mezclas adecuadas para un uso dado, se deben comprender las propiedades físicas de las arcillas y su respuesta a la cocción y también las propiedades físicas y térmicas de otros materiales utilizados en las mezclas de arcilla.

Los materiales que constituyen las mezclas de arcilla pueden ser considerados como:

- Plásticos (arcilla)
- Relleno o desengrasantes, que son materiales no plásticos, tales como el pedernal, la chamota o arcilla calcinada
- Fundente, tales como el feldespatos o las fritas

Los plásticos dan la trabajabilidad y plasticidad necesarias a la pasta de arcilla; los rellenos o desengrasantes hacen posible que la arcilla se seque con seguridad sin deformación o agrietamiento indebidos y disminuyen el valor de la contracción. Los fundentes controlan el punto de fusión y endurecimiento de la arcilla y hacen que se cueza a un grado satisfactorio de densidad a cualquier temperatura [35].

La arcilla se puede cambiar de las siguientes maneras:

- 1)- Cambios de color o textura: puede desearse modificar el color de cocción de la arcilla para hacerlo más claro o de tono más oscuro, aumentar o disminuir su rugosidad granular o textura.
- 2)- Cambios de la plasticidad: puede desearse hacer la arcilla más plástica o menos plástica.
- 3)- Cambios para disminuir la contracción o mejorar el secado y cocción, con el mínimo de deformación o agrietamiento [35].

### **I.4.3 Pastas de arcillas para tornear**

La arcilla para tornear debe ser extremadamente plástica; que no absorba agua fácilmente mientras se trabaja y mantenga su forma, incluso, cuando esté blanda y tenga secciones delgadas, además debe ser densa. Es aceptable que las arcillas para torneado posean una contracción alta y cierta tendencia a la deformación, además las piezas deben ser tratadas cuidadosamente en el secado y la cocción.

La arcilla plástica se utiliza para aumentar la plasticidad, sin embargo su proporción no debe exceder en un 30 % ya que provoca dificultades con la contracción, en el secado, y la pasta puede hacerse muy pegajosa [15].

Como regla general las pastas para tornear se deben hacer con el porcentaje más pequeño posible de sustancias no plásticas en ellas, tales como el pedernal y el feldespato. Los desgrasantes como el talco o frita pueden disminuir significativamente la plasticidad [35].

Para hacer formas grandes o altas y especialmente las que tienen mas de 30 cm de altura es necesaria una arcilla con algún material que mejore la cohesión entre las partículas. Se ha comprobado que la chamota, con la granulometría adecuada, o la arcilla gruesa le da la necesaria estructura para el torneado. A las pastas de tornear en lugar de la chamota o además de ésta, puede añadirse una arcilla refractaria gruesa o arcilla cuarzosa. En general un 8% a 10% de material granular puede mejorar el comportamiento de las arcillas de tornear [35].

Además puede añadirse bentonita para mejorar su trabajabilidad en el torno. La bentonita se hincha y forma un gel cuando se moja, y la presencia de pequeñas cantidades de ella en la pasta de arcilla aumenta grandemente su plasticidad; sin embargo si se utiliza más de un 2 % aproximadamente de bentonita, la arcilla se hace muy pegajosa y difícil de amasar y un exceso de bentonita puede causar problemas en el secado. La pasta correcta para el trabajo en el torno debe tener una arcilla densa, grasa, bien madura y dócil [20].

### **I.4.4 Pastas de arcillas para barro cocido**

Para formular pastas para barro cocido, con las cuales se pueden obtener ladrillos, piezas de alfarería, tiestos, etc, la variante mas económica es utilizar una arcilla natural. La mayoría

de las arcillas rojas comunes se cuecen a un estado bastante denso y duro en la zona de temperatura entre el cono 0 y el cono 1. (ANEXO 1)

El barro cocido se cuece usualmente a temperaturas por debajo del cono 06 y la arcilla cocida permanece algo porosa y de estructura abierta. La inmensa mayoría de la cerámica mundial ha sido barro cocido, por lo muy corriente de las arcillas para éste y la relativa facilidad de alcanzar en el horno las temperaturas necesarias para cocerla; pues tiene una calidad táctil blanda y una ligereza bastante diferente al de las formas más densa de cerámica; aunque más quebradizo que la loza y la porcelana, no es tan frágil [35].

#### **I.4.5 Pastas de arcilla para modelar**

Para modelar objetos tales como esculturas, azulejos, piezas arquitectónicas o vasijas grandes son necesarias mezclas de arcillas que sequen rápidamente y cuezan con seguridad y con pequeño peligro de agrietamiento. Un contenido de 20 a 30 % de chamota puede proporcionar las propiedades necesarias para modelar.

Mezclas de arcillas muy plásticas con materiales gruesos como arcillas refractarias y chamota pueden dar el grado de plasticidad adecuado sin aumentar la contracción o afectar el secado y la cocción [35]. Un pequeño porcentaje de bentonita, hasta el 2 ó 3 % aporta cohesión adicional y sustentación a la arcilla modelada.

Pueden hacerse pastas de arcillas ligeras mezclando agregados combustibles como aserrín, cascarilla de café, etc. a la arcilla plástica. Estos añadidos orgánicos se queman y desaparecen en la cocción y añaden rugosidad a la pasta mejorando el secado [35].

#### **§ I.5 Requerimientos tecnológicos de la arcilla para cerámica**

El control de los parámetros que caracterizan las diferentes producciones de arcillas, permiten conocer la calidad de las mismas y si cumplen los requisitos para su uso y consumo. Los diferentes tipos de arcillas poseen requerimientos tecnológicos de acuerdo con sus características y con el posible uso.

La Tabla I.7 muestra algunos de los requerimientos tecnológicos para las arcillas de alto contenido de hierro o de bajo punto de fusión y para arcillas un poco más puras [29].



Tabla I.7 Cerámica que emplea arcillas de bajo punto de fusión

• Arcillas de bajo punto de fusión	1100 – 1150°C
▪ Temperatura de cochura	800 – 900°C
▪ Absorción	Menor o igual a 25%
▪ Contracción al secado	Menor o igual a 6%
▪ Pérdida por ignición	Menor o igual a 10%
• Margas calizas arcillosas	
▪ Arcillas	Mayor o igual a 10%
▪ Carbonato de Calcio	Menor o igual a 60%
▪ Temperatura de cochura	600 – 700°C
▪ Contracción al secado	Menor 5%
▪ Pérdida por ignición	Menor 15%
▪ Contracción a la quema	1 %
▪ Humedad para introducirla al horno	11 %

Las arcillas ricas en Silicatos de Aluminio y pobres en Fe, Ca y Mg son consideradas, arcillas de alto punto de fusión, y presentan algunas de las características mostradas en la Tabla I.8 [29].

Tabla I.8 Cerámica que emplea arcilla de alto punto de fusión

▪ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36 – 42 %
▪ SiO <sub>2</sub>	50 – 57 %
▪ CaO y MgO	Menos de 0,5 %
▪ FeO	2 %

### I.5.1 Secado de la arcilla

El secado de la arcilla va siempre acompañado de contracción. La arcilla plástica se contrae alrededor de un 5% y las muy plásticas pueden contraerse hasta un 8% [40].

A medida que se desarrolla el proceso de secado, el agua superficial eliminada se reemplaza por el agua proveniente del interior de la pieza, debido a ello, las partículas se van acercando y unas con otras, alcanzándose la contracción máxima, cuando todas las partículas se hallan en contacto [43], como se muestra en la Figura I.3

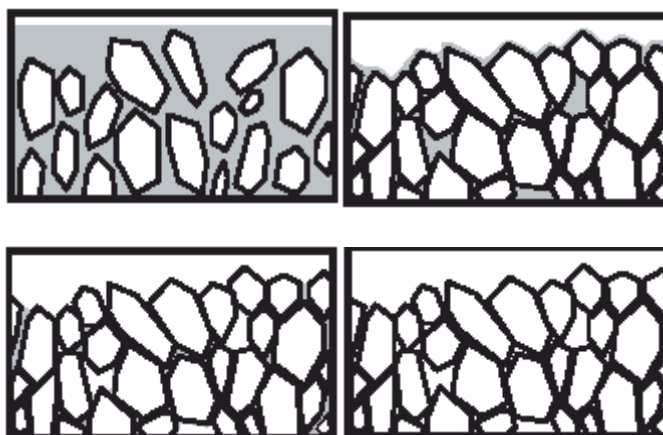


Figura I.3 Mecanismo de la contracción de secado

La contracción, aunque se desarrolle lentamente, provoca dificultades durante el secado. A medida que la película de agua entre los granos de arcilla se pierde por evaporación, las partículas se acercan más entre sí, cerrando el espacio interlaminar. Cuando la superficie de la masa de arcilla está ligeramente seca, el agua del interior sale por atracción capilar. El secado se produce uniformemente, a menos que la masa sea muy gruesa [35].

El efecto acumulativo de cada partícula acercándose unas a otras es la contracción de toda la masa.

La contracción y el secado están relacionados generalmente con la estructura del grano de la arcilla y por tanto con la plasticidad. Las arcillas de tamaño de grano muy fino se contraen más debido a la presencia de mayor cantidad de intersticios llenos de agua que se cierran. Cuando toda el agua se ha evaporado y las partículas están en contacto ha

concluido el secado, a pesar de que ellas pueden estar húmedas y el secado no está completo, hasta que se elimine por evaporación.

El secado mas rápido de una parte del objeto que otra, provoca la contracción desigual entre las mismas trayendo como consecuencia el curvado o agrietamiento. Para evitar los indeseados procesos de alabeo, agrietamiento o deformación, es necesario un secado lento y uniforme [35].

#### **I.5.1.1 Formas de facilitar el secado**

El proceso de secado se facilita añadiendo a la arcilla cualquier tipo de partículas no plásticas, las cuales tienden a absorber menos agua que la arcilla y proporcionan poros abiertos o canales a través de los cuales se evapora el agua.

Las partículas no arcillosas, especialmente las de tamaños relativamente grandes tienen gran uso cuando los objetos deben hacerse con paredes gruesas como esculturas o terracotas. En este caso se utiliza comúnmente la chamota, que no sufre contracción posterior y disminuye la contracción total. [35]

Otros materiales que también pueden disminuir la contracción y favorecer el secado rápido son el cuarzo y el feldespatos. [40]

Se debe tener en cuenta que cuando se necesita de una arcilla muy plástica, por ejemplo en el torneado, los materiales no plásticos deben mantenerse al mínimo. Las pastas de arcillas varían considerablemente su resistencia en seco. Un objeto hecho de arcilla plástica puede ser 6 ó 7 veces más resistente que uno hecho de caolín. La propiedad de resistencia en seco está directamente relacionada con el tamaño de las partículas y en consecuencia con la plasticidad [40].

#### **I.5.2 Proceso de cocción**

Al cocerse, la arcilla, que es un material plástico y fácil de conformar, se transforma en una sustancia dura y permanente.

Durante la cocción se producen profundos cambios en la arcilla. La arcilla cocida es completamente diferente tanto física como químicamente.

Después de cocida, la arcilla, que era blanda, fácilmente desintegrable, plástica y sin resistencia, se convierte en un material duro, semejante a una roca e impermeable al agua [36].

El primer cambio que sufre durante la cocción es la terminación de su secado, el cual debe llevarse a cabo lentamente, pues la formación de vapor de agua en la pasta de arcilla puede provocar su estallido.

El siguiente cambio ocurre aproximadamente a los 350°C, donde el agua combinada químicamente comienza a eliminarse. En este punto debe darse a la cocción suficiente tiempo para evitar el desarrollo repentino de vapor de agua y la posible rotura del objeto [35].

A los 500 °C la arcilla se ha deshidratado completamente y no se ablandará o desintegrará en el agua. También habrá perdido su plasticidad, teniendo lugar un cambio químico irreversible, que no está acompañado de contracción [36].

Otro cambio importante que se produce durante las primeras etapas de la cocción es la oxidación o descomposición de todos aquellos elementos de la arcilla que no están ya en forma de óxidos, los cuales pueden ser materia orgánica como el carbón, e inorgánicas como los carbonatos o sulfatos, la cual se completa a los 900°C aproximadamente [36].

Al aumentar la temperatura, el cuarzo, asociado a la arcilla como un mineral accesorio, se reordena en una forma ligeramente diferente. Cuando se alcanzan los 573°C los cristales de cuarzo cambian de cuarzo alfa a cuarzo beta, el cual va acompañada de un ligero ( $\pm 2\%$ ) aumento de volumen, que es reversible, cuando se enfría el cuarzo cambia de beta a alfa volviendo a tomar su forma cristalina y tamaño originales. Este cambio de volumen en el cuarzo de una pasta cerámica debe realizarse lentamente para evitar daños en las piezas.

Gran parte de la cerámica que sale del horno agrietada está dañada o bien por un calentamiento o un enfriamiento demasiado rápido a esta temperatura crítica [37].

## **§ 1.6 CONCLUSIONES PARCIALES**

1. Las grandes extensiones de arcillas del municipio no han sido suficientemente estudiadas, con el propósito de ser utilizadas con fines industriales.
2. La composición química y otras propiedades de las arcillas de Centeno, son muy similares a las arcillas rojas comunes.
3. Los altos contenidos de hierro, hacen necesario establecer cambios en la tecnología del tratamiento que está siendo empleada tradicionalmente, para su utilización en la producción de objetos cerámicos decorativos y utilitarios.

## **CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **§ II.1 TOMA DE MUESTRA**

Las muestras fueron tomadas de la cantera de arcilla roja que constituye la fuente de materias primas del Tejar, y que se encuentra localizada aproximadamente a 100 m del mismo, en la zona de Centeno, a un lado de la carretera Moa-Sagua, que tiene 10 m de largo y aproximadamente 7 m de ancho [31].

Con el objetivo de que la muestra fuera lo mas representativa posible se tomaron porciones de varios puntos a lo largo y ancho del yacimiento.

La cantidad de muestra se determinó de acuerdo con la cantidad de ensayos que se realizarían. Luego de su traslado, se sometieron a una limpieza con el objetivo de eliminar restos de materia orgánica, piedras, y alguna que otra sustancia propia de la cantera. Se homogenizaron a través del método de paleo y se tomaron las cantidades necesarias para los ensayos.

### **§ II.2 CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA EMPLEADA EN EL TEJAR**

La mezcla de arcillas que se utiliza en el Tejar de Centeno, donde se fabrican ladrillos, conexiones, entre otros materiales para la construcción, está compuesta por dos partes de arcilla roja (66%), del yacimiento que se encuentra próximo al local, en la carretera Sagua-Moa, y una parte de arcilla gris (33%) de las márgenes del río de la Granja de la ESUNi a pocos metros del propio tejar, sin adicionar otro tipo de material. Estas arcillas se utilizan de forma natural, es decir tal y como son extraídas de la cantera, sin recibir tratamiento de molienda o cribado alguno, solamente adicionando agua hasta obtener una pasta moldeable.

Con la pasta confeccionada de esta manera no se han obtenido buenos resultados en la fabricación de objetos cerámicos decorativos u ornamentales de alta demanda popular pues se agrietan durante el secado, se rompen durante y después de la cocción y no tienen una buena textura, ni el acabado adecuado.

### **II.2.1 Modificaciones a realizar a las mezclas tradicionales**

Después del estudio bibliográfico y de acuerdo con la experiencia práctica, se llegó a la conclusión de que la mezcla del Tejar debía ser objeto de investigación.

Para ello se propuso realizar modificaciones a las mezclas y cambios en la tecnología del tratamiento. Por lo que se decidió:

- Añadir a la mezcla un material que no disminuya su plasticidad y a la vez mejore la contracción durante el secado, no provocando roturas por este concepto y que además no influya demasiado en la temperatura de fusión de las arcillas, que por contener un alto porcentaje de hierro, es baja.
- Someterla a molienda para disminuir el tamaño de las partículas y mejorar la calidad de la pasta en cuanto a textura del producto final.
- Mejorar las condiciones de secado, garantizando que sea lo mas uniforme posible.
- Realizar el proceso de cocción manteniendo un control estricto de la temperatura, cuyos cambios no deben ser bruscos ya que pueden provocar la rotura de las piezas.

El feldespató fue el material escogido para añadir a la mezcla de arcillas, por ser, de los materiales recomendados por la literatura [8, 15 y 35], el que debe cumplir los requisitos anteriormente expuestos, además de ser abundante en nuestro país, y por tanto, de fácil adquisición, además de no requerir de un tratamiento previo para su utilización.

Este material suele mejorar la compacidad y disminuye la contracción de secado aunque disminuye la plasticidad de mezcla y generalmente aumenta la fundencia.

