



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**Alternativas de aprovechamiento de un residuo sólido
arcilloso proveniente del agua residual de la planta
potabilizadora “Vista Bella”**

**TESIS presentada por:
I.Q. JOSÉ ARTURO IRACHETA MANZO**

**A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
Química como requisito parcial para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**Asesor:
Doctor en ciencia y tecnología ambiental José Apolinar Cortes.**

**Co-asesor:
Doctor en ciencias químicas Juan Zarate Medina.**

Morelia, Michoacán, Mayo 2015.

RESUMEN

ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE UN RESIDUO SÓLIDO ARCILLOSO (RSA) PROVENIENTE DEL AGUA RESIDUAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA “VISTA BELLA”

La erosión de suelos y la presencia de lluvias provocan que la presa de Cointzio capte los escurrimientos que provienen de zonas altas y presente así, un elevado contenido de sólidos arcillosos. Esta agua es procesada por la planta potabilizadora “Vista Bella”, utilizando compuestos químicos para su tratamiento como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y la sílice activada. Generando en la etapa de sedimentación una purga de lodos, la cual se descarga sin previo tratamiento al drenaje municipal de la ciudad de Morelia mediante el río Chiquito de la misma, provocando su contaminación por el contenido de un residuo sólido arcilloso (RSA) y el agua residual. En base a lo anterior, el presente proyecto está referido a la evaluación de tres alternativas de aprovechamiento del RSA en base a su contenido de la arcilla halloysita 7A. Primeramente mediante la incorporación en un 10% en peso del RSA a un pavimento cerámico de la región de Castellón de la plana, España. Disminuyendo la temperatura de cocción de las baldosas cerámicas, de una temperatura de 1160°C a una temperatura de 1140°C , obteniendo resistencias mecánicas a la flexión del orden de 245 Kg/cm^2 . Por otra parte, la elaboración de ladrillos en base a un 70% en peso del RSA y un 30% en peso de un barro natural (BN), mediante un proceso de elaboración artesanal. Obteniendo ladrillos con porcentajes de absorción de agua del orden de $216.22 \text{ dm}^3/\text{m}^3$. 6% de absorción de agua menos del valor permitido por la norma mexicana NMX-C-404-ONNCE-2012 (23%, $230 \text{ dm}^3/\text{m}^3$) y resistencias mecánicas a la compresión del orden de 84.27 Kgf/cm^2 , 20% mayores que el valor permitido por la norma mexicana NMX-C-404-ONNCE-2012 (70 Kgf/cm^2). Además de una disminución en peso de hasta 450 g en base a los ladrillos comerciales de la ciudad de Morelia elaborados en la tenencia Morelos. Finalmente la elaboración de una pasta cerámica en base a un 70% del RSA, un 30% de BN y un 10% en peso de caolín EPK (C), con un límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del orden de 36.1, 18.0 y 18.1% respectivamente.

Palabras clave: Residuo Sólido, Arcillas, Halloysita 7A, Caracterización, Aprovechamiento.

ABSTRACT

USE ALTERNATIVES FOR A CLAYISH SOLID RESIDUE (CSR) COMING FROM THE WASTE FLOW OF THE “VISTA BELLA” PURIFICATION WATER PLANT

The Cointzio dam has a high clay suspended solid content. Soil erosion and rain cause the dam to receive the runoff flows coming from high zones. The dam's water is processed in the purification plant of Morelia “Vista Bella” using chemical substances such as aluminium sulphate and activated silica for the treatment. During the sedimentation stage, there is a sludge purge which is discharged into the municipal drain system without undergoing any prior treatment. As a result of this practice, the Chiquito river of Morelia City that collects the drainage is polluted because of the clayish solid residue (CSR) content and the wastewater. Therefore, an assessment of three alternatives of recovery and recycling of the solid residue, based on the Halloysite 7A clay content, is carried out in this work. The first application proposed is the incorporation of 10% weight of CSR into a ceramic pavement of the region of Castellón de la Plana, Spain. The cooking temperature of this pavement decreased from 1160°C to 1140°C, and the bend strength of 245 Kg/cm² is obtained. Another study evaluated is a handcrafted brick production with 70% weight of CSR and 30 % w/w of natural mud (NM), with the following characteristics determined: percentage of water absorption, 216.22 dm³/m³, which is 6% less absorption than the permitted value by the Mexican standard NMX-C-404-ONNCE-2012 (23%, 230 dm³/m³). The compressive strength is 84.27 Kgf/cm², this value is 20% more than the Mexican standard NMX-C-404-ONNCE-2012 (70 Kgf/cm²). Besides, there is a decrease in weight of up to 450 g in comparison to commercial bricks offered in Morelia city and elaborated in Tenencia Morelos, Michoacán. Finally, a ceramic paste manufacture is proposed made in a weight ratio of 70% CSR, 20% NM and 10% kaolin. This paste has a liquid limit, a plastic limit and a plasticity index of 36.1, 18.0 y 18.1% respectively.

Key words: Solid residue, Clays, Halloysite 7A, Characterization, Recovery.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al fin de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos. Es un privilegio ser su hijo. Los amo.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ABSTRAC	iii
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	xiii
AGRADECIMIENTOS	xviii
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Generalidades	2
1.2.- Antecedentes	8
1.3.- Justificación	18
1.4.- Hipótesis	19
1.5.- Objetivos	19
CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO	20
2.1.- Materiales cerámicos	21
2.2.- Clasificación de los materiales cerámicos	22
2.3.- Cerámica tradicional	24
2.4.- Arcillas	25
2.5.- Procesamiento cerámico	36
2.6.- Diagramas de gresificación	45
CAPÍTULO 3.- ESTADO DEL ARTE	49
3.1.- Estructura mineralógico de la halloysita	50
3.2.- Análisis mineralógicos de las materias primas halloysíticas; típicos comportamientos de reconocimiento	52
3.3.- Aplicaciones de los nanotubos de halloysita	54
3.4.- Usos cerámicos de las materias primas halloysíticas	58
3.5.- Caracterización tecnológica de los materiales halloysíticos prensados	58
3.6.- Usos de la halloysita en diferentes sectores	59

CAPÍTULO 4.- METODOLOGÍA	60
4.1.- Preparación del RSA	61
4.2.- Caracterización del RSA	62
4.3.- Incorporación del RSA a un pavimento cerámico, para la elaboración de baldosas cerámicas	71
4.4.- Elaboración de ladrillos	75
4.5.- Elaboración de una pasta cerámica	80
CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	81
5.1.- Caracterización del RSA	82
5.2.- Incorporación del RSA a un pavimento cerámico, para la elaboración de baldosas cerámicas	88
5.3.- Elaboración de ladrillos	106
5.4.- Elaboración de una pasta cerámica para alfarería de alta calidad	125
CONCLUSIONES	133
RECOMENDACIONES	135
REFERENCIAS	161

LISTA DE TABLAS

Tabla #.	Descripción.	Página
Tabla 1.1.-	Valores típicos de Demanda Bioquímica de Oxígeno para aguas de diferente calidad.	6
Tabla 2.1.-	Radios Iónicos de los elementos más abundantes en la corteza terrestre.	27
Tabla 2.2.-	Clasificación de los minerales arcillosos en base al contenido de tetraedros y octaedros.	31
Tabla 2.3.-	Área superficial específica de diferentes arcillas.	33
Tabla 2.4.-	Capacidad de intercambio iónico de diferentes arcillas.	34
Tabla 3.1.-	Distancias reticulares (d) y el posicionamiento de los picos (por radiación Cu K) de la halloysita y de la metahalloysita.	53
Tabla 4.1.-	Condiciones de operación de la prensa SS/EA para piezas cilíndricas.	66
Tabla 4.2.-	Condiciones de operación de la prensa para piezas rectangulares.	72
Tabla 5.1.-	Distribución del tamaño de partícula del RSA.	82
Tabla 5.2.-	Fluorescencia de rayos X del RSA.	82
Tabla 5.3.-	Área superficial específica del RSA.	85
Tabla 5.4.-	% Absorción de agua (ABS) y % contracción lineal (CL) del RSA a diferentes temperaturas de cocción.	86
Tabla 5.5.-	Densidades aparentes del RSA a diferentes temperaturas de cocción.	87
Tabla 5.6.-	Parámetros colorimétricos L*, a* y b* del RSA a diferentes temperaturas de cocción.	88
Tabla 5.7.-	% Absorción de agua (ABS) y % contracción lineal (CL) del gres rojo (GR) a diferentes temperaturas de cocción.	90

Tabla 5.8.- % Absorción de agua del GR y de mezclas del GR con RSA a diferentes temperaturas de cocción.	91
Tabla 5.9.- % Contracción lineal del GR y de mezclas del GR con RSA a diferentes temperaturas de cocción.	91
Tabla 5.10.- Contenido de agua y materia orgánica en el RSA.	97
Tabla 5.11.- % Absorción de agua y % Contracción lineal del RSA previamente calcinado a 600°C.	98
Tabla 5.12.- % Absorción de agua y % Contracción lineal del GR+10%RSA previamente calcinado a 600 °C.	99
Tabla 5.13.- % Absorción de agua y % Contracción lineal del GR+20%RSA previamente calcinado a 600 °C.	99
Tabla 5.14.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR a 1140°C.	101
Tabla 5.15.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR+10%RSA a 1140°C.	101
Tabla 5.16.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR+10%RSA calcinado a 1140°C.	102
Tabla 5.17.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR a 1160°C.	102
Tabla 5.18.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR+10%RSA a 1160°C.	103
Tabla 5.19.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR+10%RSA calcinado a 1160°C.	103
Tabla 5.20.- Densidades aparentes del GR+10%RSA a diferentes temperaturas de cocción.	104
Tabla 5.21.- Colorimetría del GR+10%RSA a diferentes temperaturas de cocción.	105

Tabla 5.22.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos cocidos en el primer nivel del horno.	110
Tabla 5.23.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos cocidos en el segundo nivel del horno.	110
Tabla 5.24.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos cocidos en el tercer nivel del horno.	111
Tabla 5.25.- Dimensiones promedio de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos.	111
Tabla 5.26.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 50% RSA + 50% BN cocidos en el primer nivel del horno.	112
Tabla 5.27.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 50% RSA + 50% BN cocidos en el segundo nivel del horno.	112
Tabla 5.28.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 50% RSA + 50% BN cocidos en el tercer nivel del horno.	112
Tabla 5.29.- Dimensiones promedio de los ladrillos elaborados en base a un 50% RSA + 50% BN.	113
Tabla 5.30.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 70% RSA + 30% BN cocidos del primer nivel del horno.	113
Tabla 5.31.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 70% RSA + 30% BN cocidos del segundo nivel del horno.	114
Tabla 5.32.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 70% RSA + 30% BN cocidos del tercer nivel del horno.	114
Tabla 5.33.- Dimensiones promedio de los ladrillos elaborados en base a un 70% RSA + 30% BN.	115
Tabla 5.34.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del primer nivel del horno.	115

Tabla 5.35.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del segundo nivel del horno.	115
Tabla 5.36.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del tercer nivel del horno.	116
Tabla 5.37.- Capacidades de absorción de agua promedio en 24h de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos.	116
Tabla 5.38.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del primer nivel del horno.	117
Tabla 5.39.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del segundo nivel del horno.	117
Tabla 5.40.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del tercer nivel del horno.	117
Tabla 5.41.- Capacidades de absorción de agua promedio en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN.	118
Tabla 5.42.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del primer nivel del horno.	118
Tabla 5.43.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del segundo nivel del horno.	118
Tabla 5.44.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del tercer nivel del horno.	119
Tabla 5.45.- Capacidades de absorción de agua promedio en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN.	119
Tabla 5.46.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del primer nivel del horno.	120
Tabla 5.47.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del segundo nivel del horno.	120

Tabla 5.48.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del tercer nivel del horno.	120
Tabla 5.49.- Resistencias a la compresión promedio de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos.	121
Tabla 5.50.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del primer nivel del horno.	121
Tabla 5.51.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del segundo nivel del horno.	122
Tabla 5.52.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del tercer nivel del horno.	122
Tabla 5.53.- Resistencias a la compresión promedio de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN.	122
Tabla 5.54.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del primer nivel del horno.	123
Tabla 5.55.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del segundo nivel del horno.	123
Tabla 5.56.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del tercer nivel del horno.	123
Tabla 5.57.- Resistencias a la compresión promedio de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN.	124
Tabla 5.58.- % Absorción de agua (ABS) y % contracción lineal (CL) de mezclas de 50%RSA+50%BN a diferentes temperaturas de cocción.	125
Tabla 5.59.- % Absorción de agua (ABS) y % contracción lineal (CL) de mezclas de 70%RSA+30%BN a diferentes temperaturas de cocción.	125
Tabla 5.60.- Análisis químico y características del caolín EPK.	128

Tabla 5.61.- % Absorción de agua (ABS) y % contracción lineal (CL) de mezclas de 70%RSA+20%BN+10%C a diferentes temperaturas de cocción. **128**

Tabla 5.62.- % Absorción de agua (ABS) y % contracción lineal (CL) de mezclas de 70%RSA+15%BN+15%C a diferentes temperaturas de cocción. **129**

LISTA DE FIGURAS

Figura #.	Descripción.	Página
Figura 1.1.-	Localización de la cuenca de Cointzio.	9
Figura 1.2.-	Distribución de la concentración de sólidos totales presentes en la cuenca de Cointzio.	9
Figura 1.3.-	Cribado de la planta potabilizadora Vista Bella.	11
Figura 1.4.-	Cámara de Mezclado rápido (Coagulación).	12
Figura 1.5.-	Cámara de Mezclado lento (Floculación).	13
Figura 1.6.-	Tanques sedimentadores de la planta potabilizadora Vista Bella.	13
Figura 1.7.-	Purga de lodos de la planta potabilizadora Vista Bella descargada sobre el río Chiquito de Morelia.	14
Figura 1.8.-	Cal química y tanque con contenido de cloro en solución.	14
Figura 1.9.-	Filtros de arena y antracita.	15
Figura 1.10.-	Diagrama de bloques del proceso de potabilización la planta potabilizadora Vista Bella.	16
Figura 2.1.-	Elementos más comunes en la corteza terrestre.	21
Figura 2.2.-	Elementos cerámicos de la tabla periódica.	22
Figura 2.3.-	Clasificación de los materiales cerámicos.	23
Figura 2.4.-	Diferencias entre la cerámica tradicional y la cerámica avanzada.	25
Figura 2.5.-	Nesosilicatos, formados a partir de tetraedros independientes.	27
Figura 2.6.-	Estructura de los silicatos.	28
Figura 2.7.-	Representación esquemática de las capas tetraédricas (superior) y octaédrica (inferior).	28

Figura 2.8.- Estrato T-O-T.	29
Figura 2.9.- Posibles ordenaciones estructurales de las arcillas.	29
Figura 2.10.- Conformación de los filosilicatos.	30
Figura 2.11.- Esquema general de clasificación de los materiales arcillosos de aplicación cerámica.	32
Figura 2.12.- Principales etapas del procesamiento cerámico.	37
Figura 2.13.- Prensado en seco uniaxial.	39
Figura 2.14.- Colada por barbotina.	40
Figura 2.15.- Maquina de extrusión hélice-vacío.	41
Figura 2.16.- Etapas de un proceso de cocción.	43
Figura 2.17.- Diagrama de gresificación de un gres blanco.	46
Figura 3.1.- Celda elemental de la caolinita y la halloysita.	50
Figura 3.2.- Micrografía por MEB de la halloysita.	51
Figura 3.3.- Micrografías por TEM de nanotubos de halloysita.	51
Figura 3.4.- Difractograma de Rayos X de la Halloysita (ATC, 2004).	52
Figura 4.1.- Recolección y secado del RSA.	61
Figura 4.2.- Molienda y Tamizado del RSA.	62
Figura 4.3.- Ensayo DTP en un analizador de partícula automático centrifugo.	62
Figura 4.4.- Espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X XEPOS III.	63
Figura 4.5.- Difractómetro de Rayos X SIEMENS D5000.	64
Figura 4.6.- Microscopio Electrónico de Barrido de emisión de campo JEOL JSM-7600F.	64

Figura 4.7.- Equipo Quantasorb Jr.	65
Figura 4.8.- Proceso de prensado del RSA.	66
Figura 4.9.- Hornos de gradiente GR98.	66
Figura 4.10.- Absorción de agua de piezas cocidas del RSA.	67
Figura 4.11.- Pieza del RSA sumergida en Mercurio.	68
Figura 4.12.- Espacio de color CIELAB.	69
Figura 4.13.- Calibración del espectrofotómetro MINOLTA D8000.	69
Figura 4.14.- Muestra del RSA en el espectrofotómetro MINOLTA D8000.	70
Figura 4.15.- Muestra de RSA en la termobalanza.	70
Figura 4.16.- Ensayo de resistencia mecánica a la flexión.	72
Figura 4.17.- proceso de cocción a 1140°C.	73
Figura 4.18.- Proceso de cocción a 1160°C.	74
Figura 4.19.- Proceso de elaboración de baldosas cerámicas.	75
Figura 4.20.- Proceso de elaboración de ladrillos artesanales.	76
Figura 4.21.- Proceso de elaboración de ladrillos en base al RSA.	77
Figura 4.22.- Determinación del peso ahogado de los ladrillos.	78
Figura 4.23.- Absorción de agua de los ladrillos.	78
Figura 4.24.- Colocación del mortero de azufre a los ladrillos.	79
Figura 4.25.- Ensayo de resistencia a la compresión.	79
Figura 5.1.- Difractograma de Rayos X del RSA.	83
Figura 5.2.- Micrografías por MEB a 5,000x, 10,000x, 40,000x y 100,000x del RSA.	84
Figura 5.3.- Análisis elemental (EDS) del RSA.	84
Figura 5.4.- Diagrama de gresificación del RSA.	86

Figura 5.5.- Piezas de RSA a diferentes temperaturas de cocción.	88
Figura 5.6.- Difractograma de rayos X del gres rojo (GR).	89
Figura 5.7.- Diagrama de gresificación del gres rojo (GR).	90
Figura 5.8.- Diagramas de gresificación del GR y del GR+10%RSA.	92
Figura 5.9.- Diagramas de gresificación del GR y del GR+20%RSA.	93
Figura 5.10.- Diagramas de gresificación del GR y del GR+30%RSA.	94
Figura 5.11.- Diagramas de gresificación del GR y del GR+40%RSA.	94
Figura 5.12.- Diagramas de gresificación del GR y del GR+50%RSA.	95
Figura 5.13.- Termograma diferencial (ATD-TG) del RSA.	97
Figura 5.14.- Diagramas de gresificación del RSA y del RSA a 600°C.	98
Figura 5.15.- Diagramas de gresificación del GR, GR+10%RSA calcinado y GR+20%RSA calcinado.	100
Figura 5.16.- Yacimiento natural del BN.	106
Figura 5.17.- Piezas en verde del BN.	106
Figura 5.18.- Piezas del BN sometidas a un proceso de cocción a temperaturas de 1100°C a 1200°C.	106
Figura 5.19.- Difractograma de Rayos X del BN.	107
Figura 5.20.- Termograma diferencial (ATD-TG) del BN.	108
Figura 5.21.- Distribución de los ladrillos en el horno artesanal.	109
Figura 5.22.- Difractograma de rayos X de la PTM.	109
Figura 5.23.- Diagramas de gresificación del RSA y del 50%RSA+50%BN.	126
Figura 5.24.- Diagramas de gresificación del RSA y del 70%RSA+30%BN.	126
Figura 5.25.- Difractograma de Rayos X del caolín EPK.	127

Figura 5.26.- Comparación de los diagramas de gresificación del RSA adicionando Barro Natural y Caolín EPK. **130**

Figura 5.27.- Limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad de la mezcla de 70%RSA+20%BN+10%C. **131**

Figura 5.28.- Limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad de la mezcla de 70%RSA+15%BN+15%C. **131**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de dar un paso más en mi carrera profesional en compañía de todos mis seres queridos.

Hago mi más sincero agradecimiento a toda mi familia, especialmente a mis padres Arturo e Isabel por su amor, consejos y su ejemplo de lucha y trabajo; a mis hermanas Montserrat y Daniela por su sincero cariño, a mi sobrina Melina por sus sonrisas y sus besos y a mi novia Miriam por su paciencia, su incansable apoyo y su amor incondicional.

Agradezco los apoyos otorgados por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, sin ellos, este trabajo no hubiera sido realizado.

Agradezco profundamente la labor de dirección del Dr. José Apolinar Cortes y del Dr. Juan Zarate Medina. Reconociendo el apoyo que me han brindado en todo momento, trabajar con ellos ha sido una grata experiencia; a la Dra. María del Carmen Chávez Parga, al Dr. Rafael Huirache Acuña y al Dr. Marco Antonio Martínez Cinco por su apoyo y comentarios que fortalecieron este trabajo, pero sobre todo por su amistad.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Química y al Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales; especialmente al M.C. Héctor Orozco por las facilidades otorgadas en los laboratorios. A la División de Estudios de Posgrado en Ingeniería Química y al personal docente y administrativo por su amistad y apoyo.

Quiero dar un agradecimiento especial a la Escuela Superior de Cerámica de Alcora, España, especialmente a la Dra. Gertrudis Rodríguez López por su cooperación y apoyo para la realización de una estancia de investigación en este centro y al Dr. Isaac Nebot Díaz por su dirección académica para el buen soporte de este trabajo, por sus consejos y su sincera y grata amistad.

Finalmente agradezco el apoyo de todos mis amigos en todo momento, en especial a Aldo y Adrián, por sus consejos y su apreciada amistad.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1.- GENERALIDADES.

Como resultado de las diferentes actividades productivas que desarrollan las sociedades, se generan inevitablemente una serie de residuos sólidos, líquidos o gaseosos. De entre ellos, destacan los residuos sólidos ya que generan un impacto ambiental negativo por su inadecuado manejo, por lo que amenazan la sostenibilidad y la sustentabilidad ambiental. Por otra parte, pueden provocar efectos nocivos a la salud humana ya que son frecuentemente depositados en lugares en donde la población puede estar expuesta como lo son: calles, orillas de caminos, fuentes de agua, entre otros. La cantidad y tipo de residuos sólidos que se generan, dependen, entre otras cosas, del grado de desarrollo industrial y de servicios que el país o región posee, así como de las mismas pautas de consumo de la sociedad (Semarnat, 2006).

1.1.1.- Residuos sólidos y su clasificación.

Los residuos sólidos se definen en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) como cualquier objeto, material, sustancia o elemento en estado sólido, resultante del consumo o uso de un bien que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final (DOF, 2003). En función de sus características y orígenes, se les clasifica en tres grandes grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos peligrosos (RP) y residuos de manejo especial (RME).

Los residuos sólidos urbanos, denominados residuos sólidos municipales hasta el año 2003 (DOF, 1985) son los que se generan en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos y en la vía pública con características domiciliarias (DOF, 2003).

Por otra parte, la gran diversidad de sustancias químicas que existen en la actualidad, si bien es cierto que han servido para mejorar significativamente el nivel de vida de la población, también han ejercido una presión importante sobre el medio ambiente y la salud humana. Una vez finalizada la vida útil de muchos de los productos que se fabrican a partir de estas sustancias o que las contienen, se convierten en desechos que ponen en riesgo la salud de las personas o pueden causar daños al medio

ambiente. Estos desechos se denominan residuos peligrosos, definidos como aquellos que poseen alguna de las características CRETIB que les confieren peligrosidad (corrosividad, C; reactividad, R; explosividad, E; toxicidad, T; inflamabilidad, I; o ser biológico-infecciosos, B), así como los envases, recipientes y suelos que hayan sido contaminados por los mismos, según lo establece la LGPGIR (Semarnat, 2012). Las características, el procedimiento de identificación, la clasificación y los listados de los residuos peligrosos se establecen en la norma oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

Finalmente se encuentran los residuos de manejo especial (RME), estos están definidos como aquéllos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados residuos sólidos urbanos o peligrosos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos. En este tipo de residuos sólidos destacan los servicios de salud y transporte, lodos de tratamiento de aguas, residuos de construcción, demolición y los residuos electrónicos. Estos últimos destacan de gran manera con una generación nacional anual (entre los que se incluyen televisores, computadoras de escritorio y portátiles, equipo de audio y teléfonos celulares) estimada entre 150 mil y 180 mil toneladas al año (INE, 2012).

Por consecuente, la problemática ambiental se relaciona directamente con el manejo de los residuos sólidos, la cual afecta al hombre y a su entorno de diferentes maneras, especialmente en los sectores de:

- Salud Pública.
- Destrucción de los recursos naturales renovables y no renovables.
- Rellenos Sanitarios.

Entre los factores ambientales impactados por el mal manejo de los residuos sólidos destacan:

- Recurso Hídrico.
- Recurso Atmosférico.
- Recurso Suelo.
- Paisajismo.

1.1.2.- Contaminación de cuerpos de agua por residuos sólidos.

Cuando los residuos sólidos son vertidos en los cuerpos de agua de manera directa (Aguas superficiales) o indirecta (Aguas subterráneas), afectan la estructura física del hábitat e impactan negativamente la calidad del agua.

Para el caso de la contaminación de las aguas subterráneas (pozos y manantiales), la contaminación ocurre debido a la filtración de lixiviados a través del suelo, ya que este último absorbe estos líquidos y los transporta a estos cuerpos de agua. El tratamiento de estas fuentes de agua es altamente costoso y puede llegar a afectar comunidades que dependen únicamente de este recurso como es el caso de las zonas desérticas.

