

**ESTUDIO DE MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE TEJAS
Y LADRILLOS CON LAS ARCILLAS DE LA VEREDA GUAYABAL DEL
MUNICIPIO DE BARICHARA (SANTANDER)**

**JOSÉ DARÍO SANTOS AMADO
PEDRO YESID MALAGÓN VILLAFRADES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2009

**ESTUDIO DE MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE TEJAS
Y LADRILLOS CON LAS ARCILLAS DE LA VEREDA GUAYABAL DEL
MUNICIPIO DE BARICHARA (SANTANDER)**

**JOSÉ DARÍO SANTOS AMADO
PEDRO YESID MALAGÓN VILAFRADES**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico**

**Directora
Ph.D. ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2009

AL PUEBLO COLOMBIANO, Porque gracias a sus años de sacrificio incondicional pude recibir la educación superior, que muchas personas anhelan y merecen.

José Darío.

*A los obreros y campesinos, a las mujeres y hombres que han sido un ejemplo de vida
para aquellos que sueñan y se esfuerzan por crear
una mejor sociedad.*

PEDRO.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes personas y entidades:

Ph.D. Elcy María Córdoba Tuta, Directora de proyecto, por su gentileza, paciencia, apoyo y contribución.

Vicerrectoría de Investigación y Extensión de La Universidad Industrial de Santander, por la financiación del presente Trabajo de Grado, a través del proyecto: DISEÑO DE UN PROCEDIMIENTO SISTEMATIZADO PARA LA FABRICACIÓN DE TEJAS Y LADRILLOS CON LAS ARCILLAS DE LA VEREDA GUAYABAL DEL MUNICIPIO DE BARICHARA, Código: 5426.

Asociación de Artesanos de la Vereda Guayabal de Barichara (ASOGUAYABAL) por su hospitalidad y colaboración.

Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA), por brindarnos algunos de los medios para el desarrollo de nuestro trabajo de grado.

Técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica: Ambrosio Carrillo, Daniel, Javier, Fermín y Mario, por su colaboración en varias etapas del proyecto.

Ing. Jesús Mendoza de la Escuela de Química por su ayuda en el análisis microgranulométrico.

Químico José Luis y al Profesor Antonio Henao del Laboratorio de Difracción de Rayos-X de la Escuela de Química.

Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil.

Ing. Jorge Díaz de la Universidad Santo Tomás, Sede Bucaramanga.

Profesora Gloria Restrepo e Ingeniero Esteban Correa de la Universidad de Antioquia.

Corporación para el desarrollo productivo de la Joyería.

A todas aquellas personas que de alguna u otra forma nos brindaron su ayuda para culminar este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	3
1.1 Objetivo General	3
1.2 Objetivos Específicos	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 ARCILLAS	4
2.1.1 Definición	4
2.1.2 Clasificación	4
2.2 PROCESO DE FABRICACION DE MATERIALES CERAMICOS	6
2.2.1 Conminución	6
2.2.2 Concentración	7
2.2.3 Preparación de Las Pastas Cerámicas	7
2.2.4 Conformado de Las Piezas	8
2.2.5 Secado de Las Piezas	9
2.2.6 Cocción	10
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	13
3.1 RECOLECCIÓN DE ARCILLAS Y DIAGNOSTICO DEL PROCESO PRODUCTIVO EN LA VEREDA GUAYABAL	14
3.2 CARACTERIZACION DE LAS ARCILLAS	14
3.2.1 Análisis mineralógico por difracción de rayos x (DRX)	14

3.2.2	Análisis químico por fluorescencia de rayos x (FRX)	15
3.2.3	Análisis térmicos	15
3.2.4	Análisis Granulométrico	16
3.2.5	Plasticidad	19
3.3	SELECCIÓN DE LAS ARCILLAS PARA ELABORAR PASTAS CERAMICAS	19
3.4	PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS PASTAS CERAMICAS	20
3.4.1	Mezclado	21
3.4.2	Conformado	21
3.4.3	Secado	21
3.4.4	Cocción	21
3.5	SELECCIÓN DE LAS PASTAS ADECUADAS PARA ELABORAR TEJAS Y LADRILLOS	22
3.6	ESTUDIO DE COCCIÓN DE LOS CERAMICOS	23
3.7	PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL PROCESO DEL PROCESO DE FABRICACION DE TEJAS Y LADRILLOS	25
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	26
4.1	RECOLECCIÓN DE ARCILLAS Y DIAGNOSTICO DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS EN LA VEREDA GUAYABAL.	26
4.1.1	Producción	26
4.1.2	Recurso Humano	31
4.1.3	Seguridad Industrial	32
4.1.4	Distribución de Planta	33

4.1.5	Comercialización	34
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS	36
4.2.1	Análisis Mineralógico Mediante Difracción de Rayos X	36
4.2.2	Análisis Químico por Fluorescencia de Rayos X	39
4.2.3	Análisis Térmicos	40
4.2.4	Plasticidad	42
4.2.5	Estabilidad de las pulpas arcillosas	43
4.2.6	Distribución Granulométrica	45
4.3	SELECCIÓN DE ARCILLAS PARA LA ELABORACIÓN DE PASTAS CERAMICAS	45
4.4	PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS PASTAS CERAMICAS	47
4.4.1	Evaluación de pastas con las arcillas puras N, R, T y C	47
4.4.2	Obtención de pastas con las mezclas de arcillas C y A	49
4.5	SELECCIÓN DE LAS PASTAS CERAMICAS MÁS ADECUADAS PARA LA FABRICACIÓN DE TEJAS Y LADRILLOS	51
4.6	ESTUDIO DE COCCIÓN DE LOS CERAMICOS	51
4.6.1	Temperaturas de cocción	52
4.6.2	Tiempo de permanencia	60
4.6.3	Velocidad de Calentamiento	65
5.	PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE TEJAS Y LADRILLOS EN LA VEREDA GUAYABAL	69
5.1	El trabajo asociativo	69
5.2	Explotación minera	70
5.3	Mezclado y preparación de las pastas	71
5.4	Moldeo y secado	71

5.5	Cocción	72
6.	CONCLUSIONES	75
7.	RECOMENDACIONES	77
8.	BIBLIOGRAFIA	79
9.	ANEXOS	83

LISTA DE TABLAS

		pág.
Tabla 1	Característica de estabilidad de los coloides.	18
Tabla 2	Nómina según actividad realizada en el proceso de elaboración de tejas y ladrillos.	32
Tabla 3	Especies cristalinas presentes en las arcillas, según figura 21.	37
Tabla 4	Resultados FRX de las arcillas.	39
Tabla 5	Limites de Atterberg para las diferentes arcillas.	42
Tabla 6	Condiciones de pH usadas para dispersión.	44
Tabla 7	Caracterización física de los cerámicos obtenidos con arcillas puras (V= 2°C/min, t= 2 H, T= 1050°C)	48
Tabla 8	Plasticidad de las mezclas de arcilla C-A.	49
Tabla 9	Caracterización física de los cerámicos obtenidos con las mezclas de arcillas C-A (V= 2°C/min, t= 2H, T= 1050°C)	50
Tabla 10	Resultados de caracterización físico-mecánica de los cerámicos sinterizados con diferentes temperaturas (V= 2°C/min, t= 2 horas).	53
Tabla 11	Características de las pastas a la temperatura escogida de 1050°C	60
Tabla 12	Resultados de caracterización físico-mecánica de los cerámicos sinterizados con diferentes tiempos de permanencia (V= 2°C/min, T= 1050°C)	61
Tabla 13	Resultados de caracterización físico-mecánica de los cerámicos sinterizados con diferentes velocidades de calentamiento (T= 1050°C, t= 2h)	62

LISTA DE FIGURAS

		pág.
Figura 1	Diagrama del proceso de fabricación de productos cerámicos.	7
Figura 2	Diagrama de flujo del desarrollo experimental	13
Figura 3	Equipo de FRX, Shimadzu EDX 800 HS.	15
Figura 4	Analizador térmico Linseis STA.	16
Figura 5	Zeta – meter	17
Figura 6	Cazuela de Casagrande del laboratorio de cerámicos, UIS.	19
Figura 7	Estufa para secado.	22
Figura 8	Mufla Terrígeno.	22
Figura 9	Estética de los techados en teja (centro de Bogotá).	23
Figura 10	Microscopio electrónico de barrido (SEM)	25
Figura 11	Diagrama de flujo del proceso de fabricación tejas y ladrillos en Barichara (S/der).	27
Figura 12	Frente de explotación para algunas arcillas de la zona.	28
Figura 13	Pilas de disgregación de arcilla.	29
Figura 14	Pozos ubicados en las canteras.	29
Figura 15	Moldeo manual de tejas.	29
Figura 16	Horno típico de Barichara (Santander).	30
Figura 17	Leña usada para cocción.	30
Figura 18	Condiciones laborales de los artesanos	33
Figura 19	Frente de explotación de la cantera.	34
Figura 20	Secado natural de las piezas.	35

Figura 21	Difractogramas de las nueve arcillas de la vereda Guayabal.	38
Figura 22	Curvas ATD y ATG de las diferentes arcillas preseleccionadas.	40
Figura 23	Diagrama de Casagrande.	42
Figura 24	Potencial Zeta de las arcillas.	44
Figura 25	Distribución de tamaño de partícula de las arcillas.	46
Figura 26	Cerámicos obtenidos con arcillas puras (condiciones de cocción: $V=2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $T=1050^{\circ}\text{C}$, $T= 2\text{H}$)	48
Figura 27	Resultados de la caracterización física de los cerámicos sinterizados con diferentes Temperaturas ($V=2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $T= 2\text{H}$)	50
Figura 28	Los cerámicos obtenidos a diferentes temperaturas de sinterización ($V=2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $T= 2\text{H}$).	52
Figura 29	Efecto de la temperatura sobre las propiedades físico-mecánicas de los cerámicos obtenidos con la pasta R.	53
Figura 30	Efecto de la temperatura sobre las propiedades físico-mecánicas de los cerámicos obtenidos con la pasta 55C.	54
Figura 31	Difractogramas de los cerámicos obtenidos con la pasta R a diferentes temperaturas de sinterización ($V= 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $t= 2\text{ h}$).	56
Figura 32.	Difractogramas de los cerámicos obtenidos con la pasta R a diferentes temperaturas de sinterización ($V= 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $t= 2\text{ h}$).	57
Figura 33	Micrografías de los cerámicos a 1050°C . microanálisis EDX. (a) R, (b) 55C.	59
Figura 34	Micrografía del cerámico obtenido con la pasta 55C a 1150°C	59
Figura 35	Cerámicos obtenidos con diferentes tiempos de sinterización	61
Figura 36	Efecto del tiempo de permanencia sobre las propiedades físico – mecánicas de los cerámicos con la pasta R	62
Figura 37	Efecto del tiempo de permanencia sobre las propiedades físico – mecánicas de los cerámicos con la pasta 55C.	62
Figura 38	Difractogramas de los cerámicos obtenidos con la pasta 55C a	63

	diferentes tiempos de permanencia ($V= 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $T= 1050^{\circ}\text{C}$).	
Figura 39	Difractogramas de los cerámicos obtenidos con la pasta R a diferentes tiempos de permanencia ($V= 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $T= 1050^{\circ}\text{C}$).	63
Figura 40	Micrografías cerámicas obtenidos con las pastas R y 55C a un tiempo de permanencia de 3 horas ($T= 1050^{\circ}\text{C}$, $V= 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	64
Figura 41	Aspecto de las micrografías cerámicas al aumentar la velocidad de calentamiento	65
Figura 42	Efecto de la velocidad de calentamiento sobre las propiedades físico-mecánicas de los cerámicos obtenidos con la pasta 55C.	66
Figura 43	Efecto de la velocidad de calentamiento sobre las propiedades físico-mecánicas de los cerámicos obtenidos con la pasta R.	67
Figura 44	Propuesta de mejoramiento del proceso de fabricación de tejas y ladrillos en la vereda Guayabal	74

LISTA DE ANEXOS

		Pág.
Anexo A.	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRIA DE SUELOS	83
Anexo B.	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS LÍMITES DE ATTERBERG	84
Anexo C.	LIMITE LÍQUIDO PARA LAS PASTAS C-A.	89
Anexo D.	DIFRACTOGRAMAS DE LOS CERÁMICOS A DIFERENTES VELOCIDADES DE CALENTAMIENTO (T= 1050°C, T= 2H).	90
Anexo E.	DIAGRAMA TERNARIO Al_2O_3 - SiO_2 - FeO	92

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE TEJAS Y LADRILLOS CON LAS ARCILLAS DE LA VEREDA GUAYABAL DEL MUNICIPIO DE BARICHARA (SANTANDER)*

AUTORES: SANTOS AMADO, José Darío, y, MALAGÓN VILAFRADES, Pedro Yesid**

PALABRAS CLAVES: Arcilla, ladrillos, teja, plasticidad, sinterización

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se determinaron las características mineralógicas, físicas y químicas de cinco de las muestras más representativas de Barichara (Santander, Colombia): Arcilla Roja (R), Cascajo (C), Arena Amarilla (A), Sangre Toro (T) y Arcilla Negra (N), llamadas así por los artesanos de la región. Luego de complementar su caracterización y teniendo en cuenta varios criterios, se seleccionaron tres arcillas, C, R y A, con propiedades físicas diferentes, siendo la primera y la segunda plásticas y la tercera desgrasante. Posteriormente se elaboraron cinco pastas de las tres arcillas en distintos porcentajes, a las cuales se les realizó un estudio de plasticidad mediante los límites de Atterberg, se conformaron probetas cerámicas mediante prensado, se secaron al ambiente y en estufa, y finalmente se sinterizaron a 1050°C. Después de determinar sus propiedades físico-mecánicas, se seleccionaron las pastas cerámicas que cumplieron los requerimientos exigidos por las normas técnicas colombianas NTC 2086 Y 4205. Se realizó un estudio de cocción evaluando tres variables: velocidad de calentamiento, temperatura de cocción y tiempo de permanencia a esa temperatura.

Los resultados demostraron que es posible obtener ladrillos y tejas de muy buena calidad, que cumplan con los requisitos de resistencia mecánica, acabado superficial, Absorción de agua (porosidad) y color haciendo las mezclas adecuadas de C, A y R (plásticas y arenosas) y usando una temperatura de 1050°C, un tiempo de permanencia de 2 horas y velocidades de calentamiento de 3°C/min.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Ph.D. Elcy María Córdoba Tuta.

ABSTRACT

TITLE: IMPROVEMENT BRICKS AND CLAY TILE'S FABRICATION WITH THE BARICHARA'S (SANTANDER) CLAY.....*

AUTHORS: SANTOS AMADO, José Darío, and, MALAGÓN VILLAFRADES, Pedro Yesid **

KEYWORDS: Clay, Brick, tile and Plasticity.

DESCRIPTION:

This work identified mineralogical characteristics, physical and chemical properties of five of the most symbolic Barichara's clays: Red clay (R), Cascajo (C), Yellow Sand (A), Blood Bull (T) y Black Clay (N), as called by the artisans of the region. After complement its characterization and taking into account several criteria, it were selected three clays, C, R and A, with different physical properties, the first and second plastic and the third with low plasticity. It was subsequently developed five mixtures of clays of the three clays in different percentages, at which they conducted a survey of plasticity through Atterberg limits, ceramic pieces were formed by pressing the dried environment and stove, and finally sintered at 1050 ° C. After determining their physical and mechanical properties, were selected mixtures of clays that met requirements by standards: NTC 2086 Y 4205 a firing study was made with three variables: sintering temperature, keeping at the maximum sintering temperature and rate of heating.

The results showed that is possible obtain bricks and roofing tiles quality, with good bending strength, surface, water absorption and make specific mixtures with C, A and R clays and use a sintering temperature of 1050°C, two hours of keeping time and rate of heating of 2 and 3°C/min.

* Degree Work.

** Phisycal-Chemical Engineering Faculty. Metallurgycal Engineering and Material Science School. Escuela. Director: Ph.D. Elcy María Córdoba Tuta.

INTRODUCCIÓN

El uso de la arcilla en el campo de la construcción, para la fabricación de tejas y ladrillos, se remonta a miles de años; pero tan solo a mitad del siglo pasado surgió la industria ladrillera en Colombia, con sus primeros chircales artesanales, orientados principalmente a cubrir la elevada demanda de tejas de la época, lo que significó que esta industria creciera significativamente en sus primeros años de existencia. Así, las grandes y medianas empresas del sector aparecen, en su mayoría, entre 1950 y 1970 (Camacho y Camargo, 1986).

Actualmente, en el departamento de Santander la industria ladrillera presenta cierto contraste, al abarcar desde grandes empresas tecnificadas hasta los pequeños chircales artesanales, siendo estos últimos los más vulnerables. La producción en los chircales conserva las técnicas ancestrales, debido al poco apoyo que recibieron del estado durante años y por el reducido interés económico que esta industria despierta en las grandes empresas del sector de los cerámicos, quienes han dirigido sus esfuerzos a tecnificar y mejorar la producción de artículos de mayor valor.

La situación de los chircales en el departamento de Santander es reflejada por la asociación de artesanos de la vereda Guayabal del municipio de Barichara (ASOGUAYABAL), quienes se dedican a la fabricación de tejas y ladrillos. Su sistema de producción se ha mantenido gracias a la tradición familiar, debido a esto sus conocimientos del área son empíricos. La ausencia, hasta ahora, de asesoría técnico científica, tiene como consecuencia un rendimiento económico muy bajo de su trabajo, así como graves daños ambientales en la región.

Los artesanos de ASOGUAYABAL trabajan con cerca de 9 tipos de arcillas, a las que les atribuyen un carácter de plásticas o poco plásticas. Basados en sus deducciones, los artesanos fabrican las pastas cerámicas, desconociendo la composición de las mezclas utilizadas, la temperatura alcanzada durante la cocción y el tiempo necesario durante la misma para lograr piezas de buena calidad. La falta de control de estas tres variables ha generado la producción de piezas con diferentes propiedades mecánicas y un excesivo consumo de energía. La problemática anterior es agravada por el hecho de que el combustible utilizado para la cocción de las piezas es leña, cuya obtención se puede calificar como insostenible ambientalmente por la consecuente desertización de la región.

El elevado grado de empirismo en el sector “chircalero” de la vereda Guayabal (Barichara) representa un obstáculo para el desarrollo de la producción regional en la producción de tejas y ladrillos. Por tanto existe la necesidad de generar estándares de operación que favorezcan la obtención de productos con composición y propiedades controladas, lo cual redundará en el mejoramiento de la calidad de vida de los núcleos familiares que encuentran su sustento en esta actividad productiva, así como minimizar el impacto ambiental por dicha actividad.

Teniendo en cuenta lo anterior, con este proyecto se pretendió establecer alternativas de mejoramiento al proceso de fabricación de tejas y ladrillos en los chircales de la vereda Guayabal (Barichara).

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Proponer una alternativa de mejoramiento al proceso de fabricación de tejas y ladrillos a partir de las arcillas de la vereda Guayabal del municipio de Barichara.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características mineralógicas, físicas y químicas de las arcillas de la zona.
- Obtener una pasta cerámica a partir de las mezclas de arcillas con agua que cumpla con las condiciones físico-mecánicas necesarias para la obtención de piezas de buena calidad.
- Determinar las variables de operación más apropiadas en el proceso de cocción para la obtención de productos con buenas propiedades físico-mecánicas.
- Plantear una metodología apropiada para el procesamiento de las arcillas en la fabricación de tejas y ladrillos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ARCILLAS

La arcilla es una materia prima que cada vez tiene mayores aplicaciones en las diferentes industrias: Para moldes de fundición, fabricación de Cerámicos, filtros, diseño de materiales compuestos, etc. Sin embargo su aplicación más antigua, la fabricación de materiales para la construcción, ha tenido pocos avances, a causa de un estudio insuficiente en este campo.

Las arcillas están ampliamente extendidas sobre la mayor parte de la superficie terrestre, a pesar de esto es difícil encontrar una clasificación satisfactoria dada la exigencia de su empleo práctico. Se han propuesto clasificaciones en relación con la composición química y estructura cristalográfica, lo que solo tiene interés teórico, pues únicamente las características fisicoquímicas, establecen las posibilidades de uso de dichos materiales arcillosos.

2.1.1 Definición. Se podría decir que los materiales arcillosos tienen como fórmula general: $n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, no obstante algunos autores llaman materiales arcillosos a los comprendidos en la fórmula: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (0.3-8)\text{SiO}_2 \cdot (0.5-19)\text{H}_2\text{O}$.

Por sus propiedades físicas, la arcilla se define como un material que toma un carácter plástico y moldeable al ser mezclada con una cantidad apropiada de agua (formando la pasta cerámica), se endurece tras el secado y se vitrifica cuando se quema a una temperatura alta.

2.1.2 Clasificación. Una buena clasificación de las arcillas la hace el Norteamericano P.F. Kerr (Morales J, 2005) de la siguiente manera:

Caolin	Nacrita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Dickita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Distinta red cristalina)
	Caolinita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Distinta red cristalina)
	Anauxita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Halloysita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	Alófano	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$
Montmorillonita	Montmorillonitas	(Mg,Ca) $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Beidillita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Nontronita	(Al,Fe)O $\cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Saponita	$2\text{MgO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Esmectita	Metabentonita	$\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	Hidromica	(composición Variable)

Las arcillas contienen cantidades variables de óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), alúmina (Al_2O_3), óxido de calcio (CaO) y otros elementos. Mineralógicamente, la mayoría de los minerales arcillosos no se encuentran puros (homolíticos), sino que están formados por mezclas de estos (heteropolíticos), en los cuales existe un mineral predominante.

Las arcillas contienen también algunos otros minerales que no son arcillosos, como sílice (SiO_2), que no presenta plasticidad por lo que es usada comúnmente como material desgrasante. El carbonato de calcio (CaCO_3), ejerce una acción fundente en las pastas cerámicas disminuyendo la temperatura de cocción. Los minerales de hierro dentro de los cuales los más comunes son Hematita, Magnetita, Goethita y Pirita, son los principales responsables del color rojo de las arcillas. El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), es una impureza que puede formar depósitos salinos en los ladrillos crudos, que fácilmente se transforman en manchas superficiales.

Muchas arcillas contienen materia orgánica, especialmente como lignito (Norton, 1972), el cual puede separarse fácilmente en parafinas, resinas y humus de lignina. La

mayoría de la materia orgánica se presenta en fracciones voluminosas unidas a la arcilla por lo cual puede ser separada fácilmente, a excepción del humus que es absorbido por la superficie de las partículas. Este último componente es responsable del aumento de la porosidad durante el proceso de cocción de muchos cerámicos, especialmente refractarios, por lo cual se agrega intencionalmente para la fabricación de refractarios aislantes.

2.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS.

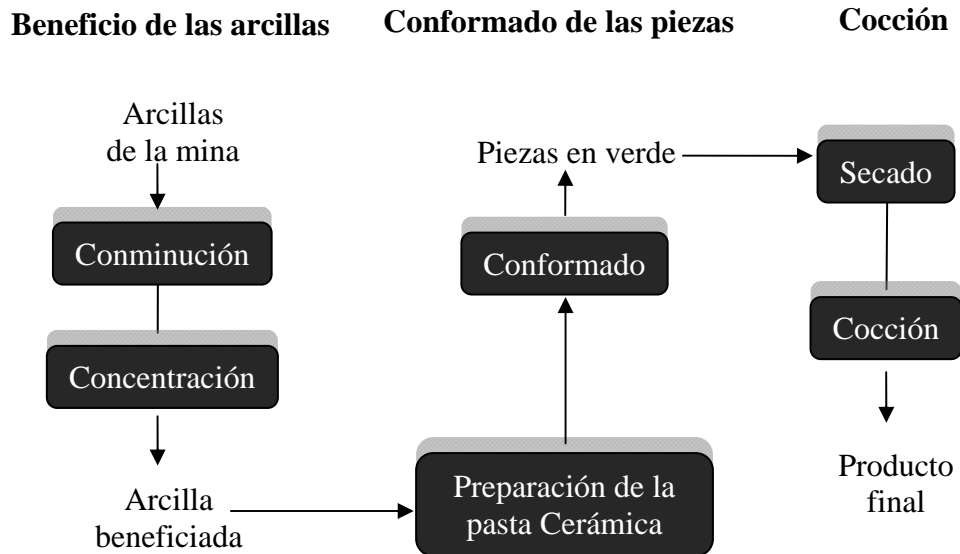
Tal como se indica en la Figura 1, el proceso de fabricación de productos cerámicos tradicionales se pueden dividir en tres grupos: Beneficio de las arcillas (trituración, molienda y concentración), conformado de las piezas (preparación de la pasta cerámica y el moldeo de las piezas) y Cocción de las piezas, con un previo secado de las mismas para evitar deformaciones.