Con el objetivo de determinar el comportamiento de los parámetros tecnológicos añadiendo a las mezclas el feldespató, se procedió a hacer el diseño de experimentos utilizando este material en las proporciones recomendadas en la bibliografía y la experiencia práctica del Tejar.

### § II.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para llevar a efecto el estudio de los diferentes factores que intervienen en el tratamiento correcto de las materias primas, que constituyen las mezclas de arcillas roja y gris; se analizará cómo influyen algunos de ellos en la obtención de resultados satisfactorios en el producto final.

El tamaño del grano, la composición de la pasta, las condiciones de secado y la temperatura de cocción, son los factores que mayor influencia presentan de acuerdo con la experiencia y la literatura consultada, por lo cual serán los que se tendrán en cuenta en el presente trabajo.

- Tamaño del grano:

Inicialmente se pensó que la arcilla poseía una estructura física coloidal, pero estudios posteriores indican que el tamaño extremadamente pequeño de los granos implican la mayoría de sus propiedades físicas. Muchas arcillas presentan un porcentaje sustancial de partículas por debajo de  $1\mu\text{m}$  de diámetro, las cuales pueden ser consideradas como cristales simples de arcilla. El examen en el microscopio electrónico (Figuras I.1 y I.2), ha revelado que las partículas de arcilla tienen forma plana, alargada en dos dimensiones y delgada en la otra dimensión [10].

Debido a la forma y tamaño extremadamente pequeño de sus partículas, tiene un área superficial muy grande por unidad de volumen. La plasticidad de la arcilla, así como su contracción y absorción de agua, se le atribuye a la forma y el tamaño del grano [14].

- Condiciones de secado:

El proceso de secado consiste en evaporar el agua que se añadió, para poder conformar los objetos, que oscila entre el 15 y 25 %.

El proceso de secado va siempre acompañado de contracción. A medida que el agua se evapora, las partículas de arcilla se acercan más entre sí cerrando el espacio que había sido ocupado por el agua. Esta humedad está localizada tanto en el interior como en la superficie de la pieza. Si el proceso de secado se lleva a cabo muy bruscamente la pieza se puede agrietar debido a que la parte exterior se seca casi completamente y se contrae, mientras que el interior queda húmedo. Se ha observado que las contracciones no avanzan



linealmente con el tiempo, casi el 25 % de la contracción ocurre durante un tiempo muy corto en el comienzo del secado, continuando después muy suavemente [35]. Si se quiere eliminar el alabeo, la deformación o el agrietamiento los objetos cerámicos deben secarse lenta y uniformemente, es decir hay que tener sumo cuidado durante el secado y sobre todo en la fase primaria [40].

- Temperatura de cocción:

Durante la cocción se producen profundos cambios en la arcilla. El primer cambio es la terminación de su secado, el cual debe efectuarse lentamente de lo contrario la formación de vapor en la pasta puede provocar su estallido. El siguiente cambio ocurre aproximadamente a 350°C, cuando el agua combinada químicamente comienza a eliminarse.

Alrededor de los 500 °C estará completamente deshidratada y la pieza no se ablanda ni se desintegra en el agua y ha perdido su plasticidad [35].

- Composición de la pasta:

Raramente las arcillas pueden ser utilizadas tal y como están en la naturaleza, por lo que hay que añadir otros materiales tales como fundentes, desgrasantes u otros tipos de arcillas para mejorar sus propiedades. De hecho existen diferentes formas de preparar las arcillas de acuerdo con el fin que se persiga [35].

Ha quedado demostrado que las mezclas tal y como son elaboradas en el tejar de Centeno, no pueden ser utilizadas para cerámica decorativa y utilitaria, por las exigencias de calidad del acabado de las mismas y los problemas de roturas que presentan, por lo cual se proponen cambios en su composición.

### **II.3.1 Elección de las variables de entrada y salida**

Para llevar a efecto el desarrollo de la investigación se escogió el diseño de mezclas o McLean Adnerson [12], lo que permite, haciendo una comparación entre la composición de varias mezclas, seleccionar cual ellas ofrece buenos resultados de las variables de salida. Se eligió, además una temperatura de cocción de 890 °C y un tamaño de partículas de +0.27mm.

VARIABLES DE ENTRADA (X):

- Composición de la mezcla:  
     $X_1$  - arcilla roja  
     $X_2$  - arcilla gris  
     $X_3$  - desgrasante (Feldespatos)
- Temperatura de cocción
- Tamaño de partículas
- Condiciones de secado y cocción

VARIABLES DE SALIDA (Y):

- $Y_1$  - % de contracción total
- $Y_2$  - % de absorción
- $Y_3$  - Resistencia a la compresión

**II.3.2 Elección de los niveles principal, superior e inferior**

$X_i^-$  nivel mínimo de la variable

$X_i^0$  nivel principal de la variable

$X_i^+$  nivel máximo de la variable

Para establecer los diferentes niveles de la variable de entrada, composición de la mezcla, se tuvo en cuenta la experiencia del Tejar de Centeno, añadiendo el feldespatos en las proporciones recomendadas por la literatura. Estos niveles quedaron establecidos como se muestra en la Tabla II.1

Tabla II.1 Valores de los niveles mínimo, principal y máximo de las variables de entrada.

Materias primas	$X_i^-$	$X_i^0$	$X_i^+$
Arcilla roja	60 %	66 %	70 %
Arcilla gris	30 %	33 %	40 %
Desgrasante	1 %	1,5 %	2 %

Luego se confeccionó la matriz de experimentos. Se utilizaron los códigos:

l – nivel mínimo.

u – nivel máximo.

### II.3.3 Número de experimentos a realizar

El número de experimentos a realizar fue calculado por la ecuación 1.

$$N = q \times 2^{(q-1)} \dots\dots\dots(1)$$

Donde q es el número de variables de entrada.

Por tanto, el número de experimentos es: **N = 12**

Con el número de experimentos se confeccionó la matriz de experimentos con los códigos seleccionados que se muestra en la Tabla II.2

Tabla II.2 Matriz de los experimentos codificada.

No Experim.	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	-
2	l <sub>1</sub>	-	l <sub>3</sub>
3	-	l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>
4	u <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	-
5	u <sub>1</sub>	-	l <sub>3</sub>
6	l <sub>1</sub>	u <sub>2</sub>	-
7	-	u <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>
8	l <sub>1</sub>	-	u <sub>3</sub>
9	-	l <sub>2</sub>	u <sub>3</sub>
10	u <sub>1</sub>	u <sub>2</sub>	-
11	u <sub>1</sub>	-	u <sub>3</sub>
12	-	u <sub>2</sub>	u <sub>3</sub>

Sustituyendo los niveles por sus correspondientes valores se obtuvo la matriz definitiva según la Tabla II.3

Tabla II.3 Matriz de experimentos descodificada.

Experim.	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	60	30	-
2	60	39	1
3	69	30	1
4	70	30	-
5	70	29	1
6	60	40	-
7	59	40	1
8	60	38	2
9	68	30	2
10	70	40	-
11	70	28	2
12	58	40	2

De la matriz de experimentos (Tabla II.3) se obtiene que se deben realizar cuatro experimentos, los cuales son los que cumplen con la condición de normalidad, o sea, una mezcla con un contenido de 100% entre los tres componentes.

Los cuatro experimentos resultantes fueron los números 2; 3; 8 y 9. (A partir de aquí y en lo adelante se denominarán experimentos 1; 2; 3 y 4), debido a que estos son los que cumplen con la condición de normalidad, es decir la suma de las composiciones es igual al 100%.

Tabla II.4 Número de experimentos a realizar.

Experim.	X <sub>1</sub> (%)	X <sub>2</sub> (%)	X <sub>3</sub> (%)
1	60	39	1
2	69	30	1
3	60	38	2
4	68	30	2

En el ANEXO 4 se muestra una representación de estos valores en un diagrama triple, en el cual se puede apreciar de forma clara, la zona de experimentación.

## § II.4 METODOLOGÍA PARA LA REALIZACION DE LOS ENSAYOS

Las determinaciones de la Contracción y de la Absorción de agua se realizaron mediante sencillos métodos que se describen a continuación:

### II.4.1 Ensayo de la contracción total

Corrientemente la contracción de cocción se determina en muestras que se cuecen a distintas temperaturas. Esto permite tener una idea de la cohesión progresiva de la arcilla con el avance de la temperatura [35].

1. De una masa de arcilla bien amasada, de una consistencia promedio para modelar, hacer un cierto número de probetas con las siguientes dimensiones:  
14 cm de largo X 4 cm de ancho X 1 cm de espesor.
2. Dejar que las barretas se sequen, volteándolas frecuentemente para evitar la deformación.
3. Cocer las probetas secas a diferentes temperaturas.
4. Medir la longitud de las probetas cocidas.
5. Calcular la contracción total por la fórmula:

$$\text{Contracción lineal} = 100 \cdot \frac{\text{Longitud en plástico} - \text{Longitud cocida}}{\text{Longitud en plástico}} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

Longitud en plástico: L.P (cm)

Longitud después de cocida: L.C (cm)

#### II.4.2 Ensayo de absorción de agua de la arcilla cocida

El grado de absorción de agua es una medida de la maduración de la mezcla de arcilla cocida. A medida que la mezcla de arcilla se acerca a la vitrificación su absorción se acerca a cero [35].

1. Pesar cuidadosamente las probetas cocidas del experimento anterior.
2. Hervir en agua las probetas cocidas durante dos horas.
3. Secar la superficie de las probetas con una toalla y pesarlas otra vez.
4. Calcular la absorción utilizando la fórmula:

$$\text{Absorción de agua} = 100 \cdot \frac{\text{Peso saturado} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \dots\dots\dots(3)$$

Peso saturado: P.H (g)

Peso seco: P.S (g)

#### II.4.3 Ensayo de resistencia a la compresión

En este ensayo [7], las muestras que van a ser sometidas a carga deben tener una forma cilíndrica con una relación entre altura y diámetro igual a la unidad. Según las normas se recomiendan muestras de altura y diámetro igual a 42 mm que permiten variaciones entre los límites de 40 a 45 mm y diferencia entre altura y diámetro de hasta 5 %. A cada una de las muestras una vez preparadas se le aplican cargas en los platos de la prensa Hidráulica T N Π Π - 10 de 10 T, aumentando su presión en un rango de 5 a 10 Kg/cm<sup>2</sup> por segundo.

Luego se realiza el cálculo de la Resistencia a la compresión a través de la fórmula 4.

$$R_c = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{A} \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

A: Área de la sección transversal de la probeta ( $\text{cm}^2$ ).

Q<sub>máx</sub>: Carga máxima sobre la muestra en el momento de su destrucción (kgf).

R<sub>c</sub>: Resistencia a la compresión ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

## § II.5 ELABORACION DE LAS MEZCLAS

Las pastas cerámicas cuyas composiciones fueron obtenidas de acuerdo con el diseño de experimentos (Tabla II.4) se confeccionaron tomando 4000 g de mezcla como base, y de aquí se calcularon los demás componentes para cada uno de los experimentos.

Las arcillas se secaron en la estufa del laboratorio de mecánica de suelos y luego se molieron en el molino de bolas en el laboratorio de Beneficio de Minerales del ISMM durante una hora. Posteriormente, con la cantidad de agua adecuada (suficiente para que se mojen todas las partículas), se confeccionaron las probetas con las diferentes mezclas y se procedió a realizar los ensayos correspondientes en cada experimento.

La determinación de las variables Absorción de agua y Contracción total se realizaron mediante técnicas operatorias ya descritas, efectuadas en el laboratorio de Beneficio de Minerales y de Química General del ISMM. Para ello se confeccionaron cinco probetas rectangulares, con cada una de las mezclas resultantes del diseño de experimentos.

Otro parámetro importante, mediante el cual se evaluaron las pastas (mezclas) obtenidas es la resistencia a la compresión. Para la determinación de este parámetro se confeccionaron probetas cilíndricas, las cuales se secaron y cocieron en las mismas condiciones de las muestras anteriores y se determinó la carga máxima en la Prensa Hidráulica T N Π Π - 10 de 10 T) del laboratorio de áridos de la ECRIN y en el laboratorio de rocas del ISMM. Para estos ensayos se realizaron tres replicas, de acuerdo con las exigencias del equipo de medición y de la técnica operatoria.

## **II.5.1 CORRIDAS EXPERIMENTALES**

Las probetas experimentales, después de secadas a temperatura ambiente, teniendo en cuenta las mejores condiciones, fueron cocidas a la temperatura seleccionada según el diseño de experimentos, Cono 010 (ANEXO 1), recomendada para el bizcochado de las arcillas rojas con alto contenido de hierro [12].

Luego de evaluados los parámetros tecnológicos de las diferentes mezclas, aplicando los métodos estadísticos correspondientes se realizó la comparación entre los cuatro experimentos, con el objetivo de comprobar cual de las mezclas obtenidas tendrían mejores resultados, aplicando el análisis de varianza [9] recomendado en la literatura para estos casos.

Para realizar el análisis estadístico del diseño con un criterio de clasificación [9] se probó la hipótesis nula de que las medias de los cuatro tratamientos o experimentos realizados son iguales (ANEXO 3), mediante un análisis de varianza, que permite determinar si hay diferencias significativas entre los experimentos para un nivel de confianza del 95 al 99 %.

## **§ II.6 RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS DIFERENTES MEZCLAS**

### **II.6.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE PLASTICIDAD**

El índice de plasticidad de cada una de las arcillas ensayadas [17], se determinó por el método de Casagrande [7], en el laboratorio de mecánica de suelos de la Facultad de Geología del ISMM y se muestra en la Tabla II.5

Tabla II.5 Índice de plasticidad de las arcillas roja y gris de Centeno.

Arcilla	Límite de Plasticidad
Roja	14.52
Gris	11.40



De acuerdo con la clasificación de Priklonski (Tabla I.5), las arcillas de Moa se encuentran dentro de las arcillas plásticas.

La plasticidad de las diferentes mezclas estudiadas fue determinada por el método más sencillo, es decir doblando o roscando un cilindro fino, en el cual no deben aparecer grietas (en caso de agrietarse la masa, la plasticidad es baja). A través de este método, que es muy utilizado en la práctica (por ser sencillo, rápido y eficaz), se determinó que la plasticidad de las cuatro mezclas estudiadas, es buena.

Tabla II.6 Plasticidad de las mezclas

<b>Exper.</b>	<b>Plasticidad</b>
1	Buena
2	Buena
3	Buena
4	Buena

## II.6.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTRACCION TOTAL

A partir de los ensayos realizados se obtuvieron los datos (ANEXO 2, Tabla 2.1) para la determinación de la contracción total para las cuatro mezclas analizadas.

Se realizaron cinco replicas, cuyos resultados fueron promediados y se muestran en la Tabla II.7

Tabla II.7 Contracción total a 890°C (%)

<b>C</b>						
<b>Exper.</b>	<b>Replica 1</b>	<b>Replica 2</b>	<b>Replica 3</b>	<b>Replica 4</b>	<b>Replica 5</b>	<b>Promedio</b>
1	10,2	14,8	10,2	10,2	10,2	<b>11,1</b>
2	13,8	13,8	12,9	13,8	14,8	<b>13,8</b>
3	14,8	12,9	10,2	14,8	11,1	<b>12,8</b>
4	12,0	10,2	10,2	11,1	12,0	<b>11,1</b>

### II.6.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABSORCION

El grado de madurez de la pasta, dado por la absorción de agua fue determinado para cinco replicas a partir de los datos obtenidos de los ensayos (ANEXO 2, Tabla 2.2) y sus valores promedios se muestran en la Tabla II.8

Tabla II.8 Absorción de agua a 890 °C (%)

<b>A</b>						
Exper.	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	<b>Promedio</b>
1	21,7	19,2	22,9	22,0	18,2	<b>20,8</b>
2	21,0	21,6	17,9	17,4	22,6	<b>20,1</b>
3	17,1	18,4	18,1	16,0	18,2	<b>17,7</b>
4	18,9	19,3	19,0	18,7	25,3	<b>20,2</b>

### II.6.4 RESULTADOS DEL ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION

La resistencia a la compresión para cada una de las mezclas fue ensayada con tres repeticiones y calculadas por la ecuación (4) a partir de los datos (ANEXO 2, Tabla 2.3). Los valores promedios se presentan en la Tabla II.8

Tabla II.8 Resistencia a la compresión a 890 °C (kgf/cm<sup>2</sup>)

<b>Rc</b>				
Exp	Replica 1	Replica 2	Replica 3	<b>Promedio</b>
1	130,23	74,42	112,97	<b>105,87</b>
2	113,81	118,50	111,63	<b>114,65</b>
3	96,74	162,16	210,92	<b>156,61</b>
4	114,08	110,46	111,37	<b>111,97</b>

## **§ II.7 VALORACION DE LA MEJOR MEZCLA RESPECTO A LA TEMPERATURA Y AL TAMAÑO DEL GRANO**

Después de establecido el uso del feldespatos como material desgrasante, así como seleccionada la composición de la mezcla, se estudió el comportamiento de los parámetros tecnológicos de la misma, respecto a la temperatura y al tamaño de las partículas.