Sin embargo, para el caso de las aguas superficiales (ríos, lagos, lagunas, mares y océanos), existen diversos factores contaminantes como pueden ser microorganismos patógenos, materia orgánica, sustancias inorgánicas, sólidos suspendidos, nutrientes, sustancias tóxicas, materiales radiactivos, entre otros.

- **Microrganismos patógenos.**

El ser humano vive en relación íntima con los microorganismos sobre su piel y en su sistema digestivo. En estado de salud, los seres humanos y los microorganismos patógenos viven juntos para beneficio mutuo. Sin embargo, algunas personas sanas viven en armonía con organismos que pueden resultar patógenos para otros. Estos tipos de microorganismos son representados por los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, hepatitis, entre otras.

Resulta muy fácil contaminar el agua con microorganismos como las bacterias intestinales, ya que normalmente estos microbios son transportados al agua mediante las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas, por lo que es muy difícil mantener el agua potable libre de bacterias intestinales y además eliminarlas no es posible, ni benéfico y resulta muy costoso.

Un buen índice para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que en el agua para beber haya 0 colonias de coliformes por 100 ml de agua (Ramos y Col., 2003).

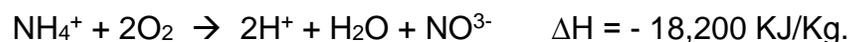
- **Materia orgánica (DBO).**

Cuando mayor es la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), mayor es la cantidad de materia orgánica que puede ser biodegradada por las bacterias que necesitan oxígeno para realizar esta función (bacterias aerobias). Esta situación provoca un descenso del oxígeno disuelto (OD) en el agua y puede llevarlo a valores tan críticos que provoque la mortandad de algunas especies.

A la descomposición de la materia orgánica en presencia de oxígeno se le llama aerobiosis y es el proceso más eficiente para liberar la energía de la materia orgánica. Por ejemplo: la descomposición aeróbica de las proteínas que contienen nitrógeno y azufre (representadas por la fórmula general $C_xH_yO_zN_2S$ se puede representar mediante la ecuación química no balanceada:



Cuando la materia orgánica que contamina al agua se ha agotado, la acción bacteriana de la desoxigenación de las aguas contaminadas oxida al ion amonio, proceso denominado nitrificación y se puede representar mediante la ecuación química iónica:



Si el oxígeno disuelto sigue disminuyendo, se pueden producir olores desagradables por la actividad bacteriológica anaeróbica (Baird, 2001). Estos procesos de descomposición bacteriana anaeróbica (en ausencia de oxígeno) de la materia orgánica se denominan anaerobiosis. A la descomposición bacteriana anaeróbica de las proteínas se le denomina putrefacción y puede representarse mediante la siguiente ecuación química no balanceada:



Se puede observar que se libera mayor cantidad de energía en la aerobiosis que en la putrefacción. En el proceso de putrefacción, como el metano es insoluble en el agua, y este se libera en forma de gas. El sulfuro de hidrógeno, es un gas incoloro, de mal olor (a huevo podrido) y tóxico (en concentraciones de 5 % es nocivo para la salud), por lo que la putrefacción desprende un olor fétido y los peces y otros organismos que requieren del oxígeno no pueden vivir en aguas contaminadas donde ocurra la putrefacción (se le considera la peor forma de contaminación bacteriana).

Tabla 1.1.- Valores típicos de Demanda Bioquímica de Oxígeno para aguas de diferente calidad.

Tipo de Agua	DBO (mg/L)
Agua potable	0.75 a 1.5
Agua poco contaminada	5 a 50
Agua potable negra municipal	100 a 400
Residuos industriales	500 a 10000

- **Nutrientes.**

Los nitratos y fosfatos son sustancias solubles en el agua, los cuales las plantas las necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidades excesivas inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando la eutrofización de las aguas. Cuando las algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, disminuye el oxígeno disuelto. Además provocan un efecto antiestético por su color y aspecto, obstruyen los filtros y aumentan las necesidades químicas del tratamiento del agua. El resultado es un agua maloliente e inutilizable (Ramos y Col., 2003).

- **Sustancias tóxicas y peligrosas.**

Pequeñas concentraciones de ácidos, cianuros, arsénicos, metales pesados y numerosas sustancias químicas son tóxicas para los organismos incluyendo a los seres humanos, la población bacteriana y la vida biológica. Los materiales radiactivos son

degradados con gran dificultad en el medio ambiente (persistentes) y tienden a acumularse en los organismos de los seres vivos (bioacumulativos) (Jiménez, 2001).

- **Sólidos suspendidos.**

Las partículas de materia orgánica e inorgánica pueden ser sólidos sedimentables, flotantes y en suspensión capaz de formar depósitos de diferentes características pero generalmente con olor y color desagradable, impidiendo la penetración de la luz solar en el agua, afectando procesos biológicos que dependen de ella. De la misma manera estos sólidos suspendidos reducen el cauce del cuerpo de agua, provocando también un azolvamiento de sólidos, que en épocas de lluvias puede favorecer a inundaciones por el desbordamiento de aguas, afectando así, a las familias aledañas a estos cuerpos de agua, dañando zonas de cultivo e impactando negativamente la zona, sin olvidar el mal aspecto físico que se genera (Ramos y Col., 2003).

De tal manera que cuando los cuerpos de agua son contaminados por cualquier elemento, en especial los residuos sólidos, deben pasar por un proceso de tratamiento para que el hombre pueda emplearla en el consumo humano, en el riego de cosechas o en general para cualquier actividad en la que se necesite emplear este recurso. En consecuencia, estos procesos de tratamiento son altamente costosos y la comunidad que demanda estos recursos, debe afrontar el pago de estos servicios.

Tal es el caso de la presa de Cointzio, que presenta un elevado contenido de un sólido arcilloso en suspensión coloidal, provocando **que la presa de Cointzio presente características que ninguna presa del país posee.**

Por otra parte, es necesario su proceso de potabilización de agua ya que es uno de los principales cuerpos de agua encargado de abastecer agua a la ciudad de Morelia Michoacán.

1.2.- ANTECEDENTES.

1.2.1.- La presa de Cointzio.

En la cuenca de Cointzio existe un embalse denominado “presa de Cointzio”, construido para retener y controlar las aguas del río Grande de Morelia, localizada sobre el río Grande en la entrada del cañón de Cointzio a unos 13 Km al suroeste de la ciudad de Morelia con coordenadas $19^{\circ}37.234'$ – $101^{\circ}15.534'$ (figura 1.1.), en el municipio del mismo nombre del estado de Michoacán.

La presa de Cointzio se construyó con la finalidad de abastecer de agua potable a la ciudad de Morelia, actualmente en el orden del 19% en constante aumento, riego de unas 17 500 hectáreas de los valles Morelia-Querendaro y San Bartolo (Distrito de Riego 020), generación de energía hidroeléctrica, protección contra inundaciones y actividades recreativas (Sánchez C. y Wagner G., 2008). Dicha presa terminó su construcción en Julio de 1939, por administración de la extinta Comisión Nacional de Irrigación.

La presa de Cointzio cuenta con una capacidad total de 84 millones de m^3 , de los cuales 15 millones de m^3 son de azolves y por lo tanto se tiene una capacidad útil de 69 millones de m^3 (INE-CONAGUA, 2002).

La presa de Cointzio cuenta con las siguientes dimensiones:

- Altura total: 46 m.
- Altura sobre el lecho del río: 37 m.
- Longitud en la corona: 300 m.
- Anchura en la corona: 8 m.
- Anchura en la base: 200 m.
- Taludes: aguas arriba: 3:1.
- Taludes: aguas abajo: 2:1.
- Elevaciones del desplante de la cimentación: 1951 m,
- Elevaciones del fondo del cauce: 1960m,
- Elevaciones de la corona de la cortina: 1997 m.

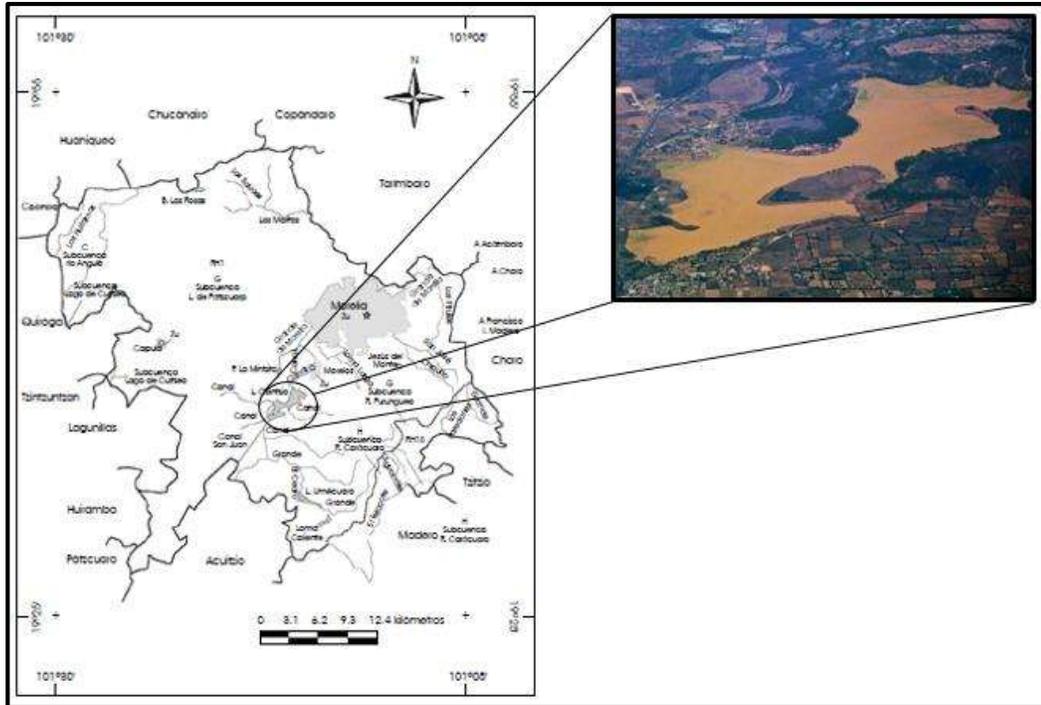


Figura 1.1.- Localización de la cuenca de Cointzio.

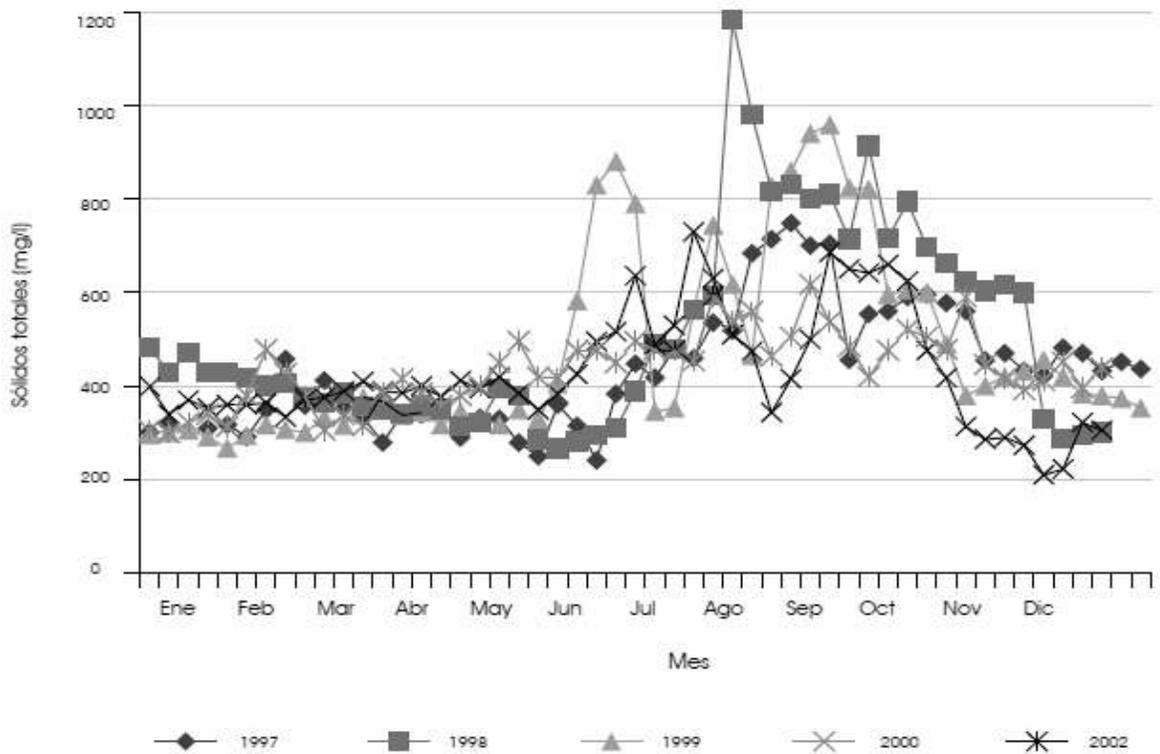


Figura 1.2.- Distribución de la concentración de solidos totales presentes en la cuenca de Cointzio.

En la figura 1.2., se muestra la concentración de sólidos totales presentes en la cuenca de Cointzio. Se puede observar que se presenta una mayor concentración de sólidos totales en la temporada de lluvias (Junio a Octubre), por lo que la concentración de los sólidos totales varía en gran manera dependiendo la época del año, así como de la zona de la cuenca, con valores que van desde una concentración de 200 mg/L hasta una concentración de 1200 mg/L. Estos datos indican que el agua de esta fuente renovable presenta problemas de calidad originados por el elevado contenido de los sólidos suspendidos, que se erosionan de las parcelas agrícolas y de las cárcavas de la cuenca (Bravo y Col., 2007), provocando que la diversidad acuática haya disminuido considerablemente en dicho cuerpo de agua.

Debido a la calidad del agua de la presa de Cointzio, es necesario realizar un proceso de potabilización al agua para que pueda ser utilizada por la sociedad de la ciudad de Morelia.

1.2.2.- Proceso de potabilización de la planta potabilizadora “Vista Bella”.

El agua proveniente de la presa de Cointzio es tratada en la planta potabilizadora del OOAPAS “Vista Bella”, ubicada sobre la avenida Rey Tangaxoan II, número 695 de la colonia Vista Bella del municipio de Morelia realizando un proceso de potabilización convencional mediante las siguientes etapas.

- **Cribado o cernido.**

El agua proveniente de la presa de Cointzio se conduce a través de un conducto de concreto con una longitud aproximada de 13 km. Al llegar a la planta potabilizadora, atraviesa una válvula de compuerta tipo Miller de 16 pulgadas de diámetro, con la finalidad de regular el flujo de suministro a la planta potabilizadora, que en promedio es del orden de 600L/s a 700L/s, el excedente es descargado directamente al drenaje municipal. Posteriormente se hace pasar a través de una reja de acero al carbón de 2 cm con la finalidad de retener sólidos de mayor tamaño como ramas, rocas y toda clase de residuos sólidos de gran tamaño.



Figura 1.3.- Cribado de la planta potabilizadora Vista Bella.

Esta agua presenta una serie de propiedades que son cuantificadas por el organismo del OOAPAS previo a la adición de compuestos químicos para su tratamiento como lo son:

- Turbiedad: 167.1 Unidades Nefelométrica de Turbidez (UTN).
- Color: 1376.9 Pt-Co.
- PH: 7.49.
- Dureza: Total: 65.55 mg/L, Magnesio: 30.89 mg/L, Calcio: 33.63mg/L.
- Conductividad: 160 μ mhos/cm.
- Sólidos totales: 290.75 mg/L. Sólidos disueltos totales: 75.75 mg/L.

- **Coagulación.**

Esta etapa de tratamiento se utiliza principalmente para eliminar el color y la turbiedad del agua, mediante la agitación rápida de la misma, adicionando previamente en la entrada de la planta sustancias que contengan propiedades coagulantes, la cual transfiere sus iones a la sustancia que se desea remover, lo que neutraliza la carga eléctrica de los coloides para favorecer la formación de flóculos de mayor tamaño y peso. En esta planta potabilizadora se utiliza Sulfato de Aluminio líquido $Al_2(SO_4)_3$ como coagulante primario a razón de 0.05 L/s con una proporción de 54 ppm por 1.2 ppm de un polímero catiónico a 0.023L/s. El objetivo de este polímero es disminuir la cantidad

necesaria de Sulfato de Aluminio, ya que si se agrega un exceso del coagulante primario, el agua que se distribuirá a la ciudad de Morelia presentara residuos de Aluminio.



Figura 1.4.- Cámara de Mezclado rápido (Coagulación).

- **Floculación.**

Consiste en la agitación lenta de la masa coagulada para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados, con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesario para sedimentar con facilidad. La sílice activada es el floculante usado en esta planta potabilizadora a 0.091L/s ya que es el que mejor da resultado si se usa en conjunto con el Sulfato de Aluminio. La sílice activada es una suspensión coloidal de ácidos polisilícicos hidratados, producida por la neutralización parcial de la alcalinidad caustica del silicato sódico comercial (se ha de pasar de un pH próximo a 12 hasta conseguir un pH poco menor de 9). Entre las diversas sustancias que pueden emplearse como activadores de la sílice hay que destacar el cloro, al tener doble aplicación de empleo como desinfectante en el tratamiento del agua y como activador en la preparación de la sílice (0.5 cloro/1 sílice). A continuación se presentan algunas de sus ventajas.

- Un incremento en el rango de pH dentro del cual se puede obtener una buena floculación y en la rapidez o cantidad de formación del floculo.
- La producción de mayores, más pesados y cohesionados flóculos con la consecuente aceleración de sedimentación.
- Una extensión del rango de temperatura, dentro del que ocurre una eficiente floculación, en particular en zonas o épocas de baja temperatura.

- Una disminución de la turbidez del agua decantada, lo cual conduce a una reducción en el lavado de filtros.



Figura 1.5.- Cámara de Mezclado lento (Floculación).

- **Sedimentación.**

Los flóculos se sedimentan y se depositan en el fondo de un tanque, mientras el agua clara es recolectada mediante unas canaletas rectangulares instaladas en la parte superior del tanque. Los lodos sedimentables en el tanque son retirados por medio de una purga (denominada purga de lodos) cada 8 horas (45min por purga, 25.2 L/s promedio durante el día) de manera hidráulica a través de una serie de válvulas operadas manualmente que se encuentran instaladas en el fondo de estos tanques. **La purga de lodos es desechada sin previo tratamiento por la planta potabilizadora Vista Bella al drenaje municipal de la ciudad Morelia mediante el río Chiquito.**



Figura 1.6.- Tanques sedimentadores de la planta potabilizadora de Vista Bella.



Figura 1.7.- Purga de lodos de la planta potabilizadora Vista Bella descargada sobre el río Chiquito de Morelia.

- **Filtración y Desinfección.**

Del efecto provocado de la reacción del sulfato de aluminio con la alcalinidad del agua en el proceso de coagulación, se produce un descenso en el pH ($\text{pH}=6$), por lo cual es necesario agregar cal química para ajustar el pH y llevarlo al punto neutro ($\text{pH}=7$). Es precisamente antes de entrar a los filtros donde se agrega la cal química y se aplica el desinfectante, con una concentración de 2 ppm de cloro en solución.



Figura 1.8.- Cal química y tanque con contenido de cloro en solución.

El agua clara proveniente de los sedimentadores se hace pasar por un fondo poroso de antracita y arena (Filtros) para eliminar los sólidos suspendidos, microfloculos e incluso coloides que no fueron retirados durante el proceso de sedimentación por

diversos factores. Este proceso se utiliza como único tratamiento cuando las aguas son muy claras o como proceso final de pulimiento en el caso de aguas turbias.



Figura 1.9.- Filtros de arena y antracita.

- **Almacenamiento y distribución.**

El agua potable es almacenada y lista para distribuirse en las diferentes redes de distribución por gravedad hacia la ciudad de Morelia.

Algunos cuerpos de agua de la ciudad de Morelia como son el río Chiquito y el río Grande están siendo afectados por la notable presencia de sólidos suspendidos, debido a la descarga residual de la planta potabilizadora “Vista Bella”, provocando efectos negativos al ecosistema.

Actualmente no se ha implementado ningún tipo de sistema de tratamiento para los residuos sólidos que afectan a dichos cuerpos de agua.

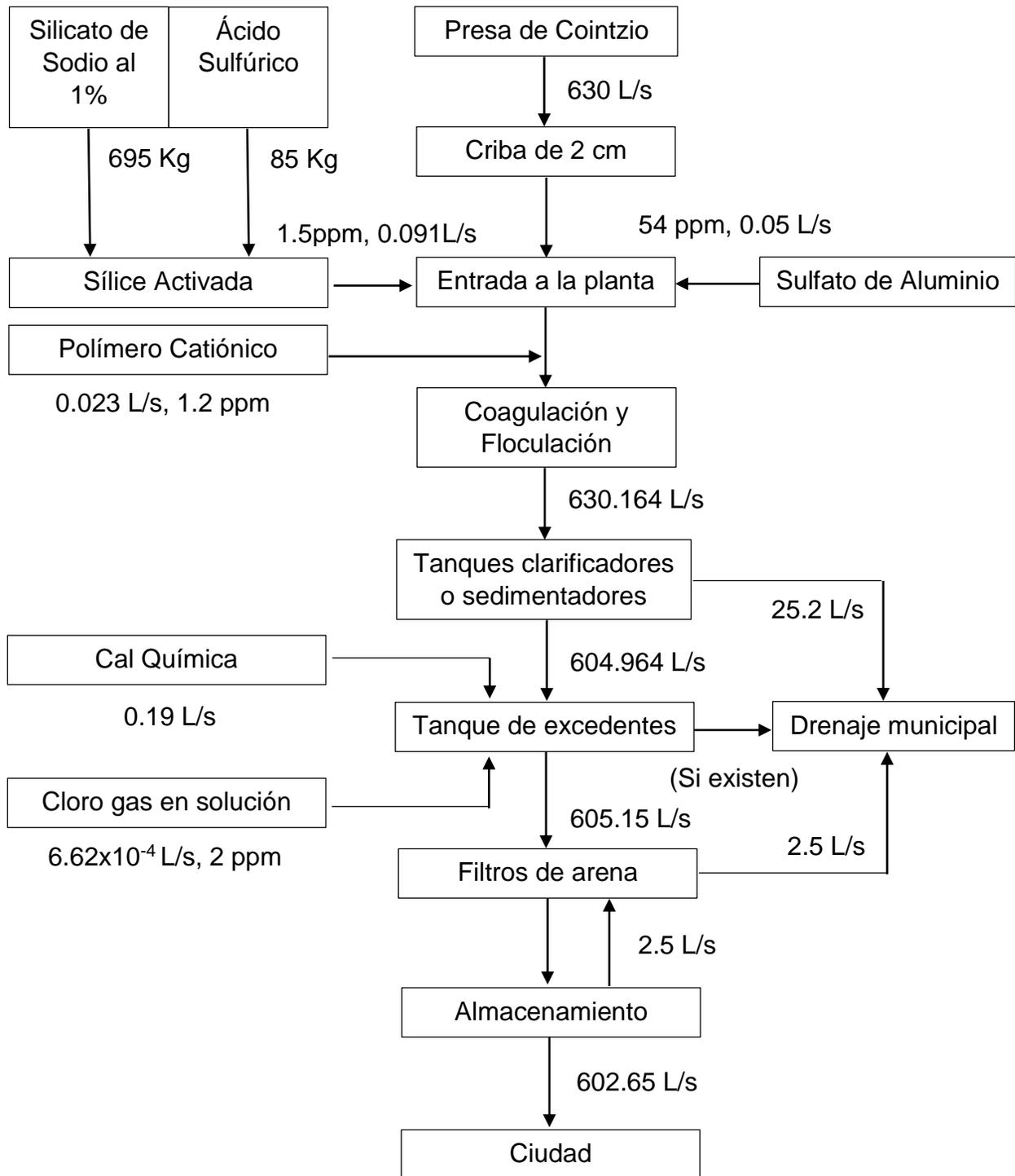


Figura 1.10.- Diagrama de bloques del proceso de potabilización de la planta potabilizadora Vista Bella.

Como se puede observar en la figura 1.10., el efluente de lodos residuales (LR) que se descarga directamente al drenaje municipal comprende tanto la purga de lodos provenientes de los tanques sedimentadores (PS) como la sección de retrolavado de los filtros (RF).

$$PS + RF = LR \quad (1.1)$$

$$25.2 \text{ L/s} + 2.5 \text{ L/s} = \mathbf{27.7 \text{ L/s}}$$

Para poder determinar la cantidad de sólidos que se remueven en promedio anualmente en consecuencia del proceso de potabilización, es necesario conocer la cantidad de sólidos suspendidos totales previo al proceso de potabilización y al terminar el mismo. Estos datos son calculados por el organismo del OOAPAS a lo largo del año.

$$SST = ST + SDT \quad (1.2)$$

Donde:

SST: Son los sólidos suspendidos totales en mg/L.

ST: Son los sólidos totales en mg/L.

SDT: Son los sólidos disueltos totales en mg/L.