2.2.1 Conminución. Normalmente en esta etapa el material se tritura en “desterronadores” para luego pasar a los molinos de martillos, donde se obtiene la reducción de tamaño de los agregados en los que se encuentra inicialmente la materia prima. El objetivo principal de esta primera etapa es aumentar el área superficial de los agregados, y así aumentar la capacidad de interacción con otras posibles fases y elementos. En algunos casos la Conminución se realiza para disminuir el tamaño de las partículas, principalmente del material desgrasante, buscando una mejor distribución granulométrica que mejore la compactación en el moldeo y por ende las propiedades mecánicas del producto.

Esta etapa puede llevarse a cabo por vía seca o húmeda, lo cual se decide en primera instancia por la dureza de los materiales o la dificultad para desintegrarlos. Algunas materias primas, como pegmatitas, talcos, dolomitas, e incluso algunas arcillas compactas, son poco adecuadas para su procesamiento en seco debido a la alta abrasión que producen en los molinos, la generación de gran cantidad de impurezas y

la dificultad de obtener tamaños de partícula pequeños. La molienda vía húmeda permite una molienda más fina y la realización de un mejor tamizado para la eliminación de impurezas.

Figura 1. Diagrama del proceso de fabricación de productos cerámicos.



2.2.2 Concentración. Las arcillas antes de su uso industrial, deben someterse a diversos procesos de purificación, tales como: Tamizaje, lixiviación, flotación, etc. El propósito de estos procesos es separar minerales indeseables, que puedan afectar las características finales del producto cerámico. Un proceso de purificación habitual es el blanqueo de las arcillas, es decir, la eliminación de sustancias coloreadas, tales como los óxidos de Fe y Mn.

2.2.3 Preparación de la Pastas Cerámicas. Independientemente del sistema utilizado en la producción, para la fabricación de cualquier producto cerámico se parte de una mezcla de materias primas, denominada comúnmente pasta, la cual sufre diversas transformaciones fisicoquímicas hasta alcanzar las propiedades requeridas

por el producto acabado. De acuerdo con su comportamiento con el agua, las materias primas cerámicas se pueden clasificar en plásticas y no plásticas (desgrasantes). Ejemplos simples de materias primas plásticas son los caolines y las arcillas, mientras que el cuarzo y el feldespato son ejemplos de materias primas no plásticas.

La composición de la pasta debe ser elegida en función de las características de la pieza cerámica que se desea obtener y del proceso de fabricación a emplear. Por tanto, la calidad del producto dependerá plenamente de la mezcla de materias primas empleadas y del procedimiento seguido en la fabricación. En general, una pasta es idónea para la fabricación de un producto cerámico cuando cumple una serie de condiciones:

- La relación de materiales plásticos (minerales arcillosos) a materiales desgrasantes debe ser tal que confiera a la pasta cerámica la plasticidad necesaria para realizar un adecuado moldeo y a la pieza conformada la suficiente resistencia mecánica en verde y en seco.
- Si la preparación de la muestra se realiza por vía húmeda, debe ser fácilmente desfloculable.
- Por último, la pasta cerámica debe poseer una adecuada composición química y mineralógica de manera que, las transformaciones fisicoquímicas que tienen lugar durante el proceso de cocción, confieran al producto acabado las características deseadas.

2.2.4 Conformado de las Piezas. Esta etapa es de gran importancia debido a la influencia que tiene sobre las etapas posteriores. Las propiedades físicas de los materiales terminados varían de forma considerable según los métodos de fabricación, estos dependen de la forma del producto y de las características de la materia prima. Los principales métodos de moldeo son: moldeo a mano, mediante plantilla giratoria, torneado, prensado y extrusión (Elías, 2001).

La plasticidad, por su importancia en el proceso de elaboración de la pasta cerámica tiene influencia directa en el moldeo, y por ende en las etapas posteriores de secado y cocción, entendiéndose la plasticidad como una propiedad que tienen las arcillas para formar una pasta dúctil con el agua. Para un correcto conformado se debe determinar la cantidad de agua necesaria para obtener la plasticidad adecuada, lo cual se hace comúnmente mediante la determinación de los límites de Atterberg que comprenden el límite líquido (% de humedad que posee un suelo cuando se halla en el límite entre el estado líquido y estado plástico), límite plástico (el cual corresponde a la menor humedad a la cual un suelo se puede moldear) e índice de plasticidad (Indica el intervalo de trabajabilidad de la arcilla).

Al agregar agua a la pasta cerámica, esta es inicialmente absorbida por la superficie de las partículas arcillosas formando una capa rígida que se comporta como si fuese una película sólida. A medida que aumenta el número de capas de agua que envuelven a la partícula arcillosa éstas van perdiendo rigidez, hasta que sobre el 18% de humedad comienzan a aparecer moléculas de agua libre entre partícula y partícula. Si se continúa agregando agua, la sección de los capilares aumenta y la atracción capilar disminuye, apreciándose un rápido descenso de la consistencia de la arcilla (Morales y Niño, 2006).

2.2.5 Secado de las Piezas. El secado consiste en exponer la pieza húmeda a la acción de una corriente de aire caliente y seco, con la finalidad de eliminar por evaporación superficial el líquido que contiene. Es una de las fases del proceso, en la cual convergen múltiples factores: la naturaleza, grado de preparación y homogeneización de la arcilla, tensiones ocasionadas durante el moldeo, diseño y forma de las piezas, etc. En este proceso, se produce la eliminación de la mayor parte del agua de moldeo, con el fin de evitar que en la posterior etapa de cocción se presenten hinchamientos y rompimientos de las piezas. Este fenómeno se puede dividir en tres fases cuyo orden cronológico es el siguiente (Morales Juan, 2005):

- Se elimina el agua que llena los intersticios entre partículas; estas tienden a aproximarse unas a otras produciéndose una primera contracción, es decir, el volumen disminuye de forma proporcional al agua eliminada.
- Se elimina el agua que constituye un velo que envuelve a las partículas. Continúa la contracción de la pieza, pero no de forma proporcional al volumen de agua porque comienzan a formarse poros.
- Se elimina el agua que produjo el hinchamiento de las partículas coloidales, es decir, el agua absorbida en los espacios interlaminares del retículo cristalino. En esta fase se anula la contracción y se forman espacios vacíos proporcionales al volumen de agua eliminada.

El proceso de secado depende de los siguientes factores:

- Las características del aire: temperatura y humedad del aire
- La velocidad y dirección e incidencia del aire que esta en contacto con la pieza en un momento determinado.
- La relación superficie-volumen, es decir, la superficie específica de la pieza.
- El tamaño de las partículas y su distribución de tamaño en la pieza.

Industrialmente existen dos tipos de secado, secado natural y secado artificial, en el natural las piezas se secan al ambiente en periodos de dos semanas hasta un mes, mientras que en el secado artificial se utilizan diferentes tipos de secadores los cuales disminuyen considerablemente el tiempo de secado (Morales y Niño 2006).

Para determinar el ciclo de secado y evitar defectos sobre las piezas, es importante conocer la curva de contracción de las arcillas y de las pastas, ya que al terminar la contracción el resto de agua puede eliminarse fácilmente.

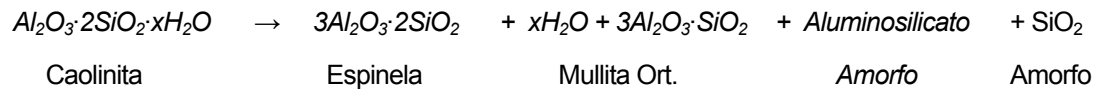
2.2.6 Cocción. La cocción es la fase culminante del proceso cerámico y consiste en una serie de modificaciones físicas y reacciones químicas que endurecen y consolidan la pasta cerámica, aportándole propiedades nuevas.

En cuanto a la duración del ciclo de cocción se pueden considerar dos aspectos. El primero de ellos hace referencia a la materia orgánica presente en la pasta, la cual se ha de oxidar en el transcurso de la cocción, lo cual es una limitante para la velocidad de la cocción. El segundo aspecto concierne al tamaño de partícula de las materias primas que componen la pasta, necesitándose menores tiempos de cocción a medida que el tamaño de partícula disminuye.

En la industria cerámica existen diversos tipos de hornos: Pampa, Colmena, Hoffman, Túnel, entre otros. Estos hornos permiten llevar a cabo en diferentes formas el proceso de cocción, el más utilizado en la industria ladrillera colombiana es el horno tipo colmena que opera de forma intermitente y donde la temperatura y la velocidad de calentamiento son controladas con la alimentación de combustible, que generalmente es carbón.

Reacciones durante la cocción Durante el calentamiento de las arcillas se produce una serie de reacciones que se manifiestan exteriormente en forma de: absorción y desprendimiento de calor, desprendimiento de gases, dilataciones y contracciones. Para comprender mejor el proceso de cocción de las arcillas, es necesario considerar que en cada uno de los minerales presentes se generan diferentes cambios en función de la temperatura, por ejemplo:

- 1) Caolinita: Cuando es calentada no experimenta ningún cambio hasta alcanzar aproximadamente los 470° C, momento en el que los iones OH⁻ de la estructura cristalina comienzan a ser eliminados en forma de vapor de agua (OH⁻ + OH⁻ → H₂O + O²⁻), esto genera la destrucción de la red cristalina de la caolinita convirtiéndose en un cuerpo amorfo conocido con el nombre de metacaolín [(Si₄O₁₀)(OH)₂Al₄ → 2(Al₂Si₂O₇) + 2H₂O]. Aproximadamente a los 980 °C, según Chakravorty y Ghosh tiene lugar la siguiente reacción de descomposición:



La espinela presenta una estructura cristalina cúbica y es la fase mayoritaria (30-40%), la mullita ortorrómbica ($3Al_2O_3 \cdot SiO_2$) se sitúa en un 5% y es morfológicamente diferente de la mullita bien cristalizada considerada estándar. Paralelamente a estas dos fases cristalinas se forman dos amorfas, una de aluminosilicato (30-40%) y otra de sílice. A 1150-1250°C la espinela se transforma en mullita por reacción polimórfica, y por encima de 1250°C el aluminosilicato amorfo forma núcleos de mullita los cuales crecen lentamente (Barba y Col, 1997).

- 2) Illita: A partir de 400°C experimenta la pérdida del agua de cristalización, pero persiste la estructura cristalina. Entre 900 y 1000°C se producen cambios cristalográficos y comienza la vitrificación, apareciendo la Mullita, aumentando la resistencia mecánica.

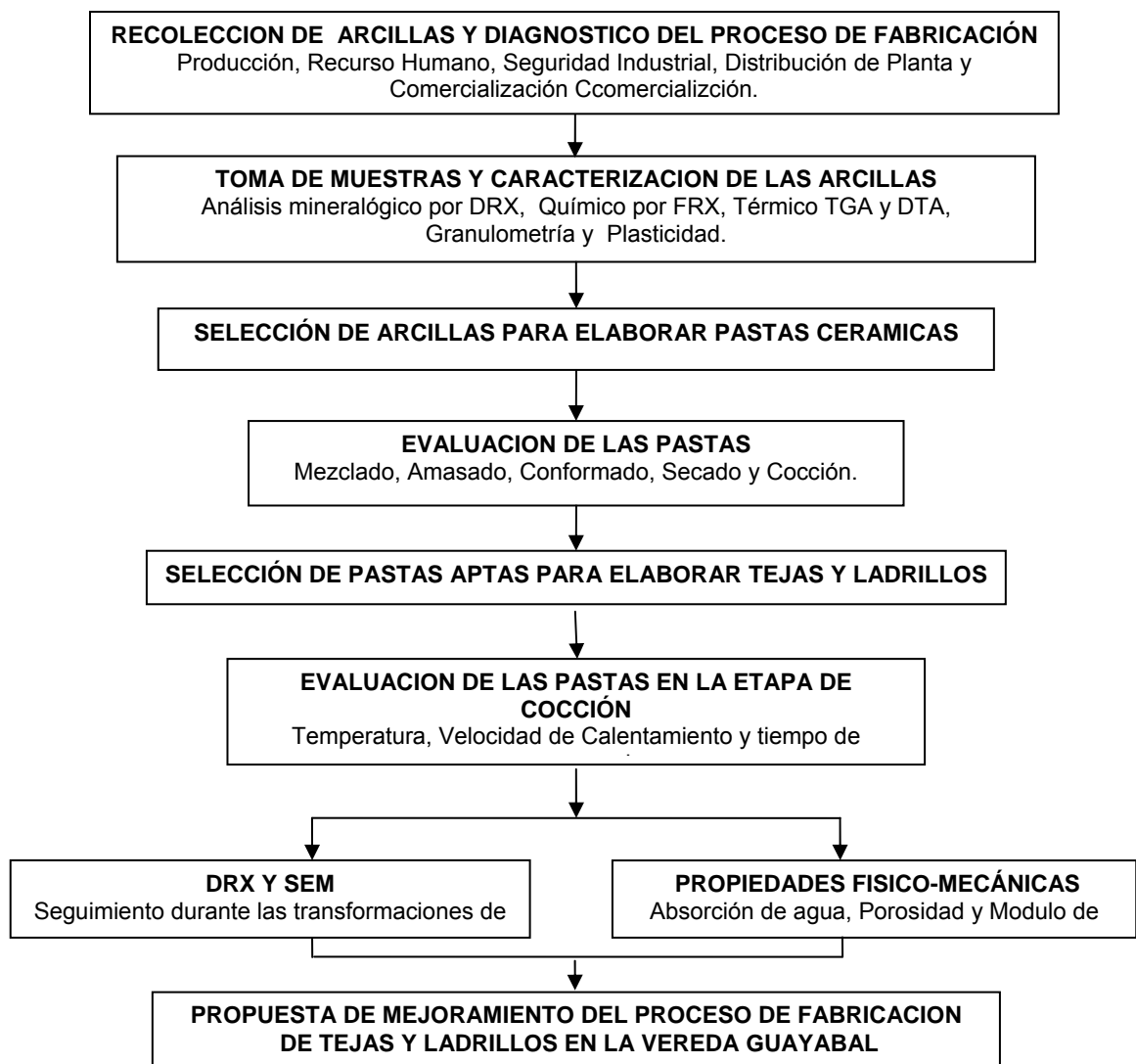
- 3) Cuarzo: Hacia los 573°C el cuarzo cambia su estructura cristalina transformándose de cuarzo α a cuarzo β , produciendo cambios de volumen que pueden generar grietas durante el proceso de enfriamiento, a estas mismas temperaturas pueden presentarse contracciones debido a la transformación del cuarzo β a cuarzo α .

Las arcillas por su composición variable, en donde converge diversidad de minerales cristalinos y amorfos, generan bastante dificultad en el estudio de sus reacciones y transformaciones mineralógicas. Hoy día se proponen diversos mecanismos posibles de formación de minerales, tales como la mullita, espinela y sílice amorfa, basada en estudios de análisis térmicos unidos a análisis mineralógicos, sin embargo muchos científicos continúan estudiando dichos mecanismos de transformación (Barba y Col, 1997). No obstante, el uso de diagramas ternarios para sistemas Alúmina-sílice-FeO componentes principales de las arcillas pueden ser usados para confirmar la formación de fases tales como la mullita (ver anexo F).

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El presente proyecto se desarrolló a través de una serie de actividades detalladas en el plan de trabajo de grado, las cuales se encuentran resumidas en la figura 2.

Figura 2. Diagrama de flujo del desarrollo experimental.



3.1 RECOLECCIÓN DE ARCILLAS Y DIAGNÓSTICO DEL PROCESO PRODUCTIVO EN LA VEREDA GUAYABAL.

El diagnóstico del proceso productivo desarrollado en la vereda Guayabal para la elaboración de tejas y ladrillos se desarrolló en junio del año 2007. Este se fundamentó en una serie de visitas realizadas aleatoriamente a 10 de los 64 chircales existentes basándose en las siguientes pautas: Producción, recurso Humano, seguridad Industrial, distribución de Planta y comercialización. Se buscó abarcar puntos representativos del territorio que comprende la vereda Guayabal, así como los diferentes tipos de chircal.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS

La caracterización de las materias primas, se realizó para conocer y distinguir los diferentes elementos químicos, las respectivas especies mineralógicas y la plasticidad de las arcillas. Las técnicas usadas fueron: Análisis mineralógico por rayos X (DRX), análisis químico por fluorescencia de rayos X (FRX), análisis granulométrico por Tamizaje y fotosedimentación, y determinación de los límites de Atterberg con ayuda de la cazuela de Casagrande.

3.2.1 Análisis mineralógico por difracción de Rayos X (DRX). Esta fase de caracterización se realizó con el fin de conocer los compuestos cristalinos presentes en las arcillas, para ello se usó un difractómetro de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB, rango de medición de muestras entre 2 y 70 grados a 2θ ; tipo de barrido continuo; con velocidad de barrido de 1.2 grados por minuto; 30kV y 15 mA. Estos análisis se realizaron en el laboratorio de rayos X de la escuela de Química de la UIS.

3.2.2 Análisis Químico por Fluorescencia de Rayos X (FRX). La composición química elemental de las arcillas se obtuvo gracias a la técnica de fluorescencia de rayos X, la cual se basa en la irradiación de la muestra con rayos X, provocando la expulsión de un electrón interno de los átomos presentes en la matriz. El electrón expulsado es sustituido por otro, de una capa superior y este proceso genera la emisión de fotones de rayos X característicos de cada elemento presente.

Para analizar una porción representativa, cada muestra fue homogenizada y depositada en un portamuestra desechable de polipropileno, provisto con una película polimérica de C_3H_6 . Se empleó para el análisis un Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersa *Shimadzu* EDX 800 HS (figura 3) del laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Centro de Desarrollo Productivo (C.D.P) de Joyería.

Figura 3. Equipo de FRX, Shimadzu EDX 800 HS.



3.2.3 Análisis térmicos. Este análisis se llevó a cabo en un equipo Linseis STA, Platinum Series de la Universidad de Antioquia (Figura 4). Con los análisis

térmicos se buscó determinar el comportamiento de las arcillas al incrementar la temperatura, su importancia radica en que gracias a ellos se pueden evaluar diversos fenómenos térmicos que tienen lugar durante la cocción de las arcillas, tales como cristalización de fases, reacciones en estado sólido, deshidratación, fusión, oxidación, etc. El análisis Termo-Gravimétrico (ATG) permite distinguir los cambios de peso y el Análisis térmico diferencial (ATD) registra los cambios de energía. Estas dos técnicas constituyen una gran herramienta para determinar las temperaturas de sinterización de los cerámicos.

Figura 4. Analizador térmico Linseis STA.



3.2.4 Análisis Granulométrico. Se realizó con el fin de conocer la distribución granulométrica de los agregados que componen las materias primas arcillosas; la arcilla (agregado fino), la arena (agregado grueso). La proporción de agregados finos con respecto al grueso determina en gran medida las propiedades finales de los cerámicos de arcilla cocida. De aquí la importancia del análisis granulométrico de las arcillas.

Para realizar el análisis granulométrico completo del material arcilloso fue necesario conocer la distribución granulométrica y microgranulométrica, para esta última fue obligatorio que la arcilla se encontrará dispersa y estable en una pulpa de baja concentración (Anexo A). Las condiciones de estabilidad de las pulpas arcillosas fueron determinadas mediante las medidas de potencial zeta, teniendo como variables pH y adición o no de pirofosfato de sodio al 0.5% P/P. Para lograr la dispersión se preparó una pulpa al 10% en peso, bajo la acción de una celda de flotación de doble aspa (atrición) marca DENVER a 1200 rev/min durante 15 minutos. Las mediciones de potencial z se realizaron en el equipo Zetameter System 3.0+ (Figura 5) propiedad del Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgica y Ambiente (GIMBA) de la UIS.

Figura 5. Zeta-meter System 3.0+.



La relación directa entre la estabilidad de las pulpas y los valores de Potencial Zeta se muestra en la tabla 1, en la cual se observa que al aumentar el valor absoluto del potencial zeta, aumenta el grado de estabilidad de las pulpas.

Tabla 1. Característica de estabilidad de los coloides.

CARACTERISTICAS DE ESTABILIDAD	POTENCIAL ZETA PROMEDIO (mV)
Máxima aglomeración y precipitación	+3 a 0
Excelente aglomeración y precipitación	-1 a -4
Regular aglomeración y precipitación	-5 a -10
Umbral de aglomeración	-11 a -20
Meseta de leve estabilidad (baja aglomeración)	-21 a -30
Estabilidad moderada (no hay aglomeración)	-31 a -40
Buena estabilidad	-41 a -60
Muy buena estabilidad	-51 a -60
Excelente estabilidad	-61 a -80
Máxima estabilidad	-81 a -125

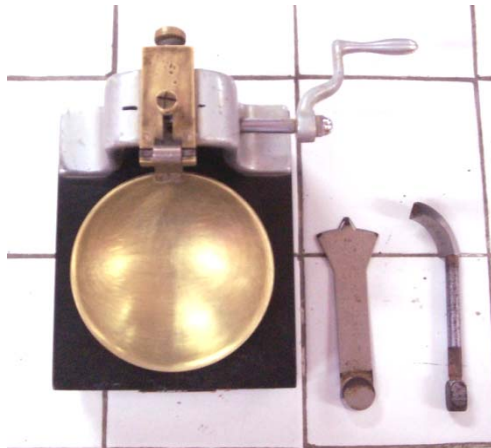
Fuente: www.zetameter.com

Una vez estabilizadas las pulpas arcillosas, se llevaron a cabo los análisis granulométricos y microgranulométricos de las arcillas:

- **Análisis Granulométrico.** Fue realizado para las muestras en estado de recepción, por medio del tamizado en húmedo de la misma, con previo tratamiento de dispersión, haciendo uso del conjunto de mallas Tyler # 60, # 100, # 140 y # 200.
- **Análisis Microgranulométrico.** Las pulpas pasantes de la malla 200 del análisis granulométrico fueron dispersadas en un medio ultrasónico durante 5 minutos, para luego trasladarlas al foto-sedimentador LUMOSSED de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, en donde se realizó el análisis microgranulométrico (Anexo A).

3.2.5 Plasticidad. Para esta determinación se uso la Cazuela de Casagrande junto con sus ranuradores (Figura 6), Pertenecientes al laboratorio de materiales cerámicos de la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UIS. Se uso el método indirecto o método de Atterberg (Anexo B), siguiendo la norma ASTM D4318-05, en la cual se considera una pasta de arcilla y agua que se seca progresivamente pasando del estado líquido al plástico y finalmente al sólido. Los valores determinados fueron: Límite líquido (**LL**), Limite Plástico (**LP**) e Índice de Plasticidad (**I_p**). Los datos se representaron en el diagrama de Casagrande (ver figura 23), mediante el cual se clasifican cualitativamente la plasticidad de las arcillas en baja, mediana y alta.

Figura 6. Cazuela de Casagrande del laboratorio de cerámicos, UIS.



3.3 SELECCIÓN DE ARCILLAS PARA LA ELABORACIÓN DE PASTAS CERAMICAS.

Las arcillas de la vereda Guayabal fueron sometidas a una preselección teniendo en cuenta la disponibilidad, similitud mineralógica y uso dado por los artesanos, evitando caracterizar arcillas que puedan tener las mismas propiedades y/o sean de poco uso en la región.

La calidad del producto cerámico depende en gran medida de las materias primas empleadas, por ello la selección de las arcillas para elaborar la pasta cerámica se hizo en función de las características del producto que se quería obtener.

Para conocer si una arcilla es factible en la fabricación de tejas y ladrillos ésta debe tener un contenido de SiO_2 entre 50 y 60%, y de Al_2O_3 entre 20 y 30 % (Elías, 2001), este será el criterio decisivo en la selección de las arcillas. Sin embargo también se tuvieron en cuenta, otros criterios, tales como plasticidad y granulometría.