Fueron escogidos tres valores de tamaño del grano:  $-0.125$ ;  $+0.125 -0.27$ ;  $-0.27$ mm (denominadas Fina, Media y Gruesa, respectivamente), teniendo en cuenta las experiencias de la fábrica de cerámica roja de Moa y de Holguín, y un perfil de temperaturas entre los conos 010 y 02 (ANEXO 1), recomendados en la literatura y presentados en la Tabla II.10

Tabla II.10 Perfil de temperaturas

<b>Cono</b>	<b>Temperatura °C</b>
010	890
08	945
06	1005
04	1050
02	1095

El procedimiento para la determinación de los parámetros tecnológicos que están siendo evaluados, fue similar al anterior.

### **§ II.7.1 RESULTADOS OBTENIDOS**

#### **II.7.1.1 Parámetros tecnológicos para las mezclas con granulometrías $-0.125$ mm**

De los resultados de los ensayos (ANEXO 5) se obtuvieron los valores de cada uno de los parámetros para pastas preparadas con granulometría de  $-0.125$ mm, los cuales se muestran en la Tabla II.11

Tabla II.11 Parámetros tecnológicos para la mezcla con granulometría -0.125 mm

al cono 010		al cono 08		al cono 06		al cono 04		al cono 02	
C	11.72	C	13.73	C	14.66	C	15.74	C	16.01
A	16.16	A	15.83	A	14.90	A	13.79	A	12.04
Rc	-	Rc	-	Rc	-	Rc	-	Rc	-

### II.7.1.2 Parámetros tecnológicos para las mezclas con granulometrías -0.27 +0.125 mm

Para la mezcla con granulometría media los parámetros estudiados se comportaron como se muestran en la Tabla II.12

Tabla II.12 Parámetros tecnológicos para las mezclas con granulometrías +0.125 -0.27mm

al cono 010		al cono 06		al cono 4		al cono 010		al cono 010	
%C	12.61	%C	14.03	%C	16.52	%C	17.27	%C	18.41
%A	17.33	%A	16.80	%A	15.33	%A	14.84	%A	12.65
Rc	-	Rc	223.38	Rc	292.68	Rc	262.93	Rc	248.26

### II.7.1.3 Parámetros tecnológicos para las mezclas con granulometrías +0.27mm

Para la mezcla con granulometría gruesa (+0.27mm) los parámetros estudiados se comportaron como se muestra en la Tabla II.13

Tabla II.13 Parámetros tecnológicos para las mezclas con granulometrías +0.27mm

al cono 010		al cono 06		al cono 4		al cono 010		al cono 010	
%C	13.35	%C	15.28	%C	17.81	%C	18.41	%C	19.74
%A	20.14	%A	18.09	%A	17.49	%A	16.06	%A	13.98
Rm	-	Rm	272.62	Rm	332.37	Rm	288.51	Rm	262.89

## § II.8 CONCLUSIONES PARCIALES

1. El feldespató puede ser utilizado para mejorar la calidad de las mezclas cerámicas elaboradas a partir de las arcillas de Centeno, pues el comportamiento de las mismas durante el secado y la cocción fue satisfactorio.
2. Las mezclas estudiadas presentan valores de las propiedades físicas, químicas y mecánicas requeridas para una mezcla cerámica.
3. La temperatura y el tamaño de las partículas tienen una marcada influencia en los parámetros tecnológicos.

## **CAPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS E IMPACTO AMBIENTAL**

### **§ III.1 ANALISIS DE LOS RESULTADOS PARA LAS MEZCLAS**

A partir de los datos obtenidos (ANEXO 2, Tablas 2.1, 2.2 y 2.3), se determinaron los parámetros tecnológicos para cada una de las mezclas resultantes del diseño de experimentos, procesándose mediante los paquetes estadísticos Microsoft 2000, con la aplicación del análisis de varianza.

#### **III.1.1 CONTRACCIÓN TOTAL**

Los valores de la contracción (Tabla II.7), calculados mediante la ecuación (2) para las cuatro mezclas estudiadas, se encuentran dentro del rango para productos cerámicos decorativos y utilitarios.

El parámetro tecnológico Contracción total da una medida de la unión de las partículas después de cocida las piezas.

La evaluación de este parámetro es de vital importancia debido a que, mediante su control, se pueden lograr productos cerámicos mas o menos densos para cada una de las mezclas.

La contracción es una consecuencia del secado y el horneado de las piezas, por lo que se requiere que estos procesos sean bien controlados y se realicen con el mayor cuidado.

El secado desigual de las partes de una pieza puede provocar diferencias en el modo de contraerse cada una de ellas, provocando rajaduras, alabeos y roturas de las mismas.

Debido al alto contenido de Hierro que presentan, las arcillas estudiadas (Tablas I.2, I.3) se contraen más durante el secado y la cocción que otras mas puras o con mayor contenido de caolín.

De acuerdo con los métodos estadísticos aplicados, cuyos resultados se encuentran en la Tabla 5.1 (ANEXO 5), entre las medias de las cuatro composiciones analizadas no hay diferencias significativas, por lo que cualquiera de ellas puede ser empleada en la producción de objetos cerámicos.

En este caso fue utilizado el estadígrafo F (Fisher). El valor de F observado, igual a 3,78; resultó ser menor que el valor crítico para  $F= 5.29$ , para un nivel de confianza del 95%, lo que demuestra que no hay diferencias significativas entre los experimentos.

Es decir que cualquier mezcla de composición similar a las estudiadas, debe proporcionar valores de % de contracción muy semejantes a los obtenidos.

### **III.1.2 ABSORCIÓN DE AGUA**

El parámetro Absorción de agua para cada una de las mezclas (Tabla II.8), calculado por la ecuación (3) a partir de los resultados experimentales (Tabla 2.2 ANEXO 2), al igual que la Contracción total, se encuentra dentro del rango para productos cerámicos (Tabla I.6).

El grado de absorción de agua es una medida de la maduración de la pasta de arcilla cocida. A medida que la pasta se acerca a la vitrificación su absorción se acerca a cero.

Utilizando el estadígrafo F (Fisher) para el análisis estadístico (Tabla 5.2, ANEXO 5), en este caso el valor de F observado, igual a 2,26; resultó ser menor que el valor crítico  $F=3,24$ , para un nivel de confianza del 95%, lo que demuestra que no hay diferencias significativas entre los experimentos.

Esto significa que cualquier mezcla de composición similar a las estudiadas, debe proporcionar valores de Absorción muy semejantes a los obtenidos en los experimentos realizados.

### **III.1.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

La resistencia mecánica caracteriza la capacidad de los objetos cerámicos de resistir golpes y cargas sin sufrir roturas durante su uso y manipulación. Es un parámetro respecto al cual no se hace mucha referencia en la literatura consultada, para el caso de productos cerámicos utilitarios, no siendo así cuando se trata de materiales para la construcción, los cuales se encuentran muy bien normados.

No obstante, en el presente trabajo se realizó un estudio de la resistencia a la compresión para las cuatro mezclas. A pesar de que no fueron encontradas referencias para su comparación, estos resultados ofrecen un rango de valores entre los cuales debe encontrarse el parámetro, y puede ser utilizado como referencia para futuros estudios.

En el caso de la resistencia a la compresión, calculada por la ecuación (4), a partir de los datos obtenidos de los ensayos (Tabla II.8), los resultados estadísticos (Tabla 5.3, ANEXO 5) corroboran la hipótesis nula. El estadígrafo Fisher observado, igual a 1,57

resultó ser menor que el valor crítico (4,07). Esto significa que la resistencia mecánica de cualquier mezcla cuya composición se encuentre entre los rangos estudiados, tendrá valores similares a los obtenidos en este estudio.

Como resultado del análisis de varianza (ANEXO 5), se obtuvo que cualquiera de las mezclas puede ser utilizada con muy buenos resultados, ya que no existen diferencias significativas entre las medias para cada uno de los experimentos.

Por tanto se concluyó que la mejor mezcla a partir de la cual se obtuvieron los mejores resultados fue la Mezcla No 3, que tiene la siguiente composición (Tabla II.4):

- 60 % de arcilla roja
- 38 % de arcilla gris
- 2% de Feldespato

Con esta mezcla se obtuvieron los mayores valores de resistencia a la compresión. Los demás parámetros se comportaron de forma similar para los cuatro experimentos.

## **§ III.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS PARA LA MEJOR MEZCLA**

### **RESPECTO A LA TEMPERATURA Y EL TAMAÑO DE GRANO**

En la cocción de productos cerámicos preparados con materias primas arcillosas es necesario conocer el margen de temperaturas en el que la contracción y la porosidad de la pieza no varían excesivamente. Este intervalo depende de las características de la mezcla y debe ser lo mas amplio posible, de lo contrario pueden producirse deformaciones en la pieza o la cocción insuficiente de las mismas, lo que influye en que la porosidad y la resistencia mecánica del producto acabado no sean los deseados [43].

Debido a esto los diagramas de contracción total - absorción de agua- temperatura son de gran ayuda para la formulación y ajuste de las mezclas destinadas a la producción de objetos cerámicos. El comportamiento de la resistencia a la compresión es otro de los parámetros que se debe controlar.

En la Figura III.1 se representa el diagrama de contracción lineal – absorción de agua – temperatura de cocción de una arcilla caolinítica y otra illítica, ambas con bajo contenido en sílice libre [43].



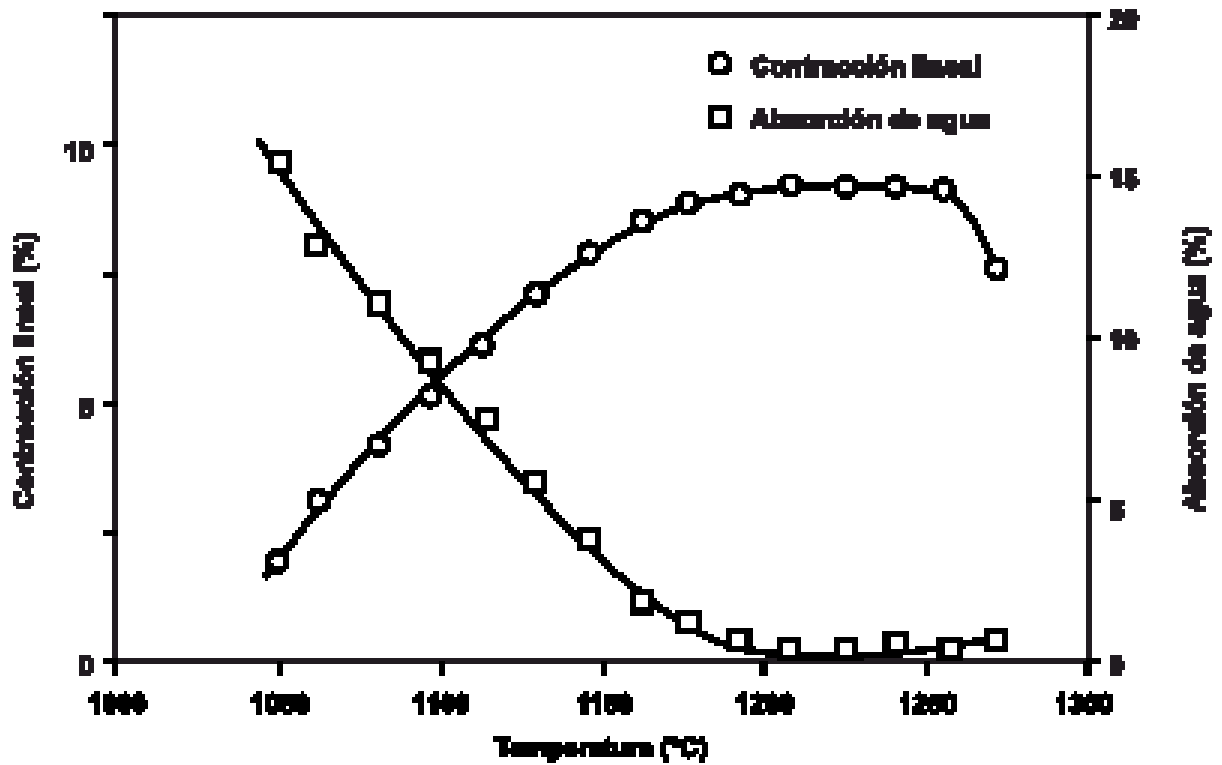


Figura III.1 Diagrama de variación de la contracción lineal – absorción de agua con la temperatura de cocción de una arcilla caolinítica.

Para una arcilla illítica el comportamiento de los parámetros de Absorción de agua y contracción lineal se representan en la Figura III.2, donde se observa la temperatura a partir de la cual comienza a disminuir la contracción y aumentar la absorción, fenómeno que ocurre debido a la vitrificación.

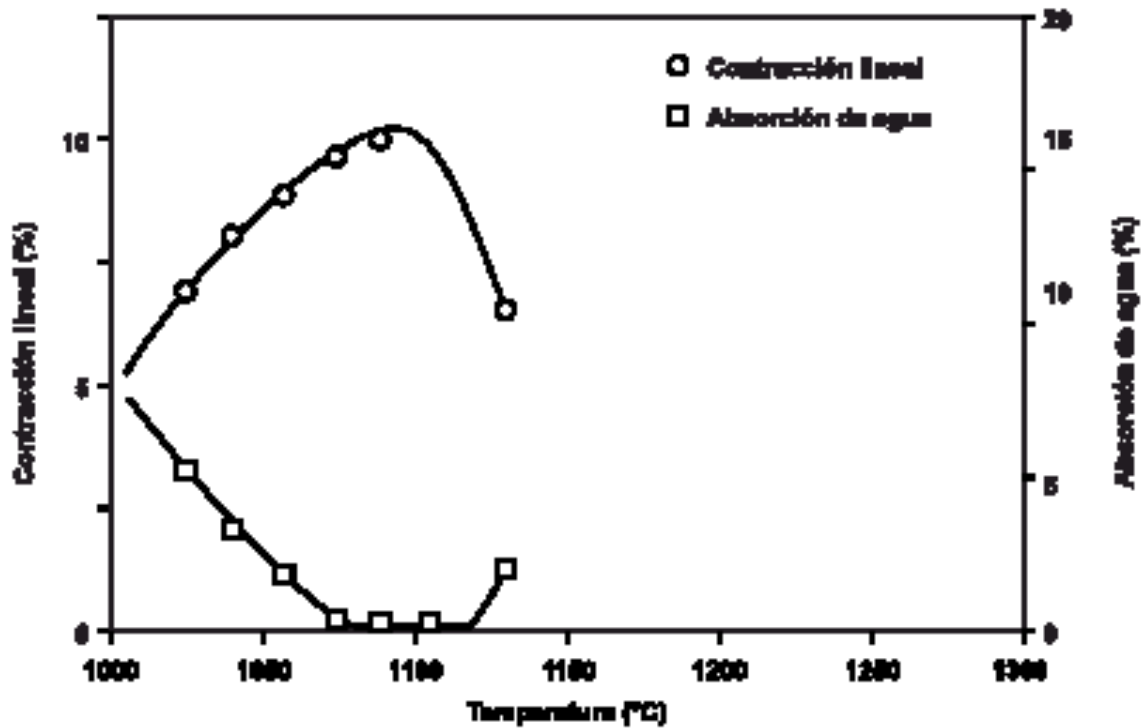


Figura III.2 Diagrama de variación de la contracción lineal – absorción de agua con la temperatura de cocción de una arcilla illítica.

Los resultados muestran que el feldespato mejora los parámetros tecnológicos de la mezcla y, estadísticamente, siempre que se utilicen composiciones dentro del rango estudiado (Tabla II.4), se obtendrán resultados satisfactorios para cualquiera de las cuatro mezclas ensayadas.

Los datos obtenidos (ANEXOS 6, 7 y 8) permitieron el cálculo de los diferentes parámetros, para la mejor de las mezclas mediante las ecuaciones (2, 3 y 4). Estos resultados se procesaron a través de los paquetes estadísticos Microsoft 2000, aplicando el análisis de regresión.