Sólidos suspendidos totales, inicio = 2=90.75 mg/L – 75.75 mg/L=**215 mg/L.**

Sólidos suspendidos totales, final =144.31 mg/L – 95.01 mg/L=**49.3 mg/L.**

La cantidad de remoción de los Sólidos suspendidos totales debido al proceso de potabilización de la planta potabilizadora Vista Bella son:

$$\text{Remoción} = 215 \text{ mg/L} - 49.3 \text{ mg/L} = \mathbf{165.7 \text{ mg/L.}}$$

Como el flujo promedio de operación de la planta potabilizadora es de 630 L/s, la remoción de sólidos es:

$$\text{Remoción} = \left(\frac{165.7 \text{ mg}}{\text{L}} \right) \left(\frac{630 \text{ L}}{\text{s}} \right) = 104,391 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

También se tiene que sumar la cantidad de cal que se adiciona al proceso, la cual es de 6950 mg/s, teniendo como resultado:

$$\text{Remoción} = 104,391 \frac{\text{mg}}{\text{s}} + 6950 \frac{\text{mg}}{\text{s}} = 111,341 \frac{\text{mg}}{\text{s}} = 3511.3 \frac{\text{Ton}}{\text{año}}$$

Esta cantidad de remoción de sólidos, indica que anualmente se vierten 3511.3 Toneladas de un residuo sólido arcilloso (RSA) directamente sobre el río Chiquito de Morelia sin previo tratamiento, provocando una serie de efectos negativos al ecosistema.

1.3.- JUSTIFICACIÓN.

La purga de lodos desechada por la planta potabilizadora Vista Bella al drenaje municipal de la ciudad de Morelia afecta a los principales cuerpos de agua de la misma. Tal es el caso de los ríos Chiquito y Grande, ya que la purga de lodos contiene agua residual con un pH=6, agentes coagulantes y un gran contenido de sólidos suspendidos. Un medio ácido provoca la disminución de las bacterias presentes en estos cuerpos de agua, debido a que la mayoría de ellas coexisten en valores de pH del orden de 6.5 a 8.5. Los sólidos suspendidos además de influir en el azolvamiento de los ríos, impiden el paso de la luz solar, generando una disminución del oxígeno disuelto. Estos dos parámetros evitan que las bacterias lleven a cabo el proceso de autodepuración natural en las aguas residuales.

La presencia de esta purga de lodos no solo afecta de manera directa la economía de la población de la ciudad de Morelia, ya que estas aguas se usan como sistema de riego de cultivos del valle Morelia-Querendaro, deteriorando así, la calidad de los cultivos, para fines de consumo y exportación, sino también a la comunidad pesquera del municipio de Cuitzeo, debido al daño generado a la calidad de la especie acuática de su laguna, provocando en algunos casos la migración de algunas familias.

Por estas razones, el presente proyecto pretende aprovechar el residuo sólido arcilloso (RSA) presente en la purga de lodos desechada por la planta potabilizadora "Vista Bella" que hoy en día actúa como un contaminante en el río Chiquito de la ciudad de Morelia, a través de la generación de alternativas de aprovechamiento en base a la

elaboración de productos de alfarería, como son el caso de las baldosas cerámicas, ladrillos y una pasta cerámica. Siendo así en un futuro, una gran fuente de empleo para la elaboración de estos productos y evitar así, los efectos negativos provocados por dicho material residual.

1.4.- HIPÓTESIS.

Debido a la adición del $Al_2(SO_4)_3$ y la sílice activada en el proceso de potabilización de la planta potabilizadora Vista Bella, será factible el aprovechamiento del material residual vertido sobre el río Chiquito de la ciudad de Morelia, por medio de la elaboración de productos de alfarería con mejores propiedades mecánicas que algunos productos alfareros comerciales como son el caso de las baldosas cerámicas y los ladrillos, mediante un procesamiento cerámico adecuado.

1.5.- OBJETIVOS.

Objetivo general.

Evaluar tres alternativas de aprovechamiento a partir de un residuo sólido arcilloso (RSA) proveniente del agua residual de la planta potabilizadora "Vista Bella".

Objetivos particulares.

1. Evaluar las características del material arcilloso presente en la purga de lodos de la planta potabilizadora Vista Bella mediante análisis fisicoquímicos y mecánicos.
2. Determinar la cantidad necesaria del RSA, para adicionar a un pavimento de gres rojo (GR), con la finalidad de identificar la temperatura de cocción óptima para la obtención de baldosas cerámicas de calidad, analizando sus propiedades mecánicas.
3. Determinar las condiciones de procesamiento adecuadas para la elaboración de ladrillos artesanales en base al RSA, analizando sus propiedades mecánicas al compararlos con ladrillos comerciales de la ciudad de Morelia mediante la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013.
4. Determinar la composición necesaria para generar una pasta cerámica, en base al RSA, adicionando un barro natural (BN) y caolín EPK

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, la purga de lodos desechada por la planta potabilizadora Vista Bella, presenta un elevado contenido de una arcilla ferruginosa en estado coloidal que puede ser factible tanto su recuperación como su aprovechamiento en base a un procesamiento cerámico adecuado.

2.1.- MATERIALES CERÁMICOS.

Entre las decenas de posibles definiciones, un material cerámico se puede describir eficazmente como *“cualquier producto, que posee una forma, compuesto por materias primas inorgánicas no metálicas (tanto minerales como sintéticas), que a partir de un estado incoherente de polvo se transforma mediante varias operaciones en un producto semielaborado, el cual, por cocción, se convierte en un objeto sólido, que posee una estructura parcialmente cristalina y parcialmente vítrea”* (ATC, 2004). En cuanto a sus aplicaciones, van desde la fabricación de ladrillos y tejas hasta los imanes permanentes de los dispositivos electrónicos, los láseres, o las losetas que cubren los ingenieros espaciales. Posterior al proceso de cocción, prácticamente todas las transformaciones y/o combinaciones son permanentes. Cuando se trata de materias inorgánicas, es necesario tener presente el grado de abundancia de los elementos más comunes en la corteza terrestre, ya que para elaborar la cerámica, será conveniente y ventajoso utilizar las materias primas más frecuentes y económicas (Kingery, 2013).

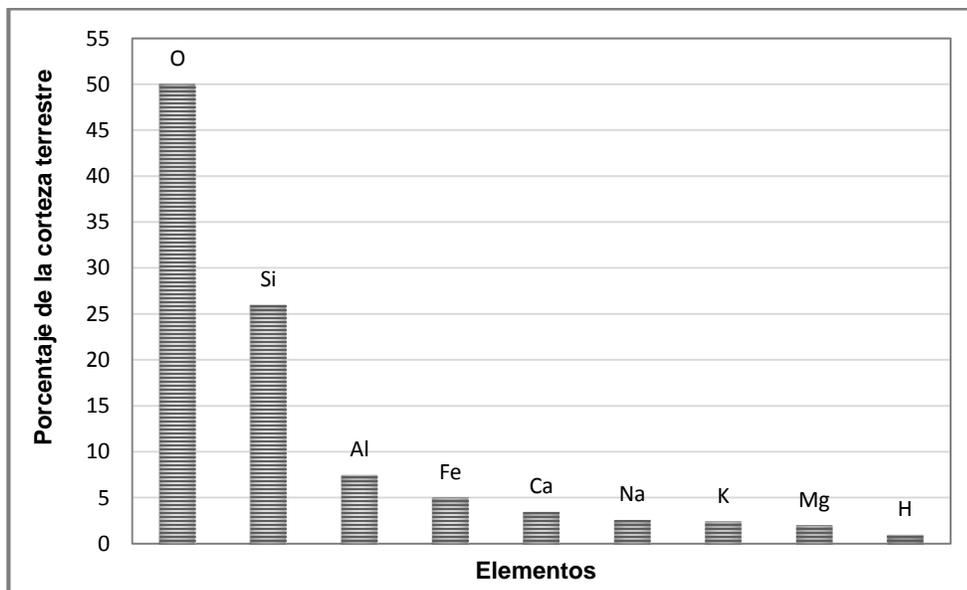


Figura 2.1.- Elementos más comunes en la corteza terrestre.

En la figura 2.1. Se pueden apreciar los principales elementos en la corteza terrestre, en lo que destacan el O, Al y Si, además de diferentes contenidos de Fe, Ca, Mg, Na y K, siendo los primeros 8 elementos más abundantes en la naturaleza y los elementos siempre presentes en una pasta cerámica (Kingery, 2013).

1 H Hidrógeno 1.008																	18 He Helio 4.003
3 Li Litio 6.941	4 Be Berilio 9.012											5 B Boro 10.811	6 C Carbono 12.011	7 N Nitrógeno 14.007	8 O Oxígeno 15.999	9 F Flúor 18.998	10 Ne Neón 20.180
11 Na Sodio 22.990	12 Mg Magnesio 24.305											13 Al Aluminio 26.982	14 Si Silicio 28.086	15 P Fósforo 30.974	16 S Azufre 32.066	17 Cl Cloro 35.453	18 Ar Argón 39.948
19 K Potasio 39.098	20 Ca Calcio 40.078	21 Sc Escandio 44.956	22 Ti Titanio 47.88	23 V Vanadio 50.942	24 Cr Cromo 51.996	25 Mn Manganeso 54.938	26 Fe Hierro 55.845	27 Co Cobalto 58.933	28 Ni Níquel 58.693	29 Cu Cobre 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Galio 69.723	32 Ge Germanio 72.61	33 As Arsénico 74.922	34 Se Selenio 78.09	35 Br Bromo 79.904	36 Kr Kriptón 84.80
37 Rb Rubidio 84.468	38 Sr Estroncio 87.62	39 Y Itorio 88.906	40 Zr Zirconio 91.224	41 Nb Niobio 92.906	42 Mo Molibdeno 95.94	43 Tc Tecnecio 98.907	44 Ru Rutenio 101.07	45 Rh Rodio 102.906	46 Pd Paladio 106.42	47 Ag Plata 107.868	48 Cd Cadmio 112.411	49 In Indio 114.818	50 Sn Estaño 118.71	51 Sb Antimonio 121.760	52 Te Telurio 127.6	53 I Yodo 126.904	54 Xe Xenón 131.29
55 Cs Cesio 132.905	56 Ba Bario 137.327	57-71 Lantánido	72 Hf Hafnio 178.49	73 Ta Tantalio 180.948	74 W Wolframio 183.85	75 Re Renio 186.207	76 Os Osmio 190.23	77 Ir Iridio 192.22	78 Pt Platino 195.08	79 Au Oro 196.967	80 Hg Mercurio 200.59	81 Tl Talio 204.383	82 Pb Plomo 207.2	83 Bi Bismuto 208.980	84 Po Polonio [209]	85 At Astato [209]	86 Rn Radón [222]
87 Fr Francio [223]	88 Ra Radio [226]	89-103 Actínido	104 Rf Rutherfordio [261]	105 Db Dubnio [262]	106 Sg Seaborgio [266]	107 Bh Bohrio [264]	108 Hs Hassio [269]	109 Mt Meitnerio [268]	110 Ds Darmstadtio [269]	111 Rg Roentgenio [272]	112 Cn Copernicio [277]	113 Uut Ununtrio [278]	114 Fl Flerovio [289]	115 Uup Ununpentio [289]	116 Lv Livermorio [293]	117 Uus Ununseptio [294]	118 Uuo Ununoctio [294]
57 La Lantano 138.904	58 Ce Cerio 140.115	59 Pr Praseodimio 140.908	60 Nd Neodimio 144.24	61 Pm Prometio 144.913	62 Sm Samario 150.36	63 Eu Europio 151.966	64 Gd Gadolinio 157.25	65 Tb Terbio 158.925	66 Dy Disprosio 162.50	67 Ho Holmio 164.930	68 Er Erbio 167.26	69 Tm Terbio 168.934	70 Yb Iturbio 173.04	71 Lu Lutecio 174.967			
89 Ac Actinio [227]	90 Th Torio [232]	91 Pa Protactinio [231]	92 U Uranio [238]	93 Np Neptunio [237]	94 Pu Plutonio [244]	95 Am Americio [243]	96 Cm Curcio [247]	97 Bk Berkelio [247]	98 Cf Californio [251]	99 Es Einsteinio [254]	100 Fm Fermio [257]	101 Md Mendelevio [258]	102 No Nobelio [259]	103 Lr Lawrencio [262]			

Figura 2.2.- Elementos cerámicos de la tabla periódica.

Se puede apreciar en la figura 2.2., el número reducido de los elementos de interés relacionados con un cuerpo cerámico (Al, Si, Ca, Mg, Fe, Ti, Na y K); incluso cuando se consideran los principales constituyentes de los esmaltes (Pb, Zn, Sn, Zr, Cr, Ni, V, B, entre otros), resulta evidente cuan estrecho es el intervalo de los elementos necesarios para caracterizar un material de cerámica tradicional.

2.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES CERÁMICOS.

La clasificación de los materiales cerámicos puede efectuarse atendiendo a diversos parámetros. Así, pueden dividirse entre los materiales iónicos y materiales covalentes, aunque no es una clasificación muy útil por la dificultad de discernir a que grupo pertenecen muchos de los compuestos. También pueden dividirse entre

cerámicas tradicionales y cerámicas avanzadas. Se consideran cerámicas tradicionales a las derivadas de las arcillas: porcelanas, ladrillos, baldosas, así como los vidrios y los refractarios (Morales, 2005), mientras que las cerámicas avanzadas son las que poseen propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas, donde a diferencia de las cerámicas tradicionales, el control químico y estructural son de suma importancia.

En la actualidad, suelen clasificarse en los siguientes grupos: Materiales estructurales de las arcillas, porcelanas, vidrios, refractarios, cementos, abrasivos y cerámicas avanzadas. Dentro de este último grupo se incluirían también materiales cerámicos, magnéticos y ópticos. En cualquier caso, dada la gran variedad de compuestos y aplicaciones, cualquier intento de clasificación estricta es inútil, dado que siempre quedan materiales que no pueden ser ubicados claramente en ninguno de los grupos.

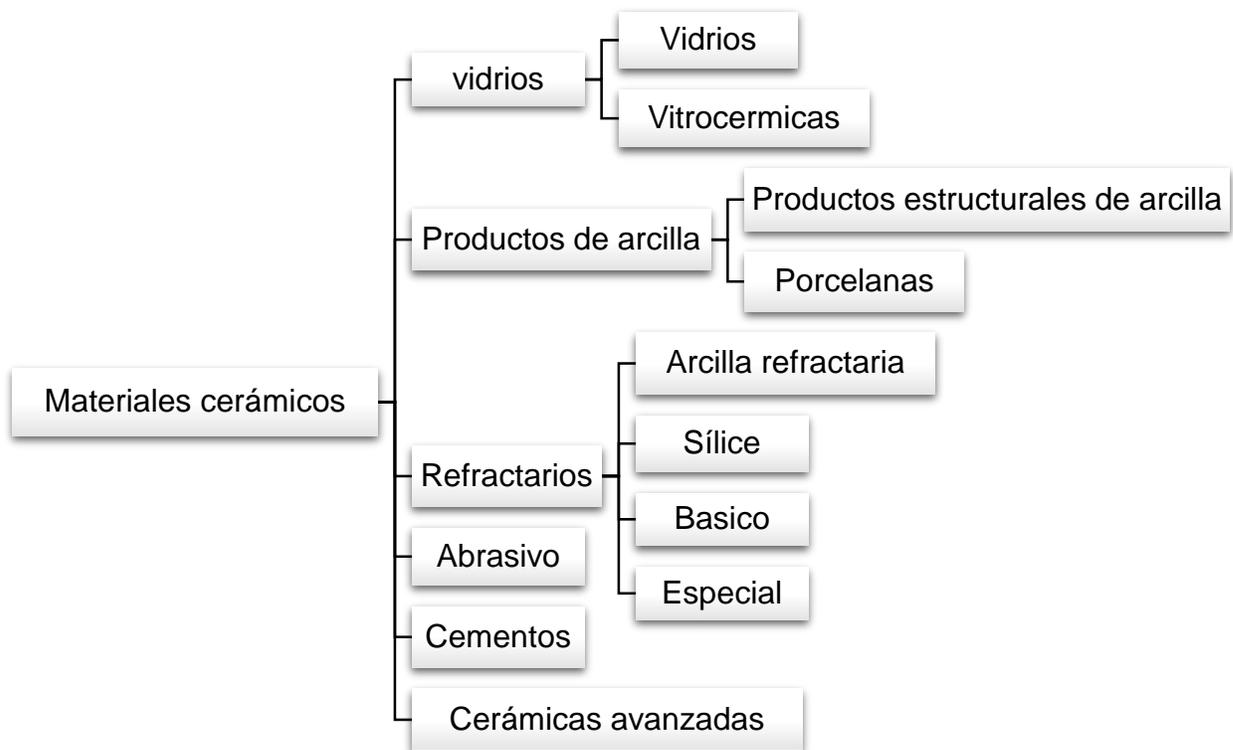


Figura 2.3.- Clasificación de los materiales cerámicos.

2.3.- CERÁMICA TRADICIONAL.

Las cerámicas tradicionales pueden definirse como aquellas que tienen como base a los silicatos, principalmente los materiales arcillosos, los cementos y los vidrios de silicatos. Entre las cerámicas tradicionales se encuentran: las vasijas de barro cocido, la porcelana, los ladrillos, tejas, los vidrios, entre otros (García, 1994).

Los materiales cerámicos tradicionales son elaborados con materias primas de yacimientos naturales (con o sin proceso, para eliminar impurezas) tales como los materiales arcillosos. El conformado puede ser manual y el proceso de cocción se realiza en hornos tradicionales como horno túnel, hornos ascendentes, entre otros.

En cuanto a la microestructura, la mayoría de los materiales cerámicos tradicionales presentan un tamaño de grano grueso y una alta porosidad. La densidad llega únicamente a alcanzar valores del orden del 10 al 20% menor que la densidad teórica del material.

Este tipo de compuestos están constituidos por tres elementos básicos: arcilla, sílice y feldespato.

Los materiales arcillosos proporcionan suficiente plasticidad para obtener una forma definida. Estos aportan Al, Si y parte de Ca, Fe y Ti.

Por otra parte, los materiales fundentes como es el caso del feldespato poseen la característica de generar fases vítreas en el proceso de cocción, las cuales actúan como ligantes entre partículas y promueven las reacciones sólido-sólido y son portadores de Na, K, Al y Si.

Finalmente en el caso de la sílice denominado como material inerte, permite obtener prestaciones concretas, aportando mayoritariamente Ca, Mg y Si.

La proporción de Mg y Ca pueden generar un efecto importante, el cual conduce a una contracción diferencial en cocido: es decir, cuanto más elevado es el contenido de estos elementos, más pequeño resulta este efecto, ya que se forman silicatos de calcio y magnesio que aumentan su volumen con la temperatura, en contraste con la contracción debida al colapso de las fases silicatadas (ATC, 2004).

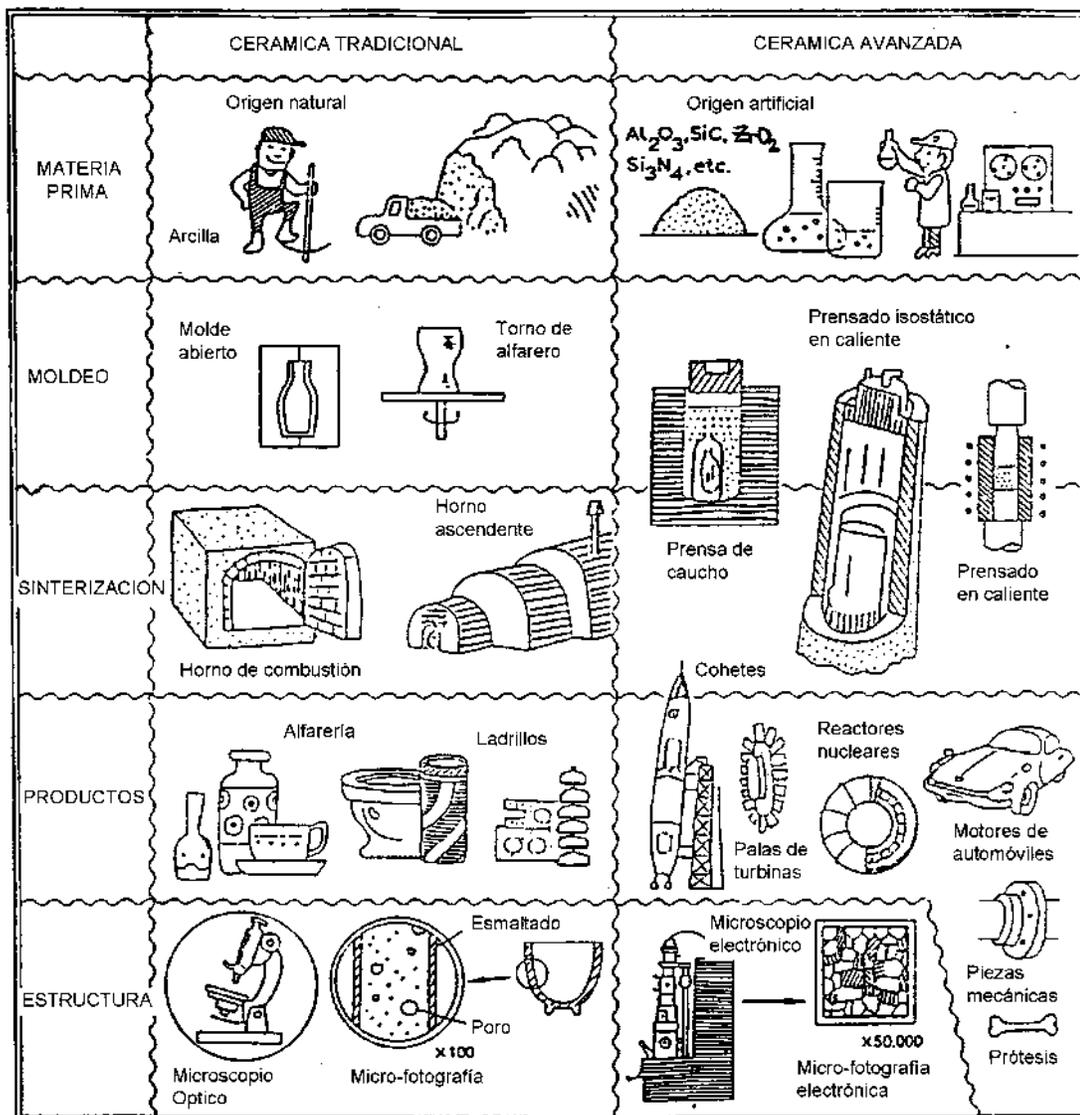


Figura 2.4.- Diferencias entre la cerámica tradicional y la cerámica avanzada.

2.4.- ARCILLAS.

Las arcillas, materiales de primera importancia en la industria cerámica, son rocas extremadamente variables, constituidas por diferentes minerales, generalmente de naturaleza silicatada, sedimentables en forma de láminas, fibras, bandas, entre otros., predominantemente asociadas a otros minerales de origen detrítico (ATC,2004).

La variedad es extremadamente amplia ya que son innumerables las combinaciones de roca inicial, condiciones morfológicas y climáticas, tipo de erosión, alteración, condiciones de transporte y sedimentación, estado y tiempo del yacimiento.

El término “arcilla” encierra en sí mismo un significado bastante ambiguo que requiere varias acepciones para su comprensión (tamaño de partícula, mineralogía, petrografía, propiedades físicas, entre otras.). Las arcillas son fruto de los agentes de meteorización físico-químicos actuantes sobre la roca madre original y se las puede considerar como unas acumulaciones naturales, consolidadas o no, de tamaño de grano fino ($< 1 \mu\text{m}$ según los químicos que estudian los coloides, $< 2 \mu\text{m}$ según los mineralogistas e investigadores del suelo, y $< 4 \mu\text{m}$, según los sedimentólogos) (Díaz y Torrecillas, 2002) y constituidas por variados minerales arcillosos (silicatos alumínicos hidratados, con iones principalmente de Mg, Fe, K y Na) y otros minerales acompañantes como el cuarzo, los feldspatos, los carbonatos, etc. Además, salvo excepciones, poseen un comportamiento físico muy peculiar frente al agua, la cual es la plasticidad, e incluso endurecen cuando son secadas o sometidas a tratamientos térmicos a alta temperatura.

Como se puede observar, en la definición del término arcilla intervienen tres aspectos fundamentales como son el tamaño de grano, la composición mineralógica y, por ejemplo, entre otras, una propiedad física fundamental, su plasticidad en contacto con el agua. De hecho, la definición más reciente del concepto “arcilla, según la nomenclatura de los comités de la AIPEA y de la Clay Minerals Society (CMS) es la siguiente: *“Naturally occurring material composed primarily of fine-grained minerals, which is generally plastic at appropriate water contents and will harden when dried or fired”*, “Materia prima natural con una constitución de partida compuesta por minerales de tamaño fino, que se comporta plásticamente con el agua y que se endurece al ser secada o calentada” (Guggenheim S. y Martin R. T., 1995).

Estructura de los minerales arcillosos.

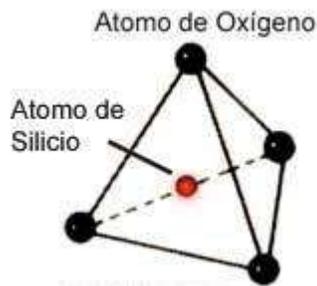
La estructura molecular de estos minerales incluye la combinación de unidades de repetición tetraédricas (coordinación 4), con un átomo de silicio rodeado de 4 oxígenos, y octaédricas (coordinación 6), con un átomo de aluminio, posiblemente sustituido por magnesio o hierro, rodeado de 6 oxígenos.

Entre los elementos más abundantes de la corteza terrestre, el oxígeno es claramente el de mayor difusión y presencia, y también uno con radio iónico más grande.

Tabla 2.1.- Radios iónicos de los elementos más abundantes de la corteza terrestre.

Ión	Radio iónico
O^{2-}	1.3
Si^{4+}	0.4
Al^{3+}	0.6
Fe^{3+}	0.7
Ti^{2+}	0.6
Ca^{2+}	1.0
Mg^{2+}	0.8
Na^{+}	1.0
K^{+}	1.3

En la tabla 2.1. Se observan los radios iónicos de diferentes elementos, se observa como el silicio presenta justo el volumen para poderse situar en el centro de un poliedro regular de oxígenos compacto con una energía potencial mínima, de coordinación 4, es decir de tetraedro $[SiO_4]^{4-}$.