3.4 PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS PASTAS CERAMICAS.

Para la elaboración de pastas cerámicas la Industria ladrillera usa mezclas de arcillas, en proporciones iguales, o con diferencias pequeñas una respecto a la otra. En la pequeña industria y los chircales, muchas veces estas mezclas se realizan, sin mediciones volumétricas definidas, utilizando carretas o vagones como unidades de medida.

El objeto de realizar mezclas es buscar las proporciones que generen buenas propiedades físico-mecánicas al producto elaborado, especialmente a las tejas que requieren mayor cuidado y son más susceptibles a la falla. Para obtener una buena pasta cerámica se debe hallar una relación adecuada entre el material plástico y el desgrasante, así como adecuadas propiedades físicas y mecánicas después del proceso de cocción, tales como, resistencia a la flexión, absorción de agua y color.

Las pastas evaluadas fueron preparadas con arcillas puras y con mezclas de las arcillas que no alcanzaron las características adecuadas para la producción de tejas y ladrillos, descritas en el apartado anterior. En el caso de la mezcla de

arcillas fue necesario hacer un barrido de posibles composiciones, variando la relación entre las arcillas que conformaban la muestra. Todas las pastas cerámicas fueron preparadas, conformadas, secadas, sinterizadas y caracterizadas conforme se describe a continuación:

3.4.1 Mezclado. Las arcillas se disgregaron manualmente y se elaboraron las mezclas respectivas. Se agregó agua, en cantidad de 5 puntos por encima del límite plástico, se amasó manualmente hasta conseguir una consistencia uniforme. Posteriormente las pastas se sometieron a un proceso de maduración durante 24 horas para garantizar la máxima plasticidad de las mismas.

3.4.2 Conformado. Se realizó usando una prensa neumática marca INDECO, ubicada en la planta de Aceros de la UIS, a una presión de 20 Psi. Las probetas se fabricaron de dos dimensiones diferentes, según la propiedad física o mecánica a medir: Para las pruebas de densidad, porosidad aparente y absorción de agua las dimensiones fueron de 2cm x 5cm x 10cm. Para los ensayos mecánicos las dimensiones fueron 4in x 1in x 0.5 in, teniendo en cuenta las recomendaciones de las normas ASTM C20-00 y A.S.T.M C674-88.

3.4.3 Secado. Se realizó de manera mixta en tres etapas: al ambiente, en estufa a 50°C y en estufa a 105°C, con un tiempo de permanencia de 24 horas para cada una de dichas etapas. Para ello se usó una estufa eléctrica marca MEMMERT, modelo TV25U serie 771025 (figura 7), ubicada en el laboratorio de materiales cerámicos de la escuela de Ingeniería Metalúrgica.

3.4.4 Cocción. Las condiciones para esta etapa fueron seleccionadas de acuerdo a la literatura (Sauhounne, 2007 y Cultrone, 2004). Temperatura de sinterización de 1050°C, debido a que a esta temperatura se garantiza que se ha iniciado la formación de Mullita; velocidad de calentamiento de 2°C/min, que es

suficientemente baja para evitar cambios bruscos de temperatura durante la cocción, tiempo de permanencia de dos horas para asegurar una buena transformación de la arcilla. En esta etapa del proceso se utilizó una mufla marca TERRIGENO (figura 8) modelo 08 serie 2094 con centro de temperatura y rampa de calentamiento, Ubicada también en el laboratorio de materiales cerámicos.

Los cerámicos una vez preparados se sometieron a diversos ensayos para conocer las diferentes propiedades físicas: La absorción de agua, la porosidad y densidad aparente (ASTM C20-00).

Figura 7. Estufa para secado.



Figura 8. Mufla Terrígeno.



3.5 SELECCIÓN DE LAS PASTAS ADECUADAS PARA ELABORAR TEJAS Y LADRILLOS.

Las Tejas y Ladrillos deben cumplir diferentes funciones. La teja, por su uso en el exterior de las construcciones y estar sometida a la intemperie, debe tener una porosidad menor que el ladrillo. Por otra parte el ladrillo, por ser de uso estructural y estar comúnmente cubierto por capas de cemento y estuco, y no requiere de belleza y estética; por el contrario la teja siempre salta a la vista (Figura 9) y su estética es un factor importante para su comercialización.

Figura 9. Estética de los techados en teja (centro de Bogotá).



Fuente: www.losconstructores.com

Una vez caracterizados los cerámicos obtenidos con las diferentes pastas, se compararon dichos resultados con los requisitos establecidos en las normas NTC 2086 y NTC 4205 para las tejas y ladrillos de arcilla cocida. De aquí se seleccionaron las pastas con las cuales se obtiene la mejor calidad de tales productos cerámicos.

3.6 ESTUDIO DE COCCIÓN DE LOS CERAMICOS.

La elaboración de productos cerámicos consta de muchas etapas, todas muy importantes, pues de ellas dependen la calidad del producto elaborado, pero la etapa más trascendental de todas, es sin duda alguna, “la cocción”, debido a que en esta etapa ocurren las mayores transformaciones químicas y físicas de las arcillas, responsables de las propiedades finales del cerámico.

Las variables evaluadas durante esta actividad fueron:

Temperaturas de cocción. Los niveles de esta variable (550°C, 900°C, 1050°C Y 1150°C) fueron escogidos con base en los análisis térmicos (ATD - ATG) de las arcillas, esperándose la formación de ciertas fases, con el fin de evaluar su efecto sobre las propiedades del cerámico.

Tiempo de permanencia. Los niveles seleccionados para esta variable fueron 1, 2 y 3 horas.

Velocidad de Calentamiento. Para esta tercera variable se escogieron 4 niveles: 2, 3, 5 y 10°C/min. Con miras a determinar hasta que punto la velocidad con la que se calientan las muestras afectan su propiedades finales.

Las variables respuestas para este estudio fueron módulo de rotura, porosidad aparente, absorción de agua y color. Los productos cerámicos también fueron analizados por DRX y microscopia electrónica de barrido (SEM), con el fin de identificar las transformaciones mineralógicas y microestructurales de los mismos. Los ensayos de flexión se realizaron en la maquina Universal de ensayos marca SHIMADZU propiedad de la Universidad Santo Tomas y con una capacidad de carga de 250kN.

La preparación de las muestras cerámicas para el análisis de SEM se hizo de acuerdo a la Sociedad Americana de Cerámicos (ACS) y la ASM Internacional, y consistió en:

- Corte de las muestras.
- Montaje de las muestras en resina epoxica (Epoxicure).
- Desbaste con papel abrasivo de carburo de silicio No: 80, 240, 320,400, 600.
- Pulido con pasta diamante de 6 y 3 μm .
- Ataque de las muestras con acido fluorhídrico (HF, 5% V/v), durante cuatro minutos.

- Limpieza ultrasónica en alcohol isopropílico y acetona, durante cada paso de desbaste y pulido y al final del proceso.

El estudio ceramográfico se realizó en un Microscopio electrónico de barrido (SEM), marca JEOL JSM, (acoplado con un micoanalizador de energía dispersa (EDX)) modelo 6490 LV, (figura 10) de la universidad de Antioquia.

Figura 10. Microscopio electrónico de barrido (SEM).



3.7. PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE TEJAS Y LADRILLOS EN LA VEREDA GUAYABAL.

Se realizó una propuesta teniendo en cuenta los resultados obtenidos en todas las actividades, incluido el diagnóstico. En ellas se plantearon ciertas pautas para la mejora del proceso de fabricación de tejas y ladrillos, al igual que el impulso del trabajo colectivo.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 RECOLECCIÓN DE ARCILLAS Y DIAGNOSTICO DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS EN LA VEREDA GUAYABAL.

Durante la visita a la vereda Guayabal se recolectaron muestras representativas de cada uno de los nueve tipos de arcillas existentes en la región: cascajo (C), arcilla negra (N), arcilla roja (R), sangre de toro (T), arena amarilla (A), arena negra (AN), arcilla plástica (P), tierra Ceruda (TC) y arcilla gris (G).

La vereda Guayabal del municipio de Barichara esta conformada por 105 núcleos familiares, distribuidos en 75 viviendas de las cuales 64 poseen chircales para la producción artesanal de teja y ladrillo en sus diferentes formas y tamaños. Salvo un par de excepciones, la producción de cerámicos en estos chircales involucra técnicas ancestrales, que han prevalecido gracias a la tradición familiar pasada de generación a generación y que ha llegado a constituirse como un patrimonio cultural de Barichara.

Por lo anterior es posible hacer una generalización de los procesos productivos en los chircales de la región, tal como se detalla a continuación.

4.1.1 Producción. En la figura 11 se presenta el diagrama de flujo del proceso de fabricación de ladrillos y tejas usado por los artesanos de la Vereda Guayabal (Barichara). Inicialmente se extraen las arcillas de canteras cercanas a los chircales, mediante el uso de herramientas, tales como picas y palas; para luego ser transportadas por animales de carga. La arcilla se descarga en el chircal donde es triturada manualmente, usando herramientas simples (pisones, porras, etc.).

Los artesanos de la región cuentan con nueve tipos de arcilla a las cuales les han dado los siguientes nombres:

- | | | |
|------------------|---------------------|-------------------|
| 1) Cascajo | 4) Arcilla Gris | 7) Arena Amarilla |
| 2) Arcilla Negra | 5) Arcilla plástica | 8) Arena Negra |
| 3) Arcilla Roja | 6) Sangre de toro | 9) Tierra Ceruda |

Figura 11. Diagrama del proceso de fabricación de tejas y ladrillos en Barichara (S/der)



Es importante mencionar que las arcillas Plástica, Ceruda y Gris se encuentran en escasos frentes de explotación, por lo cual son utilizadas a penas en un par de chircales.

Para fabricar los cerámicos los artesanos utilizan mezclas de las arcillas mencionadas anteriormente, dependiendo de su disposición, así como de las características plásticas y no plásticas que ellos han determinado empíricamente. En la figura 12 se presentan fotografías de algunos frentes de explotación de las arcillas de la vereda Guayabal. Las diferencias en la coloración de las mismas

son indicadores de su composición, lo cual conlleva a diferencias de plasticidad, entre otras propiedades.

Una vez trituradas las arcillas, estas son llevadas a pilas circulares, donde se agrega agua para preparar las pastas (figura 13). El agua del chircal (figura 14) proviene de pozos de aguas lluvias ubicados en las partes altas de la región y/o es bombeada de las quebradas en las zonas bajas. En las pilas se introducen bueyes para moler y mezclar, hasta generar una pasta plástica (según sus conocimientos empíricos). Posteriormente se procede a conformar la pieza (teja o ladrillo) manualmente (figura 15). Las piezas en verde se llevan a patios de secado (ver figura 20) donde permanece por dos semanas o más, según las condiciones ambientales; para luego cargarlas al horno de cocción.

Figura 12. Frente de explotación para algunas arcillas de la zona.

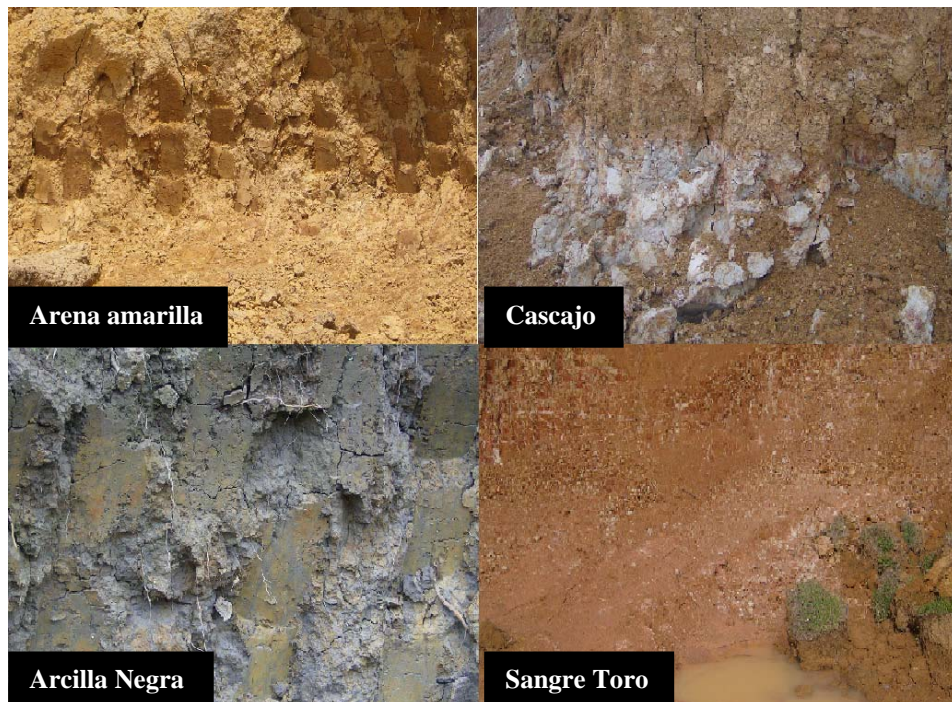


Figura 13. Pilas de disgregación de arcilla.



Los hornos típicos de Barichara (Figura 16) son: cerrados, intermitentes, esféricos, de tiro natural y consumen entre 12 y 16 metros cúbicos de leña (en cada horneada o cochada) dependiendo del tamaño del mismo. La leña (Figura 17) es agregada en la parte inferior del horno y se separa del material cerámico mediante una rejilla. A este horno se le llama “horno de llama vertical”. Su capacidad de producción es baja, inferior a las 110 ton/mes. Por horneada se cuecen de 2200 a 3500 piezas, y es considerado de alto impacto ambiental (CINSET, 2006).

Figura 14. Pozos ubicados en las canteras.



Figura 15. Moldeo manual de tejas.



La leña usada como combustible es proporcionada por vendedores casuales que llegan a negociar directamente con el artesano del chircal. Pero el consumo de este combustible natural ha desertizado enormemente la región.

Durante la etapa de cocción no se tiene ningún control de las variables del proceso, tales como temperatura o velocidad de calentamiento. Terminada dicha etapa, el horno se debe enfriar lentamente, buscando evitar cambios bruscos de temperatura que pueda ocasionar grietas o fracturas a las piezas cerámicas.

Figura 16. Horno típico de Barichara (S/der).

Figura 17. Leña para cocción.



Para controlar la calidad de las piezas cocidas, los artesanos utilizan métodos simples, tales como la coloración, el sonido emitido por la pieza al ser golpeada con otra y la resistencia al peso del artesano.

Los ladrillos desechados después de la cocción no son reutilizados, debido a que en los chircales no se cuenta con molinos de ningún tipo para triturarlos; además los bueyes no lo lograrían, sería incluso contraproducente puesto que se lastimarían. Por lo anterior los desechos son utilizados como material de relleno en las carreteras.

4.1.2 Recurso Humano. El recurso humano proviene principalmente de los núcleos familiares dueños del chircal, por lo tanto es común encontrar jóvenes y mujeres involucrados en la producción. En algunos chircales se contrata personal de manera temporal para moldear, cargar el horno y cocer las piezas cerámicas.

El cargue del horno es una etapa importante del proceso, pues las piezas deben ubicarse en una posición adecuada, por lo tanto una persona experimentada se delega para ello, de no ser así, se pueden presentar defectos y fallas en las tejas y ladrillos. Otra persona se encarga de encender el horno y cuidar de él, durante el calentamiento, agregando combustible según los requerimientos energéticos del horno. Durante las primeras 24 horas su meta es lograr que el horno alcance una temperatura elevada, luego mantenerlo a esta condición durante aproximadamente 15 horas, taparlo adecuadamente y así empezar el largo periodo de enfriamiento por alrededor de 8 días. Los encargados de esta última tarea generalmente son personas de mayor edad, ya que son esos años de duro trabajo en el chircal, los que le han permitido ganar la experiencia para reconocer, según el color del ladrillo dentro del horno, los “puntos” claves del proceso de cocción. Es por esto que la remuneración es mejor para el personal que cumple estas tareas.

A las personas que trabajan en el conformado de las piezas se les paga por el tradicional método del “destajo”, de acuerdo al número de ladrillos que se elaboren diariamente. No se descarta que se contrate personal para cualquier otra etapa del proceso, pero el salario en estos casos, se cancela de acuerdo al salario diario o del jornal según la costumbre campesina.

Tabla 2. Nómina según actividad realizada en el proceso de elaboración de tejas y ladrillos.

Actividad U Operación	N° De Operarios
Extracción	2
Mezcla, Moldeo y Corte	2
Cargue ,Descargue y cocción	4
Administración	1
Total de operarios	6

El numero total de operarios (tabla 2) es menor que la sumatoria de los operarios de cada una de las etapas, debido a que se supone que los mismos que realizan la extracción, realizan el cargue y el descargue del horno, así como uno de ellos realizaría la labor de administración.

4.1.3 Seguridad Industrial. Los trabajadores encargados de transportar la arcilla desde la cantera al pozo y de este al sector de conformado (Figura 18), pueden presentar lesiones en la espalda, debido a que deben levantar aproximadamente 60 kilos en cada viaje y no poseen ninguna protección relacionada con este tipo de riesgo; adicional a esto cuando transportan los ladrillos secos y cocidos, la humedad, la temperatura y la textura de estos les ocasiona raspaduras y lesiones menores en las manos.

Debido a la falta de dotación, para evitar la inhalación de los gases y polvos que se generan en la etapa de cocción, se ve afectada la salud de los trabajadores a mediano y largo plazo. La salud de sus familias también se afecta, a causa de que la vivienda campesina es una parte integrante del chircal, colocando a todo el núcleo familiar en el riesgo antes mencionado.

Con el tiempo, la exposición a la radiación del calor proveniente del horno durante la cocción de las tejas y ladrillos, puede ocasionar en el trabajador dolor de

cabeza, problemas visuales, irritaciones y quemaduras. Además, cabe mencionar que el excesivo contacto de la arcilla con la piel, puede generar hongos e infecciones.

Figura 18 Condiciones laborales de los artesanos.



4.1.4 Distribución de Planta. La propiedad de la tierra entre los artesanos oscila entre 3 y 12 hectáreas, las cuales son dedicadas casi en su totalidad a la actividad cerámica, y en menor medida a cultivos de consumo propio y para la venta¹.

La extracción de la arcilla es desordenada (Figura 19), es decir no poseen un solo frente de explotación, debido a que sus herramientas rudimentarias no les permiten remover grandes cantidades de material en la misma dirección, por lo cual la extracción se realiza a nivel superficial y en varios lugares a la vez.

¹ Los cultivos solo se realizan en épocas de lluvia, a causa de la escasez de agua en la zona.

Figura 19. Frente de explotación de la cantera.



La cantidad de patios y caneyes² para el secado de las piezas que no se pueden exponer directamente al sol (Figura 20), es insuficiente en relación a la cantidad producida de este tipo de piezas, generando que la producción se estanque según el tipo de secado requerido.

4.1.5 Comercialización. El sector ladrillero de Santander ha tenido un gran impulso debido al buen momento que vive el sector de la construcción a nivel nacional, del cual se espera un crecimiento de 5.3% para el 2009 (CAMACOL, 2008). También resultan importantes las exportaciones que se están realizando hacia Venezuela, por la demanda de los proyectos de vivienda social del gobierno Bolivariano, que enfatiza en la utilización de materiales derivados de la arcilla y no de otros materiales, que aunque más económicos puedan afectar la salud de las personas a largo plazo.

² Los caneyes son patios cubiertos con tejas de “zinc” o paja.

Figura 20. Secado natural de las piezas.



A pesar de que las grandes y medianas industrias ladrilleras han respondido a la demanda venezolana, esta es tan grande que ha dado cabida para que comerciantes de ese país realicen “pequeños” contratos con el sector chircalero, incluido ASOQUAYABAL (Asociación de artesanos de la vereda Guayabal), repercutiendo favorablemente al descongestionar el mercado local, el cual está constituido por compradores individuales de la región que conocen el producto y su disponibilidad permanente.

Otro factor que ha incidido positivamente, aunque en menor escala, es el desarrollo de la construcción y remodelación de casas en el casco urbano de Barichara y de fincas recreacionales que conservan todos los rasgos tradicionales como el bareque, la tapia pisada y la teja de barro, para cumplir con el estilo y los cánones que exige un monumento nacional (Vanguardia Liberal, 2007).

La falta de control en los registros de ventas de los chircales, impide realizar un análisis estadístico de la incidencia que tiene el comportamiento de cada uno de los mercados con los que comercializan (local, regional, nacional, internacional), sobre la demanda y posibles ventas que se realicen en un período de tiempo determinado.

De este diagnóstico queda de manifiesto la necesidad de apoyo técnico-científico de los artesanos de la vereda Guayabal, de tal manera que se les ayude a mejorar sus procesos de elaboración y por ende la calidad de sus productos; a hacer un mejor uso de los recursos naturales no renovables, lo cual causará un mayor ingreso económico para sus familias, y a su vez disminuirá el impacto ambiental ocasionado por el desarrollo de su actividad laboral.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS.

Los artesanos de la Vereda Guayabal pueden distinguir características importantes de las arcillas a simple vista y al tacto, tales como mayor o menor presencia de desgrasantes y finos, al igual que el contenido de impurezas debido al color (ver figura 12). Pero estas y otras características de las arcillas deben ser determinadas con las técnicas y procedimientos adecuados. Dichos resultados se presentan a continuación.

4.2.1 Análisis Mineralógico Mediante Difracción de Rayos X. En la figura 21 se pueden observar los difractogramas respectivos al conjunto de arcillas.

Todas las arcillas presentaron en común las especies mineralógicas: Cuarzo, Caolinita e Illita (tabla 3), siendo estos dos últimos los minerales arcillosos que confieren propiedades plásticas a las pastas.

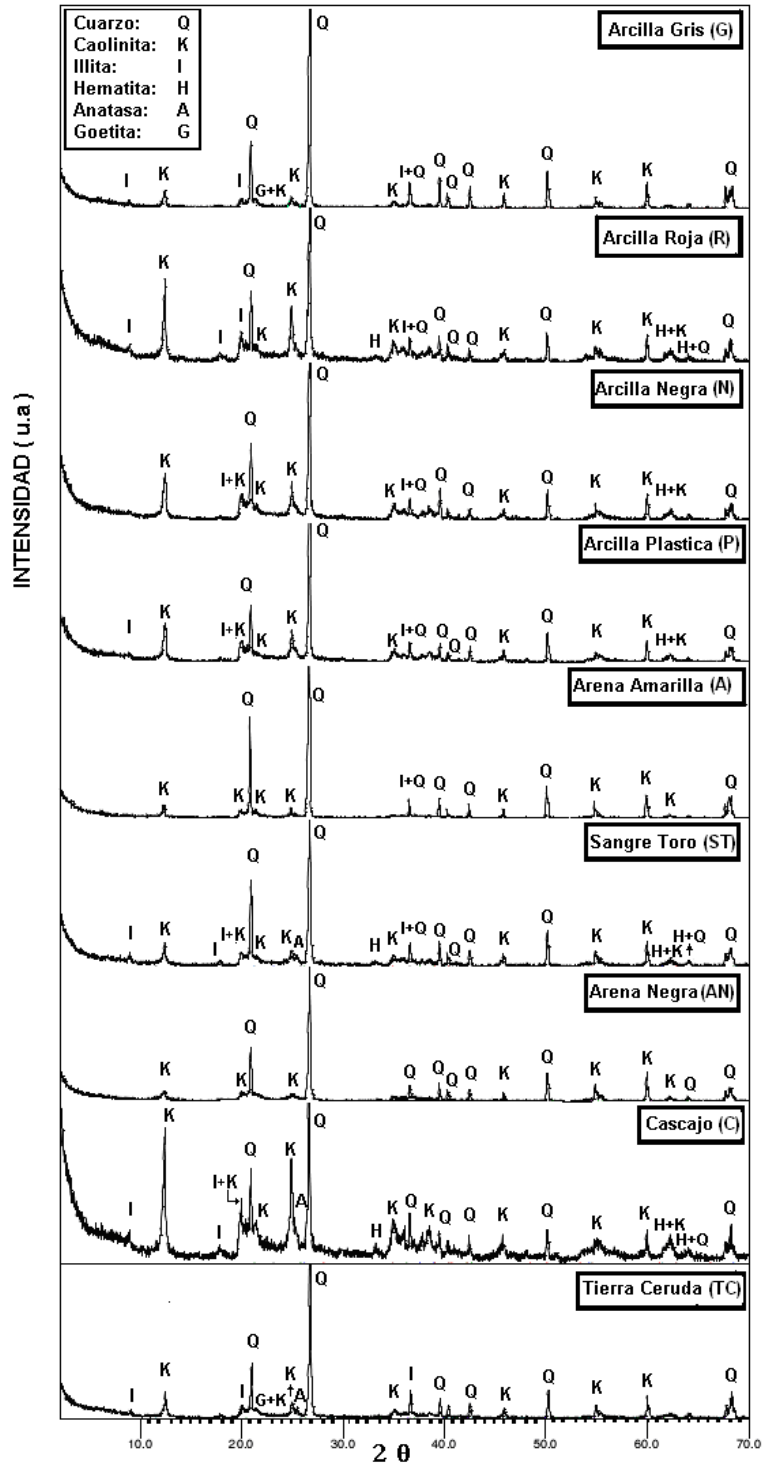
Al comparar la intensidad de los picos de las diferentes especies (figura 21), se puede deducir que la arcilla C posee más caolinita que las demás, y la arcilla A esta compuesta básicamente de cuarzo. Las arcillas C, R y T presentan Anatasa y Hematita, minerales que confieren color rojo en la cocción a las pastas cerámicas.