### III.2.1 ANALISIS PARA EL TAMAÑO DE PARTICULA -0.125mm

Con el propósito de observar el comportamiento de todos los parámetros, para cada uno de los tamaños de partículas de la mejor de las mezclas, los resultados (Tabla II.11), fueron procesados mediante el Excel, obteniéndose el siguiente gráfico:

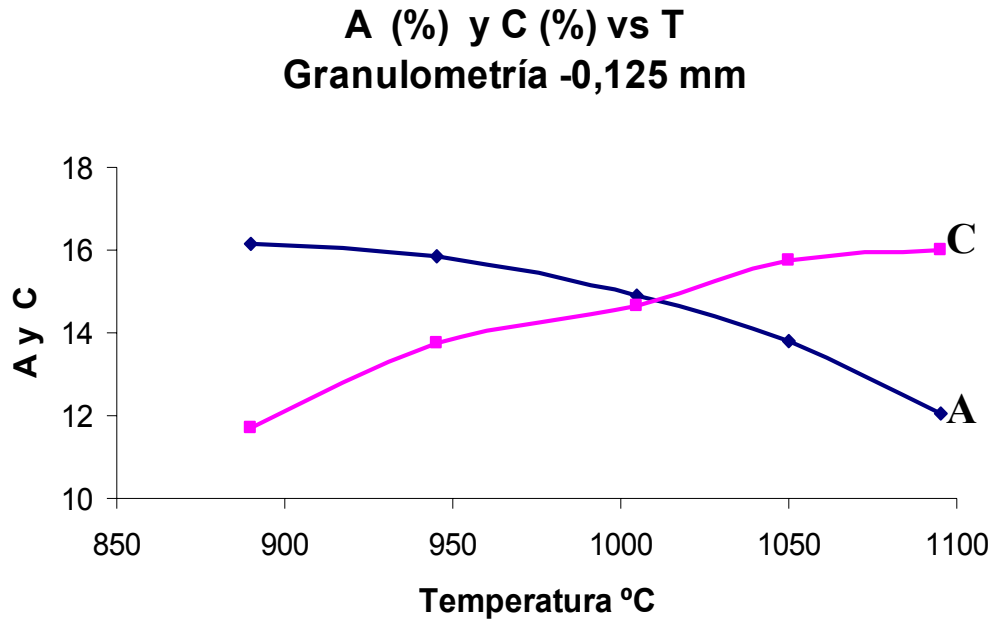


Gráfico III.1 Contracción total y Absorción de agua vs Temperatura para -0.125mm

El comportamiento de la pasta alfarera (Gráfico III.1) para el tamaño de grano mas fino que se estudió (-0.125mm), y para el perfil de temperaturas escogido (Tabla II.10), demuestra que a medida que aumenta la temperatura, aumenta la contracción, es decir que las partículas se encuentran mas unidas entre sí. Sin embargo la absorción disminuye, lo que se explica ya que al estar mas cohesionadas las partículas, y poseer tamaño tan fino, el espacio entre ellas es menor por lo tanto absorben una menor cantidad de agua, ofreciendo una idea del grado de maduración de la mezcla.

Si se comparan estos resultados con los ofrecidos por la Tabla I.5, se puede comprobar que para cualquier arcilla el comportamiento es similar.

De igual forma se manifestaron estos dos parámetros para los demás tamaños de grano estudiados.

Como se puede observar en el Gráfico III.1 no aparece el parámetro de la resistencia a la compresión debido a que las probetas confeccionadas con la pasta tamizada para este tamaño de partícula con vistas a realizar los ensayos, se rompieron durante la cocción. Este hecho será analizado detalladamente mas adelante.

### III.2.2 ANALISIS PARA LA MEZCLA CON GRANULOMETRÍAS +0.125-0.27mm

A través del Microsoft Excel se graficaron los resultados obtenidos (Tabla II.12), con el objetivo de analizar el comportamiento de los tres parámetros en conjunto, obteniéndose el Gráfico III.2

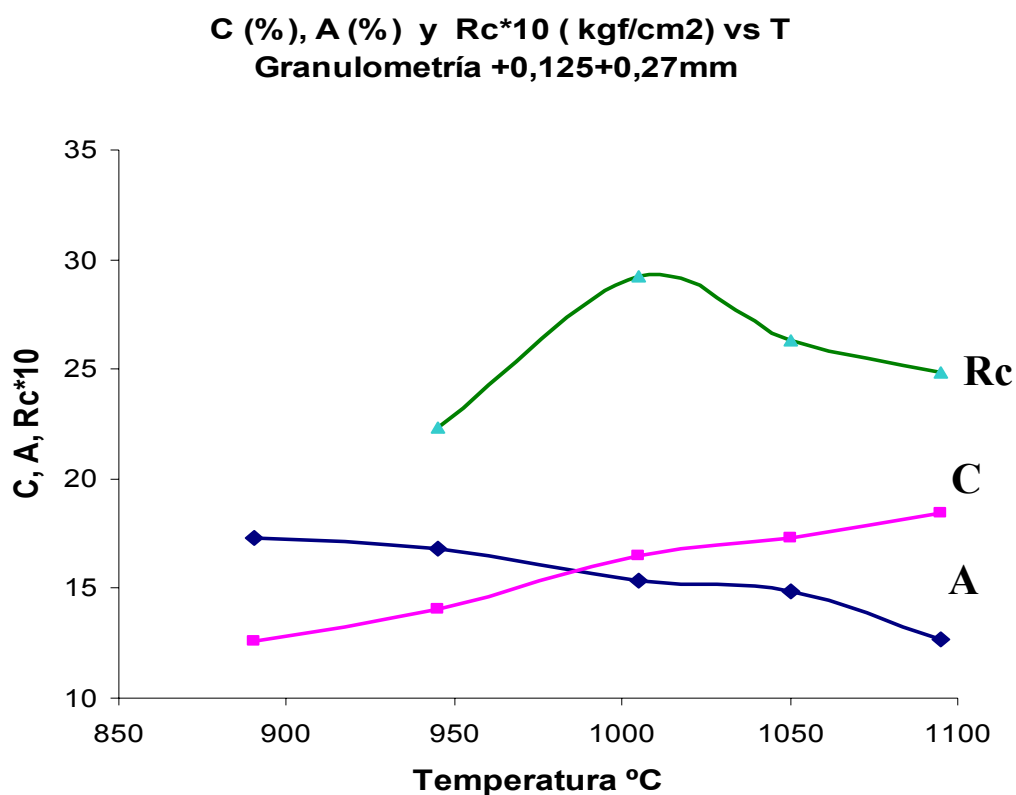


Gráfico III.2 Contracción total, Absorción de agua y Resistencia a la compresión vs Temperatura para +0.125-0.27m

Para una granulometría de +0.125-0.27mm (Gráfico III.2), se observa que, al igual que para las demás, la contracción aumenta y la absorción disminuye, a medida que aumenta la temperatura.

Respecto al tamaño de partícula fino ambos parámetros presentan un ligero aumento (Gráfico III.1).

En el caso de la resistencia a la compresión, se puede concluir que no existe una tendencia marcada, pues comienza en un determinado valor, para la primera temperatura estudiada, sube hasta un valor máximo para la siguiente y disminuye luego para el último valor de temperatura analizado.

Para este tamaño de partículas, la resistencia mecánica en todo el rango de temperaturas, es menor que para el tamaño más grueso.

Se observa además que, alrededor del punto donde coinciden el valor del Contracción y la Absorción se logran los mayores valores de resistencia a la compresión. Como no existen referencias respecto a este hecho en la literatura consultada, no se puede aseverar que este comportamiento obedezca a una ley. Pudiera tratarse de un fenómeno casuístico, por lo que se recomienda realizar un mayor número de pruebas.

### **III.2.3 ANALISIS PARA LAS MEZCLAS CON GRANULOMETRÍAS +0.27mm**

Con el objetivo de comparar el comportamiento de todos los parámetros estudiados, para un mismo tamaño de grano, se graficaron los resultados (Tabla II.13), observándose lo que se muestra en el Gráfico III.3

**C (%), A (%) y Rc\*10 kgf/cm2 vs T**  
**Granulometría +0,27mm**

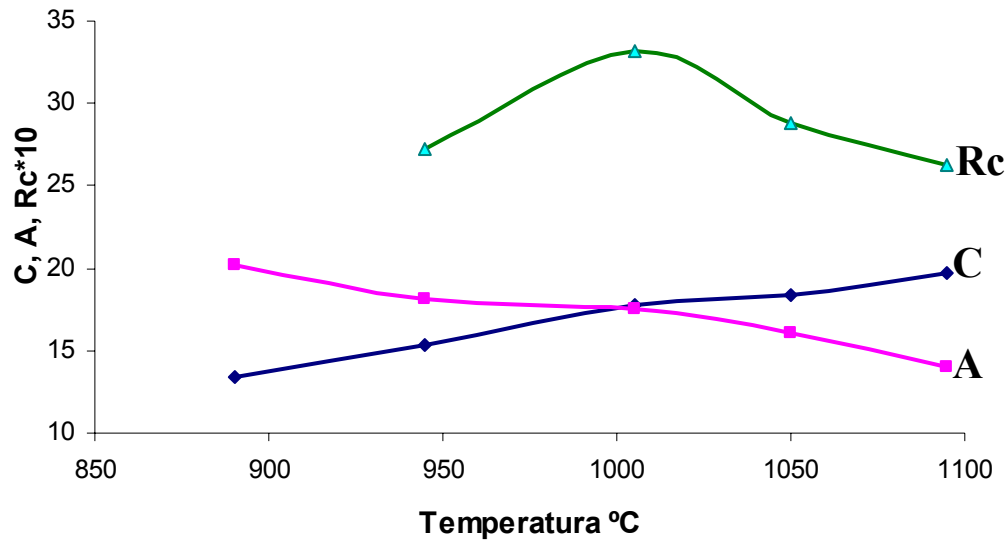


Gráfico III.3 Contracción total, Absorción y Resistencia a la compresión vs Temperatura para +0.27mm

Como se observa en el gráfico anterior, al igual que para las mezclas analizadas, con el aumento de la temperatura aumenta la contracción de las probetas y disminuye la absorción de agua.

Comparando con los tamaños de grano anteriores, para el tamaño de grano grueso, se obtuvieron los mayores valores de Contracción, de Absorción y resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión para este tamaño de partículas tuvo un comportamiento similar al anterior ya que no existe una tendencia marcada respecto a la temperatura, pues comienza en un valor, sube hasta un valor máximo y vuelve a disminuir luego.

Para este tamaño de partículas la resistencia a la compresión, en todo el rango de temperaturas, es mayor que para el tamaño medio.

De la misma forma que para la granulometría anterior, la resistencia a la compresión, presenta valores máximos para el rango de temperatura donde coinciden los valores de % de contracción y absorción de agua. En este caso, el mayor valor de resistencia a la compresión se obtuvo a la temperatura en que son iguales estos dos parámetros.

En general el comportamiento de los parámetros estudiados (Contracción y Absorción), para las arcillas de la región de Centeno es similar al de cualquier arcilla, si se compara los

resultados del presente trabajo con los mostrados en las Figuras III.1 y III.2, teniendo en cuenta que son arcillas de composición mineralógica diferentes.

### **§ III.3 ANALISIS PARA CADA UNO DE LOS PARAMETROS TECNOLOGICOS**

El estudio del comportamiento de cada uno de los parámetros tecnológicos respecto a la temperatura y al tamaño de las partículas, define en muchos casos, el tipo de productos a fabricar y además permitirá establecer, a través del análisis de regresión los modelos matemáticos que mejor describen los resultados obtenidos para cada uno de los tamaños de grano. Los modelos matemático estadístico, permitirán predecir el comportamiento de la mezcla para cualquier valor de temperatura dentro del rango estudiado, lo cual es de gran importancia para el ceramista.

#### **III.3.1 Análisis para la contracción total**

Como ya quedó demostrado, a medida que aumenta la temperatura aumenta la contracción total. La contracción de la mezcla es un proceso que comienza con el secado de las piezas, paso imprescindible para su posterior introducción en el horno. Durante el secado existe una gran tendencia a producirse roturas producto de la contracción, lo que es función tanto de las características del sólido como las condiciones en que se produce el secado, aunque algunas arcillas tienen mayor tendencia a roturas que otras [43].

Es importante el control del proceso de secado pues con el mismo culmina la contracción en plástico y el agua restante se elimina sin riesgo de roturas durante la cocción, la cual también debe ser chequeada debido a que si se introducen excesivamente húmedas las piezas en el horno al elevarse rápidamente la temperatura se produce una vaporización brusca la cual genera tensiones en su interior que pueden provocar deformaciones, fisuras, roturas, hasta explosiones.

Para analizar el comportamiento de este parámetro respecto a los diferentes tamaños de partícula se resumieron los resultados en la Tabla III.1

Tabla III.1 Contracción total para los diferentes tamaños de partículas

Temp ( °C)	Tamaño de partícula (mm)		
	-0.125	+0.125 -0.27	+0.27
890	11.72	12.61	13.35
945	13.73	14.03	15.28
1005	14.66	16.52	17.81
1050	15.74	17.27	18.41
1095	16.01	18.41	19.74

Graficando estos resultados respecto a la temperatura y al tamaño del grano se obtienen el comportamiento de los mismos, como se muestra en el Gráfico III.4

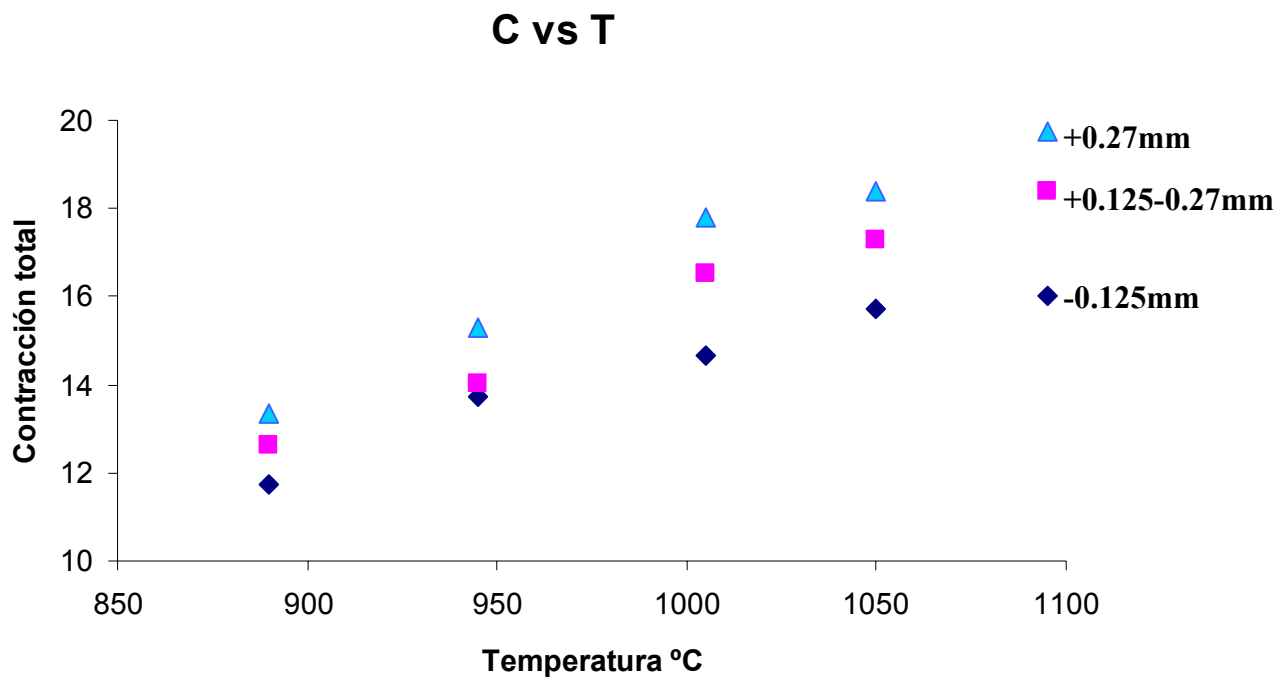


Gráfico III.4 Contracción total vs Temperatura para todos los tamaños de partículas

A través del análisis estadístico, se pudieron ajustar las curvas que mejor representan los puntos obtenidos para los diferentes tamaños de grano (Gráfico III.5).