**Figura 2.5.-** Nesosilicatos, formados a partir de tetraedros independientes.

Por lo que se refiere a la configuración octaédrica, de coordinación 6, esta se da a partir de la ordenación regular de los iones de oxígeno, o más habitualmente, por los hidroxilos (OH^-), que presentan el mismo radio, alrededor de un ión de Al^{3+} , que posee las dimensiones idóneas para incorporarse al centro de esta estructura (ATC, 2004).

Tanto los tetraedros en base Si como los octaedros en base Al pueden combinarse entre sí, formando unidades de repetición por enlaces de vértice-vértice, borde-borde, cara-cara, dando lugar a diferentes unidades de repetición estructural de varias formas como se muestra en la figura 2.6.

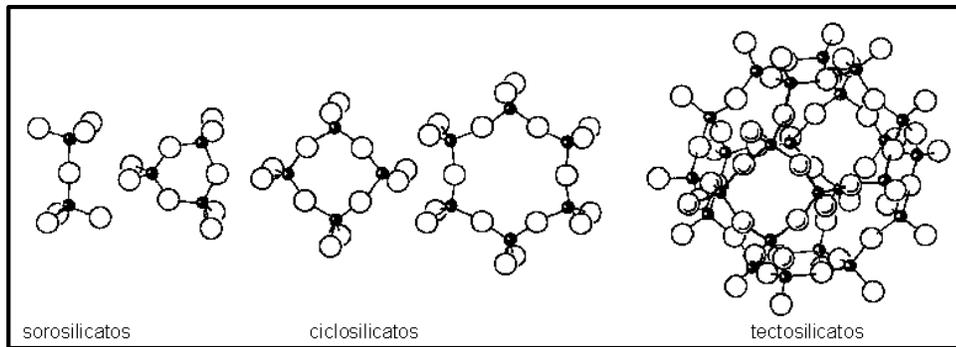


Figura 2.6.- Estructura de los silicatos.

Será entonces posible, la combinación de unidades estructurales tetraédricas y octaédricas, dispuestas regularmente en estratos superpuestos, con unas distancias bien definidas entre los estratos, y extremadamente importantes para la determinación de las características macroscópicas de los minerales arcillosos individuales.

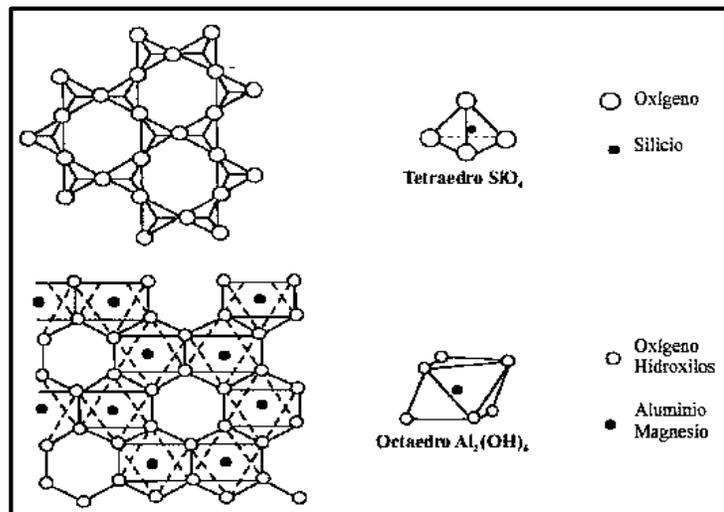


Figura 2.7.- Representación esquemática de las capas tetraédricas (superior) y octaédrica (inferior).

La configuración más sencilla será la de los estratos, con la alternativa de unidades compuestas de tetraedros (T) unidos de dos en dos por un vértice $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, y de estratos octaédricos (O) (figuras 2.8 y 2.9.) donde se puede observar la agrupación de la caolinita y la montmorillonita (Putnis, 1992).

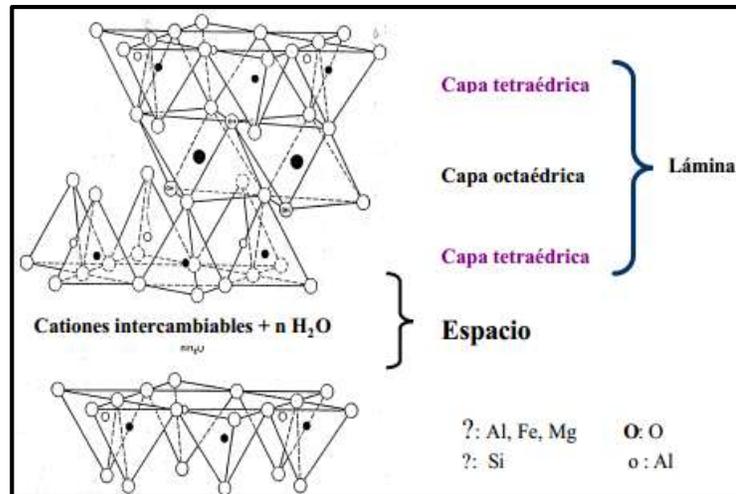


Figura 2.8.- Estrato T-O-T.

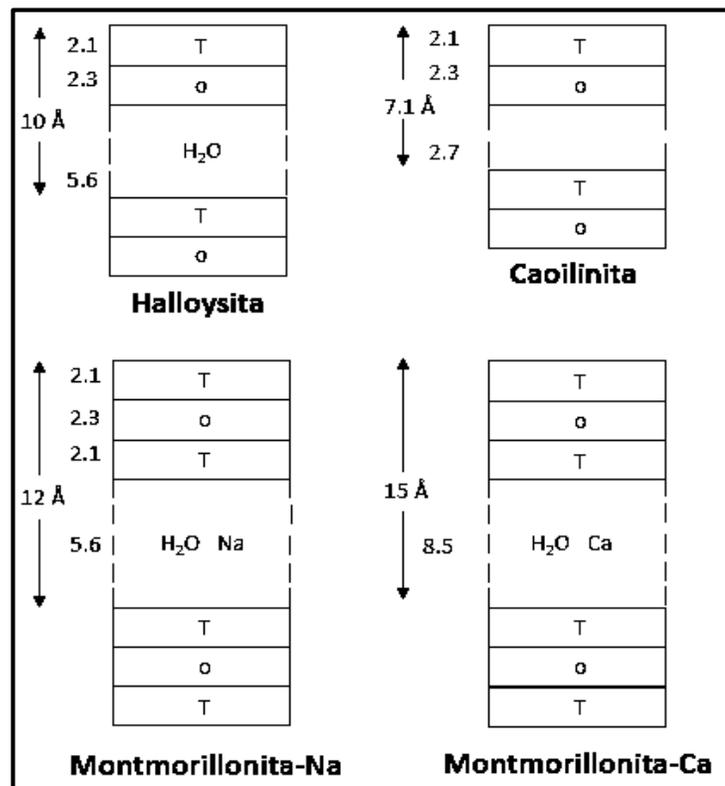


Figura 2.9.- Posibles ordenaciones estructurales de las arcillas.

Esta se puede escribir con la formula bruta $(OH)_3Al_2(OH)Si_2O_5$ o, mejor, $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, que proporciona una mejor correspondencia con el análisis químico, expresado en óxidos. Dicha molécula es eléctricamente neutral, y las partículas de las cuales se compone tendrán espesores también cercanos a 1μ , y las más finas cercanas

a 0.005μ , es decir, el equivalente de 7 láminas elementales, para formar cristales iónicos de diferentes magnitudes.

Cuando se incrementa la complejidad de los minerales arcillosos, se pueden tener estratos tetraédricos intercalados entre estratos octaédricos, en estructuras de tres estratos, como para el talco y la pirofilita y por ejemplo, la illita, del grupo de las micas donde un triple estrato tetraedro/octaedro/tetraedro se asocia a otro octaedro y así, sucesivamente. (Figura 2.10.)

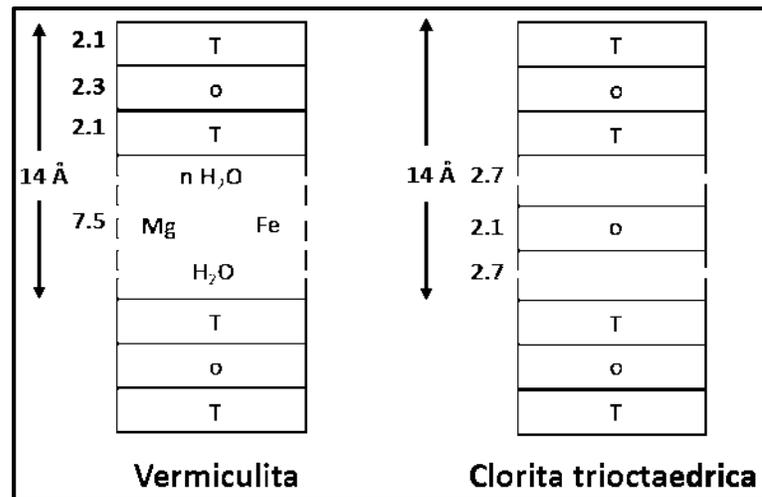


Figura 2.10.- Conformación de los filosilicatos.

Clasificación de las arcillas.

Teniendo en cuenta lo anterior, es evidente que las formaciones arcillosas pueden ser muy distintas en cuanto a su composición, grado de consolidación, edad, entre otros factores. Por lo tanto es necesario disponer de sistemas de clasificación, algunos de los cuales prescindiendo de parámetros estructurales y mineralógicos, son de un uso bastante común.

Este modo de organizar los diferentes tipos de láminas arcillosas es el que sirve principalmente de criterio distinto para la clasificación de los grupos de minerales arcillosos: la posibilidad de tener, entre laminas, el espacio suficiente para la introducción de una o más moléculas de agua (agua intersticial o interlaminar), da lugar a otra clasificación: tecnológica, en este caso, ya que la presencia de esta agua influye de

manera importante en la posibilidad de desplazamiento de los diferentes estratos, cuando se someten a esfuerzos externos, y por lo tanto, en definitiva, en la plasticidad del material.

De esta manera resulta posible formular una clasificación simplificada de los principales minerales arcillosos.

Tabla 2.2.- Clasificación de los minerales arcillosos en base al contenido de tetraedros y octaedros.

Tetraedro/Octaedros	Grupo mineral	Espacio reticular (Å)
No cristalino	ALÓFANOS	----
1/1	CAOLINITA (Nacrita, Dickita)	7.2
1/1	HALLOYSITA	7.2-10.1
2/1	PIROFILITA – TALCO	10
2/1	MICAS (ILLITA)	Variable
2/1	ESMECTITAS (Montmorillonita etc.)	10-21
	VERMICULITA	10-14
2/1/1	CLORITAS	14.1

En la tabla 2.2., se muestran los diferentes espacios reticulares de diferentes tipos de arcillas como por ejemplo la arcilla Halloysita que se clasifica por su espacio reticular en Halloysita 7Å y Halloysita 10 Å.

Existen decenas de maneras de clasificar a las arcillas algunas dependiendo de su origen, plasticidad, punto de fusión, porosidad, color, entre otras propiedades.

Por ejemplo, en base a su origen (Díaz y Torrecillas, 2002) las arcillas se clasifican en:

- Arcillas caolines.
- Arcillas refractarias.
- Arcillas de alfarería.
- Arcillas para ladrillos y tejas.

En base a su plasticidad (Barry, 1993) se clasifican en:

- Arcilla natural.
- Arcilla de alfarero.
- Caolín.
- Arcilla refractaria.
- Arcilla de gres.
- Arcilla de bola.
- Bentonita.

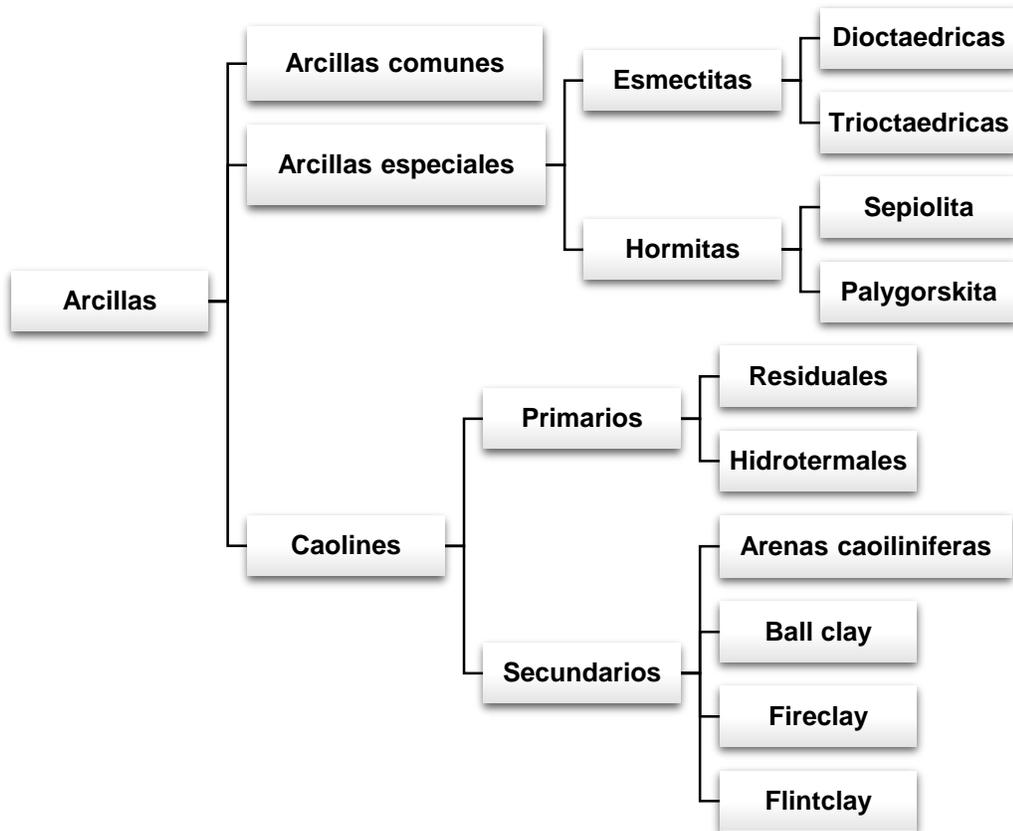


Figura 2.11.- Esquema general de clasificación de los materiales arcillosos de aplicación cerámica (Díaz y Torrecillas, 2002).

En la figura 2.11., los minerales del Grupo del caolín lo forman la caolinita (mineral más común del Grupo), la dickita, la nacrita, la halloysita 10Å y la halloysita 7Å (metahalloysita).

Propiedades de las arcillas.

- **Superficie específica.**

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g . Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

En la tabla 2.4., se observa que la halloysita cuenta con un área superficial específica del orden de $60 \text{ m}^2/\text{g}$.

Tabla 2.3.- Área superficial específica de diferentes arcillas.

Arcilla	Área superficial específica (m^2/g)
Caolinita de elevada cristalinidad	15
Caolinita de baja cristalinidad	50
Halloysita	60
Ilita	50
Montmorillonita	80-300
Sepiolita	100-240
Palygorskita	100-200

- **Capacidad de intercambio iónico.**

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar fácilmente los iones localizados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes (Juárez y Rodríguez, 2005). La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula. Además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina.

Tabla 2.4.- Capacidad de intercambio iónico de diferentes arcillas.

Tipo de arcilla	Capacidad de intercambio iónico (meq/100g)
Caolinita	3 - 5
Halloysita	10 - 40
Ilita	10 - 50
Clorita	10 - 50
Vermiculita	100 - 200
Montmorillonita	80 - 200
Sepiolita-palygorskita	20 - 35

- **Capacidad de absorción.**

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y palygorskita).

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

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

- **Tamaño de partícula.**

La estructura laminar y el tamaño inferior a las dos micras de los granos de los minerales arcillosos tienen gran influencia en la plasticidad ya que se produce un fenómeno físico de retención de agua con aumento de volumen que actúa como lubricante haciendo deslizar a las partículas entre sí. Este aumento de volumen puede llegar a ser del 200 %.

Debido a su pequeño tamaño de partícula, las arcillas se pueden mantener en suspensión en el agua un cierto tiempo aun estando está en reposo (Fluidificación). Posteriormente se depositan en estratos del mismo modo en que se formó la roca original.

- **Tixotropía.**

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

- **Refractariedad.**

Todas las arcillas son refractarias, es decir resisten los aumentos de temperatura sin sufrir variaciones, aunque cada tipo de arcilla tiene una determinada temperatura de cocción.

- **Porosidad.**

El grado de porosidad varía según el tipo de arcilla. Esta depende de la consistencia más o menos compacta que adopta el cuerpo cerámico después de la

cocción. Las arcillas que se someten a un proceso de cocción a baja temperatura tienen un índice más elevado de absorción debido a que son más porosas.

- **Color.**

Las arcillas presentan coloraciones diversas después del proceso de cocción debido a que presentan óxidos de hierro, carbonato calcio, entre otros compuestos.

- **Plasticidad.**

La característica física más significativa de las arcillas es la plasticidad, que es la capacidad de deformarse ante un esfuerzo mecánico conservando la deformación al retirarse la carga (Vázquez, 2005). Esta propiedad de las arcillas depende fundamentalmente del contenido de agua, si está seca no es plástica, se disgrega, y con exceso de agua se separan las láminas. Depende también del tamaño de partícula y de la estructura laminar. Cuando esta convenientemente humedecida puede adoptar cualquier forma. Esta propiedad se debe a que el agua forma una “envoltura” sobre las partículas laminares, produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material (Barry, 2001).

2.5.- PROCESAMIENTO CERÁMICO.

El procesamiento cerámico es el conjunto de operaciones por las que, a partir de uno o varios polvos de partida, se llega a obtener una pieza de la forma y estructura deseadas (Onoda y Hench, 1988). La fabricación de un producto requiere el establecimiento de una ruta que permita ejercer un adecuado control en cada una de las etapas del proceso, ya que las propiedades del sistema en cada etapa determinan todas las restantes (Wang, 1978). La secuencia típica de fabricación de un producto cerámico se muestra en la figura 2.12.

El principal objetivo del procesamiento cerámico es profundizar en el control de los parámetros fisicoquímicos involucrados en cada una de las etapas del proceso con el fin de reducir en lo posible la presencia de defectos (Lange, 1989).

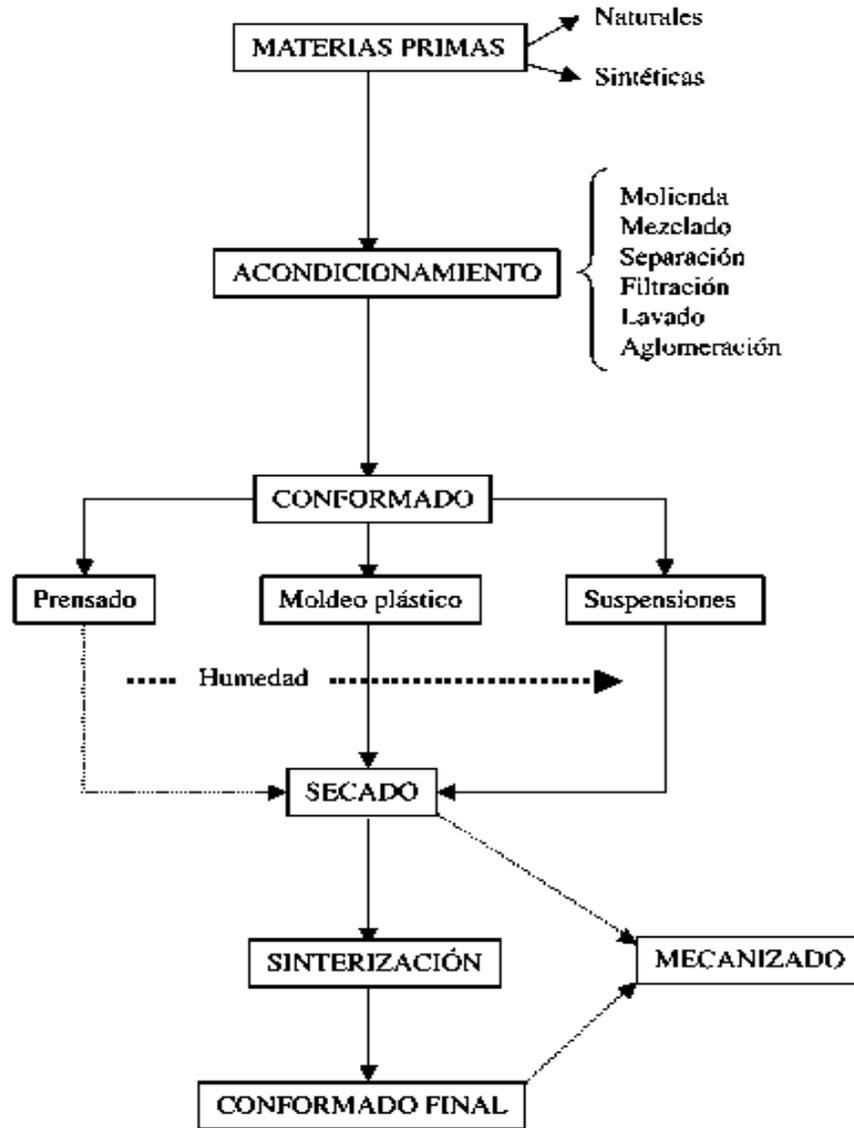


Figura 2.12.- Principales etapas del procesamiento cerámico.

Materias primas.

La obtención de las materias primas se puede realizar de manera natural (extracción de yacimientos naturales) o de manera sintética. El procesamiento cerámico parte de estas materias primas, que normalmente precisan de una serie de tratamientos

de adecuación o beneficio, para su procesamiento. Los tratamientos a los que se someten los polvos dependen de la forma y tamaño de la pieza a obtener y de la uniformidad microestructural deseada.

Molienda.

El proceso de molienda no pretende solamente obtener pequeñas partículas de un tamaño de partida aproximado, sino más bien de producir un material con un determinado diámetro medio de partícula y una distribución granulométrica adecuada para el producto que se pretenda obtener (ATC, 2004).

En general, son varios los objetivos finales del proceso de reducción de los sólidos, pero se puede considerar que el aumento de la superficie específica de los materiales permite conseguir una elevada homogeneidad de la masa y, además, seguido de la obtención de las reacciones químicas más completas en menos tiempo.

Acondicionamiento.

Los materiales de partida empleados dependen lógicamente de las propiedades requeridas para la fabricación de la pieza, pero en general se tratara de una aglomeración de diferentes partículas. Estas, y otros dispositivos necesarios en cada caso, como los aglutinantes o lubricantes, deben ser en primer lugar mezclados, proceso que puede realizarse en seco o más frecuentemente en húmedo. El medio de la mezcla generalmente es el agua, aunque en casos particulares pueden utilizarse otros medios, como la cera en las cerámicas de alto contenido en alúmina.

Conformado.

Muchos procesos de conformado utilizados en otras áreas, como son los métodos de deformación o de fusión comúnmente utilizados en metalurgia, no son aceptables en la cerámica (Reed, 1995).

El polvo cerámico con la distribución granulométrica y forma adecuadas, así como propiamente acondicionado, está listo para ser conformado en las formas requeridas. Se transforma el producto alimentado en un producto en verde que posee una forma, dimensiones y superficie controladas, así como una densidad y microestructura

determinadas. Estas dos últimas características deben ser cuidadosamente controladas con el fin de obtener un producto final de calidad, ya que los defectos significativos introducidos durante el conformado, en general, no son eliminados durante la cocción.

La resistencia del producto en verde debe ser la suficiente para poder manejar el producto y, en su caso, realizar alguna operación de acabado en verde.

Para el conformado de los materiales, se utilizan procesos generalmente en frío, como el **prensado**, el **moldeo en barbotina** y la **extrusión**.

El prensado consiste en la compactación bajo presión de las materias primas pulverizadas, a las que normalmente se añaden pequeñas cantidades de agua y/o pegamentos y lubricantes orgánicos. La mezcla adecuada de partículas de diferentes tamaños permite reducir al máximo los espacios intergranulares, en tanto que el medio húmedo facilita la distribución de las partículas disminuyendo el rozamiento. Además, y a diferencia de lo que ocurre en la metalurgia en polvo, no se producen deformaciones plásticas en las partículas. Fundamentalmente, se aplican tres diferentes procesos de prensado: el prensado en seco o uniaxial, el prensado isostático (generalmente hidrostático) y el prensado en caliente. En las dos primeras, después del prensado, las piezas son sinterizadas para que la pieza adquiera la dureza y textura requeridas (ATC, 2004).

En el **prensado** (figura 2.13.), el polvo es compactado en una matriz metálica aplicando presión en una sola dirección. Es un método sencillo y barato, que permite producir rápidamente una gran variedad de piezas sencillas. Aunque con poca uniformidad y escasa precisión. Se emplea básicamente en la producción de refractarios y dieléctricos.

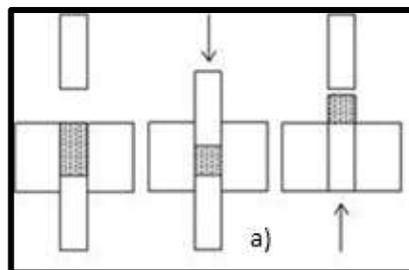


Figura 2.13.- Prensado en seco uniaxial.