Tabla 3. Especies cristalinas presentes en las arcillas, según figura 21.

Mineral	G	R	N	P	A	T	AN	C	TC
Cuarzo	x	x	X	X	x	x	x	x	X
Caolinita	x	x	X	X	x	x	x	x	X
Illita	x	x	X	X	x	x		x	X
Hematita		x				x		x	
Montmorillonita		x			x				
Anatasa		x		X		x		x	X
Goetita	x								X

Como se reportó en el diagnóstico, la tierra Ceruda (TC), la arcilla plástica (P) y la arcilla gris (G) solo se encuentran en un par de fincas y por ello es poco usada por los artesanos. La arena amarilla es granulométricamente similar a la arena negra, presentándose tan solo diferencia de color, además su mineralogía es semejante (ver figura 21). Por estos motivos las arcillas TC, P, G y AN no se siguieron caracterizando. Es decir que las arcillas preseleccionadas después de los análisis de DRX fueron: R, N, A, T y C.

Figura 21. Difractogramas de las nueve arcillas de la vereda Guayabal.



4.2.2 Análisis Químico por Fluorescencia de Rayos X. Los análisis químicos elementales de las cinco arcillas preseleccionadas se presentan en la tabla 4 en forma de óxidos. Una arcilla apta para la fabricación de cerámicos de construcción debe tener un contenido de SiO_2 entre 50 y 60%, y de Al_2O_3 entre 20 y 30 % (Elías, 2001). Teniendo en cuenta este criterio las arcillas A y C no son las más apropiadas para la fabricación de cerámicos. La arcilla A porque excede el nivel de sílice y no alcanza el nivel de alúmina requerido, y la arcilla C por no alcanzar los niveles de sílice especificados.

Tabla 4. Resultados FRX de las arcillas.

Analito	Sílice	Alúmina	Fe_2O_3	K_2O	SO_3	TiO_2	MgO	CaO
C [%]	46,017	29,576	7,472	2,027	1,337	1,158	0,0302	0,053
R [%]	52,912	26,706	6,993	1,428	1,129	0,945	0,543	0,543
T [%]	58,094	23,3	8,006	1,367	1,513	1,174	0,197	0,037
A [%]	65,629	19,444	4,59	0,567	1,169	0,732	0,056	0,022
N [%]	54,269	29,69	3,926	1,448	1,034	1,236	0,142	0,022
Analito	ZrO_2	SrO	MnO	ZnO	CO_2	H_2O	Na_2O	P_2O_5
C [%]	0,019	0,015	0,01	0,006	9,4	2,5	0,099	0
R [%]	0,03	0,014	0,004	0,014	6,47	2,5	0,099	0,021
T [%]	0,076	0,017	0	0,006	4,66	1,43	0,099	0,11
A [%]	0,053	0,008	0	0,01	6,2	1,43	0,099	0,74
N [%]	0,031	0,013	0	0,004	6,11	2,03	0	0,037

A priori, Las arcillas R, T y N serían las más adecuadas para su uso en la industria ladrillera, teniendo en cuenta su composición. No obstante lo anterior, no se pueden descartar las arcillas C y A, dado que su composición no se aleja mucho del rango óptimo, además dichas arcillas pueden mezclarse con otras de tal manera que dicha mezcla arcillosa tenga la composición requerida.

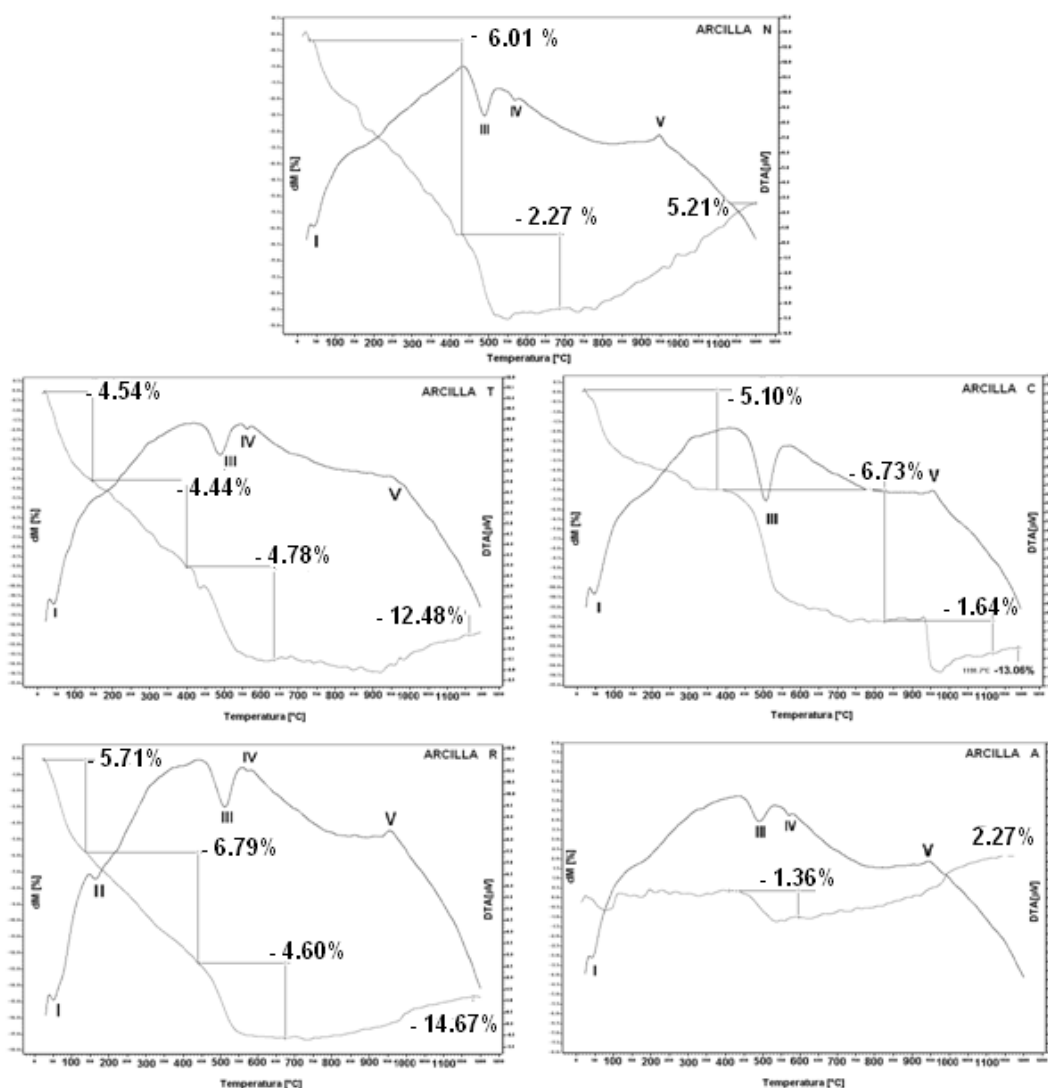
Por su mayor contenido de Al_2O_3 , cercano al 30% (ver tabla 4), las arcillas N y C, podrían llegar a ser usadas para la elaboración de ladrillos refractarios, esto

siempre y cuando dichas arcillas respondan positivamente a procesos de beneficio que permitan eliminar en gran medida las impurezas (como Fe y Ti), dado que los óxidos de estos metales bajan el punto de fusión de los refractarios (Mahmoudi, 2008). En tales procesos de beneficio, también se tendría que eliminar parte de la sílice presente, de tal manera que el cerámico producido tenga un alto contenido de mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), teniendo en cuenta que este es el mineral que le concede las mejores propiedades refractarias y de resistencia mecánica a los refractarios silico aluminosos (Morales J, 2005). La presencia de minerales de azufre como sulfuros y sulfatos es mínima, esto indica que en la cocción de estas arcillas y/o mezclas de ellas no se presentarán eflorescencias (Elías X, 2001).

4.2.3 Análisis Térmicos. Los resultados de los análisis ATG y ATD se presentan en la figura 22, en ellos se evidencian picos similares en las cinco arcillas A, N, C, R y T. En los ATD se observa un primer pico endotérmico (I), común a todas las arcillas, entre los 40 y 50°C, y un segundo pico endotérmico (II) en la arcilla R a la temperatura de 160°C. Ambos picos son producto de la pérdida de agua higroscópica, no constitucional o libre (Vieira et al, 2008). Esta pérdida de agua se refleja también en las curvas termogravimétricas, por la marcada pérdida de peso a estas bajas temperaturas.

La aparición del pico II en el termograma de la arcilla R está relacionada con la presencia de Montmorillonita. Considerándose que en el rango de temperatura entre los 150 y 260°C ocurre la evolución del agua ubicada entre las capas del mineral, así como la del agua de hidratación de los iones adsorbidos (Barba y Col, 1997). La arena amarilla aunque también posee Montmorillonita, es probable que se encuentre en muy bajas cantidades, hecho que se evidencia con la poca o nula pérdida de agua que presenta hasta los 450°C.

Figura 22. Curvas ATD y ATG de las arcillas preseleccionadas.



Entre las temperaturas de 450 y 550°C se observa en los ATD un tercer pico endotérmico (III) y en los ATG pérdida de peso. Esto se debe a que los iones OH⁻ son liberados de la red cristalina en forma de vapor de agua, generando, en el caso de la caolinita, el rompimiento de la estructura cristalina, para dar paso a una fase amorfa llamada metacaolín (Barba y col,1997).

El cuarto pico endotérmico (IV) se observa a los 570 °C en las arcillas A, T, N y R, y se debe a la transformación del cuarzo α a cuarzo β que teóricamente se ubica a los 573°C. En la arcilla C no se alcanza a desarrollar este pico, por su menor contenido de cuarzo.

La Mullita, una de las fases mas importante en los materiales cerámicos, debido a las propiedades que le infiere al material, normalmente se empieza a formar a 980°C (Morales J, 2005) por medio de una reacción exotérmica, si se observa el ATD, la formación de dicha fase estaría representada en el pico (V), entre las temperaturas de 950 y 970°C.

Por tanto, se concluye de esta etapa de caracterización que las arcillas presentan un comportamiento típico durante su calentamiento. Siendo las principales transformaciones las siguientes: pérdida de agua higroscópica, formación de metacaolín, transformación del cuarzo α a cuarzo β y formación de mullita.

4.2.4 Plasticidad. Los límites de Atterberg: Límite Líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de las arcillas, se presentan en la tabla 5 y en el Anexo B. Con estos parámetros se puede conocer si la plasticidad de cada arcilla es baja, media o alta, ubicándolos sobre el diagrama de Casagrande (Duitama L., 2004), como se observa en la figura 23.

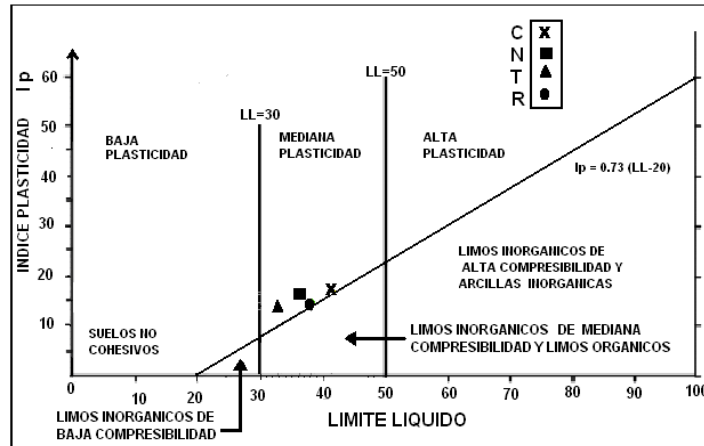
Tabla 5. Límites de Atterberg para las diferentes arcillas.

Arcillas	N	R	T	C	A
LP	20,3	23,5	20,6	25,0	17,1
LL	35	38,2	33,9	41,3	-----
Ip	14,7	14,7	13,3	16,3	-----

El límite líquido de la arcilla A no aparece registrado en la tabla 4 ni en el diagrama de Casagrande, porque al contener gran cantidad de sílice, esta no absorbe el agua suficiente para que la acilla adquiriera la plasticidad necesaria para realizar el ensayo, lo

que la convierte en una materia prima desgrasante (no plástica). Las demás arcillas se ubicaron en el rango de arcillas inorgánicas de mediana plasticidad, sin embargo la arcilla C es ligeramente más plástica que las otras, lo cual puede estar relacionado con un mayor contenido de fracción arcillosa o menor contenido de SiO_2 .

Figura 23. Diagrama de Casagrande.

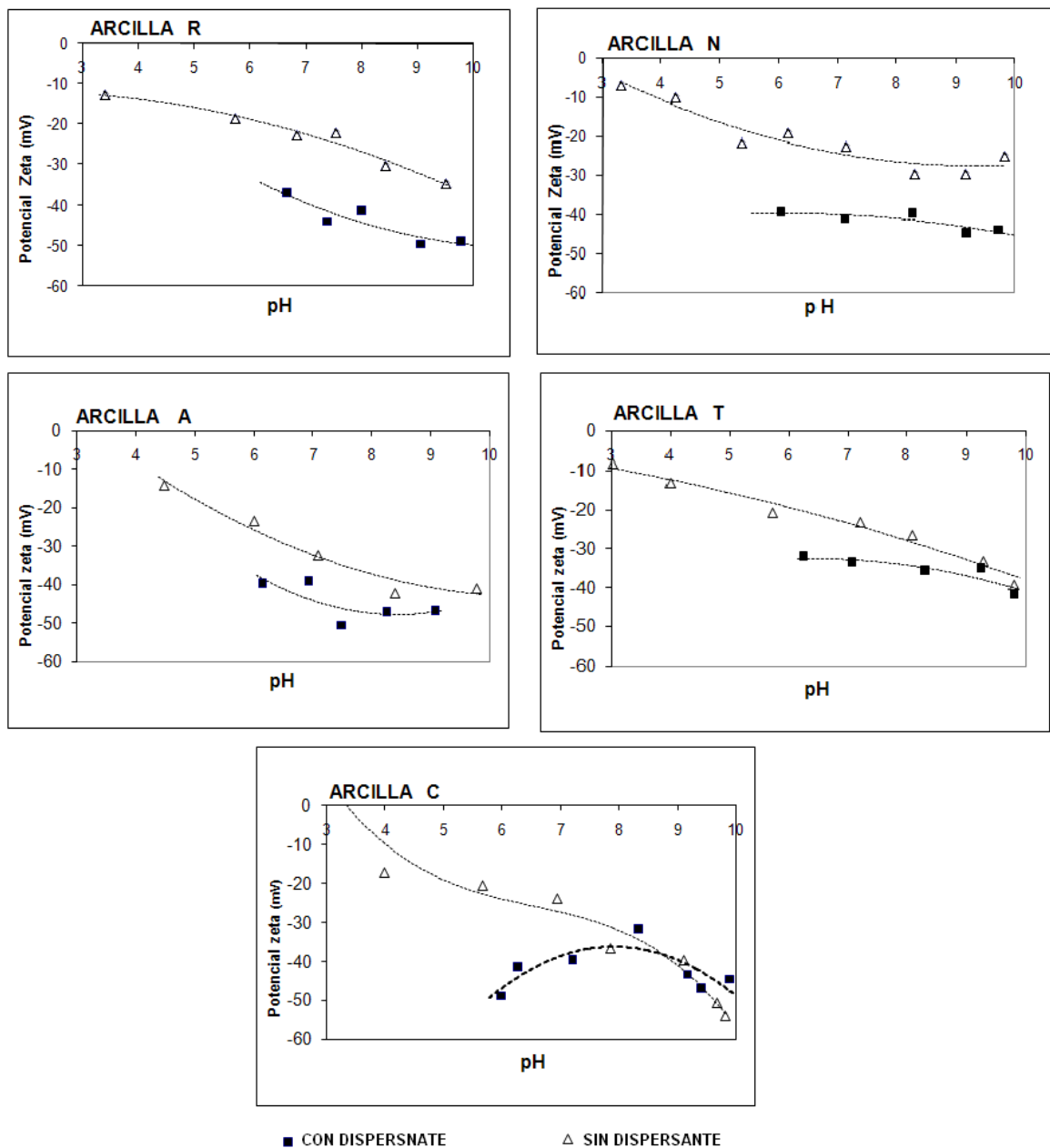


4.2.5 Estabilidad de las pulpas arcillosas. Las curvas de potencial zeta Vs pH se presentan en la figura 24, en ausencia y presencia de dispersante (pirofosfato de sodio al 0.5% p/p). Sin adición de dispersante, se observa para todos los casos, el potencial zeta aumenta con el aumento del pH, lo cual implica una mayor estabilidad de las pulpas. No obstante, la estabilidad de tres de las arcillas (R, T y N) solo alcanza a considerarse como moderada (ver tabla 2), con valores de potencial zeta menores a 41mV. Por tanto es evidente la necesidad de usar un dispersante. La adición de pirofosfato de sodio aumenta el potencial zeta, alcanzándose una buena estabilidad, con valores de potencial zeta entre 41 a 50 mV en todos los casos. De estos resultados se infiere que los pH adecuados para estabilizar las pulpas, en presencia de pirofosfato de sodio, son los presentados en la tabla 6.

Tabla 6. Condiciones de pH usadas para dispersión.

Arcillas	N	R	T	C	A
pH	9,37	9,78	9,10	9,50	8,47

Figura 24. Potencial Zeta de las arcillas.



4.2.6 Análisis Granulométrico. En la figura 25 se presentan las curvas de distribución de tamaño de partículas de las cinco arcillas de estudio, obtenidas por tamizaje y fotosedimentación de pulpas estabilizadas bajo las condiciones establecidas anteriormente.

De estas curvas, y teniendo en cuenta que la fracción arenosa de un suelo se considera como aquel material que posea un tamaño de partícula mayor o igual a 20 micrómetros (Viera et al, 2008), se puede deducir que las fracciones arenosas de las arcillas son: 20% para R, 24% para N, 46 % para T, 12% para C. De la curva correspondiente a la arcilla A, solo se puede mencionar que tiene un tamaño medio de partícula de 60 micras aproximadamente; dado que por su tamaño grueso de partícula no fue posible obtener el análisis microgranulométrico.

Estos resultados están en perfecta concordancia con los resultados del estudio de plasticidad de las arcillas (ver tabla 5 y figura 23), de donde se concluyó que la arcilla más plástica era la C, mientras que la arcilla A puede considerarse como no plástica o desgrasante. Es decir, un mayor contenido de partículas finas implica mayor contenido de material arcilloso y por ende mayor plasticidad de las mismas.

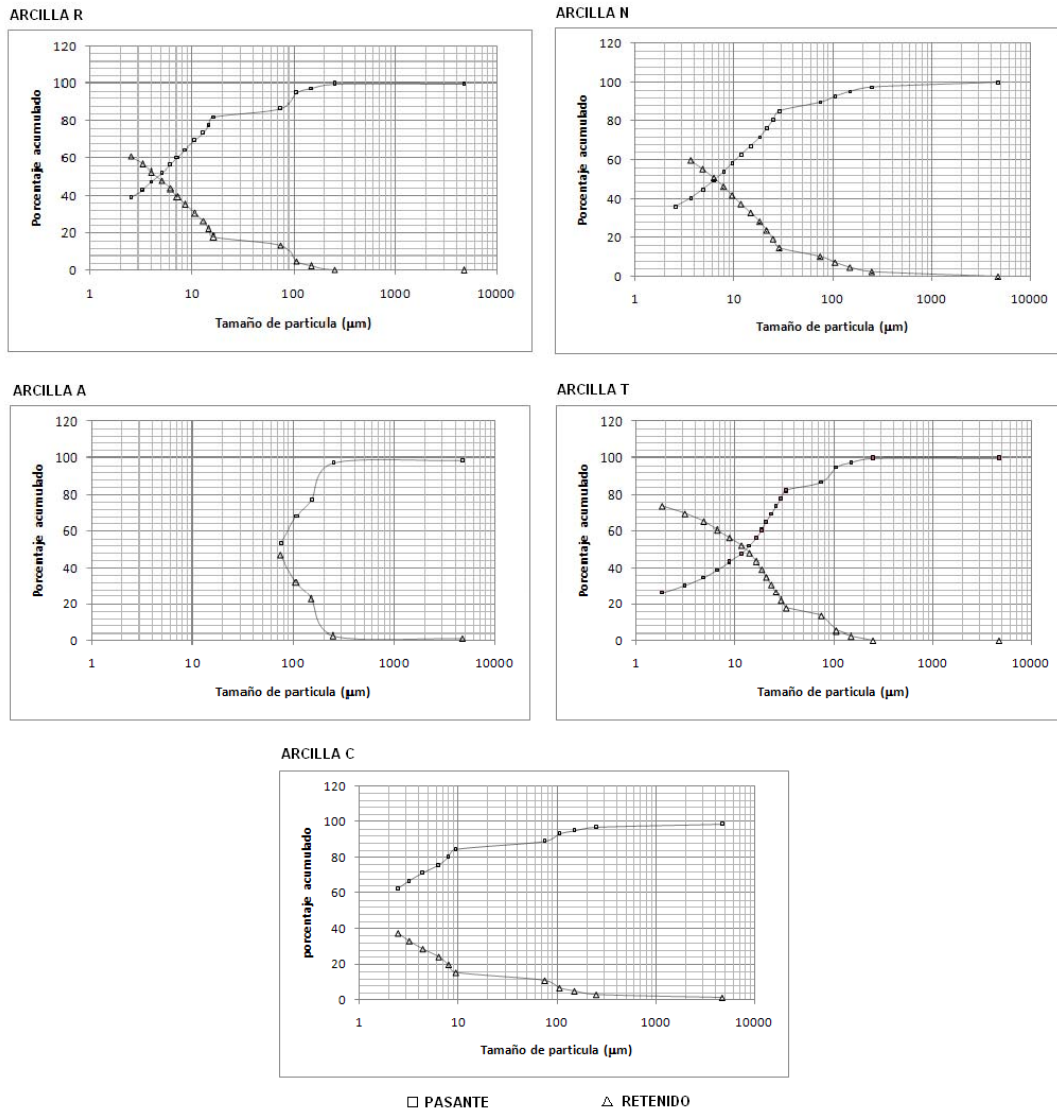
4.3 SELECCIÓN DE ARCILLAS PARA LA ELABORACIÓN DE PASTAS CERAMICAS.

De acuerdo con la composición química, las arcillas más adecuadas para la fabricación de cerámicos de construcción son las R, T y N puras. También es posible obtener buenos cerámicos con una mezcla de las arcillas C y A, dado que la primera está enriquecida en Al_2O_3 y la segunda en SiO_2 .

Ahora bien, por su distribución granulométrica y plasticidad todas las arcillas, exceptuando la A, son suficientemente plásticas; de tal manera que, en principio,

los cerámicos podrían ser conformados sin mayor problema con cualquiera de dichas arcillas.

Figura 25. Distribución de tamaño de partícula de las arcillas.



Por tanto se decidió llevar a cabo el estudio de preparación de pasta cerámicas con las arcillas N, T y R puras y la mezcla C-A en varias proporciones.