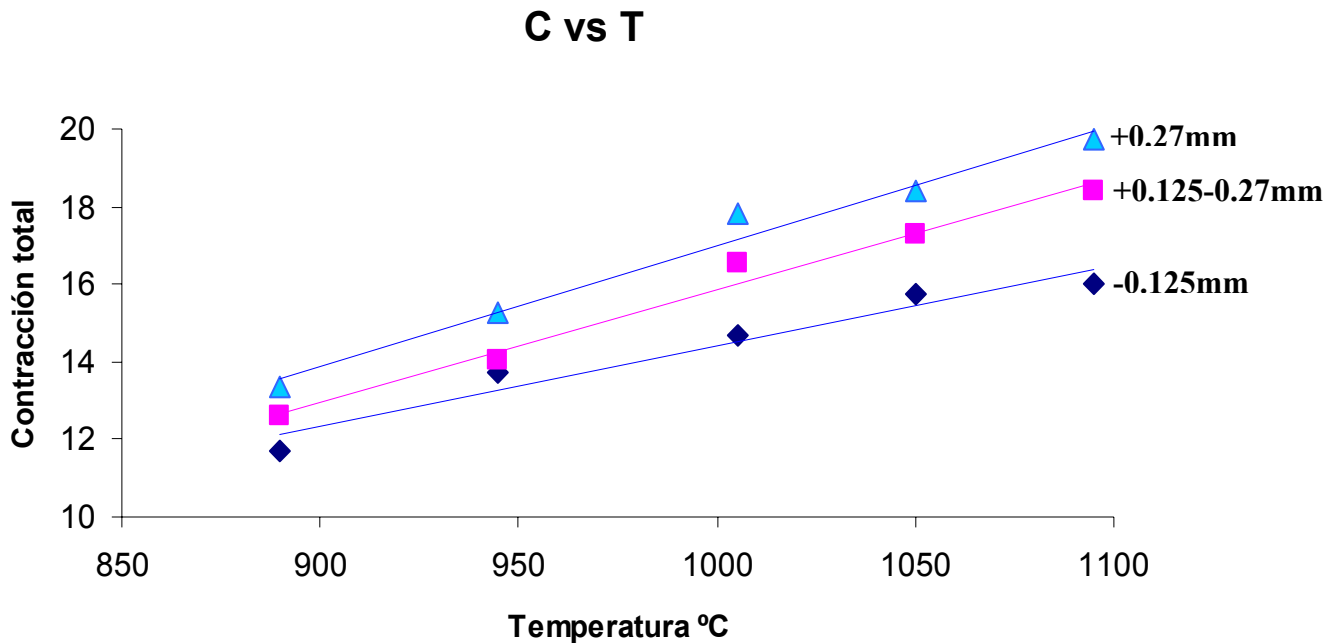


Gráfico III.5 Curvas de regresión ajustada para la Contracción total

Analizando este parámetro para cada una de los tamaños de partículas se obtuvieron los siguientes resultados:

- Para -0.125mm

En el Gráfico III.5 se muestra la tendencia de los puntos obtenidos. Mediante el análisis de regresión se realizó el ajuste de curva, obteniéndose una línea recta cuya ecuación se representa a continuación:

$$\% C = 0.0312 T - 14.2$$

Esta expresión puede utilizarse con un alto grado de correlación,  $R = 0.95$  (ANEXO 9, Tabla 9.1), para predecir el % de contracción para una pasta de características similares a un valor de temperatura comprendido entre los valores estudiados.

- Para +0.125-0.27mm

Para las granulometrías medias (Gráfico III.5), a los valores obtenidos en los ensayos, se pudo ajustar, con una correlación entre los valores obtenidos y el del modelo,  $R = 0.9839$  (ANEXO 9, Tabla 9.2) una línea de tendencia recta, la cual describe el comportamiento de la contracción respecto a la temperatura y cuya ecuación está dada por:

$$\% C=0.029 T -13$$

- Para +0.27mm

La línea de tendencia, ajustada en el caso de las granulometrías mas gruesas (Gráfico III.5), respecto a los resultados obtenidos en los ensayos, tiene la siguiente forma:

$$\% C= 0.0207 T -6.31$$

Este modelo puede ser empleado para predecir la contracción que sufrirá una pasta con estas características, respecto a un valor de temperaturas en el rango escogido, con un grado de correlación de 0.93 (ANEXO 9, Tabla 9.3)

Se concluye que a medida que aumenta la temperatura y el tamaño de las partículas, aumenta la contracción de las pastas, lo cual está limitado por el punto al cual ocurre la fusión, que depende del tipo de arcilla que esté siendo utilizada.

### III.3.2 Análisis para la absorción de agua

Del análisis de este parámetro se obtuvo que, a medida que aumenta la temperatura disminuye el % de absorción para cualquier tamaño de grano.

Para analizar el comportamiento de este parámetro respecto a los diferentes tamaños de partícula se resumieron los resultados en la Tabla III.2

Tabla III.2 Absorción de agua

Temp. (°C)	Tamaño de partícula (mm)		
	-0.125	+0.125 -0.27	+0.27
890	<b>16.16</b>	<b>17.33</b>	<b>20.14</b>
945	<b>15.83</b>	<b>16.80</b>	<b>18.09</b>
1005	<b>14.9</b>	<b>15.33</b>	<b>17.49</b>
1050	<b>13.79</b>	<b>14.84</b>	<b>16.06</b>
1095	<b>12.04</b>	<b>12.65</b>	<b>13.98</b>

Graficando la Absorción de agua para cada uno de los tamaños de partículas se pudo determinar dependencia de este parámetro respecto a la temperatura.

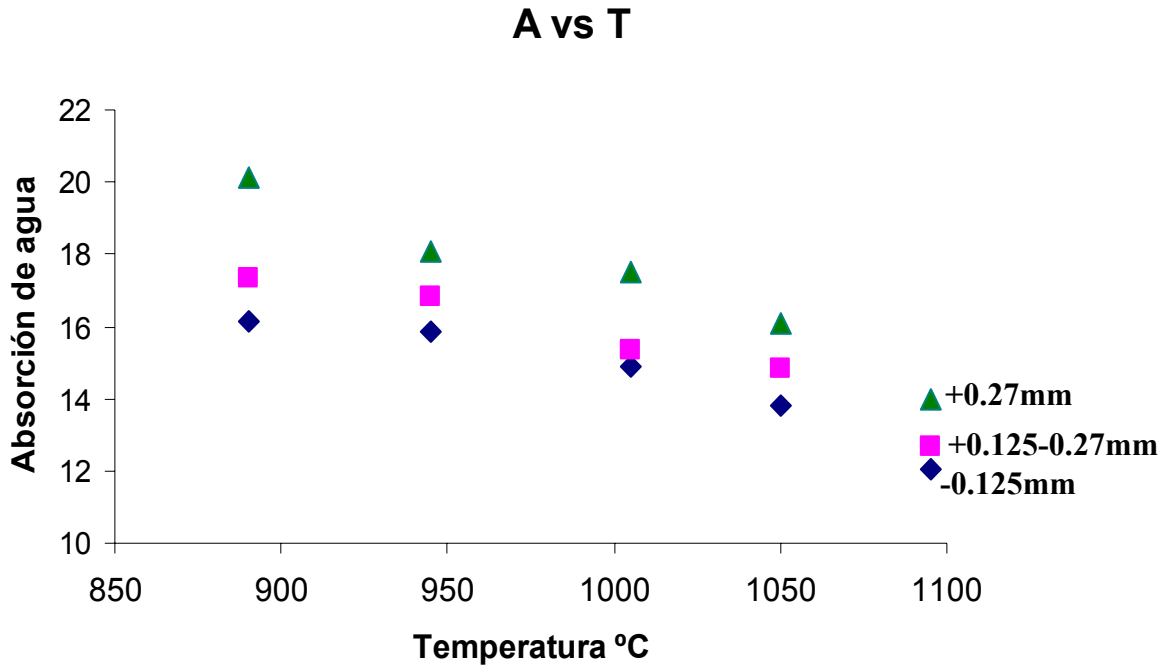
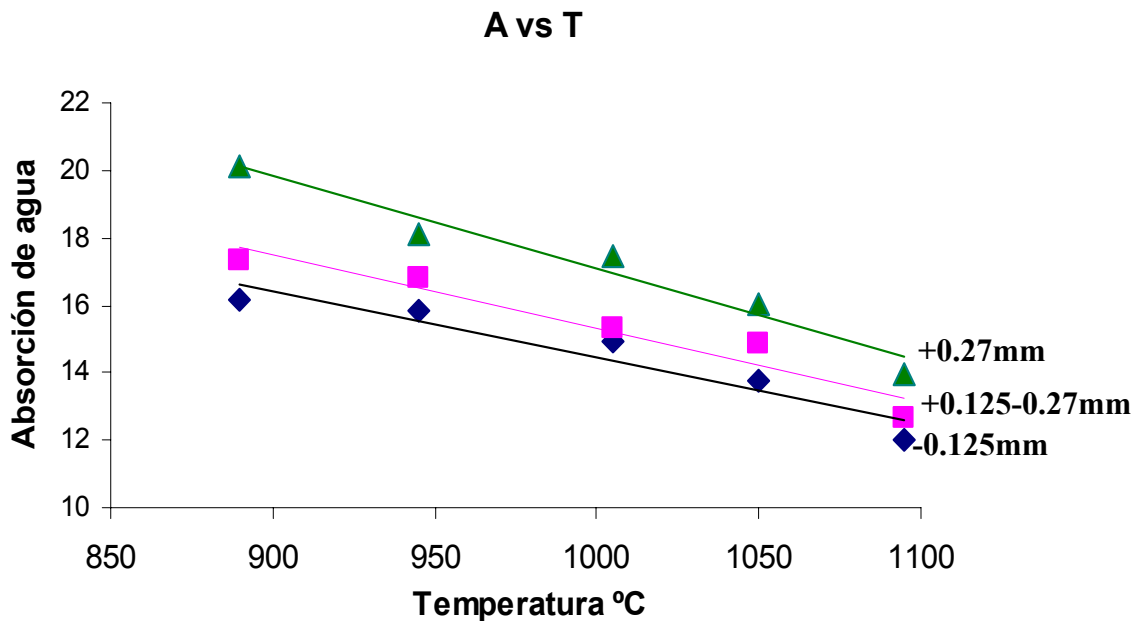


Gráfico III.3 Absorción de agua vs Temperatura para todos los tamaños de partículas

Las curvas ajustadas en el caso de la absorción en el secado para cada uno de los tamaños de partículas se muestran en el Gráfico III.4:



#### Gráfico III.4 Curvas de regresión ajustada

En el Gráfico II.8 queda demostrado que la absorción de agua disminuye con el aumento de la temperatura y aumenta, con el incremento de los tamaños de partícula con que se esté elaborando la pasta (Tabla II.14), lo cual significa que las partículas al estar más unidas y ser menos porosas admiten menor cantidad de agua, propiedad que se puede aprovechar y se debe controlar de acuerdo con las características del producto deseado. Esto está limitado debido a que las arcillas funden a una temperatura dada. La absorción de agua puede llegar a ser cero para un cierto valor de temperatura, al cual la pasta ha obtenido su mayor densidad.

Evaluando este parámetro para cada uno de los tamaños de partícula estudiados, se tiene que:

- Para -0.125mm

Para la granulometría más fina (Gráfico II.9) se ajustó la ecuación de una línea recta con un valor de R igual a 0.91, cuya forma es la siguiente:

$$\% A = 34.098 - 0.0196T$$

para el rango de temperaturas comprendido entre 890 y 1005°C.

- Para +0.125-0.27mm

La dependencia entre la absorción de agua y la temperatura (Gráfico II.10) para esta granulometría, quedó establecida en la siguiente expresión:

$$\% A = 37.1 - 0.0217T$$

con una correlación de 0.9282

- Para +0.27mm

El parámetro absorción de agua para los mayores tamaños de partícula (Gráfico II.11) puede ser determinado con una correlación de 0.9567 para valores de temperatura entre 890 y 1005 °C, por la siguiente ecuación:

$$\% A = 44.7 - 0.0276T$$

### III.3.3 Análisis de la resistencia a la compresión

El análisis de este parámetro demostró que no existe una tendencia de aumentar o disminuir con el incremento de la temperatura (Tablas II.12 y II.13).

Para analizar el comportamiento de este parámetro respecto a los diferentes tamaños de partícula se resumieron los resultados en a Tabla III.3

Tabla III.3 Resistencia mecánica (kgf/cm<sup>2</sup>)

Temp. (°C)	Tamaño de partícula (mm)		
	-0.125	+0.125 -0.27	+0.27
945	-	<b>223.38</b>	<b>272.62</b>
1005	-	<b>292.68</b>	<b>332.37</b>
1050	-	<b>262.93</b>	<b>288.51</b>
1095	-	<b>248.26</b>	<b>262.89</b>

El proceso de secado influye también en la resistencia mecánica de las piezas en crudo. Después de secadas, las piezas pueden reabsorber agua del ambiente por higroscopía, lo que influye en la resistencia mecánica como se puede observar en la Figura III.3. A medida que se incrementa el contenido de humedad de la pieza disminuye su resistencia mecánica, por lo que la pieza cruda puede soportar mejor los esfuerzos mecánicos antes de la cocción, cuanto menor es la cantidad de agua reabsorbida [43].

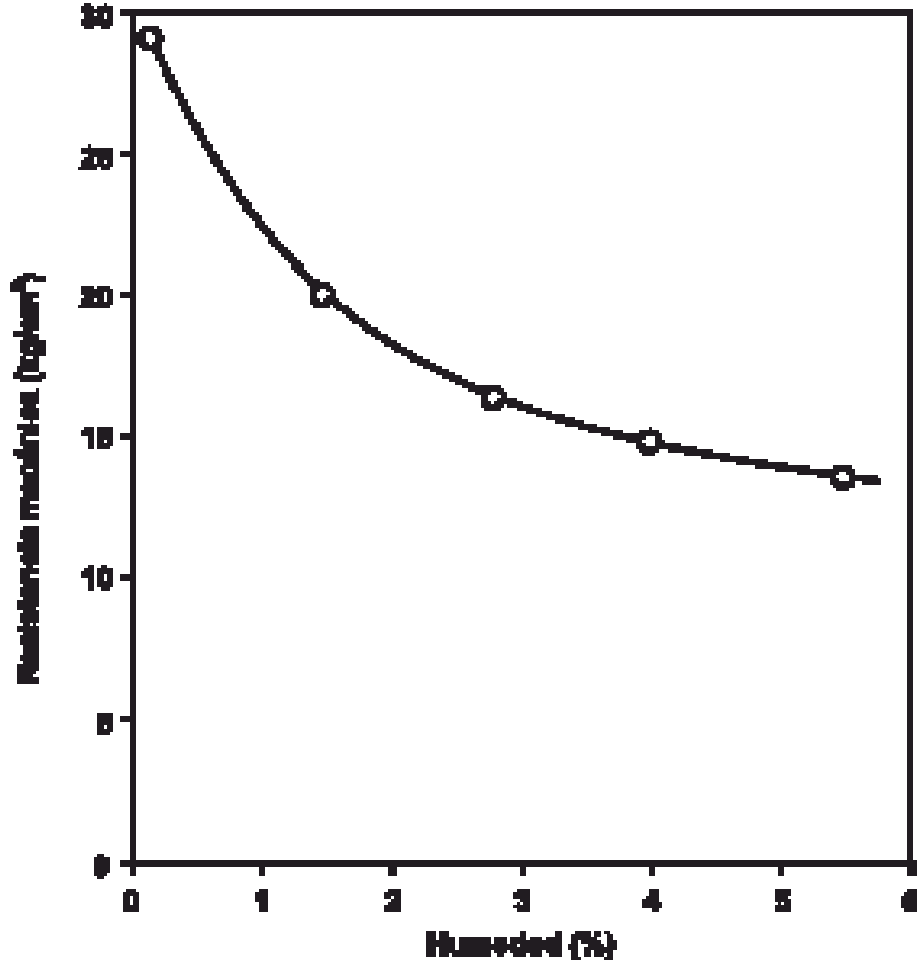


Figura III.3 Variación de la resistencia mecánica de la pieza con su contenido de humedad (% en peso respecto al sólido seco).