El **moldeo por barbotina**, o fundición por revestimiento, se emplea fundamentalmente en el conformado de materiales cerámicos preparados a partir de arcillas. La preparación de la barbotina, suspensión de la arcilla pulverizada en agua, es el primer paso. A continuación la barbotina se vierte en un molde poroso (yeso) que absorbe el agua de la suspensión. A medida que se elimina el agua, se va formando una capa de materia en las paredes del molde. El grosor de la capa formada depende del tiempo transcurrido, pudiéndose continuar con el proceso hasta que la pieza sea del todo compacta. Si no se desea esto basta con invertir el molde y escurrir el exceso de la suspensión. Una vez que la pieza se ha secado en el interior del molde, se desmonta este y finalmente se procede a someter la pieza a tratamiento térmico. Este proceso se utiliza habitualmente para preparar piezas de paredes delgadas con espesor constante. Es un proceso barato para obtener piezas pequeñas. Para casos especiales suelen aplicarse variaciones de este modo que consisten en la aplicación de presión o vacío sobre la muestra (Baird, 2001).

Un aspecto fundamental a tener en cuenta en el moldeo en barbotina es la importancia de las propiedades de la suspensión. Se precisa que esta tenga una densidad elevada, pero que al mismo tiempo sea muy fluida, para lo cual puede recurrirse a diferentes aditivos según sea el tipo de arcilla. También es necesaria una velocidad de moldeo elevada, que la pieza formada no presente burbujas y que no se contraiga demasiado al secarse. El molde también es importante, aunque normalmente se utilizan los de yeso por su bajo coste, fácil elaboración y posibilidad de ser reutilizado. Mediante el moldeo en barbotina se obtienen las clásicas figuras decorativas, las piezas de laboratorio y también la cerámica sanitaria.

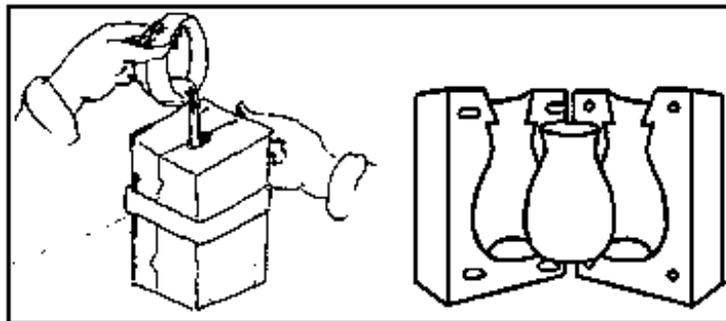


Figura 2.14.- Colada por barbotina.

La **extrusión** (conformado hidrolástico) de los materiales en estado plástico es el método mediante el cual se obtienen secciones transversales sencillas y formas huecas como las tejas y los ladrillos, tuberías de alcantarillado, dieléctricos, etc. En general se utilizan maquinas del tipo hélice-vacío, que fuerzan al material cerámico plástico (arcilla y agua, por ejemplo) a pasar a través de un troquel de acero con la forma adecuada. Para cerámicas especiales de precisión se utilizan pistones de extrusión bajo presión que permiten controlar mejor los tamaños y compactados de las piezas.

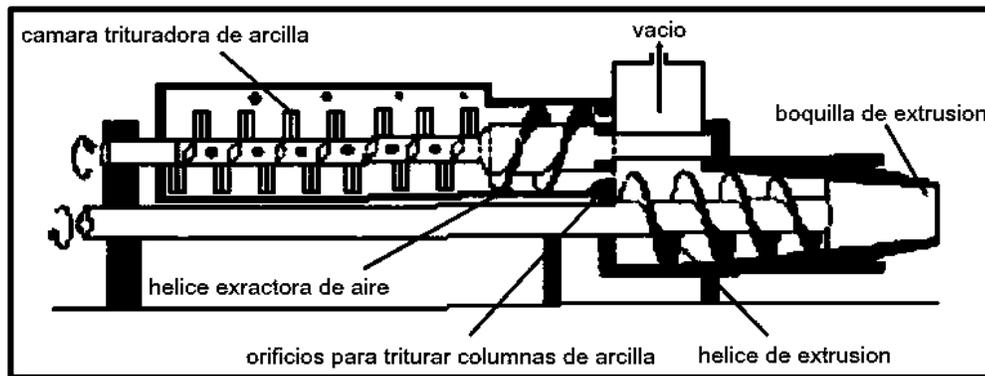


Figura 2.15.- Maquina de extrusión hélice-vacío.

Una vez conformado el material, es necesario someterlo a un tratamiento térmico que le dará la resistencia necesaria. Este es una parte fundamentalmente del procesado, durante el mismo pueden aparecer importantes defectos (grietas, poros, distorsiones) que obliguen a desechar la pieza producida. Los tratamientos térmicos normalmente incluyen dos etapas: secado y cocido o vitrificado, aunque en algunos materiales se precisa también un sinterizado.

Secado.

El objetivo del secado es la reducción del contenido de humedad de las piezas, o cualquier otra sustancia que se haya utilizado como aglutinante o lubricante antes de su cocción, es una operación compleja en la que convergen múltiples factores: naturaleza de la arcilla, grado de preparación y homogeneización, tensiones que pueden haber tenido lugar durante el moldeo, diseño y formato de la pieza, uniformidad o desuniformidad de secado, entre otros. Normalmente la eliminación del agua se hace a temperaturas inferiores a 100°C durante 24 horas (ATC, 2004).

El tipo de secado que se lleve a cabo influirá en la resistencia y calidad final de la pieza después de su cocción.

Durante el secado se produce una contracción de la pieza. La eliminación de las moléculas de agua que rodean los granos provoca la disminución de la distancia entre las partículas y la consiguiente contracción.

El secado de una pieza cerámica de cualquier tipo transcurre en dos fases:

- Eliminación del agua de mojado a velocidad constante manteniéndose la húmeda de superficie de la pieza. En esta etapa se produce una contracción en la pieza igual al agua eliminada.
- La velocidad de eliminación del agua decrece manteniéndose seca la superficie de la pieza. La contracción de esta etapa es muy pequeña

Las moléculas de agua se evaporan en la superficie del material. Por tanto, el secado de la parte interna depende de la velocidad a la que las moléculas difundan hasta la superficie. Si la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de difusión, la superficie externa se seca y contraerá antes que el interior, provocando la deformación de la pieza y su agrietamiento. Para controlar esa velocidad de secado y tratar de igualarla a la de difusión (optimizando la velocidad del proceso) se debe controlar la temperatura, y humedad (flujo de aire) del medio de secado. Evidentemente, también será preciso tener en cuenta el espesor de la pieza, el contenido en agua que ha quedado después del conformado (se trata de conseguir que sea mínimo) y el tamaño de los granos (cuanto más pequeños, más agua permanece retenida).

Cocción.

La cocción es la fase más importante y delicada del proceso de fabricación de productos cerámicos. En este proceso se confiere a la pieza las propiedades deseadas, al mismo tiempo que se muestra si las fases precedentes (amasado, moldeo y secado) se han llevado a cabo correctamente o no (Padoa, 1990). Las piezas se cuecen en hornos, a una temperatura que va desde 900° C hasta algo más de 1400°C, dependiendo de la composición y las propiedades requeridas en el producto final. Mediante este proceso se reduce la porosidad y aumenta la resistencia mecánica de las piezas

preparadas. En el caso de los materiales arcillosos, la cocción da lugar al proceso denominado vitrificación, mediante el cual se forma un vidrio líquido que rellena los poros. El grado con el que se produce este fenómeno depende de la composición del material y de la temperatura de cocción. La adición de agentes fundentes, como los feldespatos (aluminosilicatos de sodio, potasio y calcio), con temperaturas de fusión inferiores a las del resto de los componentes, permite la aparición de una fase líquida que rellena los poros. Al enfriarse, este fundido da lugar a una fase vítrea que refuerza y compacta la cerámica uniendo las partículas no fundidas entre sí.

El grado de vitrificación alcanzado aumenta con la temperatura de cocción. Por ejemplo, los ladrillos de construcción se someten a un proceso de cocción con una temperatura de hasta 900°C y son relativamente porosos. Por el contrario, las porcelanas son cocidas a temperaturas muy superiores y se presentan mucho más vitrificadas. Obviamente, cuanto mayor es el grado de vitrificación mayor es la densidad y resistencia de los materiales obtenidos, no obstante nunca debe recurrirse a una vitrificación completa pues el material perdería su forma. Si se suele recurrir a un tratamiento total de vitrificación en superficie (esmalado), pero a partir de un barniz añadido después del secado de la pieza.

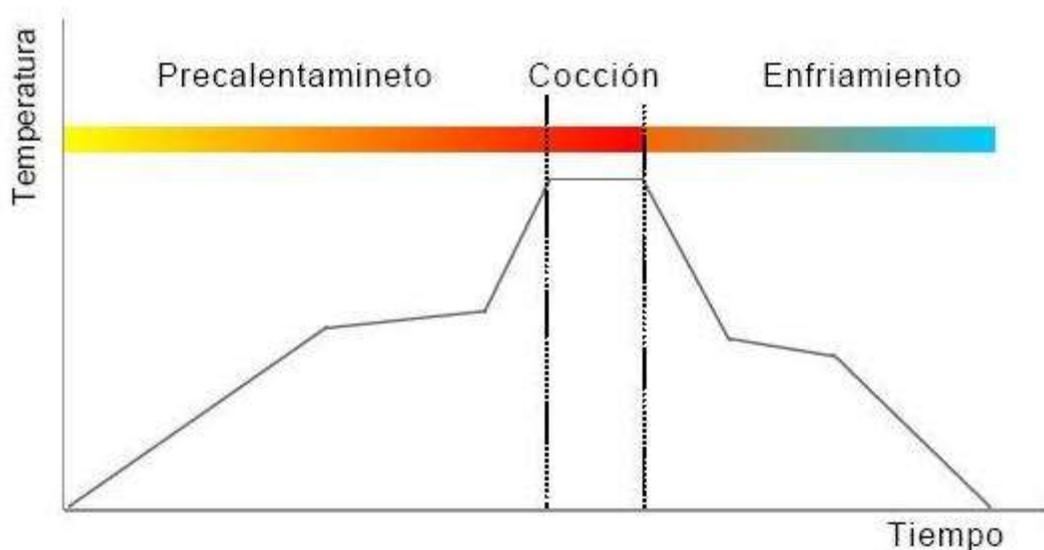


Figura 2.16.- Etapas de un proceso de cocción.

Durante la cocción de un cuerpo cerámico, a medida que la temperatura va aumentando se presentan los siguientes fenómenos (Padoa, 1990).

Hasta poco más de 100°C, la eliminación higroscópica, es decir, de la humedad residual, cuando el secado no ha sido absolutamente perfecto o si el cuerpo ha sido reabsorbido ambiente exterior en el tiempo transcurrido entre la salida del secadero y la entrada en el horno.

Hasta unos 200°C aproximadamente, eliminación de agua coloidal, o interlaminar, o también zeolítica, es decir, el agua que permanece ocluida entre las partículas incluso después de un buen secado.

Entre los 350°C y 650°C, combustión de las sustancias orgánicas que la arcilla puede contener en mayor o menor proporción, y se disocian los sulfuros y los sulfatos.

Entre 450°C y 650°C, se lleva a cabo la descomposición de las materias arcillosas con liberación en forma de vapor, del agua de constitución (que, como se sabe, esta combinada químicamente en la caolinita, constituyente fundamental de las arcillas, junto con la sílice y la alúmina).

A la temperatura de 575°C, se produce una brusca transformación de la forma cristalina del cuarzo (concretamente transformación alotrópica del cuarzo α a β), acompañada de un repentinamente aumento de volumen, de un valor aproximado de un 8%.

Entre 800°C y 950°C, se presenta la descomposición de los carbonatos (caliza y dolomita), con liberación de CO₂.

De 700°C en adelante, reacciones químicas de la sílice y de la alúmina con elementos fusibles, reacciones que dan lugar a la formación de sílico-aluminatos complejos, los cuales comunican al cuerpo cerámico las propiedades de dureza, estabilidad y resistencia a los diferentes agentes físicos y químicos, así como la coloración deseada; de esta forma se ha logrado la llamada sinterización.

Hasta una determinada temperatura, el cuerpo cerámico resulta todavía poroso, debido a los huecos dejados por la liberación del agua, por la combustión de sustancias

orgánicas y por la descomposición de los carbonatos; cuando se trata de biscocho de mayólica, loza, o loza dura, en este punto, es decir, al llegar a la temperatura de 950°C o 1020°C, la cocción ha terminado.

Por encima de 1000°C, y a temperaturas diversas que dependen de su composición, los silicoaluminatos comienzan a reblandecerse y a fundirse, formando una especie de vidrio que, al englobar las partículas menos fusibles comunica al cuerpo cerámico particular dureza, compacidad e impermeabilidad, acompañada de una sensible contracción; este es el fenómeno que recibe el nombre de gresificación, característico de los gres (figura 2.17.) y de la porcelana.

Continuando el calentamiento se llegaría a una completa fusión del material. En la segunda cocción, de esmaltado o vidriado, se verifica solo el reblandecimiento y después la fusión más o menos completa de la capa de esmalte acompañada de las reacciones de los componentes coloreados con esmaltes de base.

En el caso de monococción tienen lugar todas las fases anteriormente descritas cuando ha sido la temperatura máxima (temperatura de cocción), el cuerpo cerámico se va enfriando, con mediana rapidez, manteniendo sus características (salvo transformaciones del estructura cristalina de algún componente, como la sílice no combinada), con solidificación del eventual revestimiento, hasta llegar a una temperatura tal que permita su extracción del horno y manejarlo sin que sufra daños.

2.6.- DIAGRAMAS DE GRESIFICACIÓN.

Bajo la necesidad de reducir el consumo energético por unidad de producto fabricado y el costo de la mano de obra, la tendencia de la industria cerámica es simplificar la fabricación de productos cerámicos. Esta se ha realizado clásicamente para productos de pavimento y revestimiento cerámicos en un proceso de bicocción: cocción del soporte y posterior cocción del soporte con el vidriado.

Las exigencias de reducción del consumo energético ha llevado a la fabricación de productos cerámicos por monococción, cocción simultánea de soporte y vidriado y preferentemente monococción de productos de baja porosidad debido a las reacciones de descomposición de carbonatos que se presentan en los productos porosos y su

incidencia sobre la superficie esmaltada. Es por ello que la elaboración de un diagrama de gresificación permite observar algunas propiedades importantes a diferentes temperaturas de cocción (Escardino y col., 1981).

La absorción de agua (directamente relacionada con la porosidad abierta) y la contracción lineal son dos problemas fácilmente medibles y que generalmente se utilizan para la construcción de los diagramas de gresificación y la definición del rango de cocción.

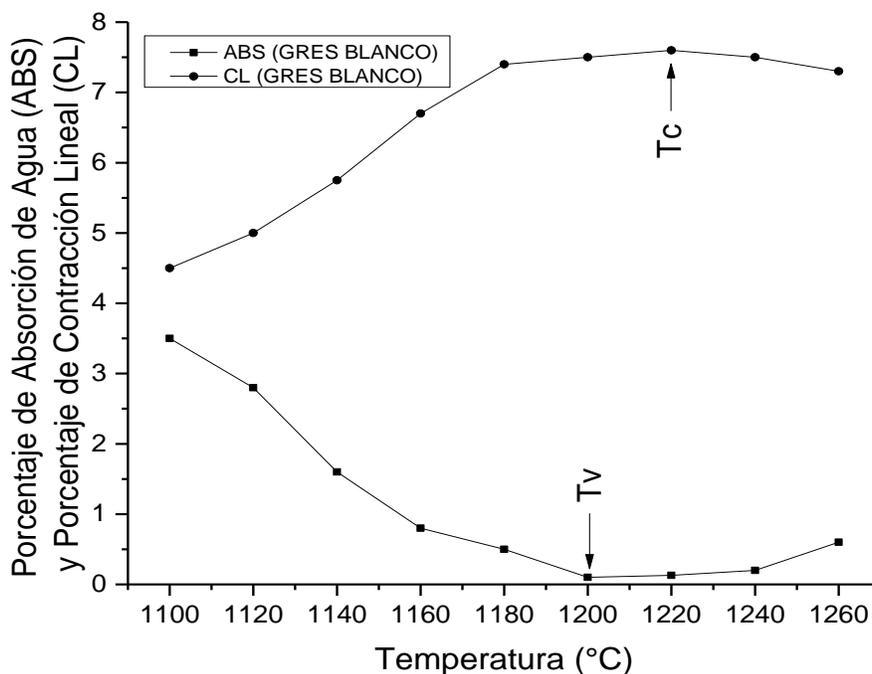


Figura 2.17.- Diagrama de gresificación de un gres blanco.

En la figura 2.17., se representa el diagrama de gresificación de una pasta industrial de gres blanco, obtenida fundamentalmente con arcillas blancas, cuarzo y feldspatos. Al aumentar la temperatura de cocción, disminuye la porosidad abierta (medida como capacidad de absorción de agua) y aumenta la contracción lineal. La porosidad abierta se anula a una temperatura T_v , próxima a los 1200°C. Un posterior aumento de la temperatura producirá un ligero aumento de la contracción hasta alcanzar un máximo de la temperatura T_c , para decrecer posteriormente.

La evolución que siguen, tanto la contracción lineal como la absorción de agua, es la que cabe esperar en la sinterización de un producto cerámico por el mecanismo de fase vítrea viscosa o vitrificación. En efecto, a temperaturas elevadas tiene lugar la formación de una fase vítrea viscosa, que bajo las fuerzas de tensión superficial creadas por los finos poros de la pieza, tienden a acercar las partículas, aumentando la contracción y disminuyendo la porosidad abierta.

Información suministrada por los diagramas de gresificación.

Un diagrama de gresificación permite determinar la temperatura de cocción y el intervalo de temperaturas en el que la porosidad abierta se anula, y la contracción permanece prácticamente constante, lo que coincide con los valores óptimos de la resistencia mecánica.

Un reducido rango de cocción, por ejemplo, caso del gres rojo, hace difícil establecer las condiciones de cocción de estos productos. De manera que pequeñas variaciones de la temperatura de cocción pueden producir una sobrecocción de la pieza, con la consiguiente deformación o una cocción insuficiente de la misma, con lo que para un pequeño gradiente de temperaturas se presentarán porosidades y contracciones diferentes.

Por el contrario, el amplio rango de cocción que poseen las pastas de gres blanco hace muy improbable que se produzcan deformaciones de piezas por sobrecocción o contracciones y porosidades diferentes por cocción insuficiente.

Por otra parte, el estudio de la evolución de la contracción lineal con la temperatura permite obtener información sobre la posible deformación que puede producirse si se presentan gradientes de temperatura en una misma pieza.

Obtención de un diagrama de gresificación.

La obtención del diagrama de gresificación requiere la determinación como mínimo de dos propiedades, la contracción lineal o la densidad aparente y la absorción de agua, a distintas temperaturas de cocción. El método más eficaz será aquel que nos

permita la cocción simultánea de demasiadas piezas y temperaturas como sea posible siguiendo el mismo ciclo de cocción.

Esto puede obtenerse fácilmente acoplado una serie de hornos a un mismo programa de cocción e interconectados entre sí, de modo que la temperatura que se alcance en cada momento se diferencia de un horno a otro en 20 o 25°C, o bien, mediante un horno de gradiente. El horno de gradiente es un horno tubular, que presenta un gradiente lineal de temperatura de 200 a 250°C, desde el fondo del horno al exterior, de modo que una serie de probetas colocadas adecuadamente se cuecen con el mismo ciclo de cocción, diferenciándose de 15 a 20°C en la temperatura máxima.

Las probetas utilizadas para la determinación de los diagramas de gresificación deben ser lo más representativas posible de las condiciones industriales, en cuanto a método de preparación (molienda, presión de prensado, etc.), ya que estos factores pueden alterar en gran medida los diagramas de gresificación.

Por consiguiente es necesario primeramente identificar con qué tipo de material cerámico se pretende trabajar ya que para obtener una pieza o un producto deseado con ciertas características es necesario desarrollar una ruta de procesamiento adecuada.

CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE

En la presa de Cointzio se presenta un elevado contenido de una arcilla ferruginosa en estado coloidal denominada halloysita, típica de la región de la tenencia Morelos, la cual a pesar de ser procesada por la plata potabilizadora Vista Bella, es factible su aprovechamiento debido a sus propiedades cerámicas.

3.1.- ESTRUCTURA MINERALÓGICA DE LA HALLOYSITA.

El nombre de la arcilla halloysita proviene del nombre de una roca belga, estudiada por primera vez, por Omalius de Halloy. Se trata de un mineral de la familia de la caolinita de composición química $Al_2(X_2O_5)(OH)_4 \cdot 2H_2O$ (Mroczek y Col., 2011), donde X es el elemento en la posición tetraédrica, principalmente Si^{4+} , ya que no se frecuenta observar la sustitución con un vicario de tipo Al^{3+} o Fe^{3+} , el cual, como se sabe, conduce a la deficiencia de una carga positiva en la estructura. La halloysita está constituida por la asociación de una “lamina” tetraédrica con una octaédrica, con la particularidad de ser hidratada (dioctaédrica) (Jouseein y Col., 2010).

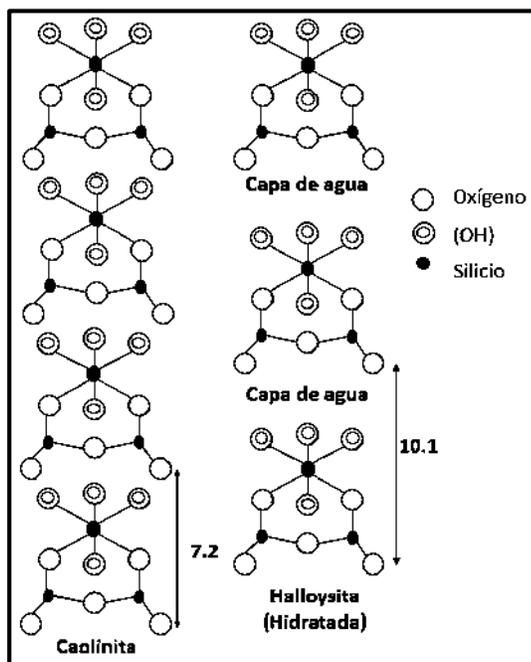


Figura 3.1.- Celda elemental de la caolinita y la halloysita.

En la figura 3.1., se muestra como la halloysita se diferencia de otras arcillas por tener la presencia de un interestrato de moléculas de agua, el cual confiere un cierto “movimiento a las láminas”, que tienden así a enrollarse en forma de tubos (Bergaya y

Col., 2010), con dimensiones del orden de 10-50nm de diámetro externo, 5-20nm de diámetro interno y de 2-40mm de longitud (Kirkman, 1975), esta estructura brinda una elevada capacidad de adsorción al interior de los nanotubos, por la presencia de grupos hidroxilo dentro de las capas tetraédricas del Si y octaédricas del Al (Mroczek y Col., 2011); así como de liberación gradual, puesto que en la superficie tiene carga eléctrica negativa y forma enlaces débiles por intercambio iónico. Este comportamiento se debe a las tensiones diferenciales entre la lámina tetraédrica y la hidrargílica (octaédrica). La atracción entre las láminas es evidentemente superior a la tensión diferencial, puesto que el caso contrario, daría lugar a la destrucción del retículo mismo (Zhou y Keeling, 2013).

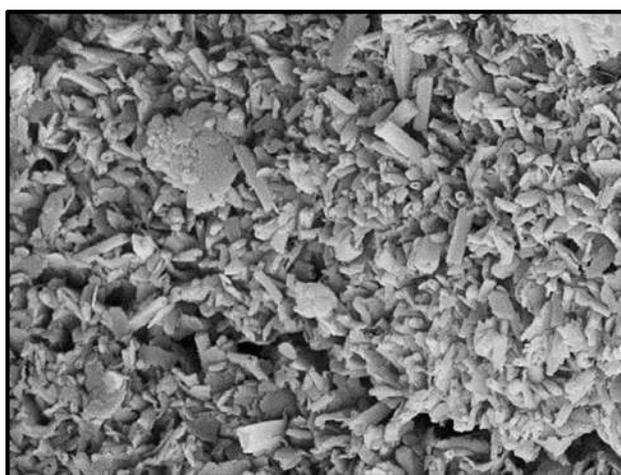


Figura 3.2.- Micrografía por MEB de la halloysita.

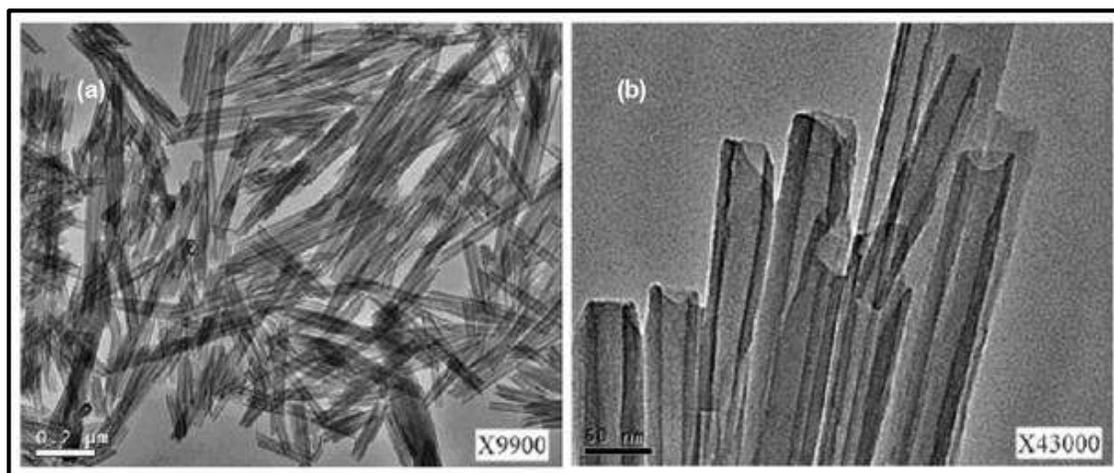


Figura 3.3.- Micrografías por TEM de nanotubos de halloysita.