4.4 PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS PASTAS CERÁMICAS

Se prepararon pastas de 100%R (R), 100%T (T), 100%N (N) y varias mezclas entre C y A. Teniendo en cuenta que en la vereda Guayabal los artesanos utilizan proporciones de 50%C-50%A (50C), se decidió hacer un barrido cercano a esta proporción tomando valores inferiores, tal como 40%C-60%A (40C) y superiores, tal como 55%C-45%A (55C) y 60%C-40%A (60C) para elaborar pastas cerámicas. También se decidió evaluar la arcilla pura C en la preparación de pastas, para poder analizar el efecto de A en la mezcla. Con la arcilla A pura no se pudo llevar a cabo este estudio dado que al no ser plásticas, no fue posible conformarla.

4.4.1 Obtención de pastas con las arcillas puras N, R, T y C. Las pastas elaboradas a partir de una sola arcilla, presentan comportamientos distintos. La arcilla R tiene buena trabajabilidad y las piezas presentan buena calidad de la superficie después del moldeado y la cocción, además de no presentar ningún tipo de grietas y fisuras. Los cerámicos obtenidos con esta pasta son de color rojo oscuro peculiar y característico de ella, de tal manera que se diferencia de las demás a simple vista. El valor de absorción de agua fue 8.2% (tabla 7), el cual cumple con los requerimientos para la elaboración de tejas, que según la norma NTC 2086 debe ser menor de 10%.

La arcilla N se pudo moldear bien y las pastas resistieron todo el proceso de elaboración de las probetas, las cuales no presentaron fisuras, ni grietas. Sin embargo el color de los cerámicos es muy claro y poco atractivo (figura 26), color característico de las arcillas ricas en caolinita. La absorción de agua de 14.2% (tabla 7) cumple los requerimientos para la elaboración de ladrillos, que de acuerdo a la norma NTC 4205 debe ser menor de 15%.

Los cerámicos obtenidos con la arcilla T son de mala calidad con muchas grietas y grandes poros, hecho que posiblemente se debe a un mal empaquetamiento de

las partículas al presentar una alta fracción de fase gruesa, tal como lo mostro el análisis granulométrico según el cual esta arcilla presentó 46% de fase arenosa, cifra alta comparada con la de las demás arcillas. Por tal motivo no se le realizaron pruebas de absorción de agua, pues la norma ASTM C 20-00, exige que las probetas no presente grietas para dicho ensayo.

Figura 26. Cerámicos obtenidos con arcillas puras (condiciones de cocción: $V= 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $T= 1050^{\circ}\text{C}$, $t= 2\text{h}$)

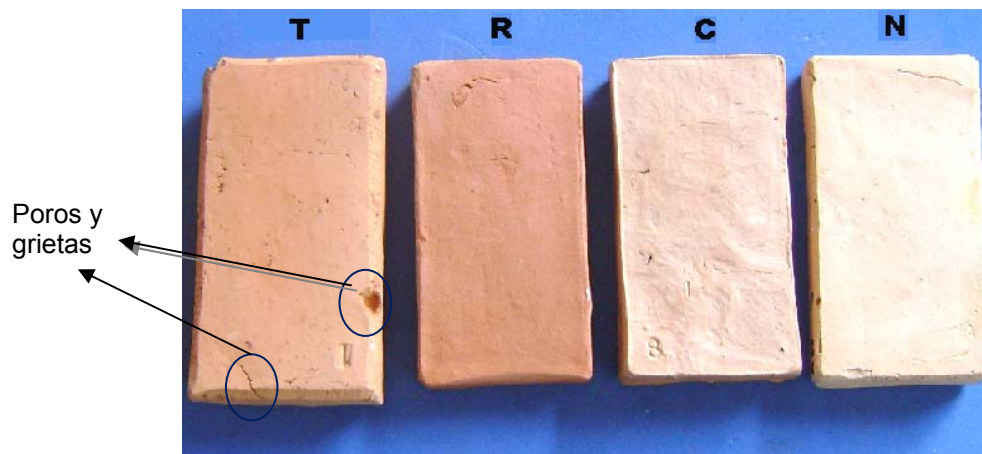


Tabla 7. Caracterización física de los cerámicos obtenidos con arcillas puras ($V= 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ $t= 2\text{ h}$ $T= 1050^{\circ}\text{C}$).

Pasta	Gravedad específica	Densidad aparente [g/cm ³]	Porosidad [%]	Absorción de agua [%]
R	2,5	2,08	17,1	8,2
N	2,6	1,92	27,3	14,2
C	2,7	2,07	22,5	10,9

Finalmente, el comportamiento de la arcilla C fue muy parecido al de N, debido a que se logro moldear bien, los cerámicos obtenidos fueron de buena calidad (sin grietas), de coloración clara y la absorción de agua (10,9%) cumple con los requisitos para la elaboración de ladrillos, pero no para la fabricación de tejas. Teniendo en cuenta los anteriores resultados, se descarta el uso de las arcillas puras T, N y C. Aunque la arcilla T presenta el color característico de los ladrillos,

se descartó por su mala apariencia (fisuras y grietas) después de la cocción. Las arcillas N y C también se descartan, por el pálido color de cocción, el cual por otro lado evidencia bajo contenido en hierro y alto contenido en caolinita. Estas dos arcillas tendrían mayor aplicabilidad en la fabricación de refractarios. Por tanto la arcilla R fue la única que cumplió con las características necesarias para la fabricación de cerámicos de construcción, específicamente de tejas.

4.4.2 Obtención de pastas con las mezclas de arcillas C y A. En primer lugar se determinó la plasticidad de cada una de las mezclas propuestas, los resultados se presentan en la tabla 8, donde se comparan con los resultados de plasticidad de la arcilla C.

Tabla 8. Plasticidad de las mezclas de arcillas C-A.

Mezclas	Limite liq	Limite Plast	Indice Plast.
100%cascajo (C)	41,3	25,0	16,3
60%cascajo (60C)	36,9	23,6	13,3
55%cascajo (55C)	32,1	22,7	9,4
50%cascajo (50C)	32,7	23,5	9,2
40%cascajo (40C)	31,4	21,5	9,1

Como era de esperarse, la plasticidad de la pasta disminuyó notablemente al mezclarlo con la arcilla A, la cual tiene un carácter netamente desgrasante. Igual que con las arcillas puras, las pastas con las mezclas de arcilla se prepararon adicionando agua un porcentaje de cinco puntos por encima del límite plástico.

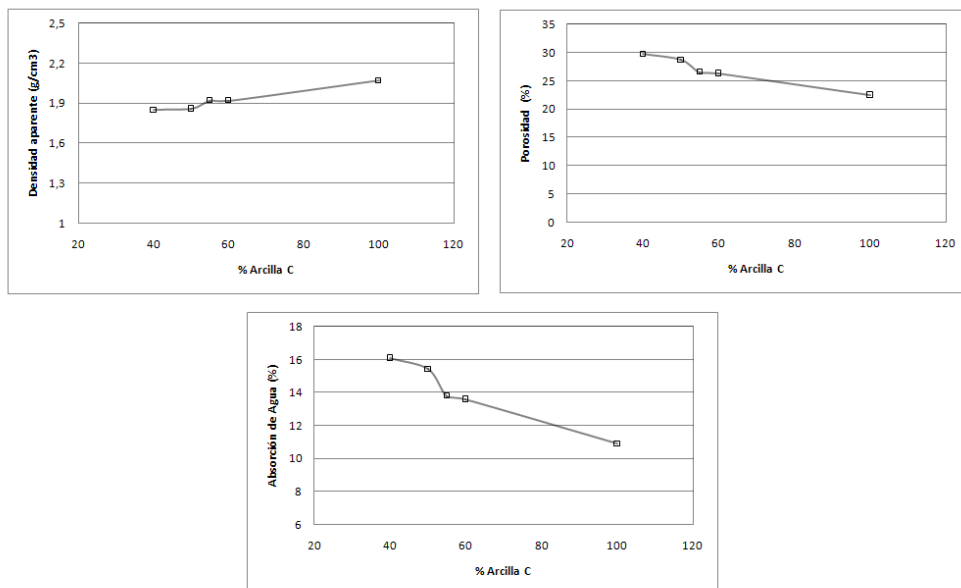
También se observa que la porosidad aparente y la absorción de agua disminuyen al aumentar la cantidad de arcilla C, obteniéndose valores de absorción de agua superiores al 15% cuando el contenido de arcilla C es menor o igual al 50%. Es decir, que tan solo las mezclas 55C y 60C cumplen con el requisito de absorción de agua para la fabricación de ladrillos.

Los resultados de caracterización física de los cerámicos, (tabla 9 y figura 27) evidencian una mayor densificación de los cerámicos al aumentar el contenido de arcilla C en la pasta, lo cual es debido a la gran presencia de partículas gruesas en la arcilla A, que dificulta la adecuada compactación de las partículas durante el conformado.

Tabla 9. Caracterización física de los cerámicos obtenidos con las mezclas de arcilla C- A (V= 2°C/min t= 2H T= 1050°C)

Pasta	Gravedad Especifica	Densidad aparente [g/cm ³]	Porosidad [%]	Absorción de agua [%]
40C	2,6	1,85	29,7	16,1
50C	2,6	1,86	28,7	15,4
55C	2,62	1,92	26,53	13,79
60C	2,6	1,92	26,3	13,6
100C	2,7	2,07	22,5	10,9

Figura 27. Resultados de la caracterización física de los cerámicos sinterizados con diferentes Temperaturas (V= 2 °C/min, t= 2H).



4.5 SELECCIÓN DE LAS PASTAS CERAMICAS MÁS ADECUADAS PARA LA FABRICACIÓN DE TEJAS Y LADRILLOS.

Teniendo como criterio, la textura, la absorción de agua y el color de los cerámicos, se eligió la pasta elaborada con arcilla R como la más adecuada para fabricar tejas. Por su parte, para la fabricación de ladrillos se seleccionó la pasta desarrollada con la mezcla 55% de arcilla C y 45% de A (55% A). Los cerámicos de arcilla R poseen buena textura y color, además su absorción de agua cumplió con los estándares exigidos para la fabricación de tejas. Los cerámicos obtenidos a partir de las pastas 55C y 60C poseen el color característico de un ladrillo Temosa, y presentan una absorción de agua inferior al 15% que es lo estipulado para los ladrillos de buena calidad.

Teniendo en cuenta que la arcilla C es la más valiosa de la región (vereda Guayabal), caso contrario ocurre con la arcilla A, se decidió escoger la mezcla 55C como la adecuada para la fabricación de ladrillos, porque ahorra el 5% de la arcilla C, comparada con la pasta 60C.

4.6 ESTUDIO DE COCCIÓN DE LOS CERÁMICOS.

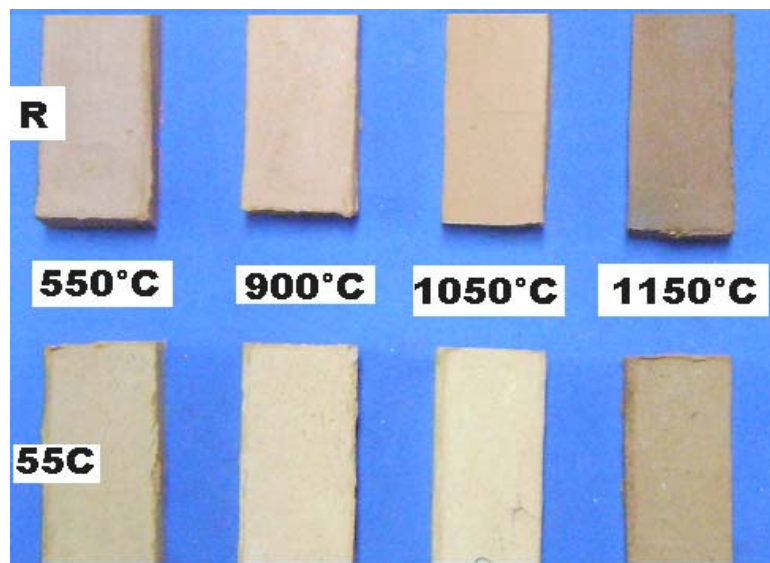
Las variables analizadas en esta etapa se evaluaron en el siguiente orden: Temperatura de cocción, tiempo de permanencia y velocidad de calentamiento.

Las variables repuestas de este estudio fueron parámetros de caracterización física, química y mecánica tales como: gravedad específica, densidad, porosidad aparente, absorción de agua, modulo de ruptura (resistencia a la flexión), composición mineralógica por DRX y morfología de fases formadas mediante observación SEM.

Esta parte de la investigación se llevo a cabo usando las dos pastas cerámicas seleccionadas en el apartado anterior, es decir, la arcilla R pura y la mezcla de 55% de arcilla C y 45% de A (55C). A continuación se presentan y discuten dichos resultados.

4.6.1 Temperatura de cocción. En la figura 28 se puede apreciar la variación en la coloración de los cerámicos elaborados a diferentes temperaturas de cocción, para las dos pastas seleccionadas (R y 55C). Al aumentar la temperatura de cocción es fácil apreciar el cambio de color de una tonalidad clara a una oscura en ambas pastas. Uno de los promotores de este cambio es la transformación que se produce, entre 200 y 400°C de los minerales de hierro, los cuales reaccionan formando Hematita, mineral de color gris metálico o rojizo que confiere dicho color a las pastas cerámicas. A temperaturas superiores a 1100°C, la Hematita se disocia dando lugar a formas reducidas como FeO y Fe₃O₄, minerales de color negro, los cuales son responsables de oscurecer aun más el material cerámico. Se debe indicar que minerales tales como la Illita pueden contener en su estructura hierro, que logra ser liberado durante el calentamiento. Por este motivo el color de las arcillas puede volverse más intenso (Barba y Col, 1997).

Figura 28. Cerámicos obtenidos a diferentes temperaturas de sinterización (V=2 °C/min, t =2h).



Los resultados de la caracterización físico - mecánica de los cerámicos se puede apreciar en la tabla 10 y en las figuras 29 y 30. Las probetas cocidas a 550°C no

fueron sometidas al ensayo de flexión pues a esta temperatura no se esperaban grandes resistencias mecánicas, debido a la presencia de metacaolín.

Tabla 10. Resultados de caracterización físico-mecánica de los cerámicos sinterizados a diferentes temperaturas ($V= 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $t= 2$ horas).

ARCILLA	Temperatura Sinterización ($^{\circ}\text{C}$)	Gravedad Específica	Densidad Aparente (g/cm^3)	Porosidad (%)	Absorción de agua (%)	Modulo de ruptura (MPa)
R	550	2,59	1,69	34,69	20,52	---
	950	2,57	1,71	33,45	19,55	5,01
	1050	2,5	2,08	17,11	8,24	9,27
	1150	2,35	2,1	10,65	5,07	7,86
55 C	550	2,64	1,66	37,23	22,46	---
	950	2,66	1,62	39,1	24,14	1,89
	1050	2,62	1,91	27,07	14,19	6,89
	1150	2,52	2,04	19,01	9,33	4,54

Figura 29. Efecto de la temperatura sobre las propiedades físico- mecánicas de los cerámicos obtenidos con la pasta R.

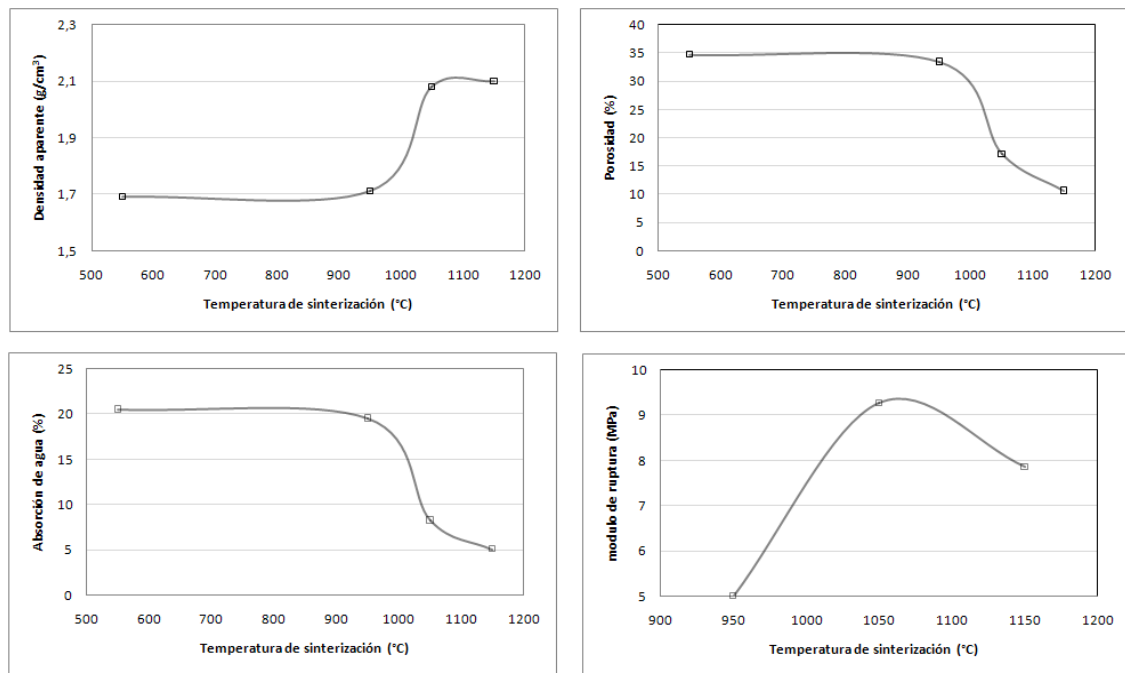
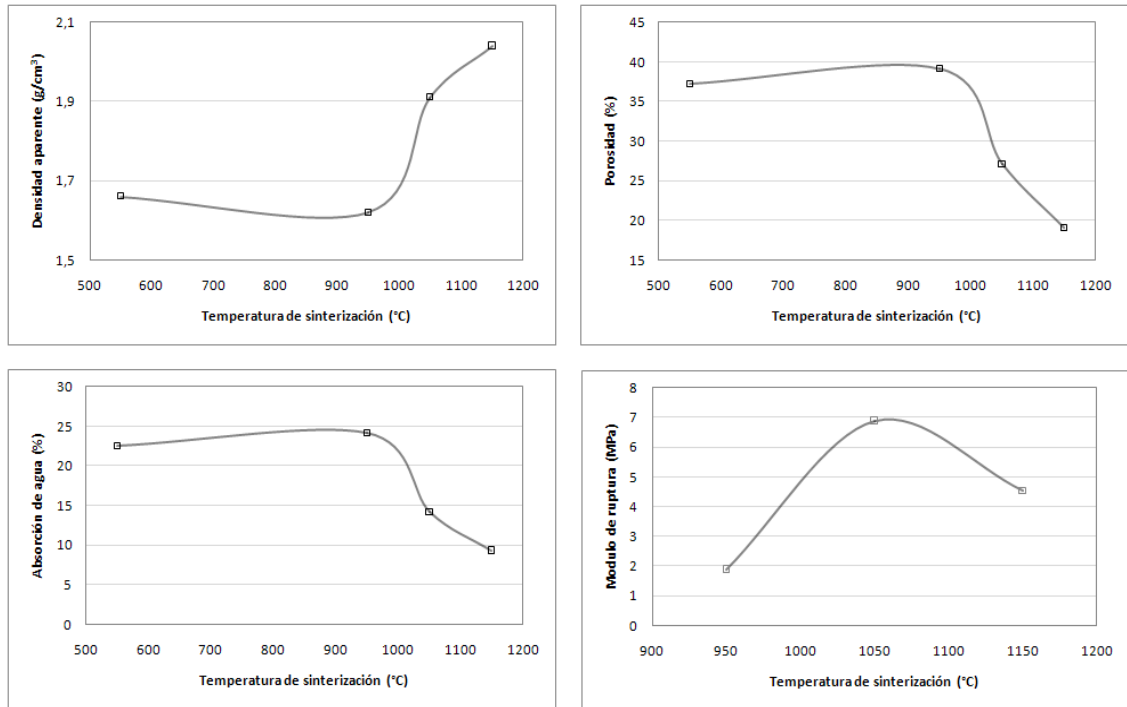


Figura 30. Efecto de la temperatura sobre las propiedades físico- mecánicas de los cerámicos obtenidos con la pasta 55C.



En general se observa un comportamiento similar de las dos pastas, R y 55C, en las propiedades físico-mecánicas al aumentar la temperatura de cocción:

- El efecto de la temperatura sobre la sinterización de los cerámicos se refleja en la disminución de la porosidad, la absorción de agua, así como en el aumento de la densidad hasta los 1050°C. resultados similares han reportado Vieira y Sánchez (2007) en estudios realizados en arcillas brasileras del estado de Rio de Janeiro. La sinterización por encima de 1050°C viene acompañada de la formación de mayor cantidad de fase vítrea, la cual fragiliza el material cerámico-
- La resistencia mecánica aumenta con la temperatura de sinterización, por la formación de nuevas fases, tales como la mullita y por efecto

también de la densificación hasta los 1050°C. A temperaturas mayores la formación de fase vítrea tiene el efecto adverso de fragilizar el cerámico, por ende se obtiene un punto máximo a los 1050°C.

Los difractogramas de los cerámicos obtenidos en este estudio con la pasta 55C y R se presentan en las figuras 31 y 32, respectivamente. Ellos permiten evaluar las transformaciones mineralógicas en los cerámicos al aumentar la temperatura de cocción.

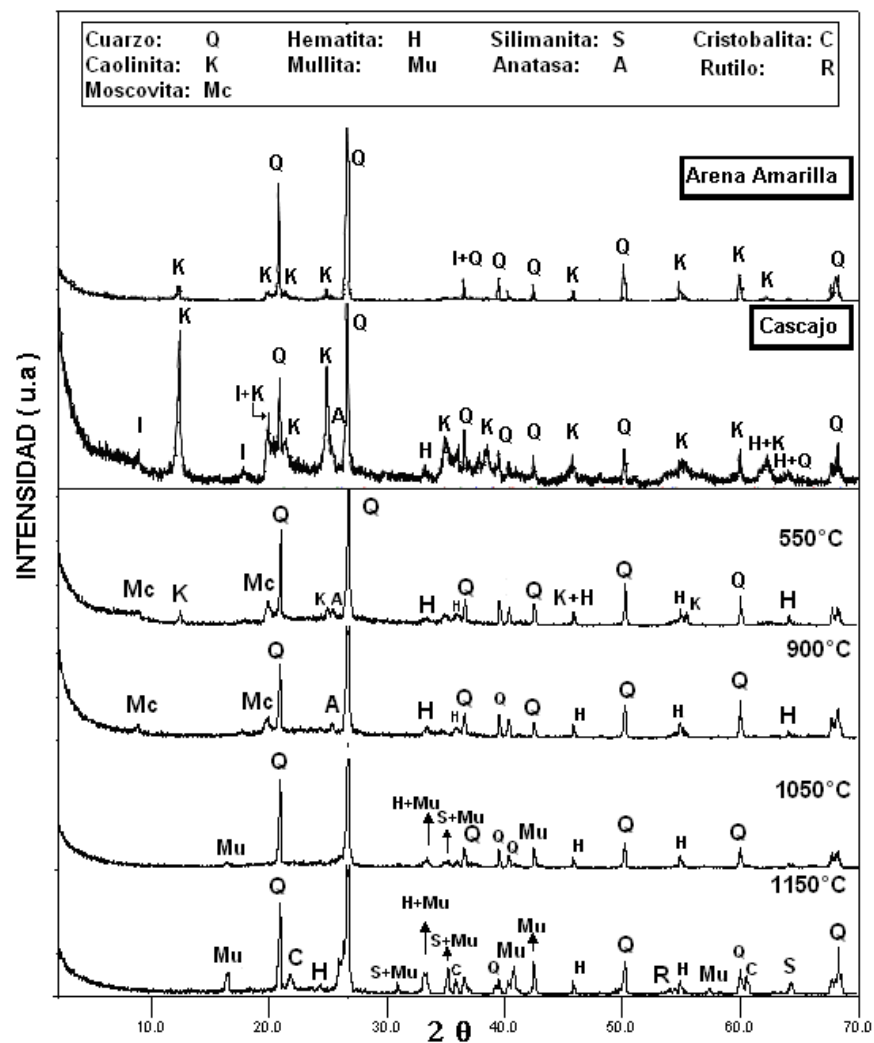
Inicialmente la pasta 55C (figura 31) estaba compuesta principalmente por los minerales cuarzo, caolinita, illita, Hematita y anatasa. Al elevar la temperatura hasta 550°C, bajo las condiciones mencionadas anteriormente, se observan todas las fases iniciales con excepción de la Illita, la cual al perder agua y cationes interlaminares posiblemente se transformó en moscovita, mineral de estructura cristalina similar a la Illita. El pico de caolinita a esta temperatura (figura 31) es muy tenue o de poca intensidad, esto significa que su contenido en la pasta ha disminuido notablemente, debido a que ha empezado su transformación a metacaolín, fase amorfa para la cual no existe un perfil de difracción, debido a que por su condición no difracta los rayos X.