Representando los valores de la Tabla III.3 en un diagrama de resistencia a la compresión contra la temperatura se obtiene el Gráfico III.5

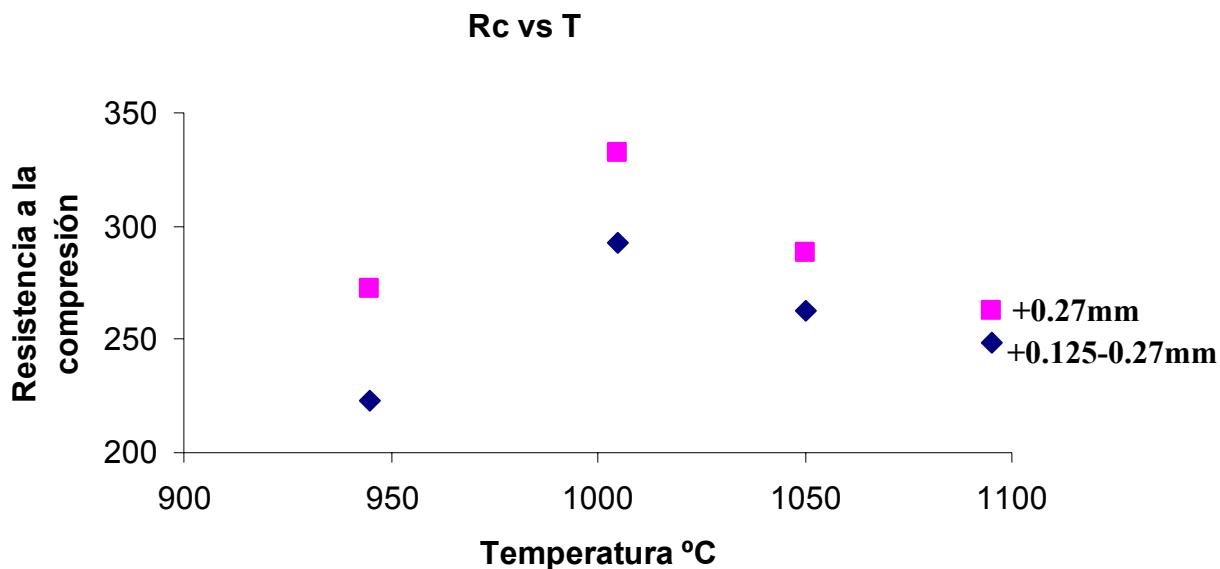


Gráfico III.5 Resistencia a la compresión vs Temperatura para todos los tamaños de partículas

Analizando la resistencia mecánica para cada uno de los tamaños de partículas, la curva que mejor se ajusta a los datos experimentales, se obtiene:

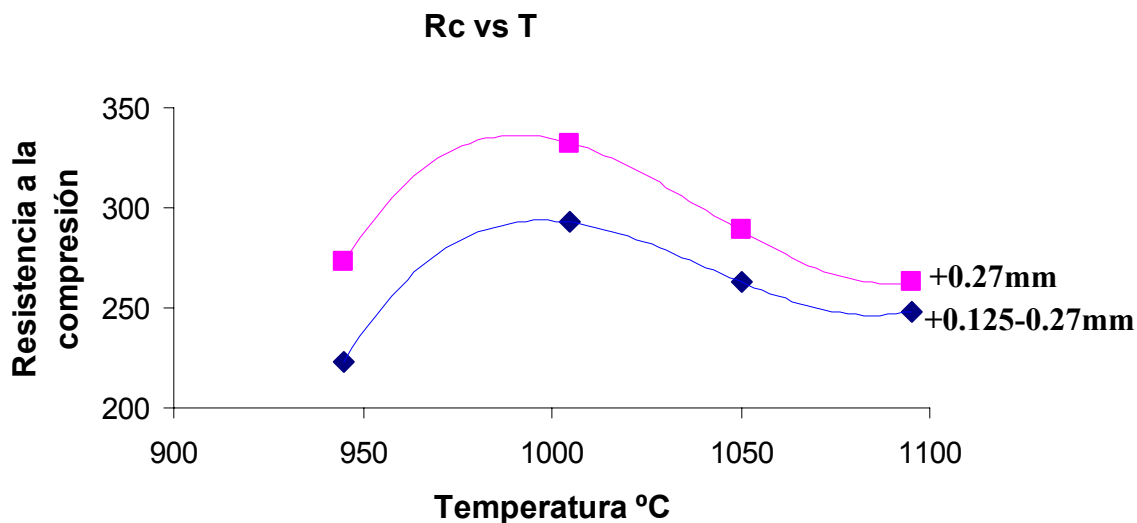


Gráfico III.6 Líneas de regresión ajustadas para la resistencia a la compresión

Como se observa en el Gráfico III.5, no aparecen representados los resultados para la granulometría mas fina, lo cual se debe a que, las probetas para la determinación de la resistencia a la compresión, confeccionadas para el tamaño de partículas mas fino, presentaron algunas dificultades, ya que durante el proceso de cochura, a una temperatura del horno de aproximadamente 600°C, todas se rompieron a pesar de que, tratando de evitar esta situación, fueron confeccionadas con gran cuidado, evitando la formación de

huecos en el interior de la masa, se secaron poniéndolas incluso a la luz y el calor del sol, y se realizó el proceso de cocción en un horno automático.

Esta situación pudiera ser la consecuencia de que no estuvieran bien secas, presentaran bolsas de aire en su interior, o que la subida de la temperatura en el horno no estuviera bien controlada. También pudo deberse a que en ese tamaño de partículas se concentre algún compuesto químico o fase mineralógica que provocara la fragilización de las probetas. Se presume que se trate de alguna fase mineral de hierro, lo cual es recomendable continuar estudiando.

En los casos de los dos tamaños de partícula para los cuales se pudo hacer la determinación del parámetro resistencia mecánica se observaron mayores valores para un tamaño de grano mayor que para el tamaño medio (Gráficos III.5 y III.6)

No se manifestó una tendencia de este parámetro respecto al rango de temperaturas estudiada.

Evaluando este parámetro para cada uno de los tamaños de partícula estudiados, se tiene que:

- Para +0.125-0.27mm

La dependencia entre la resistencia mecánica y la temperatura (Gráfico III.6) para esta granulometría, se ajustó mediante un modelo polinomial de tercer grado, a través de la siguiente expresión:

$$R_c = 0.0001 T^3 - 0.4 T^2 + 4 \cdot 10^2 T - 2 \cdot 10^5$$

con una correlación,  $R=1$ .

- Para +0.27mm

De acuerdo con el análisis de regresión realizado a los puntos obtenidos para la resistencia mecánica (Gráfico III.6), para los mayores tamaños de partícula se ajustó un modelo polinomial con una correlación  $R=1$ , para valores de temperatura entre 890 y 1005 °C, el cual está representado por la siguiente ecuación:

$$R_c = 0.0002 T^3 - 0.5 T^2 + 5 \cdot 10^2 T - 2 \cdot 10^5$$



## **§ III.4 IMPACTO AMBIENTAL**

El desarrollo de la industria cerámica en el municipio de Moa, requiere tanto del estudio detallado y minucioso de las grandes reservas de minerales arcillosos con que cuenta la región, como del análisis del impacto que provocaría su explotación en gran escala, al medio ambiente.

El estudio de los problemas ambientales debe abarcar desde la prospección de la materia prima (minería de las arcillas), como primera actividad contaminadora, hasta el vertimiento de los desechos propios del proceso productivo (conformación y procesamiento de los objetos cerámicos).

La fabricación de objetos cerámicos comprende las siguientes etapas:

- Extracción de la materia prima.
- Beneficio de las arcillas.
- Conformación y acabado del producto.

La extracción de las arcillas, la cual por lo general se encuentra debajo de la capa vegetal, trae consigo problemas a los suelos, provocando su erosión y afectando desde la vegetación hasta la fauna típica de la zona de minado, así como la emisión de polvo a la atmósfera.

### **§ III.4.1 PROBLEMAS AMBIENTALES EN LAS DIFERENTES ETAPAS DEL PROCESO**

#### **III.4.1.1 PRIMERA ETAPA: MINERÍA DE LAS ARCILLAS**

La minería de la materia prima comprende:

- La extracción de las arcillas del yacimiento.
- La transportación desde la cantera hasta la fábrica.

La arcilla es uno de los minerales que con más frecuencia encontramos en la tierra, y constituye gran parte de nuestro suelo, que es un recurso natural que corresponde a la capa superior de la corteza terrestre.

Debido a que este mineral se encuentra a poca profundidad de la superficie, debajo de la capa vegetal, su extracción se realiza a cielo abierto, y por vía seca y su impacto depende siempre de la extensión y la ubicación del terreno sobre todo lo que respecta a condiciones climáticas, regionales y de infraestructura. Se caracteriza por la producción de grandes volúmenes, con las canteras emplazadas cerca de las unidades de producción, lo que implica su ubicación cerca de los núcleos poblacionales, con los correspondientes efectos sobre ellos.

En la Ley No. 81 DEL MEDIO AMBIENTE del 11 de Julio de 1997 en su Título VI, Capítulo V, sección primera (Suelos) y Capítulo VIII Recursos minerales, quedan establecidas todas las regulaciones que se deben observar en cuanto al medio ambiente durante la investigación, prospección y extracción de estos recursos [25].

Estos procesos de pérdida y degradación del suelo son originados por la falta de planificación y el descuido del hombre. Las causas más comunes de dichos procesos están relacionadas con la erosión que se corresponde al arrastre de las partículas y las formas de vida que conforman el suelo.

Entre los problemas fundamentales que provoca el laboreo minero al medio podemos encontrar:

- La erosión de los suelos.
- Destrucción de la flora y fauna del lugar.
- Emisiones de polvo a la atmósfera.
- Problemas propios de contaminación por el uso de medios de transportación y extracción mecanizada.
- Desestabilización de pendientes.

Para el mejor control del impacto ambiental provocado por la minería de las arcillas, es importante poner en práctica algunas medidas [25]:

- ❑ Guardar la parte orgánica del suelo (humus) en forma apropiada para luego usarla en la fase de cierre y rehabilitación.
- ❑ Efectuar regularmente el mantenimiento correspondiente a todos los equipos, verificando fuga de combustibles y lubricantes.

- El uso de equipos dotados de motor eléctrico disminuye el efecto de contaminación por derrame de combustibles y lubricantes.

### **III.4.1.2 SEGUNDA ETAPA: BENEFICIO DE LAS MATERIAS PRIMAS**

La segunda etapa comprende los siguientes procesos:

- Mezclado de las materias primas
- Clasificación
- Filtración

Entre los equipos que intervienen en el beneficio de las arcillas encontramos:

- Mezclador
- Molino de bolas
- Zaranda vibradora
- Filtro prensa

Entre las diferentes materias primas tenemos además de las arcillas y el agua: el feldespatos, el caolín y el silicato de sodio.

El feldespatos y el caolín, son materiales que presentan una granulometría muy fina (en forma de polvos) y su manipulación y empleo resultan muy peligrosos ya que pueden ser inhalados por los operarios y el personal de la fábrica. El contacto con materiales cáusticos como el silicato de sodio (conocido como vidrio líquido) puede causar daños a la piel y las articulaciones, entre otras [19].

#### **III.4.1.2.1 DAÑOS POR EL USO DE LAS DIFERENTES MATERIAS PRIMAS**

Los principales riesgos específicos de la industria cerámica provienen del uso y manipulación de las diferentes materias primas [19]:

- a) De los componentes de las arcillas.
- b) De los componentes de los barnices.
- c) De las emisiones del horno de cocción.

Los riesgos asociados a la utilización de arcillas, barnices y pinturas, vienen expresados en la siguiente Tabla III.4 [19].

Tabla III.4 Riesgos asociados a la utilización de arcillas y barnices.

SUSTANCIA	MANIFESTACIONES CLÍNICAS
Aluminio	Enf. de Shaver (fibrosis pulmonar)
Caolín	Caolinosis
Carbonato de bario	Alteraciones neurológicas, baritosis
Tierra de diatomeas	Silicosis
Ácido bórico	Depresor del S.N.C., irritante
Berilio	Beriliosis
Cobalto	Dermatitis, asma, fibrosis pulmonar
Plomo	Saturnismo

#### III.4.1.2.2 DAÑOS POR EL USO DE EQUIPOS

Durante el Beneficio de las materias primas aparece otro contaminante por la utilización de equipos como molino de bolas, zaranda vibradora y mezclador en el proceso tecnológico, los cuales provocan un alto nivel de ruido.

Diariamente estos equipos operan alrededor de 4 a 5 horas es decir más de la mitad de la jornada laboral. Además se encuentran instalados en locales muy próximos a los demás puestos de trabajo.

El ruido presenta grandes diferencias con respecto a otros contaminantes:

- Es el contaminante más barato de producir y necesita muy poca energía para ser emitido.
- Es complejo de medir y cuantificar.

- No deja residuos, no tiene un efecto acumulativo en el medio, pero si puede tener un efecto acumulativo en sus efectos en el hombre.
- Tiene un radio de acción mucho menor que otros contaminantes, vale decir, es localizado.
- No se traslada a través de los sistemas naturales, como el aire contaminado movido por el viento, por ejemplo.
- Se percibe sólo por un sentido: el oído, lo cual hace subestimar su efecto. Esto no sucede con el agua, por ejemplo, donde la contaminación se puede percibir por su aspecto, olor y sabor.

Los efectos nocivos del ruido comienzan por encima de los 85 decibelios. Solo el molino de bolas produce 100 dB(A), lo cual nos da una idea la magnitud del fenómeno [42].

#### **III.4.1.2.3 EFECTOS NOCIVOS QUE EL RUIDO PRODUCE EN EL HOMBRE.**

Está dada tanto por las características físicas del mismo (frecuencia, intensidad, duración, etc) como por factores constitucionales personales.

El oído sometido a ruidos con valores superiores a 85 dB (A) durante un tiempo suficiente sufre daños irreparables, conocido por sordera profesional, industrial u ocupacional. Es tipo de daño aparece como respuesta para la salud del hombre [42].

Con el objetivo de disminuir el efecto, tanto del uso de las referidas materias primas como los trastornos provocados por el ruido, debemos observar las siguientes medidas:

- Establecer el uso obligatorio de protectores auditivos y garantizar la existencia y el modelo apropiado.
- Advertir con señales visibles los niveles de ruido a que será sometido aquel que trabaje en una zona determinada.
- Realizar exámenes audiométricos, como mínimo dos veces al año, al personal que labora en las áreas de mayor riesgo.
- Trabajar en la educación y motivación de los trabajadores.
- Aislamiento de equipos y aparatos que provoquen altos niveles de ruido.

En esta etapa, además se realiza la eliminación del agua de la mezcla por filtración o por sedimentación trayendo consigo el vertimiento de desechos líquidos.

En el caso que nos ocupa podemos plantear que el agua que se utiliza en el mezclado de las arcillas no es un gran problema ya que la misma se recircula, es decir retorna al proceso, es vertida a los alcantarillados cercanos o regresa al ciclo de la atmósfera por evaporación en los sedimentadores.

En ella no se disuelve ningún tipo de sustancia toxica que pudiera contaminar el medio u ocasionar daño o perjuicios ni a los suelos, animales, y/o la salud de los trabajadores. El agua residual producto del consumo humano, también es vertida al alcantarillado municipal.

### **III.4.1.3 TERCERA ETAPA: CONFORMACIÓN Y ACABADO**

La conformación de las piezas se puede realizar manualmente, en el torno del alfarero o por la técnica del colado o vaciado en moldes de yeso confeccionados para tales fines. Por su parte el acabado constituye el paso final y comprende el barnizado o esmaltado de las piezas para lo cual se utilizan productos químicos muy peligrosos cuyos efectos para la salud humana se muestran en la Tabla III.4.

Luego de conformada la pieza se somete al proceso de secado y de ahí se bizcocha (se hornea hasta 950 °C aproximadamente) y está lista para ser comercializada, si no se le quiere imprimir un mejor acabado a través del vitrificado o barnizado o la aplicación de alguna pintura.

Equipos que se utilizan en esta etapa:

- Torno del alfarero.
- Horno de diferentes diseños y combustibles (de carbón, de leña, eléctrico, etc).

En esta etapa del proceso se producen desechos sólidos y gaseosos fundamentalmente, debidos al proceso de horneado y a los restos de materiales después de la elaboración de las piezas.

## Desechos Gaseosos.

Debido al propio proceso de cochura en los hornos se generan gases tóxicos, los cuales enrarecen el ambiente laboral y contaminan directamente el aire.

En la fábrica, el combustible utilizado es el carbón mineral o la leña, cuya combustión produce gases de diferentes tipos, entre ellos: Compuestos de azufre, los óxidos de carbono (entre los cuales se encuentran el monóxido de carbono que se produce por la combustión incompleta de combustibles orgánicos y el dióxido de carbono gas que se encuentra normalmente en la atmósfera ya que se produce durante la espiración de los seres vivos) [38].

En el caso de la leña, se desprenden grandes volúmenes de humo, además del excesivo calor a que están expuestos el hornero y su ayudante que no cuentan con los medios de protección establecidos para tales labores. Estos humos que provienen de procesos de combustión, arrastran gran cantidad de cenizas y microgotas de combustible sin quemar.