Sin embargo, los cilindros pueden desenrollarse y compactarse, pasando a la metahalloysita, caracterizada por una menor presencia de agua y de una desviación reticular de 7.4 Å (contra 10.1 Å de la halloysita). La metahalloysita pierde toda el agua del interestrato alrededor de los 200°C, conduciendo irreversiblemente a una estructura parecida a la de la caolinita (ATC, 2004).

Al pasar de la caolinita a la metahalloysita y a la halloysita, se asiste a un aumento progresivo de la hidratación, acompañando de un aumento del grado de desorden del retículo.

3.2.- ANÁLISIS MINERALÓGICOS DE LAS MATERIAS PRIMAS HALLOYSÍTICAS; TÍPICOS COMPORTAMIENTOS DE RECONOCIMIENTO.

Difracción de rayos X.

La identificación de la especie por análisis de difracción de rayos X supone exclusivamente la observación de las difracciones de los planos basales.

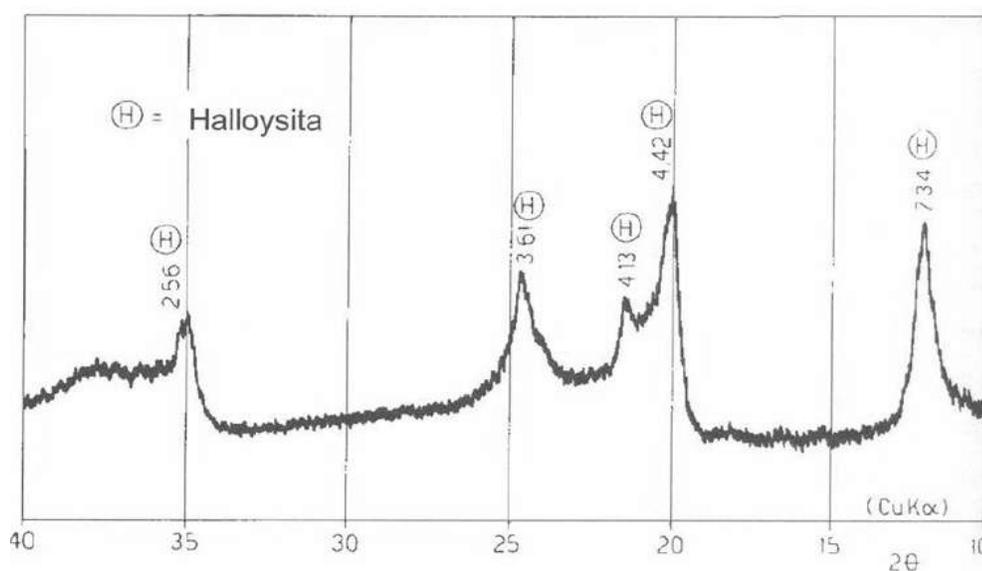


Figura 3.4.- Difractograma de Rayos X de la halloysita (ATC, 2004).

En la figura 3.4., se muestra el difractograma de rayos X de la Halloysita, caracterizado particularmente por una intensa reflexión a aproximadamente 4.4 Å, a menudo más fuerte que las basales a 7.2-7.4 Å y aproximadamente 3.6 Å, las cuales resultan también largas y asimétricas hacia los ángulos bajos (ATC, 2004).

Tabla 3.1.- Distancias reticulares (d) y el posicionamiento de los picos (por radiación Cu K) de la halloysita y de la metahalloysita.

HALLOYSITA			
d=	7.20Å	4.42Å	3.56Å
2θ=	12.20°	20.10°	24.95°
METAHALLOYSITA			
d=	7.10Å	4.42Å	3.57Å
2θ=	12.40°	20.10°	24.90°

En la tabla 3.1., se muestran las distancias reticulares (d) y el posicionamiento de los picos (2θ), mostrados en el difractograma de rayos X (figura 3.4.).

Análisis termodiferencial (ATD-TG).

El diagrama del análisis termodiferencial (ATD) de una halloysita presenta un característico pico endotérmico que se desarrolla antes de los 200°C, asociado a la pérdida del agua de interestrato, a continuación el recorrido es parecido al de la caolinita, a partir de los 450 °C, se observa un nuevo pico endotérmico, consecuencia de la eliminación de los hidroxilos OH⁻, mientras alrededor de los 980°C, y en la relación con la cristalización de la mullita o alúmina, se muestra un claro pico exotérmico. De forma correspondiente, el análisis termogravimétrico (TG) presenta una pérdida de peso, tanto antes de los 200°C como hacia los 450°C, es decir, cuando se desarrolla respectivamente la eliminación del agua de interestrato y se produce el inicio de la pérdida de los hidroxilos OH⁻ (ATC, 2004).

Naturalmente no se presenta ninguna variación a los 980°C, puesto que esta reacción exotérmica no completa la eliminación de la materia, si no únicamente la liberación de la energía de enlace.

Dilatometría.

La dilatometría presenta una débil dilatación que contrasta con una evidente contracción, un poco por encima de 150°C, a causa de la eliminación del agua de

interestrato; superada esta fase, la contracción continúa aunque con un gradiente mucho más moderado a lo que le sigue (por encima de 450°C) una nueva contracción más pronunciada (perdida de los hidroxilos OH-), que se prolonga 880°C, cuando, en relación con el principio de las reacciones de sinterización, se asiste a una contracción con un gradiente aún más fuerte a consecuencia del reblandamiento de la probeta.

3.3.- APLICACIONES DE LOS NANOTUBOS DE HALLOYSITA.

Nanotubos de halloysita para la prevención a la corrosión.

La corrosión de los metales es un problema tecnológico serio. Una variedad de métodos, tales como la protección catódica, recubrimientos aislantes, y la inhibición de la corrosión ha sido desarrollada para superarlo. Uno de los métodos más eficaces es un inhibidor de revestimiento mejorado.

En los diferentes tipos de inhibidores de corrosión inorgánicos se incluyen los cromatos, fosfatos, molibdatos, y los nitritos. Sin embargo, este tipo de inhibidores presentan algunos inconvenientes principalmente por su toxicidad.

Los nanotubos de halloysita se utilizan para la liberación activa de los inhibidores de la corrosión. En este enfoque, los revestimientos de corrosión compuestos de películas híbridas sol-gel se dopan dentro de nanotubos de halloysita y son capaces de liberar inhibidores atrapados por la corrosión de manera controlada. Por ejemplo, una película de sílice zirconia puede ser utilizada como un revestimiento de anticorrosión depositado sobre la halloysita.

El Benzotriazol y sus derivados son los inhibidores más eficaces para la protección del cobre y los metales de transición. Sin embargo, cuando se presenta un entorno que contiene cloruro de sodio (por ejemplo, el agua de mar), el desempeño de dicho inhibidor de corrosión no es suficiente, por lo que es necesario la combinación del inhibidor con una protección pasiva (como un revestimiento de pintura).

Aunque una directa incorporación de benzotriazol en la pintura no es totalmente efectiva, debido a que es soluble en agua y deja huecos vacíos en la capa de revestimiento, lo que disminuye las propiedades de barrera del revestimiento. Por lo que

la incorporación de benzotriazol en la pintura dentro de nano sistemas de encapsulación microescala como son el caso de los nanotubos de halloysita, mejora drásticamente el rendimiento anticorrosivo.

Los nanotubos de halloysita con dimensiones de 50 nm de diámetro y 1 μm de longitud son utilizados como contenedores para la carga, almacenamiento y liberación sostenida del benzotriazol (Dmitry y Col., 2008). Esta liberación controlada puede ser lograda por la formación de los tapones en las aberturas de los nanotubos. Presenta tiempos de liberación del benzotriazol en agua desde 10 a 100 h. El atrapamiento del benzotriazol dentro de sistemas de encapsulación nano y micrométricos de esta arcilla mejoran drásticamente el rendimiento anticorrosivo (Daria y Dmitry, 2008).

Nanotubos de halloysita para resistencia térmica.

La estabilidad térmica de los nanocompuestos es notablemente mejorada por la incorporación de los nanotubos de la halloysita (HNTs). Normalmente los HNTs son utilizados en la manufactura cerámica blanca de alta calidad (Mingliangy Col., 2006). Actualmente se están intentando utilizar los HNTs como nanorelleno en conjunto con diversos polímeros como el caucho natural, caucho de nitrilo y los nanotubos de polipropileno. Los nanotubos de halloysita influyen en la reacción a elevadas temperaturas de los materiales, mediante el desarrollo de una barrera de aislamiento térmico en su superficie durante su quema, protegiendo así, a los compuestos mencionados anteriormente (Zhixin y Col., 2009).

Nanotubos de Halloysita como relleno para varios compuestos.

Los nanocompuestos presentan una amplia aplicación en la óptica, electrónica, dispositivos magnéticos, y termosensibles. Estos nanocompuestos son preparados por un proceso asistido por el uso de diversas estructuras y diferentes muestras de especies biológicas. Sin embargo, estos procesos son muy costosos, pero más eficaces y urgentemente necesarios para la fabricación exitosa de nanocompuestos (Li y Col., 2009).

Las nanopartículas de halloysita se utilizan como aditivo para mejorar el rendimiento de polímeros, específicamente para el fortalecimiento y endurecimiento de las resinas epoxis.

Existen muchos beneficios asociados con los HNTs, al utilizarlos como relleno de compuestos basados en polímeros (Pasbakhsh y Col., 2010).

- Los HNTs presentan bajas cargas superficiales, por lo que proporcionan mayor facilidad en el procesamiento de mezclado con otros polímeros para dar una dispersión homogénea entre las partículas.
- Las modificaciones en las superficies de los HNTs proporcionan una oportunidad de ampliar el espaciado basal de los HNTs por la intercalación de compuestos inorgánicos y orgánicos en sus capas interrelacionadas, potenciando aún más la posibilidad de producir una mezcla homogénea de los HNTs con polímeros.
- La modificación superficial de los HNTs mejoran su capacidad de humedad y de la formación de diferentes enlaces con diferentes polímeros.
- Los HNTs están compuestos de siloxano y grupos hidroxilo, lo que dan HNTs potenciales para la formación de enlaces de hidrógeno y por lo tanto mejorar así, su dispersión.

Nanotubos de halloysita para respuesta celular.

Actualmente, los nanotubos están siendo utilizados en la ingeniería de tejidos así como para sistemas de suministro macro moleculares. Respecto a la ingeniería de tejidos, se basan en la compatibilidad de los nanotubos con matrices biológicas, debido a que es un factor limitante. Los HNTs tienen una geometría similar a los nanotubos de carbono (CNT) pero presentan un menor costo y más importante, son más abundantes, además de todo, que son biocompatibles con orgánulos celulares y proporcionan una elevada resistencia mecánica. Los grupos de Alúmina y sílice, se encuentran en las superficies de los HNTs especialmente en sus bordes de su estructura cristalina y facilitan la formación de interacciones de enlaces de hidrógeno entre los HNTs y los componentes biológicos de modo que los HNTs pudieran ser un candidato ideal como

un bionanomaterial y proporcionan la formación de película del bionanocompuesto (Vergaro y Col., 2010).

Nanotubos de halloysita para reacciones de polimerización.

Los minerales arcillosos y otros materiales inorgánicos son utilizados como huéspedes para la polimerización de diferentes polímeros conductores (Zhang y Col., 2008). Los nanotubos de halloysita son utilizados como soporte catalítico en diferentes reacciones de polimerización, así como diversos procesos biológicos, debido a las siguientes razones:

- Los nanotubos de halloysita mejoran la actividad catalítica de diferentes especies moleculares.
- La halloysita no sólo mejora la separación del catalizador sino que también mejora la recuperación del mismo mediante diferentes medios de reacción.
- Debido a la interacción iónica de la halloysita, facilita el reciclaje y mejora la disposición del catalizador.
- La halloysita presenta un diámetro tubular predefinido, el cual permite la entrada de moléculas con tamaños específicos. Esto abastece la forma y tamaño de la selectividad del catalizador.
- Comparado con otros minerales arcillosos, la halloysita presenta mayor reactividad y una mayor capacidad de intercambio catiónico (Tierrablanca y Col., 2010).

Estas características de la halloysita, lo presentan como un atractivo candidato como soporte para la inmovilización del catalizador en reacciones de polimerización (Ramírez y Col., 2009).

Nanotubos de halloysita como transporte de fármacos.

Actualmente, la halloysita se ha reconocido como un potencial portador para carga de agentes catiónicos, por quimisorción en sus caras polianiónicos o por atrapamiento en su núcleo hueco (Levis y Deasy, 2003). Aunque existen muchas alternativas de transportes de fármacos como los microtúbulos de lípidos o nanotubos de carbono con morfologías similares y capacidades de transporte de fármacos, la halloysita es un mejor

candidato debido a su abundancia y sus propiedades superficiales (Machado y Col., 2008).

- Las caras interiores y exteriores de las paredes tubulares de los nanotubos de la halloysita presentan una carga neta negativa por lo que funciona como un anión polivalente.
- Los nanotubos de halloysita presentan una carga negativa a un pH alto y una carga positiva a pH bajo.

3.4.- USOS CERÁMICOS DE LAS MATERIAS PRIMAS HALLOYSÍTCAS.

Se utilizan en muchas ocasiones para producir baldosas poco coloreadas (generalmente en otra composición de materias primas), a menudo de granulometría gruesa; resulta, en efecto, a evitar por las notables complicaciones en el secado.

A veces este material encuentra una aplicación en la producción de ladrillos (especialmente en los EE.UU.), ladrillos refractarios y refractarios (cabe recordar que se trata siempre de una materia prima de alto contenido de alúmina), (Hernández y Col., 2008).

En algunas producciones, el uso de la halloysita encuentra una justificación cuando se quiere aumentar la plasticidad de la mezcla.

Finalmente este mineral presenta un comportamiento reológico, por lo que su uso en producciones que prevén la molienda en húmedo de las materias primas conduce a un empeoramiento en la des floculación de la pasta.

En su conjunto el uso de una materia prima halloysita debe ser siempre muy limitado (5-20%); en términos de esos porcentajes puede encontrar una aplicación bastante generalizada (vajilla, baldosas porosas y vitrificadas) (ATC, 2004).

3.5.- CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DE LOS MATERIALES HALLOYSÍTCOS PENSADOS.

Las baldosas cerámicas formadas eventualmente con una materia prima predominantemente Halloysítica presentarían:

- Expansión postprensado normal.
- Buena resistencia mecánica a la flexión de los materiales crudos (verde y seco);
- Apreciable contracción de secado.
- En cocidos a 1100°C, la contracción dimensional ya es relevante (3-8%) con un porosidad abierta del 20-25%.
- A 110°C, los valores de resistencia mecánica se sitúan generalmente entre los 100 y 150 kg/cm².
- El coeficiente de dilatación cubica (para muestras cocidas a 1100°C) es increíblemente bajo (incluso inferior a $100 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Cabe descartar que la fuerte contracción de secado hace muy problemática la eliminación del agua y que muy a menudo esta operación conduce a la fractura de un número relevante de productos (ATC, 2004).

3.6.- USOS DE LA HALLOYSITA EN DIFERENTES SECTORES.

Algunos usos resultan alternativos a los del caolín; en particular la halloysita puede utilizarse como material de carga en la producción de: papel, neumáticos y caucho (ATC, 2004).

Determinadas “tierras de batán”, conocidas por su poder colorante, son construidas por importantes porcentajes de halloysita. Sin embargo el constituyente principal es casi siempre la montmorillonita.

Como se mostró anteriormente, la arcilla halloysita presenta una gran variedad de aplicaciones, dependiendo o no de su estructura, debido a la presencia del interestrato de agua, pasando de la halloysita 10Å a la halloysita 7Å (metahalloysita). Haciendo posible también utilizar esta arcilla como aditivo en ciertas pastas cerámicas para mejorar sus propiedades mecánicas.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4.1.- PREPARACIÓN DEL RSA.

El agua residual desechada por la planta potabilizadora “Vista Bella” contiene un RSA en suspensión y para poder realizar su caracterización y las etapas posteriores del procesamiento cerámico para su aprovechamiento, fue necesario que dicho material presentara un tamaño de partícula adecuado, esto se realizó mediante el siguiente proceso de recolección, secado, molienda y tamizado.

Recolección.

Se recolectaron muestras de la purga de lodos en recipientes con capacidad de almacenamiento de 20L, después de pasar por un tiempo de reposo de aproximadamente media hora, se separó la fase acuosa del RSA sedimentado mediante un proceso de sifonación.

Secado.

Posteriormente se realizó el secado de la muestra mediante el uso de la energía solar por medio de unas canaletas de acero galvanizado de 150 cm x 90 cm x 5cm, largo, ancho y alto respectivamente, hasta que la muestra presentara un contenido de humedad del orden del 5%.



Figura 4.1.- Recolección y secado del RSA.

Molienda y tamizado.

Se colocaron muestras de 120 gramos en un recipiente de porcelana de elevada resistencia con esferas de Alúmina de diámetros del orden de 1cm a 2.5cm. Posteriormente se colocó el recipiente en un molino planetario marca NANNETTI

FAENZA ITALIA modelo SPEEDY1 programado a un tiempo de operación de 5 minutos y finalmente tamizaron utilizando un tamaño de malla de 500 μm .



Figura 4.2.- Molienda y tamizado del RSA.

4.2.- CARACTERIZACIÓN DEL RSA.

Al RSA, se le realizaron las siguientes técnicas de caracterización.

Distribución del Tamaño de Partícula (DTP).

A la purga de lodos que se presentaba en estado de suspensión, se le realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de su distribución de tamaño de partícula mediante un analizador de partícula automático centrífugo marca HORIBA modelo CAPA-300 a 500 rpm durante 2 minutos con 43 segundos, programando el intervalo de trabajo del equipo, a un diámetro máximo de 8 μm , un diámetro mínimo de 2 μm y con intervalos de 2 μm . La calibración del equipo se realizó mediante un blanco (agua destilada) en base en la medida de sus transmitancias.



Figura 4.3.- Ensayo DTP en un analizador de partícula automático centrífugo.

.- Fluorescencia de Raros X (FRX).

Las muestras del RSA se secaron a 100°C durante 24 h, enfriadas y desecadas durante 4 h y se tamizaron mediante un tamaño de malla de 57 μm . Se tomaron 4 gramos de la muestra y se colocaron en un porta muestras con un diámetro interno de 28 mm. La parte inferior de la muestra se recubre con una película de 4 μm de propileno, presionándolo para evitar porosidad. La muestra se analizó en un espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X de energía dispersa marca SPECTRO modelo XEPOS III con un tanque de Helio de una pureza del 99.99% a una temperatura de 20°C y una humedad relativa <40%, utilizando un software denominado X-LAB Pro.



Figura 4.4.- Espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X XEPOS III.

Difracción de Rayos X (DRX).

Las muestras del RSA se secaron a 100°C durante 24 h, enfriadas y desecadas durante 4 h. El ensayo se realizó en un difractómetro de polvos de rayos X marca SIEMENS modelo D5000, con cátodo de cobre ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$). Los polvos fueron escaneados con irradiación $\text{CuK}\alpha$ (40 kV, 45 mA), en el intervalo $[3^\circ - 70^\circ]$ en la escala 2θ con pasos de 0.020° en lapsos de 0.6 s.

Los Difractogramas se analizaron con los softwares Jade 5 y Origin 8.0, obteniendo información cuantitativa y cualitativa de las fases cristalinas del RSA.



Figura 4.5.- Difractómetro de Rayos X SIEMENS D5000.

Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

Los polvos fueron soportados sobre un porta muestras de carbono y recubiertas por partículas de cobre. Este ensayo se realizó en un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo marca JEOL modelo JSM-7600F. Las micrografías se realizaron a escalas de 1,000x, 2,500x, 5,000x, 10,000x, 40,000x y 100,000x, generando resolución en escalas desde 10 μm hasta 100 nm.



Figura 4.6.- Microscopio Electrónico de Barrido de emisión de campo JEOL JSM-7600F.

.- Densidad aparente.

La densidad aparente del RSA se determinó en base a la norma **UNE-103-302-94**, orientada a materiales de tipo suelo (como es el caso de las arcillas) con tamaños de partículas menores a 63 μm .

Análisis BET para área superficial específica.

Las muestras se prepararon mediante un proceso de secado en un horno durante 24 horas a 100°C y fueron ventiladas con argón en el porta muestras durante 30 minutos a 150°C. En este ensayo se utilizó el equipo Quantasorb Jr., basado en el método de Brunauer, Emmett y Teller (BET).



Figura 4.7.- Equipo Quantasorb Jr.

Diagramas de gresificación.

La obtención del diagrama de gresificación requiere la determinación como mínimo de dos propiedades, la contracción lineal o la densidad aparente y la absorción de agua, a distintas temperaturas de cocción. A continuación se describe el proceso de la obtención de dichos parámetros.

Contracción lineal.

Se pesaron muestras de 120 gramos del RSA y se humectaron a un 15% con agua destilada y se tamizaron mediante un tamaño de malla de 500 μm , con la finalidad de homogenizar la humectación. Posteriormente se realizó un prensado axial a las

muestras en forma de pastilla en una prensa tipo NANNETTI FAENZA ITALIA modelo SS/EA con un tiempo de prensado de 3s. Las condiciones de operación de la prensa se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1.- Condiciones de operación de la prensa SS/EA para piezas cilíndricas.

Prensa con molde cilíndrico de 5 cm de diámetro	
Presión de prensado deseada	300 Kg/cm ²
Área del pistón	176.63 cm ²
Presión a programar	33



Figura 4.8.- Proceso de prensado del RSA.

Se obtuvieron las piezas en verde y a seis de ellos se les midió su diámetro (D_{verde}). Posteriormente se secaron las piezas a 100°C durante 24 h y se sometieron a un proceso de cocción simultánea a temperaturas de 1000°C, 1040°C, 1080°C, 1120°C, 1160°C y 1200°C, acoplando una serie de hornos de gradiente NANNETTI FAENZA ITALIA modelo GR98.



Figura 4.9.- Hornos de gradiente GR98.

Posterior al proceso de cocción, se midieron nuevamente los diámetros de las piezas cocidas ($D_{cocidas}$), y se calculó su porcentaje de contracción lineal en base a la norma europea (**UNE-56-533, 1975**) mediante la ecuación 4.1.

$$\% \text{ contracción lineal} = \left(\frac{D_{en\ verde} - D_{cocidas}}{D_{cocidas}} \right) \times 100\% \quad (4.1)$$

- **Absorción de agua.**

La medición de esta propiedad se realizó en base a la norma **ISO 10545-3,1997**, mediante la metodología de impregnación del agua por el método de ebullición.

Se secaron las piezas en un horno marca SELECTA modelo DRYBIG a 100°C, hasta que no existiera una variación en el peso de 0.1% y se pesaron (W_{seco}). Después se colocaron las piezas en un baño de agua, aumentando la temperatura hasta la ebullición del agua y en ese momento se tomó un tiempo de 2 horas. Pasado las 2 horas, se enfriaron las piezas dentro del baño de agua a temperatura ambiente durante 4 horas. Posteriormente se extrajeron las piezas y se retiró el exceso de agua con un agente secante. Se pesaron las muestras ($W_{humedad}$), y finalmente se calculó su porcentaje de absorción de agua en base a la ecuación 4.2.

$$\% \text{ Absorción de agua} = \left(\frac{W_{humedad} - W_{seco}}{W_{seco}} \right) \times 100\% \quad (4.2)$$



Figura 4.10.- Absorción de agua de piezas cocidas del RSA.

Las piezas que se sometieron al proceso de cocción se les realizaron ensayos de densidad aparente por inmersión en mercurio y de colorimetría.

Densidad Aparente del RSA a diferentes temperaturas de cocción.

Las piezas se secaron en un horno durante 24 h hasta que no presentaran una variación en 0.1% en peso (w_i). Las piezas se colocaron en un recipiente que contenía mercurio y se sumergieron en él, por acción de un dispositivo de empuje y se obtuvo el peso de la pieza inmersa en mercurio ($w_{i,Hg}$). La densidad aparente se calculó mediante la ecuación 4.3.



Figura 4.11.- Pieza del RSA sumergida en Mercurio.

$$\delta_{ap} = \left(\frac{w_i}{w_{i,Hg}} \right) \times \delta_{Hg} \quad (4.3)$$

Donde: δ_{Hg} es la densidad del Mercurio con un valor de 13.579 g/cm³.

4.2.9.- Colorimetría del RSA a diferentes temperaturas de cocción.

El ensayo de colorimetría se realizó en un espectrofotómetro marca MINOLTA modelo D8000 en base a la norma **ISO 10545-16, 1999**, con la finalidad de obtener los parámetros L* (escala blanco-negro de 0 a 100), a* (escala rojo-verde) y b* (escala amarillo-azul), para definir el color que presentaron las piezas, dependiendo de la temperatura de cocción a la que fueron sometidas mediante valores numéricos, por medio del sistema del espacio de color CIELAB (figura 4.12.). Por ejemplo.

- Cuando L es un número mayor la tonalidad del color es más clara.
- Cuando L es un número menor, la tonalidad del color es más oscura.
- Cuando a* es un valor positivo, presenta la tonalidad del rojo.
- Cuando a* es un valor negativo, presenta la tonalidad del verde.