Al alcanzar los 900°C la caolinita no se observa en el difractograma, ello indica que se ha transformado completamente en metacaolín, hecho que concuerda con lo reportado por otros autores (Morales y Niño 2006). No obstante, la moscovita persiste, pues al provenir de la arcilla illítica, solo hasta superar ligeramente los 900°C se transforma en espinela.

A 1050°C se puede observar en los difractogramas la formación de mullita y silimanita, nesosilicatos que provienen de la destrucción de la fase amorfa metacaolinita y de la reacción del SiO_2 y el Al_2O_3 a temperaturas superiores a los 950°C (Morales J, 2005). Los picos de estos dos últimos minerales son de poca

intensidad, apenas notables, ello significa que su cantidad es mínima. A 1150°C su intensidad aumenta, lo cual confirma la presencia de metacaolín a la temperatura de 1050°C, como fase precursora de mullita y silimanita.

Figura 31. Difractogramas de los cerámicos obtenidos con la pasta 55C a diferentes temperaturas de sinterización (V= 2°C/min, t= 2 h).

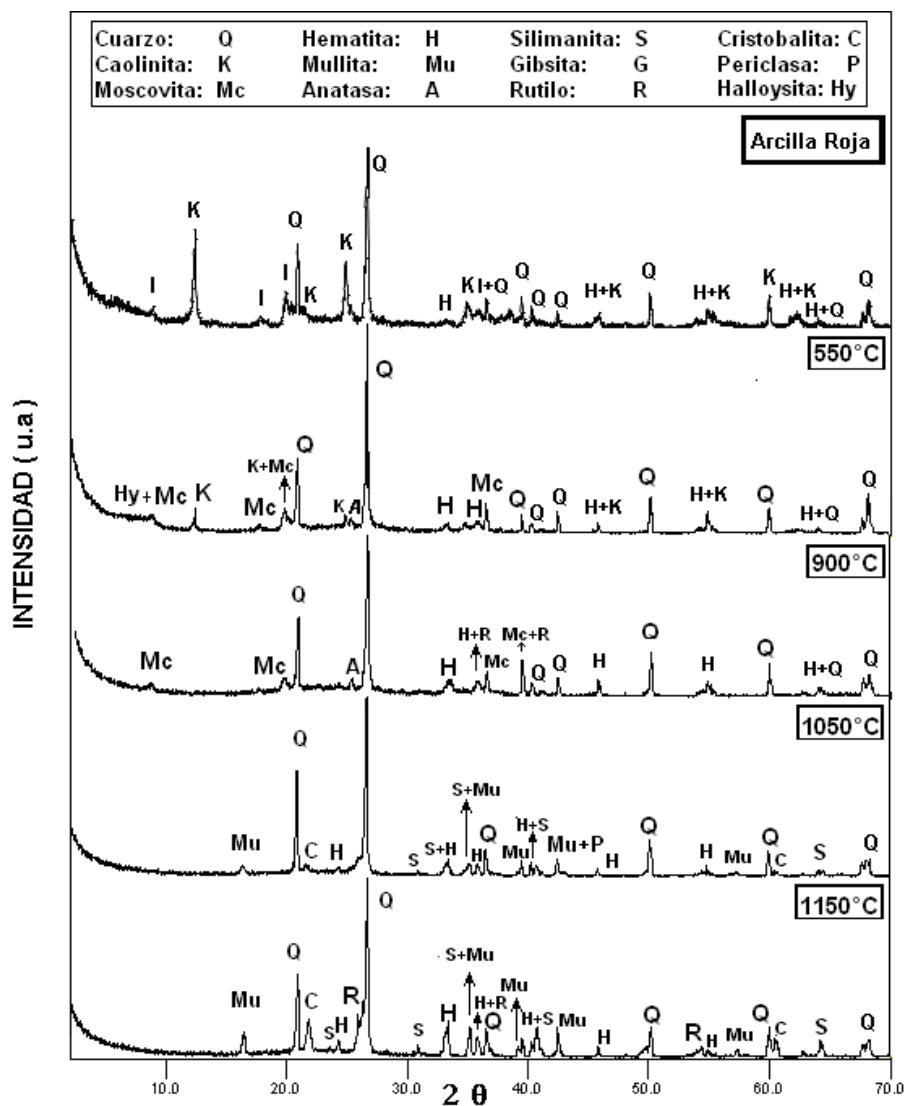


A 1150°C se observa levemente la formación de una fase nueva de SiO₂ denominada cristobalita, formada no por un cambio en la forma de cristalización del cuarzo, sino a partir de la sílice liberada por la destrucción de los minerales

arcillosos (caolinita, Illita o Montmorillonita), presentes en la muestra inicial (Macías, 2006).

En la figura 32 se observa la evolución de la composición mineralógica de los cuerpos cerámicos conformados a partir de la pasta R, al ser sometidos a elevadas temperaturas.

Figura 32. Difractogramas de los cerámicos obtenidos con la pasta R a diferentes temperaturas de sinterización ($V= 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $t= 2 \text{ h}$).



Antes de su calentamiento, la pasta R estaba compuesta inicialmente y principalmente por los minerales caolinita, illita, Hematita y anatasa. Igual que ocurrió con la pasta 55C; a 550°C se formó la moscovita, producto de descomposición de la illita.

A la temperatura de 900°C como era de esperarse, la caolinita desaparece completamente para dar paso a la formación de metacaolín (fase amorfa). También aparece el rutilo, óxido de titanio (TiO_2) producto de la transformación alotrópica de la anatasa.

A 1050°C la pasta R se comportó de manera similar a la pasta 55C, con formación de mullita y silimanita, productos de la transformación del metacaolín. A esta temperatura, también se observa para la pasta R, la aparición de un pequeño pico que indica la formación temprana de la cristobalita lo cual ocurrió a 1150°C en la pasta C.

A 1150°C se observa un crecimiento notable de los picos de mullita, silimanita y cristobalita, sin la aparición de nuevas fases.

La microestructura de algunas de las muestras fue estudiada por SEM. Con ayuda del micro-analizador de rayos X (EDX) se realizó la identificación de las fases presentes.

En la figura 33 se pueden apreciar las diferencias microestructurales de los cerámicos sinterizados a 1050°C. Con base en los microanálisis EDX, se identificó la distribución de fases: sílice amorfa, distribuida en una matriz de aluminosilicatos, en los que se resaltan la silimanita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) y la mullita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$).

La micrografía del cerámico obtenido con la pasta 55C a mayor temperatura (figura 34), 1150°C, evidenció una mayor formación de fase vítrea (sílice amorfa) que a 1050°C.

Figura 33. Micrografía de cerámicos a 1050°C y microanálisis EDX. (a) pasta R, (b) pasta 55C.

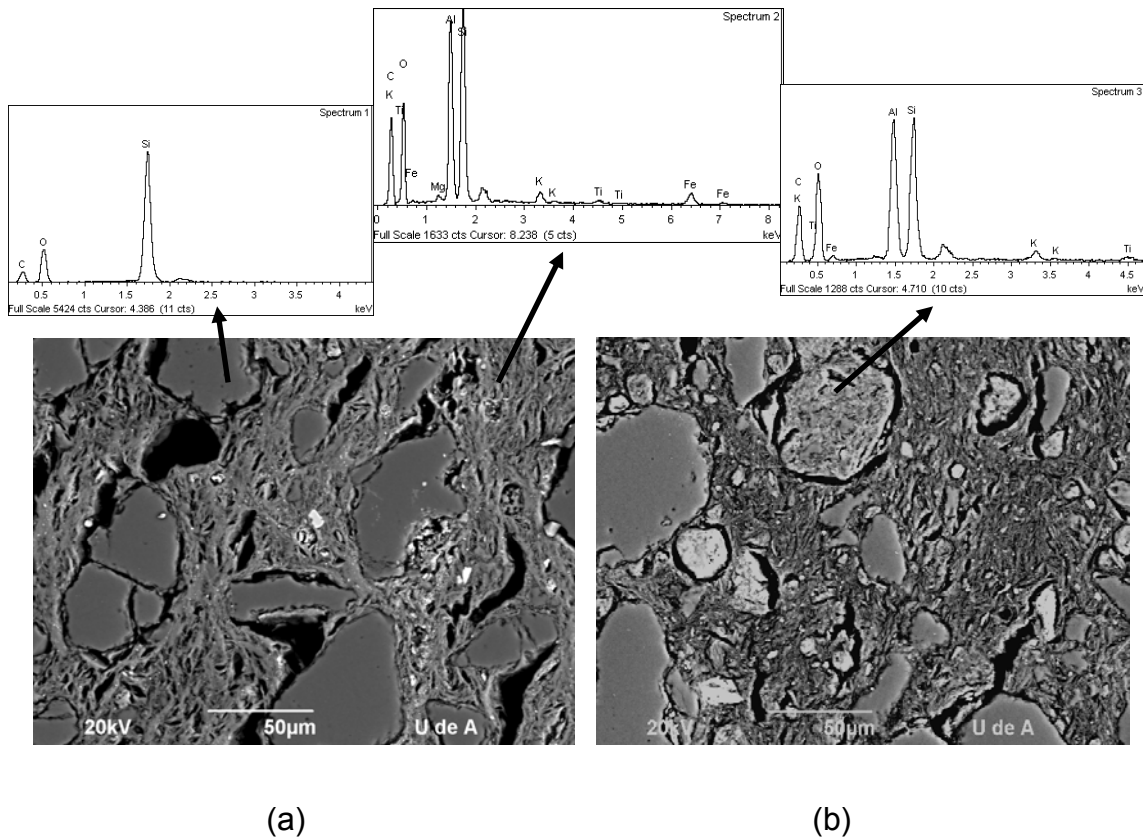
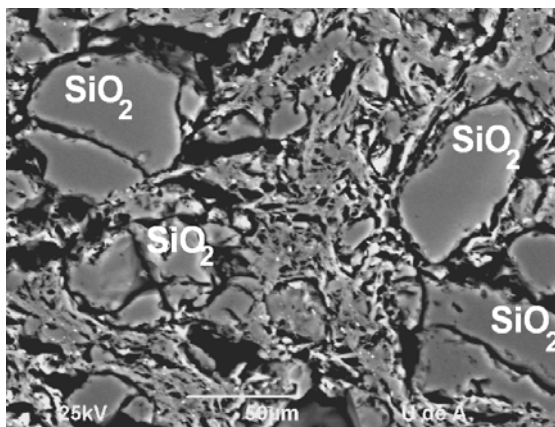


Figura 34. Micrografía del cerámico obtenido con la pasta 55C a 1150°C



Teniendo en cuenta los resultados de este apartado, se puede considerar 1050°C, como la temperatura más adecuada para la sinterización de las dos pastas, que para las condiciones de sinterización empleadas (velocidad de calentamiento 2°C/min y tiempo de permanencia 2 horas) permite obtener cerámicos con las características mostradas en la tabla 11.

Tabla 11. Características de las pastas a la temperatura escogida de 1050°C.

PROPIEDADES	PASTA R	PASTA 55C
Peso específico	2.5	2.62
Densidad aparente	2.08	1.91
Porosidad	17.11	27.07
Absorción de agua	8.24	14,19
Resistencia a la flexión	9.27	6.89

Es evidente la diferencia de calidad en los dos productos: mayor sinterización, resistencia mecánica y apariencia superficial de los cerámicos desarrollados con la pasta R que con la 55C. No obstante cada una de ellas cumple con los requisitos para fabricar cerámicos de construcción. Tejas con la pasta R y ladrillos con la 55C.

4.6.2 Tiempo de permanencia. En la figura 35 se pueden apreciar los productos cerámicos sinterizados a 1050°C y con diferentes tiempos de permanencia a dicha temperatura, para las dos pastas seleccionadas (R y 55C). Todas las piezas son de buena calidad, sin presencia de defectos importante tales como grietas o macroporos. Tampoco se observan diferencias en la coloración de los cerámicos. Es decir, macroscópicamente no se evidencia efecto alguno de la variable en estudio.

No obstante, la caracterización físico-mecánica de los cerámicos (tabla 12, figura 36 y figura 37) pone en evidencia diferencias importantes entre ellos. De estos

resultados se puede inferir que al incrementar el tiempo de permanencia de 1 a 2 horas se aumenta la sinterización de los cerámicos, disminuyéndose la porosidad y la absorción de agua y aumentándose la densidad aparente y la resistencia a la flexión (figuras 36 y 37). Por otra parte el aumento del tiempo de permanencia a 3 horas tiene un efecto adverso en las propiedades físico-mecánicas, debido a que un tiempo largo favorece la formación de más fase vítrea, lo cual se refleja en una disminución de la resistencia a la flexión, por la fragilización del material.

Figura 35. Cerámicos obtenidos con diferentes tiempos de sinterización.

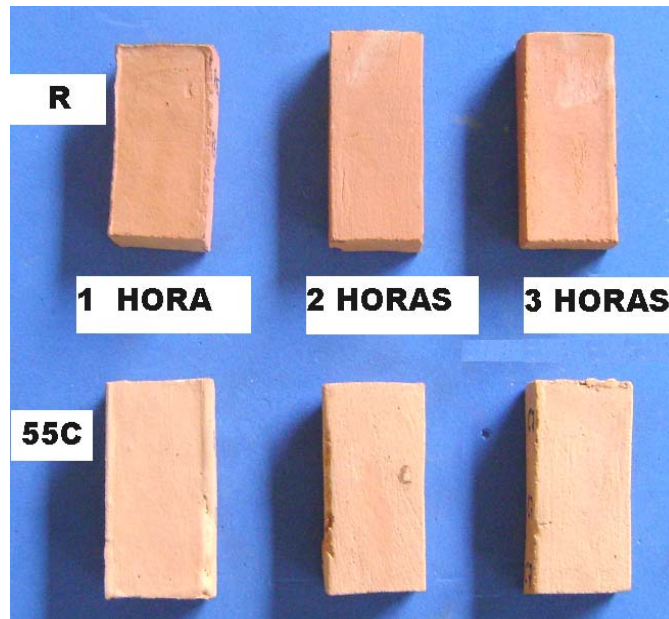


Tabla 12. Resultados de caracterización físico-mecánica de los cerámicos sinterizados con diferentes tiempos de permanencia (V= 2 °C/min, T= 1050°C).

ARCILLA	Tiempo de permanencia (Horas)	Gravedad Especifica	Densidad Aparente (g/cm ³)	Porosidad (%)	Absorción de agua (%)	Modulo de ruptura (MPa)
R	1	2,48	2,02	18,59	9,21	7,47
	2	2,48	2,05	16,82	8,17	9,27
	3	2,44	2,05	16,05	7,83	6,74
55 C	1	2,64	1,83	30,41	16,59	4,48
	2	2,62	1,91	27,07	14,19	6,89
	3	2,67	1,88	29,49	15,69	3,29

Figura 36. Efecto del Tiempo de permanencia sobre las propiedades físico- mecánicas de los cerámicos obtenidos con la pasta R.

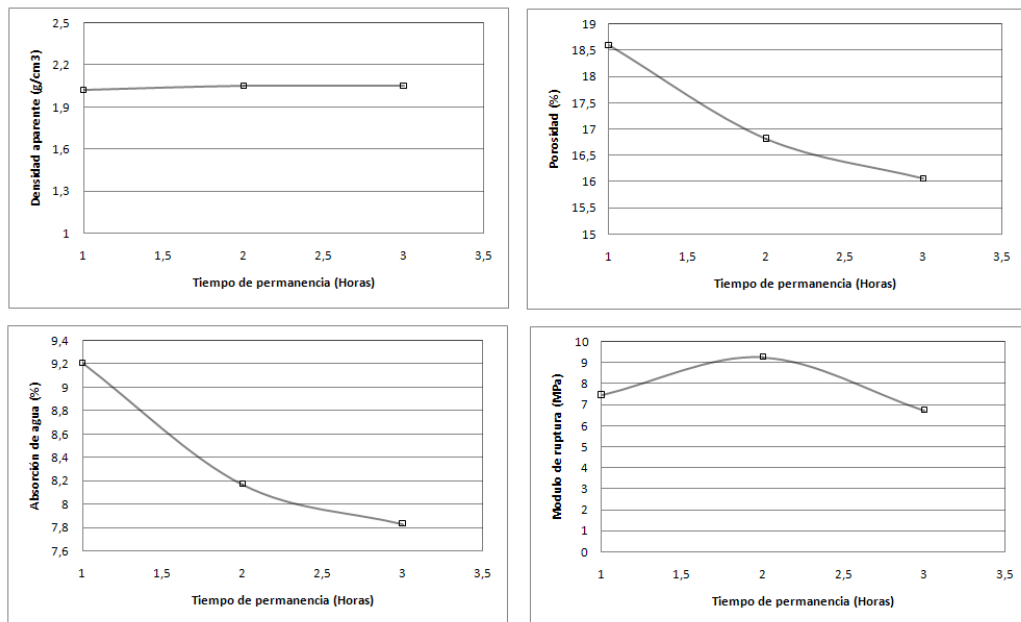
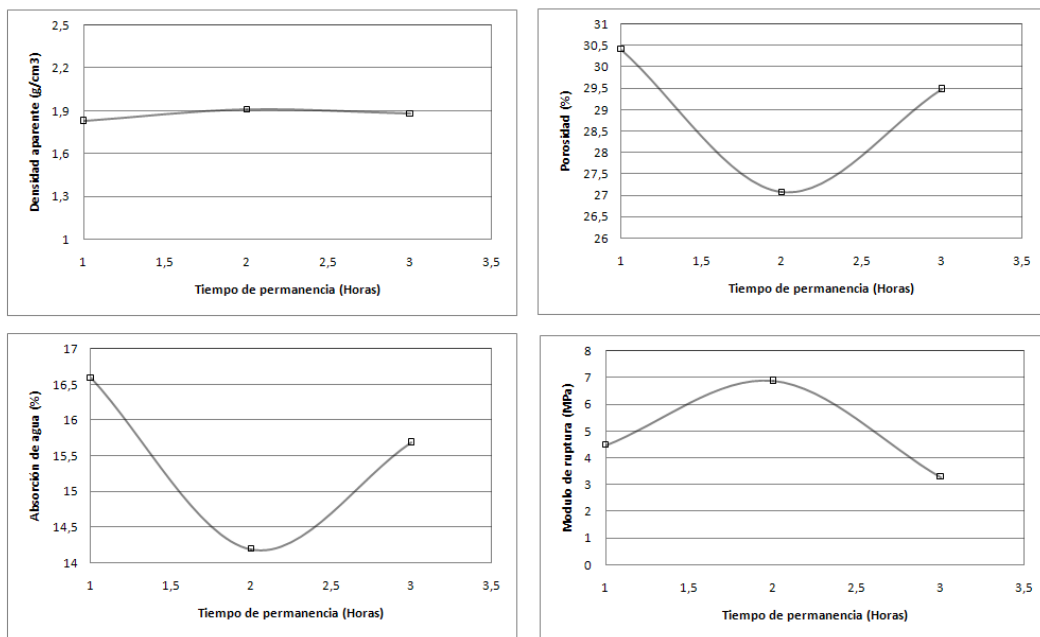


Figura 37. Efecto del Tiempo de permanencia sobre las propiedades físico- mecánicas de los cerámicos obtenidos con la pasta 55C.



No se observan diferencias apreciables en los difractogramas (figuras 38 y 39), dado que el principal efecto que tiene el incremento del tiempo de sinterización es la formación de mayor cantidad de sílice amorfa.

Figura 38. Difractogramas de los cerámicos obtenidos con la pasta 55C a diferentes tiempo de permanencia ($V = 2^\circ\text{C}/\text{min}$, $T = 1050^\circ\text{C}$).

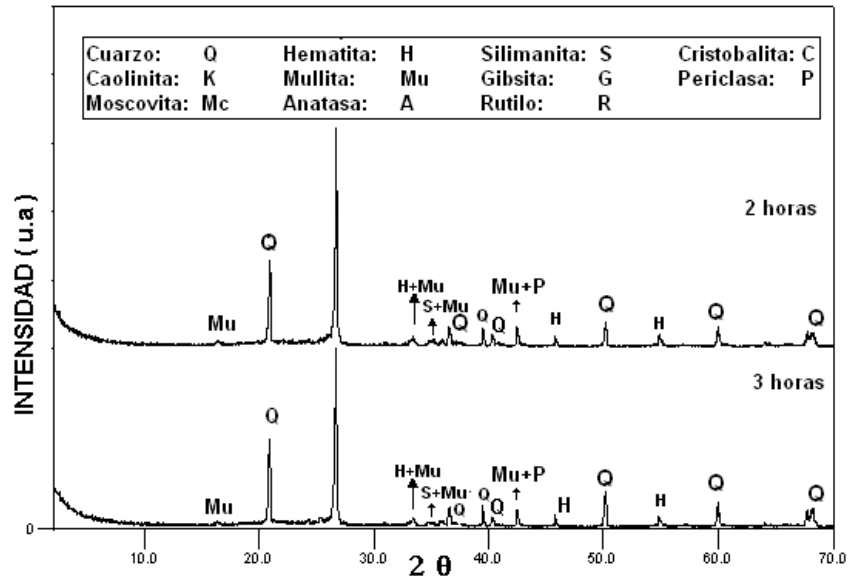
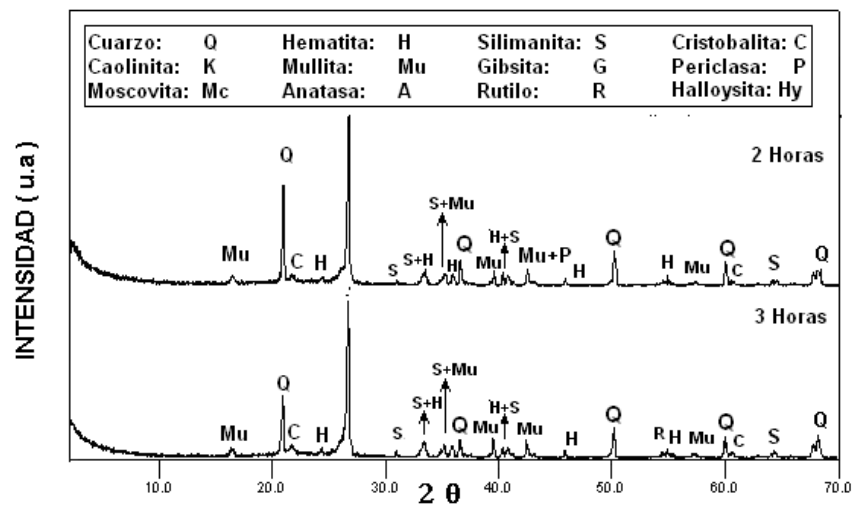
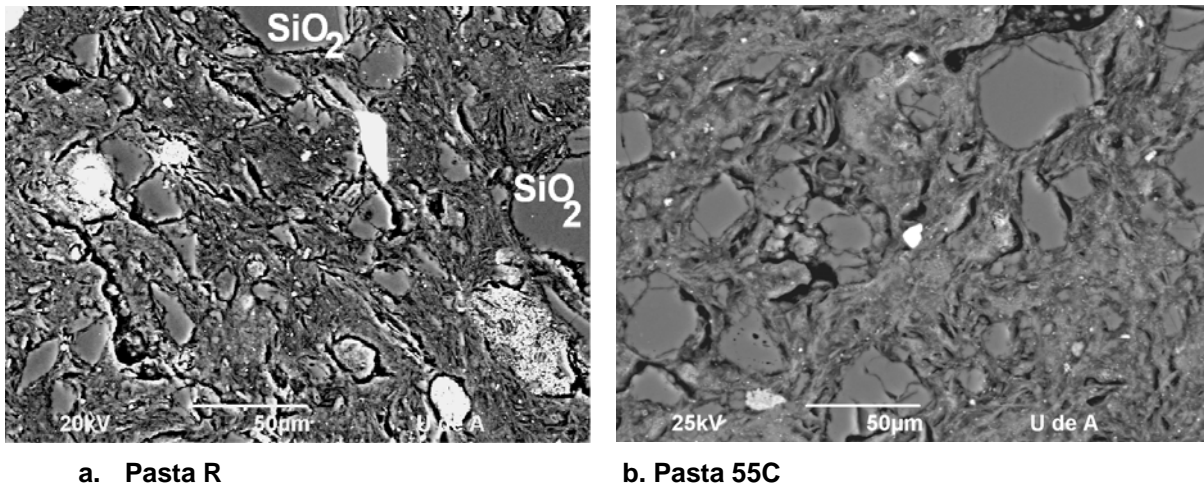


Figura 39. Difractogramas de los cerámicos obtenidos con la pasta R a diferentes tiempos de permanencia ($V = 2^\circ\text{C}/\text{min}$, $T = 1050^\circ\text{C}$).