### Efectos nocivos de los gases de combustión:

- Sobre la atmósfera: además de cambios climáticos ya analizados, se produce una reducción de la visibilidad y la destrucción total de la vegetación debido a la lluvia ácida.
- Daños directos sobre el hombre:
  - Enfermedades agudas susceptibles de causar la muerte: intoxicaciones o irritaciones. El monóxido de carbono se combina con la hemoglobina de la sangre formando un complejo estable e irreversible disminuyéndose así la capacidad de transporte de oxígeno.
  - Enfermedades crónicas: Muy diversas sustancias producen bronquitis, asma, tos crónica, enfisema, neumonía, obstrucciones broncopulmonares, y cáncer.

El control de la contaminación producto de los gases de combustión deberá estar enfocado a:

- Monitoreo y análisis permanente del aire mediante la instrumentación adecuada.

- Cambios de las materias primas o los procesos para evitar la generación de contaminantes, puede afectarse la rentabilidad.
- Separación de los contaminantes después de su generación y antes de su dispersión. Estas sustancias pueden ser recicladas aprovechándolas en algún otro proceso [34].

### **§ III. 5 CONCLUSIONES PARCIALES**

1. Las mezclas estudiadas pueden ser utilizadas en la producción de cerámicos, siendo la No 3 la que presentó una mayor Resistencia a la compresión.
2. Con el aumento del tamaño del grano, aumentan la contracción y la absorción de agua, así como la resistencia a la compresión. Con el aumento de la temperatura la contracción aumenta, no ocurriendo lo mismo con la absorción. En el caso de la resistencia a la compresión, no se observa una tendencia marcada, por lo que se hace necesario continuar estudiando este parámetro, porque además de que no se encontró referencias sobre ella en la literatura, las fluctuaciones encontradas pudieron deberse a otras causas ajenas a la investigación.
3. Las emisiones de polvo y gases, las características de las materias primas utilizadas y el ruido son los principales contaminantes del medio en la fábrica de cerámica.



## CONCLUSIONES

Después de realizado todo el trabajo de experimentación y análisis estadístico de los resultados que conforman los objetivos fundamentales de este trabajo podemos concluir:

1. La composición de las mezclas de arcilla de Centeno estudiadas presentan propiedades físicas, químicas y mecánicas requeridas para la producción de cerámicos, entre las que no existen diferencias significativas, destacándose la mezcla No 3, por ser la de mayor Resistencia a la compresión.
2. Los mejores resultados se obtienen cuando la mezcla es cocida a temperaturas entre 1000 y 1050 °C, y son confeccionadas con una granulometría de 0.27mm, con un control de los procesos de secado y cocción.
3. Los principales riesgos toxicológicos de la industria cerámica provienen de los componentes de las arcillas, barnices y emisiones de gases del horno de cocción. Además el ruido influye negativamente en el ambiente laboral afectando la salud mental de los trabajadores dentro de la fábrica.

## **RECOMENDACIONES**

A partir de las conclusiones obtenidas podemos recomendar:

1. Utilizar la composición de la mezcla No 3, con granulometrías de +0.27mm (gruesa), cociendo aproximadamente a una temperatura de 1000°C, teniendo en cuenta las mejores condiciones de secado, y controlando los cambios de temperatura dentro del horno.
2. Investigar el comportamiento de las mezclas utilizando otros desgrasantes como la chamota y la arena sílice, recomendadas también en la literatura.
3. Estudiar por qué las probetas confeccionadas a partir de mezclas con menor granulometría, presentaron un mayor índice de roturas.
4. Profundizar el estudio de la Resistencia a la compresión, pues no existe referencia bibliográfica sobre el mismo.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. ANDREIEV, S. E y PEROV V. A. Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1987.
2. ARDUINO, TERESA Glosario de términos cerámicos. Cerámica contemporánea de México. <http://www.ceramica.info/glosario.htm>, 2002
3. ARIOSAZNAGA, JOSÉ. Curso de yacimientos minerales no metálicos. Capítulo 21: Arcillas y Caolín, 1998
4. ASPECTOS GEOLÓGICOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL. Instituto Tecnológico Geo-minero. Madrid. España. 1991.
5. BASCHINI, MIRIA. Minerales Arcillosos: Un Enfoque Químico. <http://www.monografias.com/trabajos7/miar/miar.shtml>, 2002
6. BLANCO TORRENS, ROBERTO. Mecánica de rocas. Santiago de Cuba: Editorial Oriente, 1981.
7. ----- Práctica de Laboratorio de Mecánica de rocas. Santiago de Cuba Editorial Oriente, 1981.
8. CARDENAS GARNIER, MIGUEL A. Evaluación y pruebas de los automóviles. La Habana: Editorial ISPJAE, 1986. 229p
9. COLECTIVO DE AUTORES. Probabilidad y Estadística para ingenieros. Tomo II. Cuarta Edición. 624p, 1992
10. COLECTIVO DE AUTORES. Características de las arcillas. [http://www.mycoad.com/mycoad/spa\\_5\\_14.htm](http://www.mycoad.com/mycoad/spa_5_14.htm), 2002
11. CORIA, S. "Análisis fisicoquímico y mineralógico de las arcillas del valle de México". Tesis, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN, México, 1976.
12. CRUZ CRESPO, AMADO. Obtención, mediante fusión, de un fundente fundido del sistema MnO-SiO<sub>2</sub> para la soldadura por arco sumergido. Tesis doctoral. Santa Clara, 2001
13. DE PABLO, G. L. "Las arcillas. Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, tomo XXVII, 2, 49-92, México, 1964.

14. DORRONSORO, CARLOS. Granulometría de las arcillas  
<http://edafologia.ugr.es/introeda/tema04/text.htm>, 2001
15. DOVAL MONTOYA, M y GARCÍA ROMERO, E. (1991). "Arcillas Industriales: Yacimientos y Aplicaciones". En: Yacimientos Minerales. Editorial Centro de Estudios Ramon Areces, S. A. Madrid. pgs 582-60, 2000
16. FOMENKO, T. G. Procesos de enriquecimiento de minerales por gravitación . Moscú: Editorial MIR, 1980
17. FONSECA NAVARRO, DARIS. Determinación de los índices de plasticidad de las arcillas de Centeno. Informe técnico. Industrias Locales, 1999
18. GALAN HUERTOS, E. (1990). "Palygorskita y sepiolita" Textos Universitarios (C.S.I.C.) 15. pp 71-94, 2000.
19. GARCIA ARIÑO, C. La industria del vidrio.  
<http://www.viasalus.com/vs/B2P/cn/toxi/pages/t/09/t0912.jsp>, 2000
20. GONZALEZ GARZA, CESAR ROBERTO Caracterización de las arcillas y su aplicación industrial. En: <http://tenoch.pquim.unam.mx/academico/qa/arcillas.htm>, 2001
21. GONZALEZ, I. "Arcillas comunes". Recursos Minerales de España. Textos Universitarios (C.S.I.C.) 15. pp 96-112, 1990
22. GARCÍA GUINEA, J y MARTÍNEZ FRIAS J. Textos Universitarios (C.S.I.C.) 15. pp 96-112. 1996
23. INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA (ITGE). "Libro Blanco de la Minería de la Comunidad de Madrid". 285 pp. 1995
24. KASATKIN, A .G. Operaciones Básicas y aparatos en la tecnología Química. La Habana: Editorial Pueblo y educación 740p, 1971.
25. LEY DEL MEDIO AMBIENTE. Portal del Medio ambiente cubano, 11-07-1997.  
<http://www.medioambiente.cu/legislacion/leyes/L-81.htm>
26. LEY DE MINAS. Portal del Medio ambiente cubano, 21-12-1994.  
<http://www.medioambiente.cu/legislacion/leyes/L-76.htm>
27. McCABE, WARREN L. Operaciones Básicas de Ingeniería Química / Warren

- L. McCabe, Julian C Smith. La Habana: Editorial Pueblo y educación, 1987.
28. MITROFANOV, S. I. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Moscú: Editorial MIR, 1982
  29. OCHOA MAYO, IGNACIO R. Geología de los yacimientos de arcillas para la cerámica. Quinta Conferencia Científico Técnica de la Construcción, Jornada Iberoamericana, La Habana 2002: Editorial SOFTCAL, 2002. IR 824-831.
  30. OROZCO, GERARDO Caracterización de las arcillas de Cayo Guan. Informe técnico. ISMM, 1995
  31. ORTÍZ RAMÍREZ, TERESA. Recopilación bibliográfica y estudio preliminar de las materias primas de la región de Moa con posibilidades en la cerámica refractaria. Informe técnico. ISMM, 1992.
  32. PONS HERRERA, JOSE A y LEYVA, CARLOS. Empleo de las arcillas ferrocaoliniticas – gibbsíticas de la región de Moa en los talleres de fundición. Revista Minería y Geología XIII (3), p. 93 1996
  33. -----. Caracterización de las arcillas refractarias de la zona de Cayo Guam y su empleo en la fundición. Revista Minería y geología XIV (3), p. 19 1996
  34. REVISTA TÉCNICA POPULAR. Vol. VII Año 1987.
  35. RHODES, DANIEL. Arcilla y vidriado para el ceramista: Ediciones CEAC. España.
  36. RAZUMOV, K. A y V. A. PEROV. Proyecto de fábricas de preparación de minerales. Moscú: Editorial MIR, 1985
  37. RODRIGUEZ RIPOLLES, RAFAEL. Ferro España. Controles de laboratorio para gres porcelánico. <http://www.ceramicaycristal.com.ar/Investigacion.html>, 2000
  38. RUDENKO, K. G y M. M. SHEMAJANOV. Eliminación de la humedad y el polvo. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1984
  39. SÁNCHEZ ALVAREZ, RAFAEL. Estadística Elemental: La Habana. Editorial Pueblo y educación. 330p.
  40. SEGUEIRA, JOSE E. Temas sobre materiales de construcción. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1976

41. SALCEDO, ALVARO y HERRERA, FRANCISCO. Los materiales cerámicos. [www2.gratisweb.com/wilben/cap07.html](http://www2.gratisweb.com/wilben/cap07.html), 2000
42. SEXTO CABRERA, LUIS F. Análisis de ruido en áreas de una central termoeléctrica. ISPJAE. <http://www.ispjae.cu/centros/CEIM/index.htm>, 2000
43. VAZQUEZ QUEREDA, MARIA F. Fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos. Instituto Tecnológico de Cerámica. Universidad Jaume I. España, 2002

## ANEXO 1

### PUNTO FINAL DE LOS CONOS PIROMÉTRICOS CALENTADOS A 20 °C POR HORA.

Cono Número	Punto final (°C)	Cono Número	Punto final (°C)
012	<b>840</b>	1	<b>1125</b>
011	<b>875</b>	2	<b>1135</b>
010	<b>890</b>	3	<b>1145</b>
09	<b>930</b>	4	<b>1165</b>
08	<b>945</b>	5	<b>1180</b>
07	<b>975</b>	6	<b>1190</b>
06	<b>1005</b>	7	<b>1210</b>
05	<b>1030</b>	8	<b>1225</b>
04	<b>1050</b>	9	<b>1250</b>
03	<b>1080</b>	10	<b>1260</b>
02	<b>1095</b>	11	<b>1285</b>
01	<b>1110</b>	12	<b>1310</b>
		13	<b>1350</b>
		14	<b>1390</b>

## ANEXO 2

### RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A LAS DIFERENTES MEZCLAS

**Tabla 2.1 Resultados de los análisis para el cálculo del % de contracción total después de cocida al Cono 010 (890 °C)**

Longitud Plástica (L.P) = 14 cm					
Longitud (cm) después de cocida al cono 010 (L.C)					
Exper.	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5
1	12,7	12,2	12,7	12,7	12,7
2	12,3	12,3	12,4	12,3	12,2
3	12,2	12,4	12,7	12,2	12,6
4	12,5	12,7	12,7	12,6	12,5

### RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DEL % DE ABSORCIÓN

**Tabla 2.2 Resultados de los ensayos para el cálculo del % de absorción a (890 °C)**

Peso (g) de las probetas antes y después de cocidas al cono 010										
Exper	Replica 1		Replica 2		Replica 3		Replica 4		Replica 5	
	P.S	P.H	P.S	P.H	P.S	P.H	P.S	P.H	P.S	P.H
1	53,0	64,5	58,2	69,4	53,7	66,0	52,1	63,5	54,8	64,8
2	54,3	65,7	55,2	67,1	62,4	73,6	64,8	76,1	53,6	65,7
3	47,2	55,3	51,5	61,0	50,3	59,4	51,7	60,3	50,1	59,2
4	62,3	74,1	68,5	81,7	68,4	81,4	68,3	81,1	64,2	80,5

Donde: peso seco (P.S) y peso húmedo (P.H) (g)



## II.5 RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE LA RESISTENCIA MECANICA

**Tabla 2.3 Resultados de los análisis de Resistencia a la compresión (890 °C)**

Exp	Replica 1		Replica 2		Replica 3	
	A	Q	A	Q	A	Q
1	10,75	1400	10,75	800	12,57	1420
2	11,95	1360	9,62	1140	10,75	1200
3	10,75	1040	9,62	1560	5,31	1120
4	13,85	1580	11,95	1320	12,57	1400

### ANEXO 3

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

Se trata de probar la hipótesis de que las muestras que se obtuvieron de  $k$  poblaciones tienen medias iguales.

La ecuación del modelo para un criterio de clasificación está dada por:

$$y_{ij} = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_n X_n \quad \text{para} \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

La hipótesis nula de que las medias de las  $k$  poblaciones son iguales queda:

$b_0 = b_1 = \dots = b_k = 0$ . La hipótesis alterna de que al menos dos de las medias es distinta equivale a que  $b_i = 0$  para alguna  $i$ .

La hipótesis nula será rechazada si  $F$  excede  $F_{\alpha}$ , donde  $F_{\alpha}$  se obtuvo con  $k-1$  y  $k(n-1)$  grados de libertad. [9]

El análisis de varianza se realiza de la manera siguiente:

Razón para tratamientos:

$$F = \frac{SS(Tr)/(k-1)}{SSE/(kn-1)}$$

Suma total de cuadrados:

$$SST = \sum_{i1}^k \sum_{j1}^n y_{ij}^2 - C$$

Suma de cuadrados entre tratamientos:

$$SS(Tr) = \frac{\sum_{i1}^k T_i^2}{n} - C$$

Donde C denominado término de corrección está dado por:  $C = \frac{T^2}{kn}$

En estas expresiones  $T_i$  es el total de  $n$  observaciones en la  $i$ -ésima muestra y  $T$  es el gran total de las  $kn$  observaciones.

Suma de cuadrados del error:  $SSE = SST - SS(Tr)$

Los resultados obtenidos son resumidos de manera conveniente por medio de una tabla de análisis de varianza:

Tabla 3.1 Resumen del análisis de varianza.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrada	F
Tratamientos	$k-1$	$SS(Tr)$	$MS(Tr) = SS(Tr)/(k-1)$	$\frac{MS(Tr)}{MSE}$
Error	$k(n-1)$	$SSE$	$MSE = SSE/k(n-1)$	
Total	$nk-1$	$SST$		

Donde:

$k$ : Muestras aleatorias independientes de diferentes poblaciones. (Datos relativos a  $k$  tratamientos,  $k$  grupos,  $k$  métodos de producción, etc.

$n$ : Tamaño de la muestra.

La razón  $F$  para tratamientos se calcula:  $F = \frac{SS(Tr)/(k-1)}{SSE / k(n-1)}$

Para obtener los coeficientes del modelo se puede emplear el método de los mínimos cuadrados.