- Cuando b^* es un valor positivo, presenta la tonalidad del amarillo.
- Cuando b^* es un valor negativo, presenta la tonalidad del azul.

La calibración cero del equipo (figura 4.13.), se realizó por medio de un color blanco y un color negro, finalmente se colocaron las diferentes piezas en el equipo y en base al haz de luz incidido se obtuvieron los parámetros L^* , a^* y b^* descritos anteriormente.

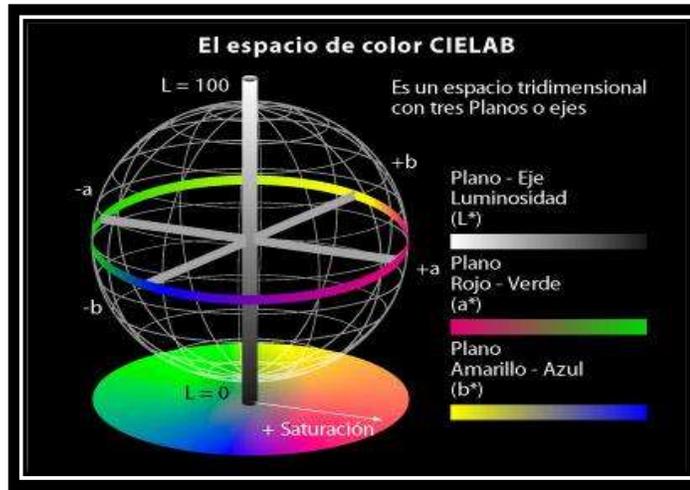


Figura 4.12.- Espacio de color CIELAB.



Figura 4.13.- Calibración del espectrofotómetro MINOLTA D8000.



Figura 4.14.- Muestra del RSA en el espectrofotómetro MINOLTA D8000.

.- Análisis Térmico Diferencial (ATD-TG).

El ensayo de ATD del RSA se realizó en un analizador térmico diferencial marca BHR modelo STA503, colocando cantidades similares del orden de 0.05 gramos de RSA y alúmina (como material de referencia) en el porta muestras de la termobalanza. Se utilizó el software ST CONTROL y se programó un sistema de cocción para medir la diferencia de temperatura y peso entre ambos compuestos en el intervalo de temperaturas desde 25°C hasta 1200°C.



Figura 4.15.- Muestra de RSA en la termobalanza.

4.3.- INCORPORACIÓN DEL RSA A UN PAVIMENTO CERÁMICO, PARA LA ELABORACIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS.

Diagramas de gresificación.

Se incorporó el RSA en un 10, 20, 30 ,40% y 50% en peso, a un pavimento cerámico (gres rojo) de la región de Castellón de la plana (provincia de Valencia, España), con la finalidad de disminuir la temperatura de cocción del proceso convencional de elaboración de baldosas cerámicas y mejorar sus propiedades mecánicas, a la vez de disminuir los costos energéticos en dicho proceso. Lo anterior se realizó mediante la evaluación de diagramas de gresificación.

El ciclo de cocción de las piezas del RSA se realizó en una serie de hornos de gradiente marca NANNETTI FAENZA ITALIA modelo GR98 (figura 4.9.), la rampa de calentamiento inició de la temperatura interna del horno de cocción, posteriormente se aumentó la temperatura gradualmente hasta que después de 50 min se logró obtener 600°C, posteriormente durante 40 min hasta 1000°C y finalmente durante 30 min hasta 1180°C con una cocción a temperatura constante durante 5 min.

Resistencia mecánica a la flexión.

El ensayo de resistencia mecánica a la flexión se realizó en un equipo marca HOYTOM modelo ME-3, utilizando un puente de flexión de 15 mm de diámetro. Se utilizó un software denominado “**ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA**”, en base a la norma **ISO 10545-4, 1997**. Se utilizó un umbral de fuerza de 1N (valor de la fuerza en la cual el equipo considera iniciado el ensayo), una detección de rotura del 25% (porcentaje de disminución de fuerza respecto al valor máximo), que debe detectarse durante el ensayo para considerar que se ha producido la rotura de la pieza y una cedula de carga de 5000N. Las dimensiones de las piezas analizadas fueron del orden de 8 cm de largo, 3 cm de ancho y 0.5 cm de espesor.



Figura 4.16.- Ensayo de resistencia mecánica a la flexión.

Proceso de elaboración de baldosas cerámicas incorporando el RSA al pavimento cerámico.

Habiendo obtenido las condiciones óptimas del proceso de cocción mediante los diagramas de gresificación y de resistencia mecánica. Se realizó la elaboración de baldosas cerámicas mediante a las siguientes etapas.

- **Mezclado y humectación.**

Se incorporó un 10% en peso de RSA al gres rojo (GR) utilizando un molino de bolas para su mezclado (figura 4.2.). Posteriormente se humectó la mezcla con un 7% en peso de agua destilada y se tamizó con una malla de 500 μm .

- **Prensado.**

Los polvos se prensaron en la prensa NANNETTI FAENZA ITALIA con un tiempo de operación de 3s., con las características ilustradas en la tabla 4.2.

Tabla 4.2.- Condiciones de operación de la prensa SS/EA para piezas rectangulares.

Prensa con molde rectangular de 8 cm x 3 cm.	
Presión de prensado deseada	300 Kg/cm ²
Área del pistón	176.63 cm ²
Presión a programar	41

- **Secado.**

Las piezas en verde se sometieron a un proceso de secado mediante un horno SELECTA modelo DRYBIG a una temperatura de 100°C, durante 24 horas.

- **Cocción.**

Las piezas secadas se sometieron a un proceso de cocción de 6 horas mediante un horno NANNETTI FAENZA ITALIA modelo CVK a las temperaturas de 1140°C y 1160°C. Dicho proceso inicio a una temperatura inicial de 30°C, se elevó una temperatura de 750°C en 10 minutos, después a 950°C en 10 minutos, posteriormente el calentamiento mediante 15 minutos hasta que se obtuvo una temperatura de 1140°C o 1160°C según sea el caso, se dejó un tiempo de reposo de 5 minutos. Para el proceso de enfriamiento se disminuyó la temperatura mediante 20 min hasta obtener una temperatura de 960°C, después prosiguió disminuyendo por 10 minutos hasta llegar a 650°C, otros 22 minutos hasta 500°C y finalmente se enfrió durante 10 minutos hasta finalmente obtener 30°C.

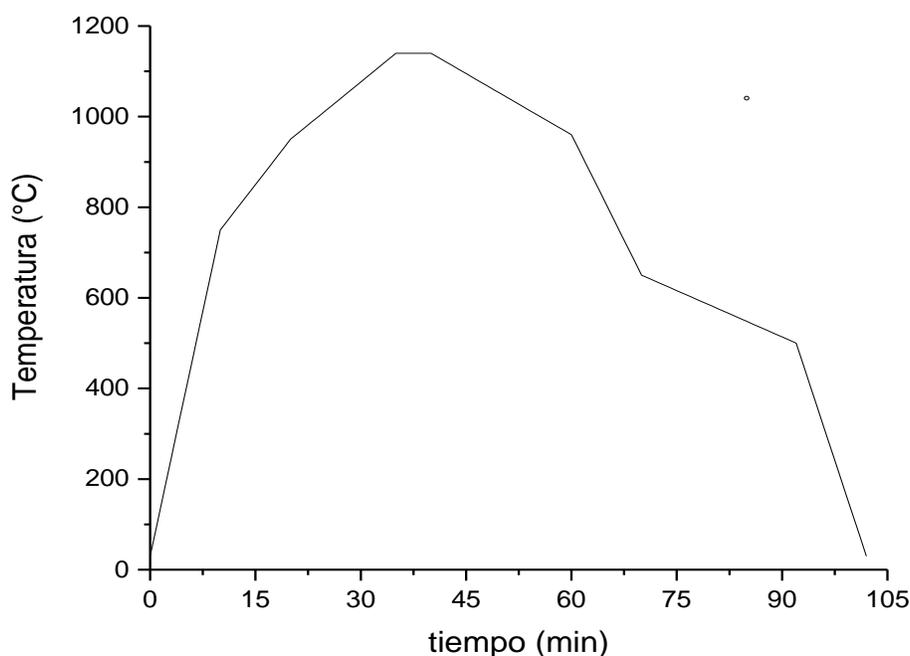


Figura 4.17.- Proceso de cocción a 1140°C.

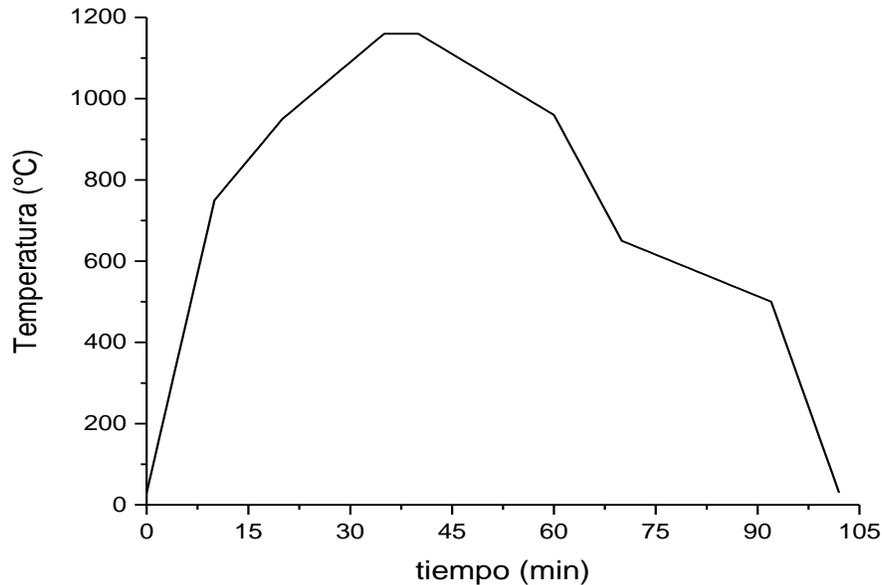


Figura 4.18.- Proceso de cocción a 1160°C.

- **Esmaltado.**

A las piezas cocidas se les aplicó una capa de esmaltes para obtener vidriados de color rojo, verde y morado.

Para el color rojo. Se realizó una mezcla de 95% en peso de bisilicato de plomo con 5% en peso de Fe_2O_3 .

Para el color verde. Se realizó una mezcla de 95% en peso de bisilicato de plomo con 5% en peso de Oxido de Cobre negro I.

Para el color morado. Se realizó una mezcla de 98% en peso de bisilicato de plomo con 2% en peso de CoO .

- **Cocción del esmalte.**

Las piezas se someten a un proceso de cocción de 1140°C durante 4 horas.

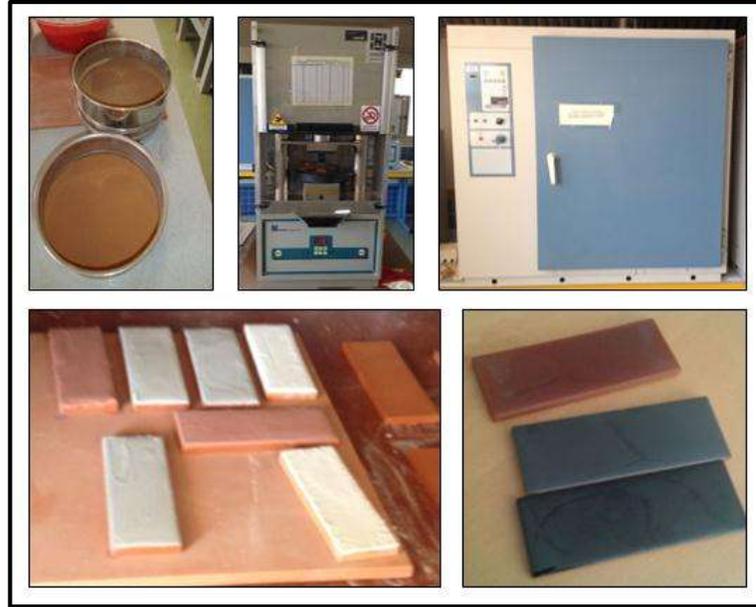


Figura 4.19.- Proceso de elaboración de baldosas cerámicas.

4.4.- ELABORACIÓN DE LADRILLOS.

Ladrillos comerciales elaborados en la tenencia Morelos.

Los ladrillos comerciales que se analizaron son los que se elaboran en la zona de tabiqueros, provenientes de la tenencia Morelos, cerca de la presa de Coitzio. Su elaboración se basa en un procesamiento artesanal mediante las siguientes etapas.

- **Mezclado y homogenización.**

Se lleva a cabo en una fosa, en la que está inmerso un eje con aspas. Este eje es impulsado mediante un motor de automóvil para que el amasado sea uniforme. Las proporciones de material que se le agregan a la mezcla son del orden de 70% arcillas 30% arena; además de agua que se agrega hasta que tenga una consistencia trabajable (con un 20% de humedad), también se agrega un poco de aserrín, el cual se quema en el proceso de cocción.

- **Moldeo.**

La mezcla se coloca en un molde de 25cm x 13cm x 7cm de largo, ancho y alto respectivamente (medidas internas), agregando una cantidad suficiente de arena seca para que la mezcla no se adhiera al molde.

- **Secado.**

Los ladrillos fabricados se secan a la sombra, en una galera, la cual tiene techo, pero sin muros; esto, con la finalidad de que el aire pueda circular libremente en su interior y así secar los ladrillos, estos se colocan de manera que el aire llegue a todas las caras. De este proceso depende la resistencia de los tabiques. Esto tarda aproximadamente 5 días, para que se puedan pasar al proceso de cocción; mientras tanto, se siguen llevando a cabo los procesos anteriores para la fabricación de más ladrillos.

- **Cocción.**

Para proceder a la cocción de estas piezas, es necesario que se encuentren perfectamente secas, de lo contrario, si son horneadas cuando contienen un porcentaje alto de humedad, se deforman y tuercen, perdiendo su forma original. La cocción se realiza en un horno fabricado del mismo material, este proceso dura aproximadamente de 15 a 24 horas. Los ladrillos se colocan en los hornos de manera que las capas sucesivas estén encontradas, con la finalidad de que el fuego los envuelva y la cocción sea uniforme (evitando que el centro reciba más calor que a los lados).

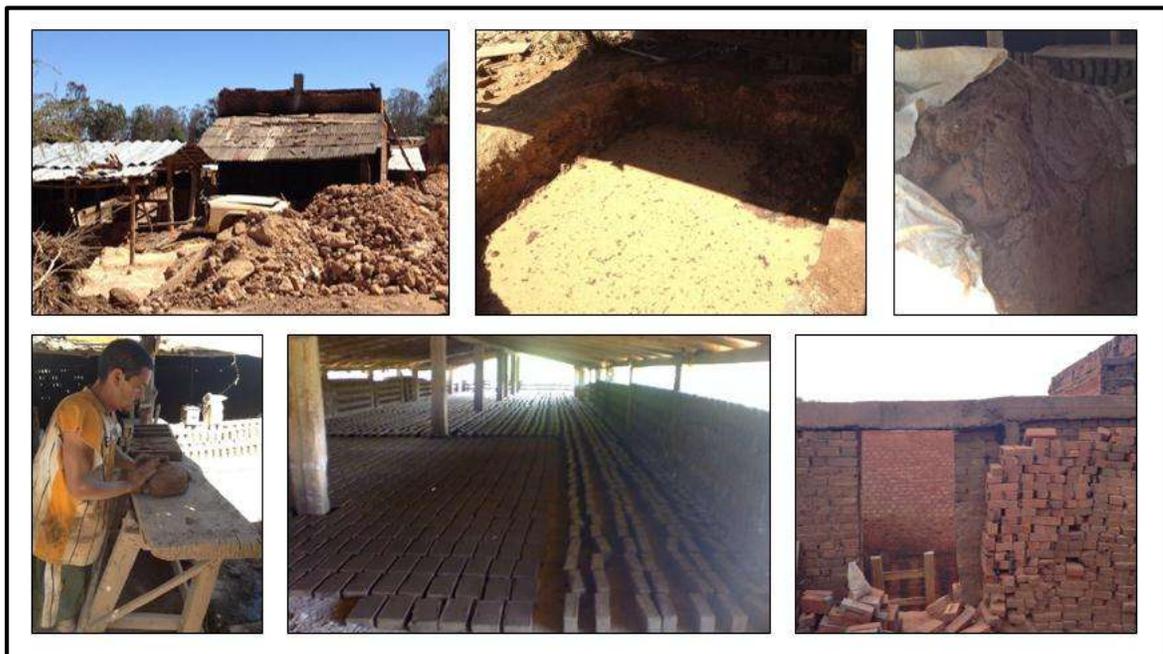


Figura 4.20.- Proceso de elaboración de ladrillos artesanales.

Ladrillos elaborados en base al RSA.

Se elaboraron ladrillos en base al RSA recuperado de la planta potabilizadora “Vista Bella”, adicionando un barro natural (BN) de la zona de la presa de Cointzio (presente como yacimiento natural) como agente ligante.

El proceso de elaboración se realizó de la misma manera que los ladrillos comerciales elaborados en la tenencia Morelos, sin embargo, en el proceso de mezclado se realizaron mezclas del RSA con BN, en relación a un 50% y 70% en peso del RSA en un molino de granos finos marca REULAND modelo 9766-XX1410.



Figura 4.21.- Proceso de elaboración de ladrillos en base al RSA.

.- Pruebas de calidad de los ladrillos en base a las normas mexicanas ONNCE.

Los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos, así como los ladrillos elaborados en base al RSA y al BN, fueron sometidos a una serie de pruebas de calidad en base a las normas mexicanas ONNCE.

Primeramente se determinaron sus dimensiones en base a la norma mexicana **NMX-C-038-ONNCE-2013. “Industria de la construcción. Mampostería. Determinación de las dimensiones de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones. Método de ensayo”.**

Posteriormente se determinaron sus capacidades de absorción de agua en base a la norma mexicana **NMX-C-037-ONNCCE-2013**, “**Industria de la construcción. Mampostería. Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones. Método de ensayo**”. Mediante la ecuación 4.4.

$$A = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_{SSS} - P_a} \times 1000 \quad (4.4)$$

Donde:

A = el volumen de agua absorbida referido al volumen aparente del espécimen en dm^3/m^3 .

M_S = Masa seca del espécimen en kg.

M_{SSS} = Masa saturada y superficialmente seca en kg

P_a = Peso ahogado en kg.



Figura 4.22.- Determinación del peso ahogado de los ladrillos.

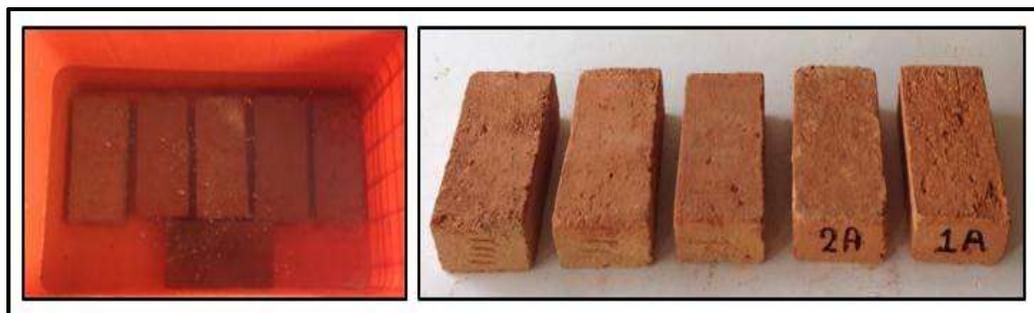


Figura 4.23.- Absorción de agua de los ladrillos en base al RSA.

Finalmente se determinaron sus resistencias a la compresión. Los ladrillos se cabecearon con un mortero de azufre y se prensaron en una prensa universal FORNEY hasta provocar su rotura y la detección de sus resistencias a la compresión se obtuvieron mediante el software “FORNEY INSTRUMENTATION” en base a la norma **NMX-C-036-ONNCCE-2013**. “Industria de la construcción. Mampostería. Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines. Método de ensayo.



Figura 4.24.- Colocación del mortero de azufre a los ladrillos.



Figura 4.25.- Ensayo de resistencia a la compresión.

4.5.- ELABORACIÓN DE UNA PASTA CERÁMICA.

Se realizaron los diagramas de gresificación para mezclas del RSA con Barro natural (BN), con un contenido del RSA del 50% y 70% en peso.

Aunado a esto, se adiciono caolín EPK (C), con la finalidad de mejorar las propiedades de dureza de las mezclas de 70%RSA + 30%BN y darles mayor plasticidad. Se elaboraron nuevamente los diagramas de gresificación y se determinaron los índices de Atterberg a las mezclas de 70%RSA+20%BN+10%C y de 70%RSA+15%BN+15%. Lo anterior se logró preparando muestras con consistencias entre 0.8 a 1N y muestras con consistencias de entre 11 y 12 N.

Las mezclas se dejaron reposar durante 24 horas en un recipiente hermético. El ensayo se realizó en un equipo HOYTOM modelo ME-3, utilizando un punzón que se emplea para realizar los ensayos de plasticidad. Este punzón con terminación cónica de 15 mm de altura y 30° de ángulo es operado mediante el software denominado “**ENSAYOS DE PLASTICIDAD**”, hasta una profundidad de 18 mm. Terminado este proceso, se tomaron muestras del orden de 10 a 20 g de la zona donde se ha introducido el punzón para determinar su humedad mediante la ecuación 4.5.

$$H = \frac{m_{v+sh} - m_{v+ss}}{m_{v+ss} - m_v} \cdot 100 \quad (4.5)$$

Donde:

H = contenido en agua de la muestra (%).

m_{v+sh} = masa del vaso + masa del sólido húmedo (g).

m_{v+ss} = masa del vaso + masa del sólido seco (g).

m_v = masa del vaso (g).

Los límites de Atterberg y el índice de plasticidad se determinaron a partir de un mínimo 8 pares de valores de consistencia/humedad.

Para cada valor de humedad se obtiene su consistencia a partir del punto de inflexión de la curva fuerza-desplazamiento resultante de los ensayos de indentación.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1.- CARACTERIZACIÓN DEL RSA.

Como primera instancia se muestran los resultados correspondientes al análisis preliminar de la metodología de la caracterización del RSA (sección 4.2.).

Distribución del tamaño de partícula del RSA.

Tabla 5.1.- Distribución del tamaño de partícula del RSA.

D [μm]	F [%]	R [%]
> 8.00	16.50	16.50
8.00 – 6.00	2.60	19.10
6.00 – 4.00	26.30	45.40
4.00 – 2.00	41.60	87.00
2.00 – 0.00	13.00	100.00
D [media]	=	3.78
SD	=	1.28

Como se puede observar en la tabla 5.1., el 41.60% de las partículas del RSA presentan tamaños del orden de 2 μm a 4 μm . Con una media de 3.78 μm \pm 1.28 μm . Esta distribución de tamaño de partícula corresponde al comportamiento que presenta un material de tipo arcilloso (García, 2004).

- Fluorescencia de rayos X (FRX).

Tabla 5.2.- Fluorescencia de rayos X del RSA.

Elemento	Composición
O	36.70
Si	25.20
Al	16.22
Fe	15.53
Pb	2.87
Ca	2.25
Mg	1.23

En la tabla 5.2., se observa el análisis químico mediante FRX, donde se muestran los principales elementos presentes en el RSA, como son el caso del O, Si, Al y Fe, con

un 36.70, 25.20, 16.22 y un 15.53% respectivamente. Estos elementos coinciden con cuatro de los siete elementos más abundantes en la naturaleza y siempre presentes en una pasta cerámica (ATC, 2004) como se analizó en la figura 2.2.

Difracción de Rayos X (DRX).

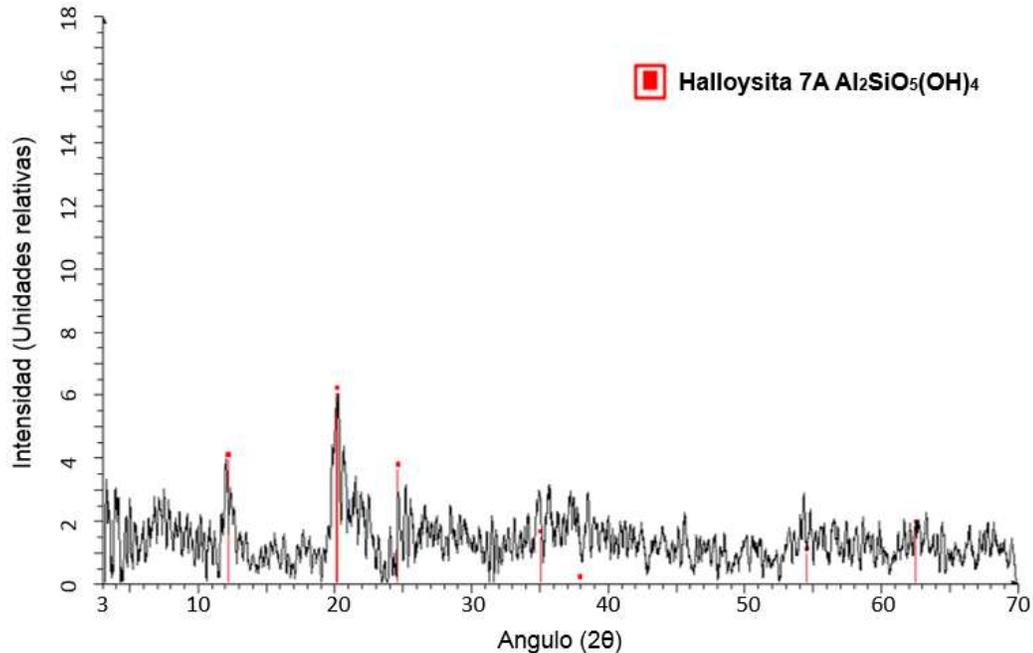


Figura 5.1.- Difractograma de Rayos X del RSA.