Al comparar las micrografías de los cerámicos obtenidos a un tiempo de 3 horas (figura 40) con los obtenidos a 2 horas (ver figura 33) se observa claramente una menor porosidad en las muestras de 3 horas, así como una distribución mas homogénea de la fase vítrea.

Figura 40. Micrografías cerámicas obtenidos con las pastas R y 55C a un tiempo de permanencia de 3 horas (T= 1050°C, V= 2°C/min)



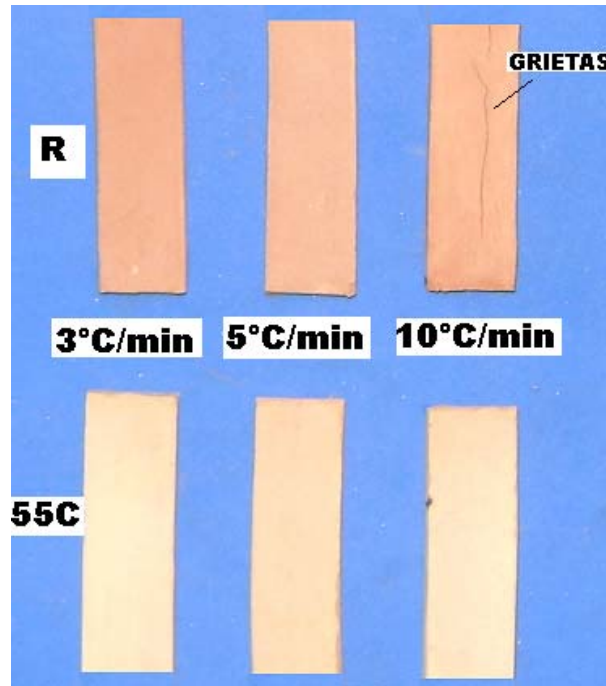
De los resultados obtenidos en este apartado se determinó que el tiempo de permanencia más adecuado para la cocción, es de 2 horas.

4.6.3 Velocidad de Calentamiento.

En la figura 41 se presenta las probetas elaboradas a diferentes velocidades de calentamiento.

A velocidades de calentamiento elevadas, tal como 10°C/min, la pasta R formo grietas muy grandes, a tal punto, que muchas de las probetas se fracturaban durante el proceso de calentamiento. Esto se debe a los esfuerzos residuales generados por mayores gradientes de temperatura.

Figura 41. Aspecto de los cerámicos sinterizados a diferentes velocidades ($T= 1050^{\circ}\text{C}$, 2 h) al aumentar la velocidad de calentamiento.



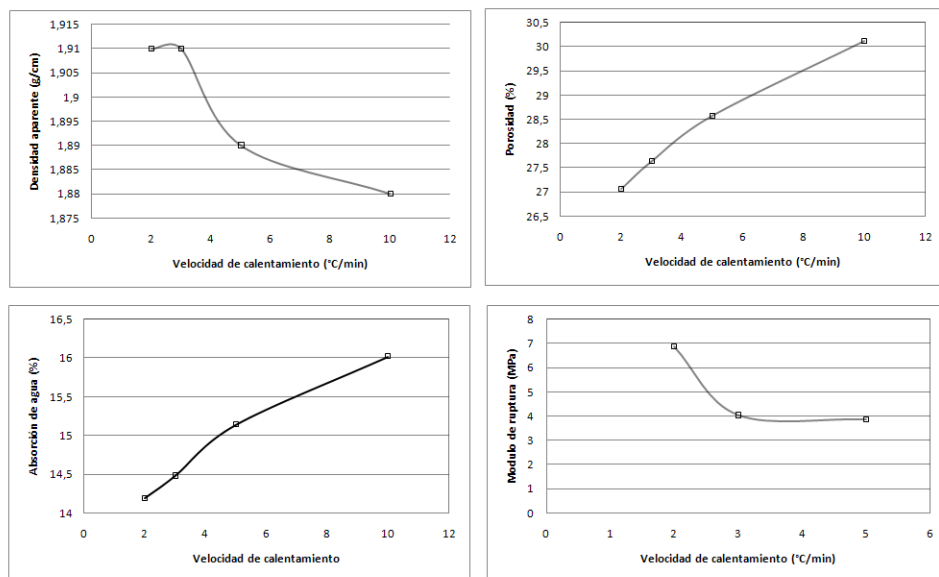
Los resultados físico-mecánicos de los cerámicos obtenidos en esta parte de la investigación, evidencian comportamientos diferentes para las dos pastas (tabla 13 y figuras 42 y 43). Estas diferencias tienen que ver con los mecanismos de sinterización que priman durante la cocción de cada una de las pastas.

Tabla 13. Resultados de caracterización físico-mecánica de los cerámicos sinterizados con diferentes velocidades de calentamiento ($T= 1050^{\circ}\text{C}$, $t= 2\text{H}$).

ARCILLA	Velocidad de calentamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Gravedad Especifica	Densidad Aparente (g/cm^3)	Porosidad (%)	Absorción de agua (%)	Modulo de ruptura (MPa)
R	2	2,49	2,07	16,92	8,25	9,27
	3	2,46	2,07	15,67	7,57	11,11
	5	2,44	2,05	16,19	7,92	5,93
	10	-	-	-	-	-
55% C	2	2,62	1,91	27,07	14,19	6,89
	3	2,64	1,91	27,64	14,48	4,04
	5	2,64	1,89	28,58	15,14	3,86
	10	2,69	1,88	30,12	16,02	-

En los cerámicos obtenidos con la pasta 55C, al aumentar la velocidad de calentamiento, disminuye la densidad aparente y el módulo de rotura y aumentó la porosidad y la absorción de agua (figura 42). Este comportamiento es señal de que, para esta materia prima, el mecanismo de sinterización “en fase líquida” es el más relevante. Es decir, que por la composición de la pasta (alto contenido de cuarzo) se facilitó la formación de líquido (sílice vítrea), el cual rodea las partículas y penetra en los poros dándole coherencia al material y densificándola.

Figura 42. Efecto de la velocidad de calentamiento sobre las propiedades físico- mecánicas de los cerámicos obtenidos con la pasta 55C.

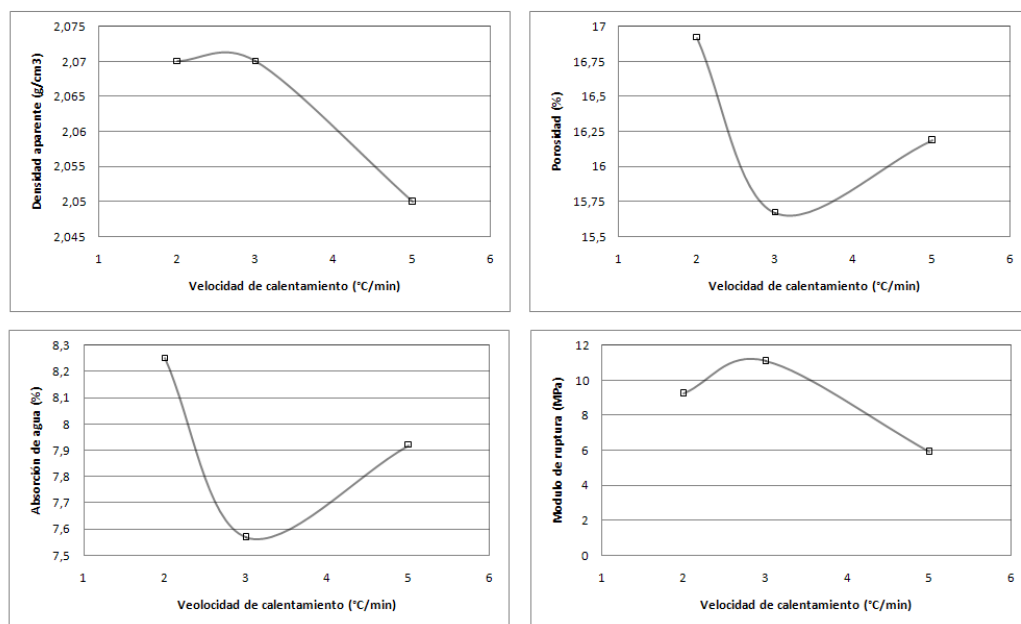


Por tanto, una mayor velocidad de calentamiento implica menor tiempo de exposición del cerámico a altas temperaturas. Entonces, durante el calentamiento lento se favorece la producción de más fase líquida, es decir, mayor densificación del cerámico.

Por su parte, durante la sinterización de la pasta R es también importante el mecanismo de “crecimiento de grano”, según el cual el cerámico se densifica por la unión de granos, es decir una sinterización en estado sólido. Este mecanismo

prima durante la cocción de la pasta R a velocidades menores de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. En este caso el efecto del aumento de la velocidad de calentamiento es contrario al observado en la pasta 55C, es decir la densificación y la resistencia mecánica aumentan con el aumento de la velocidad de calentamiento, mientras que la porosidad y absorción de agua disminuyen (figura 43).

Figura 43. Efecto de la velocidad de calentamiento sobre las propiedades físico- mecánicas de los cerámicos obtenidos con la pasta R.



De esta forma, al aumentar la velocidad de calentamiento, los granos crecen menos, lo cual favorece la eliminación de poros por el movimiento de los límites de grano, durante la etapa de sinterización isotérmica (Kingery, 1975). Por otro lado, la finura de la microestructura aumenta la resistencia a la fractura del material.

A velocidades de calentamiento por encima de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, el mecanismo de sinterización que prima en la pasta R es el de "fase líquida". Encontrándose un comportamiento similar al de la pasta 55 C.

De acuerdo con lo anterior, las velocidades de calentamiento más adecuadas para la cocción de los cerámicos son: 2°C/min para la pasta 55C y 3°C/min para la pasta R.

En el Anexo D se muestran los difractogramas de los cerámicos obtenidos a partir de las pastas 55C y R a 2, 5 y 10°C/min respectivamente. En estos se evidencia que sin importar la velocidad de calentamiento se forman las mismas especies mineralógica, de las cuales existen leves variaciones entre cada difractogramas, aunque en la arcilla R se puede ver un mayor contenido de hematita a 10°C/min.

5. PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE TEJAS Y LADRILLOS EN LA VEREDA GUAYABAL.

Teniendo en cuenta las deficiencias y fortalezas humanas y tecnológicas encontradas en la vereda Guayabal, así como los resultados experimentales discutidos en los apartados anteriores; a continuación se presenta una propuesta para mejorar el proceso de fabricación de tejas y ladrillos de los artesanos de ASOGUAYABAL.

5.1 El trabajo asociativo. Debe promoverse el trabajo como asociación, pues los retos que la comunidad afronta son bastantes. Y con este los beneficios son enormes: Tecnificación de algunas etapas del proceso productivo, mejoramiento del uso de los recursos minerales y menor impacto ambiental en la región; mayor competitividad en los mercados regional nacional e internacional, aumento de la producción y calidad de los productos; aumento del ingreso económico y mejoramiento de la calidad de vida de los artesanos.

También se exhorta a la Asociación “ASOGUAYABAL” a lo siguiente:

- Promover jornadas de trabajo colectivo que les permita construir hornos y mejores patios de secado, rehabilitar antiguas zonas de explotación por medio de la reforestación, para resarcir los daños ambientales. Debe recalcarse que las personas son la principal fuerza que posee la asociación.
- Promover la propiedad colectiva, que sea administrada de manera justa entre los diferentes artesanos. Debe invertirse en maquinaria y elementos tecnológicos que dinamicen la producción en los chircales: en la extracción con retroescabadores que aseguren explotación del subsuelo en un solo frente; en el moldeo, extrusoras galleteras que ahorren tiempo y dinero; en

la cocción hornos menos contaminantes y que garanticen un proceso óptimo.

- Promover la capacitación de los artesanos. La asociación deben ser capacitados en prácticas de administración y gerencia que les permita analizar económicamente tanto su actividad productiva como el mercado en el que participan; en nuevas tecnologías y buenas practicas industriales (seguridad industrial y primeros auxilios); en legislación minera, tema importante para garantizar la existencia de la asociación y la defensa de sus derechos.

5.2 Explotación minera. El cálculo de las reservas de las materias primas arcillosas, por medio de un extenso estudio geológico de la región debe ser el primer paso para generar una mejor explotación de las distintas canteras de la región. A razón de lo anterior solo se darán algunas pautas para mejorar la extracción minera.

- Planificar adecuadamente la ruta de explotación de los yacimientos de tal manera que, en lo posible, no se de inicio a un nuevo frente de explotación sin haber agotado el primero.
- La explotación de las canteras debe realizarse mediante la conformación de terrazas (banqueo), donde la transferencia de material se hace en forma de bancos interconectados por rampas amplias que faciliten el acceso de maquinaria y el movimiento de la materia prima.
- Los antiguos frentes de explotación deben ser recuperados ecológicamente (reforestando) utilizando material de relleno inerte (las piezas desechadas en la cocción), y regresar la capa vegetal removida en la fase inicial de extracción a su sitio original.

5.3 Mezclado y preparación de las pastas. Como materias primas se recomienda: La arcilla roja para fabricación de tejas, y la mezcla de 55% arcilla Cascajo - 45% arena amarilla (55C), para fabricación de ladrillos. Otras arcillas como la arcilla N, que son ricas en caolinita e illita pero pobres en óxidos de hierro, deben ser mezcladas con otras arcillas que le confieran dichos óxidos, para asegurar su color rojizo después del proceso de cocción. Esta arcilla también debe ser mezclada con arcillas cuyo porcentaje de sílice sea alto para mejorar las propiedades mecánicas. La arcilla sangre de toro (T) es una buena alternativa para cumplir esta doble función, pero se necesitaría de un nuevo estudio para determinar la viabilidad y proporción adecuada de los componentes.

El proceso de disgregación y mezclado puede permanecer inalterado, debido a que las arcillas C, R y A, después de un pretratamiento de maduración adquieren la plasticidad necesaria para que los animales comúnmente empleados (bueyes), logren realizar una mezcla homogénea. Además la compra de molinos y mezcladoras traerían endeudamientos muy altos para los chircaleros, dadas las características socioeconómicas de los artesanos de la región.

No obstante lo ideal sería que los asociados logran llegar a un acuerdo satisfactorio para todos, que les permita realizar sus labores de forma conjunta. Logrando esto, resultará viable la compra de algunos equipos (Trituradoras, molinos y mezcladoras) que faciliten la preparación de las pastas.

5.4 Moldeo y secado. Estas dos etapas pueden ser modificadas dependiendo de la capacidad económica de los artesanos y la demanda de los productos. Las tejas pueden ser moldeadas manualmente, pues no solo se obtienen de buena calidad, sino también se promueve el empleo entre los campesinos y se conserva la actividad artesanal, que aumenta en algunos casos el valor de los productos.

Con el trabajo asociativo también se viabilizaría la compra de prensas o extrusoras que permitan aumentar la producción y calidad de los ladrillos.

El secado puede seguir siendo natural como se esta realizando, pero se propone aumentar los patios de secado y en especial los caneyes para las tejas que necesita no ser expuestas al sol directamente, para evitar grietas o fisuras. El uso de “camaretas”³ en el secado ayuda bastante en el ahorro del espacio físico de los caneyes.

5.5 La cocción. Se recomienda reconvertir los hornos, de tal manera que utilicen otros combustibles que mejoren la eficiencia energética, técnica y ambiental de los mismos, tales como Gas Licuado del Petróleo (GLP) ó Gas Natural (GN). Estos combustibles tienen la ventaja de no emitir material particulado, además de presentar mayor eficiencia en la combustión. Esta tecnología ya se ha aplicado con éxito en otras comunidades, como es el caso de los artesanos en Ráquira, Boyaca⁴. Mientras se logra lo anterior, el uso de la leña para la cocción debe ser reducido y aumentar el uso del carbón mineral.

La temperatura de cocción, por ser la variable más crítica del proceso debe controlarse, para esto se requerirá de la postura de termopares en lugares claves del horno y conocer con mayor precisión el perfil de temperatura en su interior.

Los hornos usados por los artesanos pueden seguir siendo intermitentes o de llama invertida, deben ser diseñados para usar otro tipo de combustible como se menciono anteriormente y para soportar temperaturas superiores a 1050°C. Si se logra un trabajo asociado de los artesanos, se abre la posibilidad de construir un horno de mayor eficiencia energética, con suficiente capacidad de producción, de tal manera que satisfaga las necesidades de los artesanos asociados.

³ Objetos de madera en donde se secan las piezas unas sobre otras.

⁴ Portafolio, innovación y Desarrollo empresarial, pagina 6, 29 de Junio del 2007.

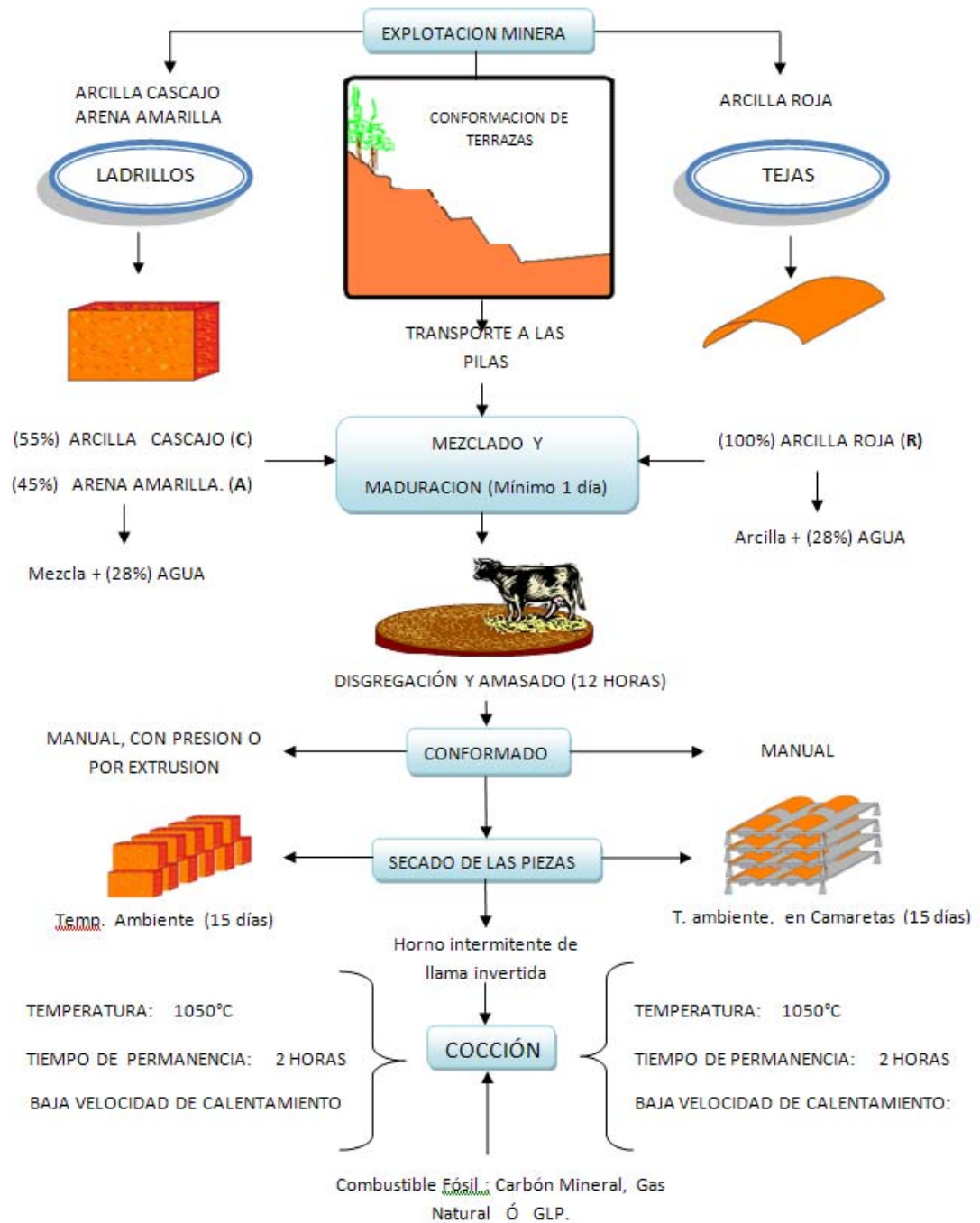
Finalmente, en la figura 44 se presenta una propuesta de mejoramiento del proceso de fabricación de tejas y ladrillos.

Este diagrama se divide en dos secciones, una dedicada a la fabricación de tejas (derecha), y otra dedicada a ladrillos (izquierda) y se resumen las pautas dadas anteriormente unidas a los datos obtenidos en el presente proyecto.

El diagrama inicia con la explotación de la cantera. Las arcillas recomendadas son: Arcilla roja para tejas, arcilla cascajo y arcilla amarilla para ladrillos. Luego estas arcillas deben ser transportadas a los chircales artesanales e introducidos a las pilas en las dosificaciones establecidas; allí serán mezcladas y añejadas por un periodo de mínimo un día. El siguiente paso, trituración y amasado puede ser el mismo usado por los artesanos, es decir, bueyes que pisan las arcillas hasta que tengan una buena consistencia y plasticidad. En caso dado de no contar con los medios económicos para la adquisición de prensas u extrusoras, el moldeado manual puede continuar sin alteración. El secado se debe realizar a temperatura ambiente, utilizando camaretas para las tejas y formando “pilas” con los ladrillos. La última etapa, la cocción, se puede realizar con hornos intermitentes de llama invertida que puedan alcanzar temperaturas de 1050°C.

La industria cerámica tradicional usa velocidades de calentamiento muy bajas (0,83°C/min) para evitar fallas en los productos, tales como fisuras, grietas e incluso rotura total. Por esto, a pesar de que en el estudio de cocción se determinaron las velocidades de calentamiento para una correcta sinterización de las pastas, esos valores no se incluyen en el diagrama de la propuesta (figura 44).

Figura 44. Propuesta de mejoramiento del proceso de fabricación de tejas y ladrillos en la vereda Guayabal



6. CONCLUSIONES

- El 100% de las ladrilleras afiliadas a ASOGUAYABAL, son clasificadas como chircales artesanales debido a su sistema rudimentario de producción: moldeo manual, secado natural, hornos de llama vertical y producción inferior a las 110 ton/mes.
- Las arcillas N y C, podrían ser usadas para la elaboración de refractarios debido a su importante contenido de Al_2O_3 , pero deben beneficiarse para reducir el contenido de óxidos de hierro.
- Según el diagrama de Casagrande, todas las arcillas de la vereda Guayabal excepto A, se clasifican como arcillas inorgánicas de mediana plasticidad.
- Las arcillas C y A, individualmente no tienen la plasticidad necesaria para la elaboración de pastas cerámicas, sin embargo al mezclarse en proporción de 55%C-45%A se pueden usar para la fabricación de ladrillos de construcción.
- La arcilla roja por su color, textura, absorción de agua porosidad aparente y resistencia mecánica, es la mejor opción para la fabricación de tejas.
- La pasta de 55% de cascajo y 45% de arcilla amarilla, debe ser elaborada con una adicción de agua entre 22,5% (límite plástico) y 32,1%(Límite

líquido). Mientras que la pasta de arcilla roja requiere de mayor contenido de agua, entre 23,5% (límite plástico) y 38,2% (límite líquido), para alcanzar las condiciones de plasticidad.