# ANEXO 4

## Diagrama triple

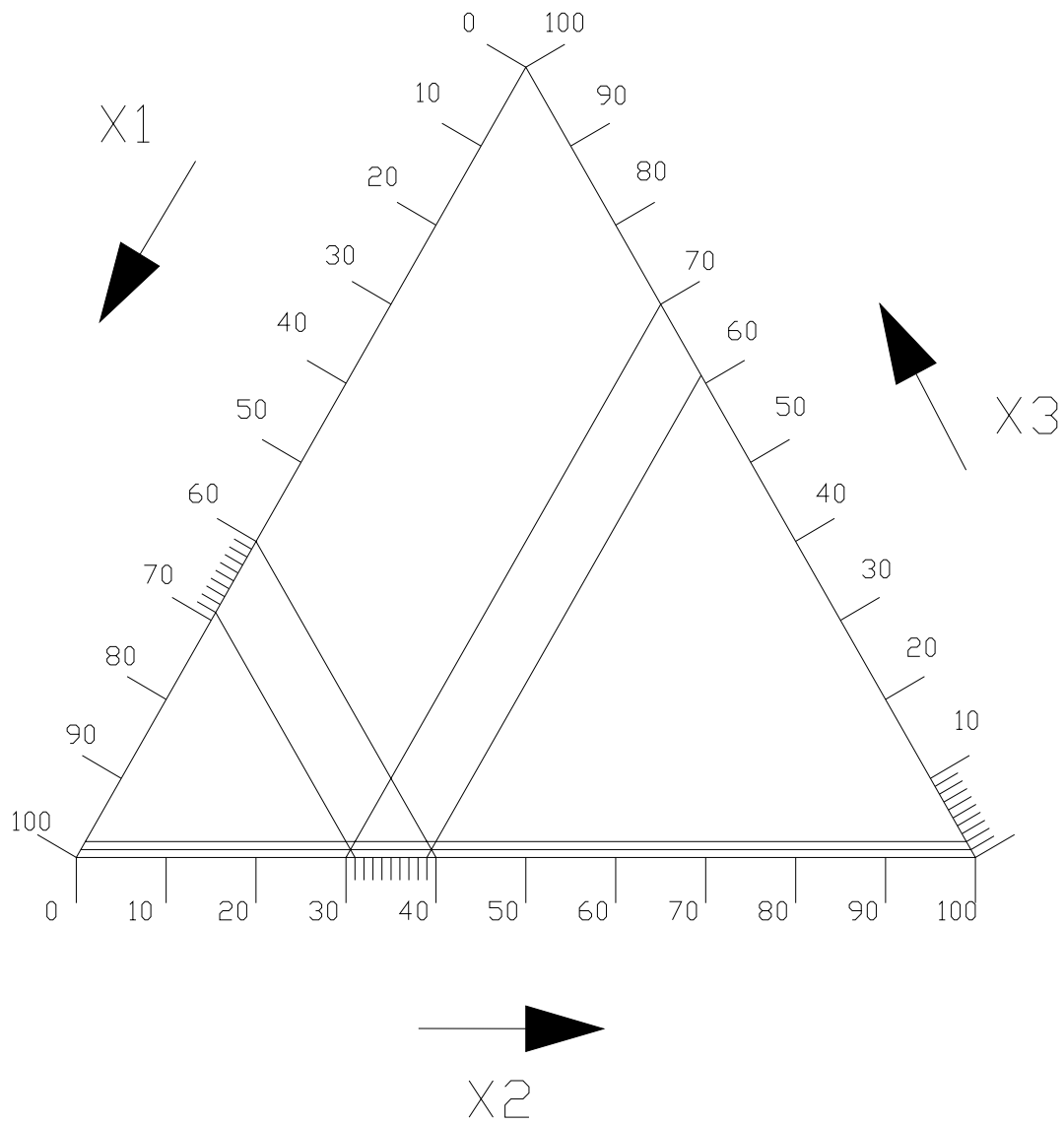


Figura 4.1 Diagrama triple

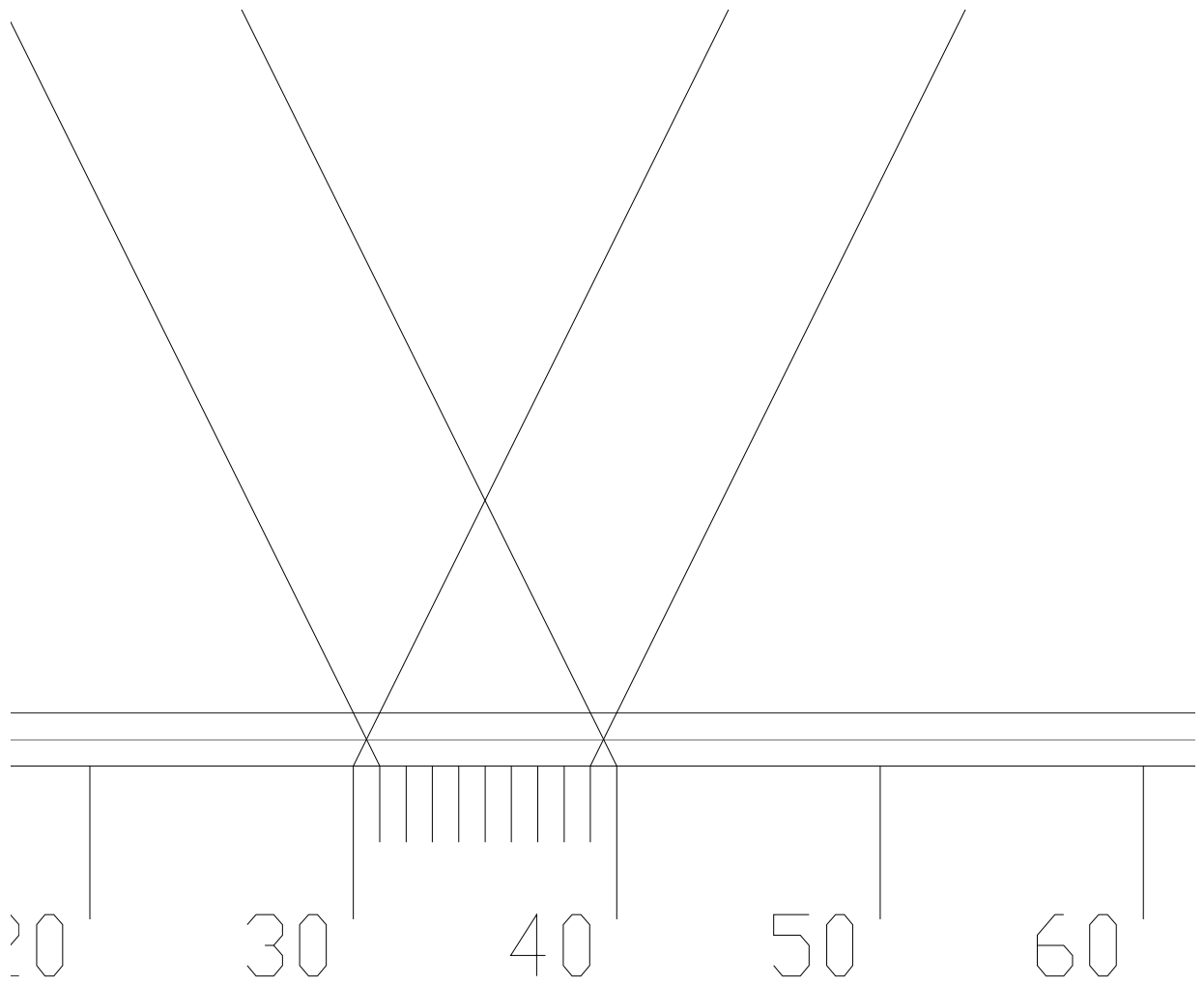


Figura 4.2 Zona de experimentación

## ANEXO 5

### RESULTADOS DEL ANALISIS ESTADISTICO

Tabla 5.1 Análisis de varianza: Contracción total

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
1	5	55,6	11,12	4,232		
2	5	69,1	13,82	0,452		
3	5	63,8	12,76	4,413		
4	5	55,5	11,1	0,81		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	26,572	3	8,8573	3,5762	0,0376	5,2922
Dentro de los grupos	39,628	16	2,4767			
Total	66,20	19				

Tabla 5.2 Análisis de varianza: Absorción de agua

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
1	5	104	20,8	3,995		
2	5	100,5	20,1	5,36		
3	5	87,8	17,56	1,013		
4	5	101,2	20,24	8,048		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	31,1935	3	10,3978	2,2584	0,1208	3,2388
Dentro de los grupos	73,6640	16	4,604			
Total	104,8575	19				

**Tabla 5.3 Análisis de varianza: Resistencia a la compresión**

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
1	5	317,62	105,8733	816,4610		
2	5	343,94	114,6467	12,3242		
3	5	469,82	156,6067	3282,3977		
4	5	335,91	111,97	3,5461		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	4836,1875	3	1612,0625	1,5671	0,2714	4,0662
Dentro de los grupos	8229,4582	8	1028,6823			
Total	13065,6457	11				

## ANEXO 6

### RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTRACCION TOTAL PARA LA MEJOR MEZCLA

Tabla 6.1 Contracción total para -0.125mm

Temp (°C)	Replica 1		Replica 2	
	L.P (mm)	L.C (mm)	L.P (mm)	L.C (mm)
890	11.0	9.6	11.2	10.0
945	11.5	10.0	11.8	10.1
1005	11.5	9.7	11.7	10.1
1050	10.8	9.2	11.4	9.5
1095	11.0	9.2	11.5	9.7

Tabla 6.2 Contracción total para +0.125 -0.27 mm

Temp (°C)	Replica 1		Replica 2	
	L.P (mm)	L.C (mm)	L.P (mm)	L.C (mm)
890	11.5	9.9	11.4	10.2
945	11.4	9.9	11.4	9.7
1005	11.5	9.7	11.5	9.5
1050	11.4	9.5	11.2	9.2
1095	11.6	9.4	11.2	9.2

Tabla 6.3 Contracción total para +0.27mm

Temp (°C)	Replica 1		Replica 2	
	L.P (mm)	L.C (mm)	L.P (mm)	L.C (mm)
890	11.7	10.1	11.5	10
945	11.5	9.7	11.4	9.7
1005	11.4	9.5	11.6	9.4
1050	11.6	9.4	11.2	9.2
1095	11.7	9.4	11.6	9.3



## ANEXO 7

### RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA ABSORCION DE AGUA PARA LA MEJOR MEZCLA

Tabla 7.1 Absorción de agua para -0.125mm

Temp (°C)	Replica 1		Replica 2	
	P.S (g)	P.H (g)	P.S (g)	P.H (g)
890	62.27	72.2	52.33	60.9
945	46.22	53.5	44.85	51.7
1005	49.50	56.84	48.18	55.4
1050	66.04	74.9	47.56	54.3
1095	50.08	56.0	49.18	55.2

Tabla 7.2 Absorción de agua para +0.125 -0.27mm

Temp (°C)	Replica 1		Replica 2	
	P.S (g)	P.H (g)	P.S (g)	P.H (g)
890	68.85	80.2	51.78	61.2
945	66.72	77.0	50.17	59.3
1005	67.31	77.4	50.40	58.3
1050	62.29	70.8	51.71	60.0
1095	62.74	69.6	51.32	58.7

Tabla 7.3 Absorción de agua para +0.27mm

Temp (°C)	Replica 1		Replica 2	
	P.S (g)	P.H (g)	P.S (g)	P.H (g)
890	50.25	60.55	48.44	58.03
945	44.31	51.85	43.63	52.0
1005	45.93	53.02	48.49	57.0
1050	53.14	61.72	51.88	60.17
1095	51.74	59.21	54.04	61.35

## ANEXO 8

### RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA MECANICA PARA LA MEJOR DE MEZCLA

Tabla 8.1 Resistencia mecánica para +0.125 -0.27mm

Temp (°C)	Replica 1		Replica 2	
	Q (kgf)	A (cm <sup>2</sup> )	Q (kgf)	A (cm <sup>2</sup> )
945	1280	5.59	1200	5.51
1005	1560	5.31	1560	5.35
1050	1620	4.99	980	4.87
1095	1520	4.67	780	4.56

Tabla 8.2 Resistencia mecánica para +0.27mm

Temp (°C)	Replica 1		Replica 2	
	Q (kgf)	A (cm <sup>2</sup> )	Q (kgf)	A (cm <sup>2</sup> )
945	1460	5.5	1590	5.36
1005	1700	5.3	1720	5.0
1050	1400	4.96	1350	4.58
1095	890	3.22	1000	4.01

## ANEXO 9

### RESUMENES DEL ANÁLISIS DE REGRESION

Tabla 9.1 Para la Contracción total (Granulometría -0.125mm)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,989581527
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,979271598
R <sup>2</sup> ajustado	0,972362131
Error típico	0,427087321
Observaciones	5

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	1	25,8518693	25,8518693	141,728958	0,00127456
Residuos	3	0,54721074	0,18240358		
Total	4	26,39908			

	<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	-14,145	2,6162	-5,40683	0,0124	-22,4720	-5,8196	-22,472	-5,81964
Variable X 1	0,0311	0,002617	11,90499	0,0012	0,02282	0,0394	0,02282	0,03948

#### Análisis de residuales

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico para Y</i>	<i>Residuos</i>
1	13,58416448	-0,23416448
2	15,29781825	-0,01781825
3	17,16725873	0,64274127
4	18,56933909	-0,15933909
5	19,97141945	-0,23141945

Tabla 9.2 Para la Contracción total (Granulometría +0.125-0.27mm)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,99190551
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,98387655
R <sup>2</sup> ajustado	0,97850206
Error típico	0,3500184
Observaciones	5

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	1	22,4277414	22,4277414	183,064355	0,00087315
Residuos	3	0,36753864	0,12251288		
Total	4	22,79528			

	<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	-13,165	2,1441780	-6,1401	0,0086	-19,9893	-6,34185	-19,9893	-6,34185
Variable X 1	0,0290	0,0021448	13,53012	0,0008	0,02219	0,03584666	0,02219	0,03584

Análisis de residuales

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico para Y</i>	<i>Residuos</i>
1	12,6627901	-0,05279009
2	14,258926	-0,22892602
3	16,0001652	0,51983477
4	17,3060946	-0,03609463
5	18,612024	-0,20202403

Tabla 9.3 Para la Contracción total (Granulometría +0.27mm)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,97397843
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,94863399
R <sup>2</sup> ajustado	0,93151199
Error típico	0,45484028
Observaciones	5

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>
Regresión	1	11,4620409	11,4620409	55,4043814	0,00501917
Residuos	3	0,62063905	0,20687968		
Total	4	12,08268			

	<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	-6,3122	2,786306	-2,26546	0,1083	-15,179566	2,5549922	-15,1795	2,554992
Variable X 1	0,0207	0,002787	7,443411	0,0050	0,0118763	0,02961676	0,011876	0,029616

Análisis de residuales

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico para Y</i>	<i>Residuos</i>
1	12,1521217	-0,4321216
2	13,2931806	0,43681938
3	14,5379722	0,12202779
4	15,4715659	0,2684341
5	16,4051596	-0,3951595

Tabla 9.4 Para la Absorción de agua (Granulometría -0.125mm)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,95505019
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,91212086
R <sup>2</sup> ajustado	0,88282782
Error típico	0,57356441
Observaciones	5

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	1	10,2435916	10,2435916	31,1377953	0,01136254
Residuos	3	0,98692841	0,32897614		
Total	4	11,23052			

	<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	34,098	3,5135987	9,70458	0,0023	22,9161543	45,279854	22,91615	45,27985
Variable X 1	-0,0196	0,0035147	-5,5801	0,0113	-0,03079841	-0,00842727	-0,03079	-0,00842

Análisis de residuales

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico para Y</i>	<i>Residuos</i>
		-
1	16,6425742	0,48257416
2	15,5638678	0,26613218
3	14,3870973	0,51290274
4	13,5045193	0,28548066
5	12,6219414	-0,5819414

Tabla 9.5 Para la Absorción de agua (Granulometría +0.125-0.27mm)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,96341672
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,92817178
R <sup>2</sup> ajustado	0,90422904
Error típico	0,56990599
Observaciones	5

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	1	12,5910215	12,5910215	38,7663156	0,00835334
Residuos	3	0,9743785	0,32479283		
Total	4	13,5654			

	<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	37,069	3,4911875	10,61788	0,0017	25,9585	48,1795	25,9585	48,1795
Variable X 1	-0,0217	0,003492	-6,22626	0,0083	-0,0328585	-0,0106	-0,03285	-0,01063

Análisis de residuales

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico para Y</i>	<i>Residuos</i>
1	17,7166373	-0,3866372
2	16,5207022	0,27929778
3	15,2160458	0,11395419
4	14,2375535	0,60244649
5	13,2590612	-0,6090612

Tabla 9.6 Para la Absorción de agua (Granulometría +0.27mm)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,9781224
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,95672344
R <sup>2</sup> ajustado	0,94229792
Error típico	0,55270142
Observaciones	5

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	1	20,2598434	20,2598434	66,3215894	0,00387171
Residuos	3	0,91643658	0,30547886		
Total	4	21,17628			

	<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	44,651	3,385794	13,1879	0,0009	33,876560	55,4267966	33,87656	55,4267
Variable X 1	-0,027	0,003386	-8,14380	0,0038	-0,0383611	-0,01680372	-0,03836	-0,01680

Análisis de residuales

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico para Y</i>	<i>Residuos</i>
1	20,1033196	0,03668044
2	18,5862861	-0,4962861
3	16,9313406	0,55865941
4	15,6901314	0,36986857
5	14,4489223	-0,4689222