- Para las dos pastas estudiadas, el incremento del tiempo de permanencia hasta dos horas aumenta la formación de fase vítrea sin perjudicar la resistencia mecánica del cerámico.
- Del estudio del efecto de velocidad de calentamiento, se concluye que la sinterización de la mezcla 55% cascajo- 45% arcilla amarilla ocurre principalmente “en fase líquida”, mientras que en la de la arcilla roja es también importante el mecanismo de sinterización por crecimiento de granos.
- Para la obtención de cerámicos tradicionales (Tejas y Ladrillos) la mejor temperatura de sinterización es 1050°C. Valores inferiores o superiores a 1050°C dan como resultado productos no aptos para uso en la industria de la construcción.
- La arcilla sangre de toro puede ser usada en la fabricación de ladrillos si se le realiza una trituration y molienda adecuada
- Las condiciones que presentaron mejores condiciones en la etapa de cocción fueron: Temperatura de 1050°C, velocidad de calentamiento de 2°C/min y un tiempo de dos horas para la pasta 55C y Temperatura de

1050°C, velocidad de calentamiento 3°C/min y un tiempo de permanencia de 2 horas para la pasta R.

7. RECOMENDACIONES

- Debido a que el combustible utilizado en la etapa de cocción es leña, se recomienda reconvertir los hornos a otros combustibles que mejoren la eficiencia energética, técnica y ambiental de los mismos, tales como el gas - Gas Licuado del Petróleo- GLP ó Gas Natural- GN.
- La asociación y cada uno de los chircales asociados deben ser capacitados en prácticas de administración y gerencia que les permita analizar económicamente tanto su actividad productiva como el mercado en el que participan. A demás debe haber capacitación en temas importantes como lo es la seguridad industrial.
- Debe invertirse en maquinaria y elementos tecnológicos así como en incorporar procesos en varias etapas: extracción, moldeo y cocción. La asociación podría pensar en comprar maquinaria de propiedad colectiva que sea administrada de manera justa entre los diferentes artesanos.
- Debe potenciarse el trabajo asociativo de los artesanos, promover jornadas de trabajo colectivo que les permita construir hornos, rehabilitar antiguas zonas de explotación, reforestando para resarcir los daños ambientales. Debe recalcarse que las personas son la principal fuerza que posee la asociación.

- Se le recomienda a los chircaleros de la región el uso de las arcillas tierra roja (pura) y mezclas de 55% cascajo y 45% arena amarilla para la fabricación de Tejas y Ladrillos respectivamente.
- Llevar a cabo los estudios de cocción de cerámicos a mayor escala (piloto), para que los resultados se acerquen a las condiciones reales de los hornos usados en la industria ladrillera.
- Completar la caracterización y estudio de preparación de cerámicas con las arcillas no estudiadas en este proyecto.

8. BIBLIOGRAFIA

A.S.T.M C20-00, American Society for Testing Materials, Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shape for Boiling Water.

A.S.T.M C674-88. American Society for Testing Materials, Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials.

A.S.T.M D 4318-05. American Society for Testing Materials, Standard Test Methods for Liquid limit, Plastic Limit, and Plasticity index of Soils.

BARBA, Antonio et al. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. España Instituto de Tecnología Cerámica. España: 1997.

BAUTISTA, J. y NAVARRO, J. Proyecto de Grado “Perfil sectorial de las empresas fabricante de ladrillo de arcilla del área metropolitana de Bucaramanga”. Bucaramanga: UIS, 1999.

BOGOTA. ANFALIT. Diagnostico De La Industria Ladrillera Y Cerámica De Santa Fe De Bogotá Y Zonas De Influencia. Bogota: Camargo y asociados, 1999.

CAMACHO, J.U. y CAMARGO, E.E. “Estudio de mezclas de arcillas del Norte de Santander para fabricar materiales de construcción”. Proyecto de Grado (Ingeniería Civil) Bucaramanga: UIS. 1986.

CARREÑO, A. Y. y MACIAS, J. F. Propuesta de Mejoramiento de Un sistema de Beneficio para una Arcilla Montmorillonítica Nacional. Proyecto de Grado (Ingeniería Metalúrgica). Bucaramanga: UIS, 2007.

CINSET, Programa de sensibilización sanitario ambiental para la pyme del área de jurisdicción de la C.A.R. Guía Ambiental Pequeñas Ladrilleras. p. 21.

COLOMBIA. CAMARA COLOMBIANA DE LA CONSTRUCCION (CAMACOL). Informe Económico. No.1, Enero 28 de 2008.

CULTRONE, Giuseppe et al. Influence Of Mineralogy And Firing Temperatura On The Porosity Of Bricks, Journal of European Ceramic Society. 24 (2004) p. 547-564.

CULTRONE, Giuseppe et al. Dinámica de transformación de moscovita en mullita en productos cerámicos: análisis mediante TEM. Bol. Soc. Esp. Mineral. (2001). 24-A: 77-78.

DUITAMA, L. et al. Composición mineralógica y química de las arcillas empleadas para cerámica roja en las zonas de Medellín, Itagüí y Amaga. Academia colombiana de Ciencia. Medellin: 2004. 28 (109). Pg 555-563,.

ELÍAS Xavier, Optimización de procesos cerámicos industriales. UPB, Medellín. 2001.

GATTI, Walter et al. Estudio de la cinética de reacción de formación de mullita: Congreso Argentino e Internacional de Cerámica, Vidrio y Refractario Congreso de Cerámica del Mercosur Buenos Aires: 2000.

KINGERY et al, Introduction to Ceramic, 2 Ed, Jhon Wiley and Sons, New York, USA: 1976. p. 336 y 347.

MACIAS Mario. Estudio De Las Transformaciones En Estado Solido De Las Arcillas De San Jose De Cucuta Utilizadas En La Fabricación de Baldosas Mediante Caracterización Mineralógica Por Difracción De Rayos X de Muestras Policristalinas, Proyecto de Grado(Escuela de Química), Bucaramanga: UIS, 2006.

MAHMOUDI S, SRASRA E, The Use of Tunisian Baremian Clay in the Tradicional Ceramic Industry: Optimization of Ceramic Properties. Appied Clay Science, Article in Press, 2008.

MILHEIRO F. et al, Densification behaviour of a red firing brazilian kaolinitic clay. Ceramic international 31(2005), pag 757-763.

MORALES Juan. Tecnología de los materiales cerámicos. Ediciones Diaz de Santos. Madrid, España: 2005.

MORALES, Y. y NIÑO, Z. Estudio de Los Efectos Térmicos En Velocidad Y Tiempo Durante La Etapa de Cocción de Las Arcillas En San José De Cúcuta Para Estudiar Los Requerimientos Energéticos”. Proyecto de Grado (Ingeniería Química) Bucaramanga: UIS. 2006.

NORTON F.H. Refractories . McGraw Hill, New York. USA.:1972.

NTC 2086, Normas Técnicas Colombianas, Ingeniería civil y arquitectura. Tejas de arcilla.

NTC 4205, Normas Técnicas Colombianas, Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos.

PATIÑO, L. PABÓN, E. Proyecto de Grado “Estudio de La Operación de Los Hornos Colmena Utilizando Combustible Líquido Fuel–Oil En La Empresa Cerámica Fortres de Ureña Estado Táchira Venezuela. Universidad Francisco de Paula Santander. San José de Cúcuta: 2001.

RAHAMAN M. Ceramic Processing and Sintering, 2 Ed. Taylor and Francis, United States of America: 2003 p. 425-459.

RODRIGUEZ J.L, RODRIGUEZ M.A, Reaction Sintering of Zircon-Dolomite Mixtures, Journal of European Ceramic Society 21 (2001) 343-354.

SALMANG, H. Los fundamentos físicos y químicos de la cerámica; estructuras químicas y físicas de los silicatos y arcillas. Editorial Reverte. Buenos Aires:1955.

SAHNOUNE F, CHEGAR M; Algerian Kaolinite Used For Mullite Formation, Applied Clay Science, Article in Press, 2007.

VANGUARDIA LIBERAL, Séptimo día, pagina 5F, Bucaramanga, 4 de Marzo del 2007.

VIEIRA C., SANCHEZ R, MONTEIRO S, Characteristics of Cáliz and Properties of Building Ceramics in the State of Rio de Janeiro, Brazil; Construction of Building Materials 22 (2008) Pág 781-787.

9. ANEXOS

ANEXO A. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRIA DE SUELOS

- I. Pesar un poco más de 300g.
- II. Preparar una pulpa al 10% en porcentaje en peso, agregar pirofosfato de sodio 0.5 p/p a 1200 Rev/min durante 15 minutos.
- III. Llevar la pulpa al pH necesario para lograr la dispersión adecuada de la arcilla y así evitar la aglomeración. Realizar el tamizado en húmedo, haciendo uso del conjunto de mallas #60, #100, #140, #200 Tyler. Dejar secar cada malla y limpiarla, retirar el material retenido y registrar su peso.
- IV. El pasante de la malla 200 debe ser recogido y homogenizado para recolectar alrededor 50 o 100 ml.
- V. Llevar la muestra anterior al Fotosedimentador, en donde será hecha la prueba de análisis micro granulométrico.

Teniendo en cuenta que el Fotosedimentador registra diámetros de partícula entre 1 y 250 micrómetros, y que el manual del equipo recomienda que el rango de partícula de la muestra a analizar no cubra todo este rango, entonces podemos utilizar las mallas #60, #100, #140, #200 en el punto 4.

ANEXO B. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS LÍMITES DE ATTERBERG

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (L.L)

(Método de varios puntos):

- I. Pesar entre 150 a 200 g de material que pase por el tamiz de 425 micrómetros (ASTM No 40).

- II. Ajustar el aparato del límite líquido:
 - a. Ajustar la altura de caída de la taza, se gira la manivela hasta que la taza se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de 10 mm (adornado al ranurador), se verifica que la distancia entre el punto de percusión y la base sea de 10 mm exactamente. De ser necesario, se aflojan los tornillos de fijación y se mueve el ajuste hasta obtener la altura de caída requerida. Si el ajuste es correcto se escuchará un ligero campanileo producido por la leva al golpear el tope de la taza; si la taza se levanta por sobre el calibre o no se escucha ningún sonido debe realizarse un nuevo ajuste.

 - b. Se debe verificar que el aparato de Casagrande no se encuentre en mal estado, ni en condiciones extremas de desgaste.

 - c. Previo a cada ensayo se verificará que la taza y la base estén limpias y secas. Además el aparato de Casagrande debe encontrarse en una base firme y nivelada.

- III. Colocar la muestra en el plato de evaporación o en el recipiente destinado para el mezclado. Agregar agua destilada y mezclar completamente mediante la espátula. Continuar la operación durante el tiempo y con la cantidad de agua destilada necesaria para asegurar una mezcla homogénea.
- IV. Curar la muestra durante el tiempo necesario para que las fases líquida y sólida se mezclen homogéneamente.

Nota 1: En suelos de alta plasticidad este plazo no debe ser menor que 24 h. En suelos de baja plasticidad este plazo puede ser mucho menor y en ciertos casos puede eliminarse.

- V. Cuando se ha mezclado con suficiente agua para obtener una consistencia que requiera aproximadamente 15 a 35 golpes para cerrar la ranura, tomar una porción de la mezcla ligeramente mayor a la cantidad que se someterá al ensayo.
- VI. Colocar esta porción en la taza con la espátula, centrada sobre el punto de apoyo de la taza con la base; comprimirla y extenderla mediante la espátula, evitando incorporar burbujas de aire en la mezcla. Enrasar y nivelar a 10 mm en el punto de máximo espesor. Reincorporar el material excedente al plato de evaporación o recipiente de mezclado.

Nota 2: El nivelado a 10 mm implica un volumen de material de aproximadamente 16 cm³ y una longitud de surco, medida sobre la superficie nivelada de aproximadamente 63 mm.

- VII. Dividir la pasta de suelo pasando el acanalador cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza de modo que se forme una ranura clara y bien delineada de las dimensiones especificadas. El acanalador de Casagrande se debe pasar manteniéndolo perpendicular a la superficie interior de la taza. En ningún caso se debe aceptar el desprendimiento de la pasta del fondo de la taza; si esto ocurre se debe retirar todo el material y reiniciar el procedimiento. La formación de la ranura se debe efectuar con el mínimo de pasadas, limpiando el acanalador después de cada pasada.
- VIII. Verificar que el aparato este puesto sobre una base firme, luego girar la manivela levantando y dejando caer la taza con una frecuencia de dos golpes por segundo hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 13 mm aprox. Registrar el número de golpes requerido (N). Si el cierre de la ranura es irregular debido a burbujas de aire, descartar el resultado obtenido.
- IX. Retirar aproximadamente 10 g del material que se junta en el fondo del surco. Colocar en un recipiente (crisol o capsula) y determinar su humedad.
- X. Transferir el material que quedo en la taza al plato de evaporación. Lavar y secar la taza y el ranurador.
- XI. Repetir las operaciones precedentes en tres (3) pruebas adicionales empleando el material reunido en el plato de evaporación o recipiente. El ensayo se debe efectuar de la condición más húmeda a la más seca. La pasta de suelo se revuelve con la espátula de modo que vaya secando homogéneamente hasta obtener una consistencia que requiera de 15 a 35 golpes para cerrar la ranura.

Nota 3: Se recomienda efectuar este ensayo en cámara húmeda. Si no se cuenta con este equipo deben tomarse las precauciones necesarias para reducir la evaporación.

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P)

METODO MANUAL:

- I. Seleccionar 20 g o más del material anteriormente preparado en el ensayo del L. líquido.

Nota 1: En caso que solo se requiera determinar el límite plástico la muestra se debe preparar idénticamente que para el ensayo de límite líquido pero con un contenido de humedad inferior.

- II. Reducir el contenido de humedad con la fricción de las manos a tal forma que se pueda formar esferas de arcilla o suelo.
- III. Tomar una porción de la muestra de aproximadamente 1 cm³.
- IV. Amasar la muestra entre las manos y luego hacerla rodar con la palma de la mano la base del pulgar sobre la superficie de amasado (placa de vidrio) conformando un cilindro solo con el peso de mano; cuando el cilindro alcance un diámetro de aproximadamente 3 mm, doblar, amasar nuevamente y volver a conformar el cilindro.
- V. Repetir la operación hasta que el cilindro se disgregue o forme fisuras al llegar a un diámetro de aproximadamente 3.2 mm.

Nota 2: Si esta disgregación se produce cuando tiene un diámetro mayor que 3 mm, puede considerarse como un punto final satisfactorio siempre que el material haya podido conformar previamente un cilindro de 3 mm.

- VI. Reunir las fracciones del cilindro disgregado y colocarlas en un recipiente tarado. Determinar y registrar su humedad.
- VII. Repetir las etapas anteriores con dos porciones más de la muestra de ensaye.

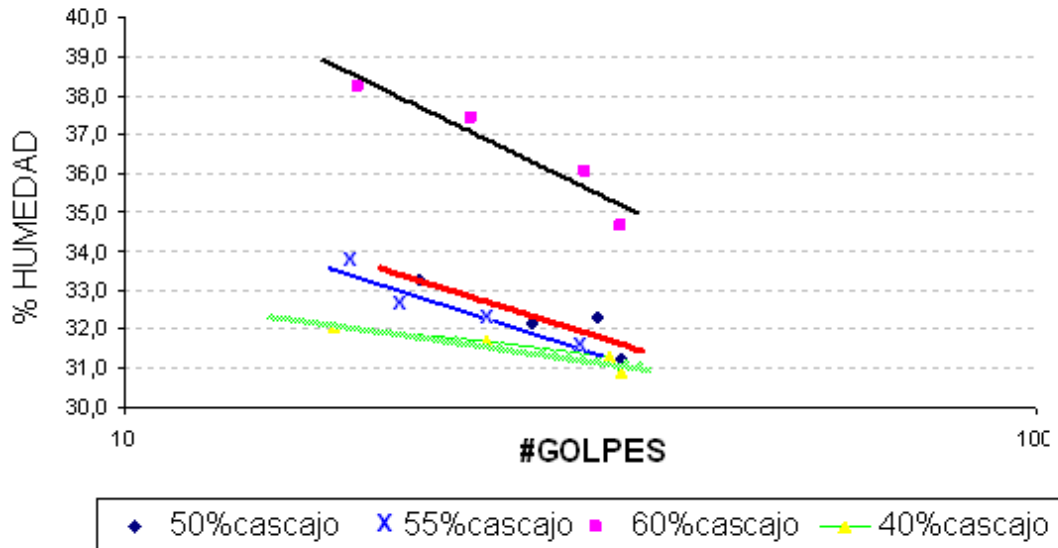
Nota 3: Se recomienda efectuar este ensayo en cámara húmeda. Si no se cuenta con este equipo deben tomarse las precauciones necesarias para reducir la evaporación.

INDICE DE PASTICIDAD

El índice de plasticidad se calcula de la diferencia entre el L.L y el L.P: $I_p = L.L - L.P$

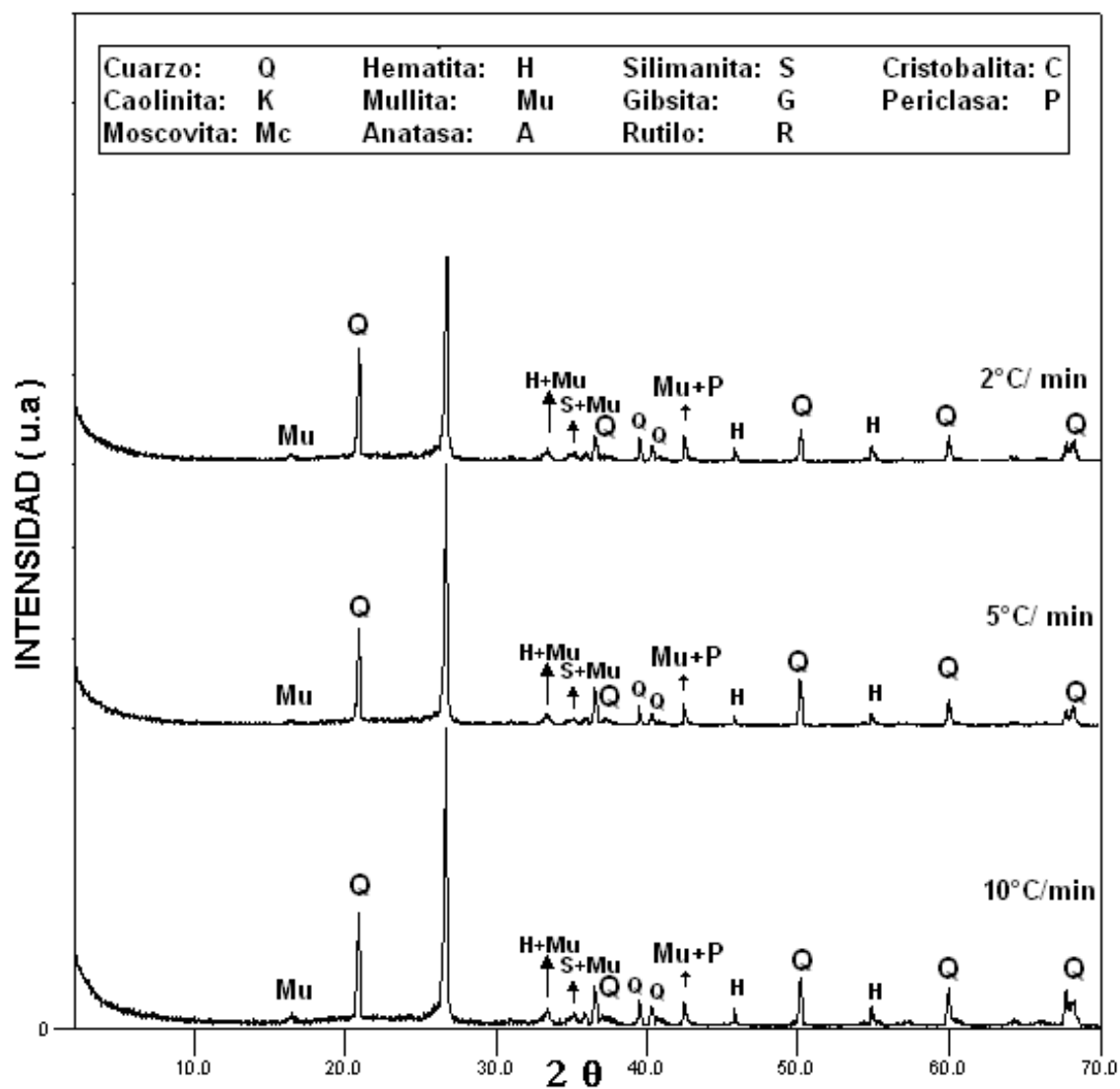
ANEXO C. LIMITE LÍQUIDO DE LAS PASTAS C-A.

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO PARA LAS PASTAS

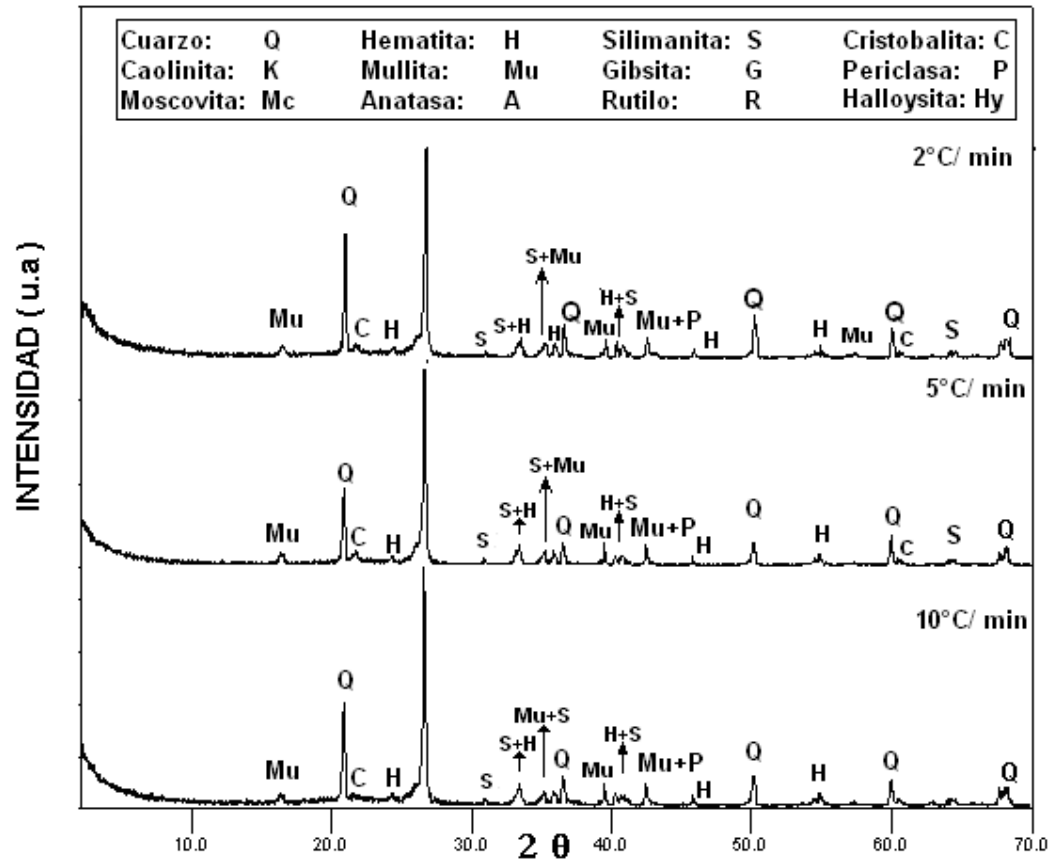


ANEXO D. DIFRACTOGRAMAS DE LOS CERÁMICOS A DIFERENTES VELOCIDADES DE CALENTAMIENTO (T= 1050°C, T= 2H).

- Cerámicos obtenidos con la pasta 55C



- Cerámicos obtenidos con la pasta R



ANEXO E. DIAGRAMA DE FASES TERNARIO Al_2O_3 - SiO_2 - FeO .