Se puede observar en la figura 5.1., el difractograma obtenido por rayos X del RSA., correspondiente a la arcilla Halloysita 7A (Metahalloysita), [(Al₂Si₂O₅(OH)₄], la cual se observa con mayor intensidad y por lo tanto el contenido es mayor con respecto a las fases menores presentes en el RSA. Las intensidades de los picos corresponden a lo reportado para dicha arcilla como se muestra en la tabla 3.1. (ATC,2004).

.- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

Se puede observar en la figura 5.2., que las partículas del RSA son del orden submicronico, nanométrico y se encuentran aglomeradas, lo anterior debido a la presencia de los coagulantes y floculantes utilizados en la planta potabilizadora Vista Bella (sulfato de aluminio y sílice activada). En la micrografía mediante MEB a 100,000x se muestra que algunas partículas del RSA presentan una morfología cilíndrica y otras no, la morfología cilíndrica se debe a la presencia de un interestrato de moléculas de agua interlaminaar, provocando así, un movimiento que tiende a enrollar las láminas en formas cilíndricas, un comportamiento típico de la estructura morfológica de la halloysita.

La morfología de las demás partículas se debe a la pérdida del interestrato de agua y al modo de preparación de la muestra para el ensayo, lo que corresponde al comportamiento de la halloysita 7A (ATC, 2004).

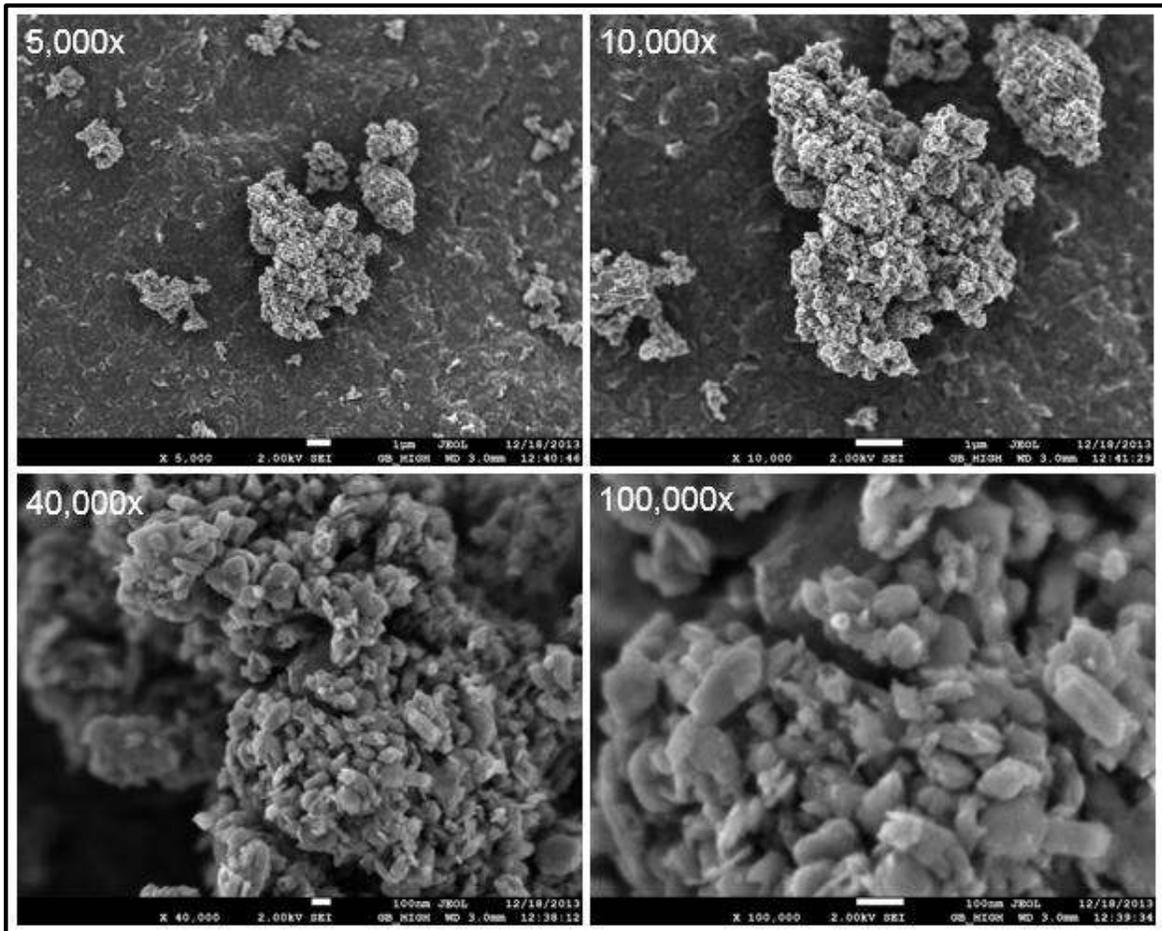


Figura 5.2.- Micrografías por MEB a 5,000x, 10,000x, 40,000x y 100,000x del RSA.

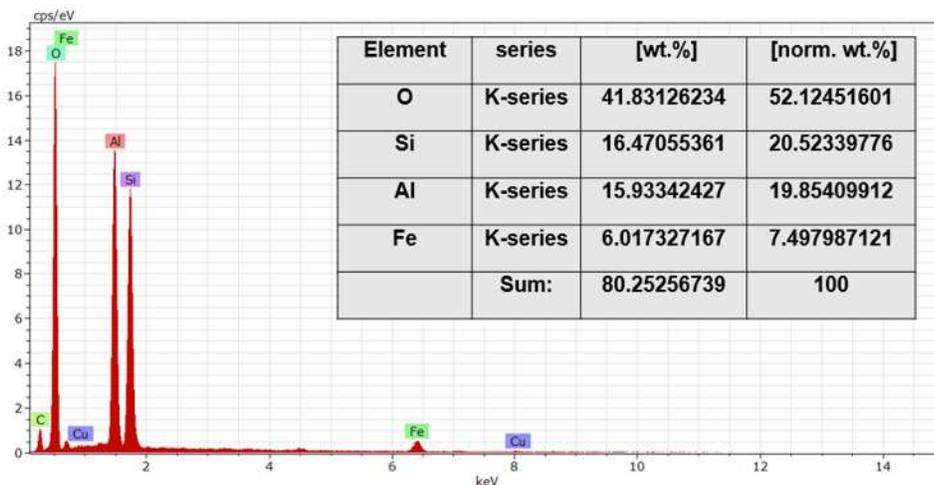


Figura 5.3.- Análisis elemental (EDS) del RSA.

En la figura 5.3., se muestra el análisis elemental (EDS) mediante MEB, en el cual se observa la presencia de los 4 principales elementos que constituyen al RSA como son el caso del O, Si, Al y Fe. Este análisis corrobora los resultados obtenidos mediante FRX. Los elementos mencionados anteriormente normalmente están presentes en un material arcilloso, ya que se tratan de aluminosilicatos hidratados y la presencia de diferentes tipos de óxidos de Hierro, Aluminio y Silicio, tomando en cuenta que se adiciona una fuente de Al y Si por parte del sulfato de aluminio y la sílice activada, adicionados en el proceso de potabilización de la planta potabilizadora Vista Bella.

Densidad aparente.

La densidad aparente del RSA se calculó en base a la norma UNE-103-302:94., obteniendo un valor de 2.34 g/cm³, cuyo valor obtenido es inferior a los 2.64 g/cm³ de la Halloysita 7A (García y Martínez, 1992), disminución que es atribuible a la adición del Sulfato de Aluminio y de la sílice activada que se adicionan en el proceso de potabilización para la desestabilización de la arcilla antes mencionada.

Análisis BET para el área superficial específica.

Tabla 5.3.- Área superficial específica del RSA.

Muestra	Área Superficial Específica, BET (m ² /g)
1	116.15
2	115.37
3	122.31
Media	117.94
Desviación Estándar	3.10

En la tabla 5.3., se muestran los resultados del ensayo de área superficial específica mediante el método de BET utilizando muestras por triplicado, generando una media de área superficial específica de 117.94 m²/g ± 3.10 m²/g. Éste valor promedio es superior al reportado para la arcilla halloysita 7A (60 m²/g), lo cual es atribuible a que en la muestra procedente de la purga de lodos, están incluidas también las áreas superficiales del Sulfato de aluminio y la sílice activada.

- Diagramas de gresificación.

Tabla 5.4.- % Absorción de agua (ABS) y % Contracción lineal (CL) del RSA a diferentes temperaturas de cocción.

RESIDUO SÓLIDO ARCILLOSO (RSA)						
Espécimen	Dinicial (mm)	Dfinal (mm)	% CL	Wseco (g)	Whumedad (g)	% ABS
RSA 1200°C	50.19	37.25	34.73	13.62	13.83	1.54
RSA 1160°C	50.17	37.35	34.32	14.36	14.58	1.53
RSA 1120°C	50.27	38.34	31.11	12.71	13.12	3.22
RSA 1080°C	50.26	42.79	17.45	14.12	17.13	21.31
RSA 1040°C	50.20	43.84	14.50	13.99	17.62	25.94
RSA 1000°C	50.21	44.19	13.62	13.66	17.32	26.79

En la tabla 5.4., se muestran los porcentajes de absorción de agua y de contracción lineal de piezas del RSA sometidas a diferentes temperaturas de cocción, desde 1000°C hasta 1200°C con intervalos de 40°C. El porcentaje de contracción lineal se determinó mediante la ecuación 4.1., en base a la norma europea **UNE-56-533, 1975.**, y para el caso del porcentaje de absorción de agua, esta propiedad se calculó mediante la ecuación 4.2., en base a la norma **ISO 10545-3, 1997.**

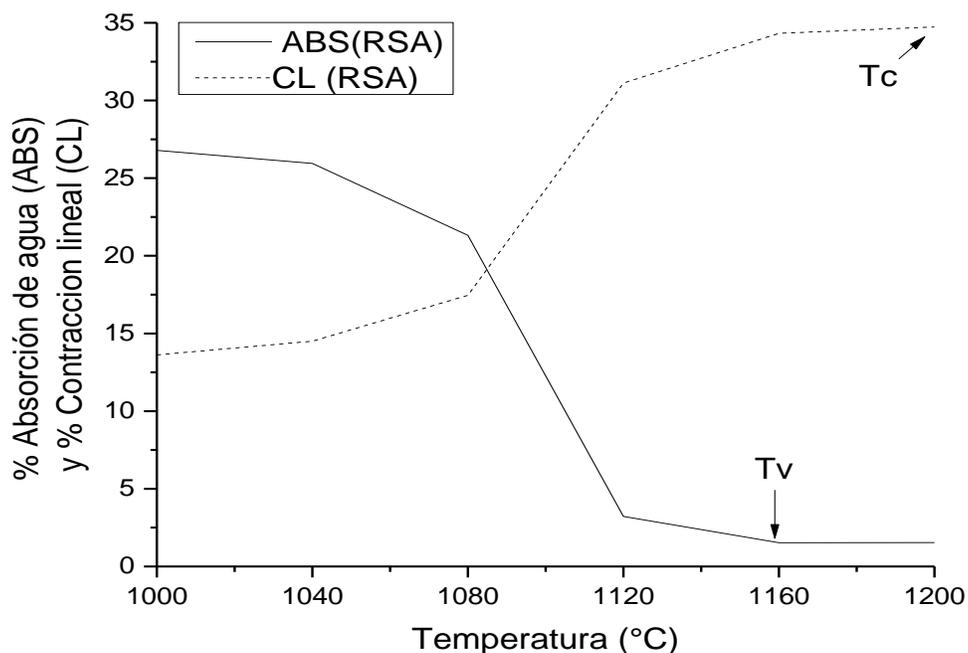


Figura 5.4.- Diagrama de gresificación del RSA.

En la figura 5.4., se muestra el diagrama de gresificación del RSA. Se observa cómo se presenta un mínimo de porosidad abierta de 1.53% a una temperatura T_v , próxima a los 1160°C. Un posterior aumento de la temperatura producirá un ligero aumento de la contracción lineal (de 34.32 a 34.73%) hasta alcanzar un máximo de la temperatura, T_c de 1200°C.

La evolución que siguen, tanto la contracción lineal como la absorción de agua, es la que cabe esperar en la sinterización de un producto cerámico por el mecanismo de fase vítrea viscosa o vitrificación como es el caso de las baldosas cerámicas. En efecto, a temperaturas elevadas tiene lugar la formación de una fase vítrea viscosa, que bajo las fuerzas de tensión superficial creadas por los finos poros de la pieza, tienden a acercar a las partículas, aumentando la contracción lineal y disminuyendo la porosidad abierta (% de absorción de agua).

.- Densidades aparentes del RSA a diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 5.5.- Densidades aparentes del RSA a diferentes temperaturas de cocción.

DENSIDADES APARENTES DEL RSA			
Espécimen	m(g)	mHG(g)	ρ_{ap} (g/cm³)
RSA 1200°C	13.62	62.41	2.96
RSA 1160°C	14.36	67.62	2.88
RSA 1120°C	12.71	63.49	2.71
RSA 1080°C	14.12	104.58	1.83
RSA 1040°C	13.99	112.72	1.68
RSA 1000°C	13.66	111.84	1.65

En la tabla 5.5., se observa el aumento de la densidad aparente del RSA conforme aumenta la temperatura de cocción del RSA, esto debido a que la porosidad abierta del material disminuye conforme aumenta la temperatura (proceso de sinterización), compactando más el material y generando mayor peso.

Colorimetría del RSA a diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 5.6.- Parámetros colorimétricos L*, a* y b* del RSA a diferentes temperaturas de cocción.

COLORIMETRÍA DEL RSA			
Espécimen	L*(DG5)	a*(D65)	b*(D65)
RSA 1200°C	41.75	16.08	16.31
RSA 1160°C	42.59	19.17	21.87
RSA 1120°C	43.36	20.7	22.46
RSA 1080°C	51.27	24.91	27.03
RSA 1040°C	54.23	26.93	32.72
RSA 1000°C	57.74	27.7	33.07

En la tabla 5.6., se muestran los resultados numéricos de los parámetros colorimétricos L*, a* y b* del RSA a diferentes temperaturas de cocción. Estos parámetros indican que al aumentar la temperatura, la tonalidad de las piezas elaboradas en base al RSA con cada vez más oscuras, más rojizas y menos amarillas (Sección, 4.2.9.). Lo anterior se comprueba mediante la figura 5.5.



Figura 5.5.- Piezas de RSA a diferentes temperaturas de cocción.

5.2.- INCORPORACIÓN DEL RSA A UN PAVIMENTO CERÁMICO, PARA LA ELABORACIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS.

Se incorporó el RSA en un 10, 20, 30, 40 y 50% en peso a un pavimento cerámico (gres rojo), para la elaboración de baldosas cerámicas, con la finalidad de disminuir la temperatura del proceso de cocción y mejorar las resistencias mecánicas de las baldosas cerámicas elaboradas sin la presencia del RSA, lo anterior, mediante la elaboración de diagramas de gresificación.

El gres rojo que se utilizó en este trabajo es proveniente de la región de Castellón de la plana, provincia valenciana donde se producen más del 90% de pavimentos y

revestimientos cerámicos de España (líderes mundiales de producción y exportación de baldosas cerámicas con Italia y China), de los cuales, el 93% son pavimentos y revestimientos cerámicos esmaltados. Se eligió este tipo de gres, debido a que se elabora prácticamente en todos lados y a su coloración rojiza (color similar al RSA), y utilizado como soporte para las baldosas cerámicas, debido a su elaboración con mezclas de arcillas naturales que desarrollan esta coloración en su proceso de cocción, representando un 88% de la producción de baldosas cerámicas de esta provincia Valenciana, contra el 12% de producción de baldosas cerámicas con pasta blanca (Regueiro y Col., 1996).

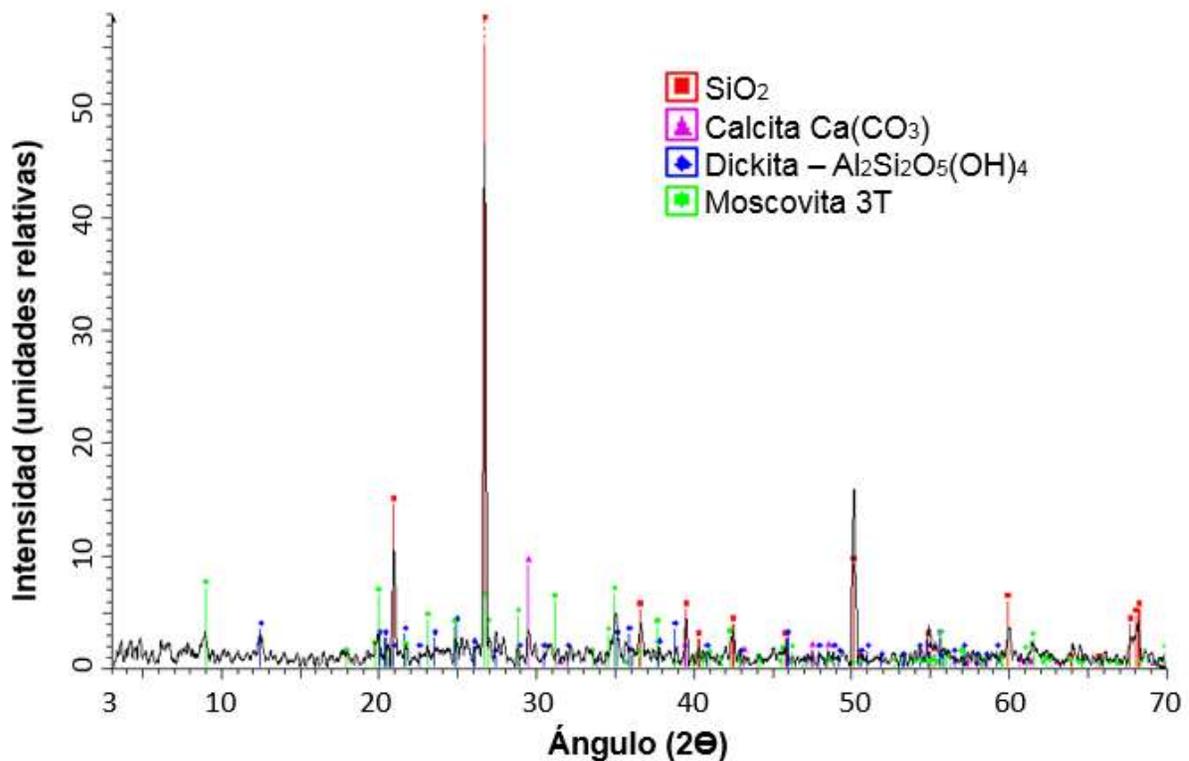


Figura 5.6.- Difractograma de rayos X del gres rojo (GR).

En la figura 5.6., se presenta el difractograma de rayos X del GR, escaneado con irradiación CuK α (40 kV, 45 mA), en el intervalo [3° - 70°] en la escala 2 θ con pasos de 0.020 en lapsos de 0.6 s. Mostrando los minerales presentes en dicho gres, como son el caso de la calcita y la sílice que indica que la muestra presenta características fundentes, obteniendo puntos de vitrificación por debajo de 1100°C (Díaz y Torrecillas, 2002).

También se aprecia la presencia de materiales arcillosos (aluminosilicatos), como son los casos de la Dickita de la familia de la caolinita, la cual genera plasticidad en el GR (ATC, 2004) y la Moscovita 3T de la familia de las micas, presentando propiedades sedimentarias.

.- Diagramas de gresificación.

Tabla 5.7.- % Absorción de agua (ABS) y % Contracción lineal (CL) del gres rojo (GR) a diferentes temperaturas de cocción.

GRES ROJO (GR)						
Espécimen	Dinicial (mm)	Dfinal (mm)	% CL	Wseco (g)	Whumedad (g)	% ABS
1180°C	50.47	46.20	9.24	22.80	22.99	0.83
1160°C	50.43	46.72	7.94	23.02	23.71	2.99
1140°C	50.42	47.07	7.11	22.28	23.19	4.08
1120°C	50.42	48.19	4.62	21.42	23.25	8.54
1100°C	50.43	48.81	3.31	22.47	24.82	10.45
1080°C	50.52	48.98	3.144	22.11	24.62	11.35

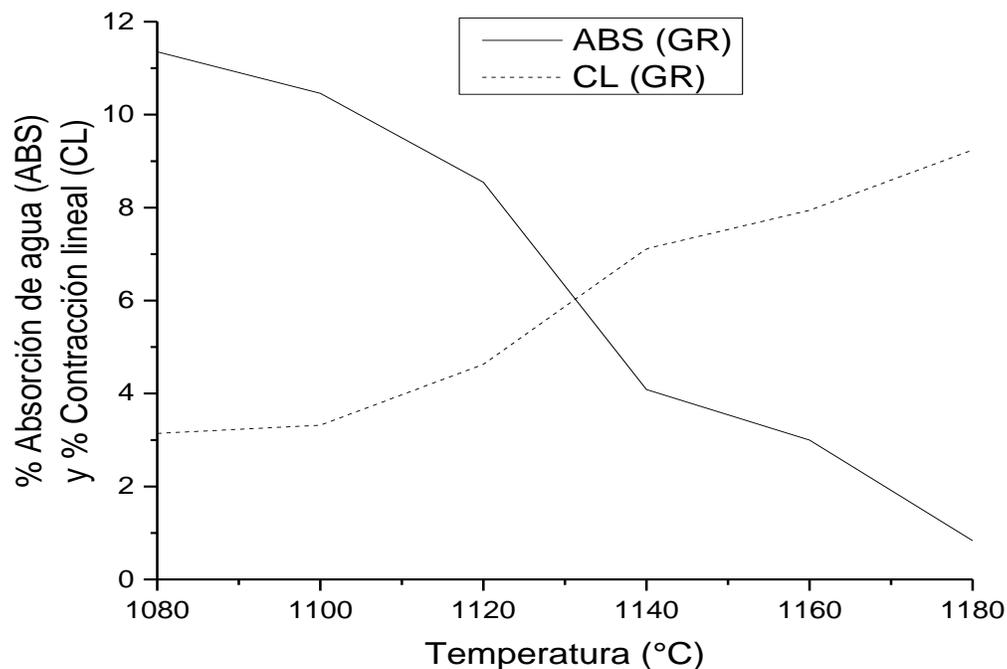


Figura 5.7.- Diagrama de gresificación del gres rojo (GR).

En la tabla 5.7., se observa como la contracción lineal del GR a temperaturas de cocción en el intervalo de 1080°C a 1180°C, varía del orden del 9.24 al 3.14 % y de absorción de agua del orden del 11.35 al 0.83%.

Las baldosas cerámicas con soporte de baja porosidad (< 3 % de absorción de agua) se destinan a pavimentos cerámicos (Regueiro y Col., 1996). En la figura 5.7., se observa que para obtener ese grado de porosidad (2.997%), utilizando como materia prima solo el GR, es necesario realizar un proceso de cocción a una temperatura de 1160° C, obteniendo una contracción lineal del orden del 8%.

Tabla 5.8.- % Absorción de agua del GR y de mezclas del GR con RSA a diferentes temperaturas de cocción.

PORCENTAJE DE ARSORCIÓN DE AGUA DEL GR Y DE MEZCLAS DEL GR CON RSA A DIFERENTES TEMPERATURAS DE COCCIÓN						
T (°C)	GR	GR+10% RSA	GR+20% RSA	GR+30% RSA	GR+40% RSA	GR+50% RSA
1080	11.35	11.24	10.66	10.14	10.80	11.99
1100	10.45	9.35	10.00	8.25	9.16	9.25
1120	8.54	7.50	7.83	7.27	8.16	8.75
1140	4.08	2.69	4.45	5.36	6.82	7.89
1160	2.99	2.13	4.09	5.31	6.67	7.84
1180	0.83	0.32	2.39	3.31	5.46	6.53

Tabla 5.9.- % Contracción lineal del GR y de mezclas del GR con RSA a diferentes temperaturas de cocción.

PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN LINEAL DEL GR Y MEZCLAS DEL GR CON RSA A DIFERENTES TEMPERATURAS DE COCCIÓN						
T (°C)	GR	GR+10% RSA	GR+20% RSA	GR+30% RSA	GR+40% RSA	GR+50% RSA
1080	3.14	2.93	5.72	7.53	8.29	10.00
1100	3.32	4.66	6.34	8.98	9.83	12.16
1120	4.62	5.01	7.69	9.41	10.38	12.44
1140	7.11	5.59	9.47	10.39	11.20	12.96
1160	7.94	7.49	9.90	10.71	11.31	13.15
1180	9.24	8.49	10.82	11.25	11.73	13.51

En las tablas 5.8., y 5.9., se observa como el porcentaje de absorción del agua de las piezas de GR y de las mezclas del GR con RSA disminuye al aumentar la temperatura

de cocción, mientras aumenta el porcentaje de contracción lineal de las piezas cerámicas.

Un efecto importante se presenta al incorporar un 10% del RSA al GR, debido a la obtención de un menor porcentaje de absorción de agua en el intervalo de temperatura de 1080°C a 1180°C, lo que se atribuye a que se presenta menor porosidad interna abierta, en comparación con las piezas elaboradas con el GR sin el RSA. Sin embargo, cuando se adicionan un 20, 30, 40 y 50% en peso del RSA al GR sucede todo lo contrario. Los fenómenos descritos anteriormente se describen en las figuras 5.8., a la 5.12.

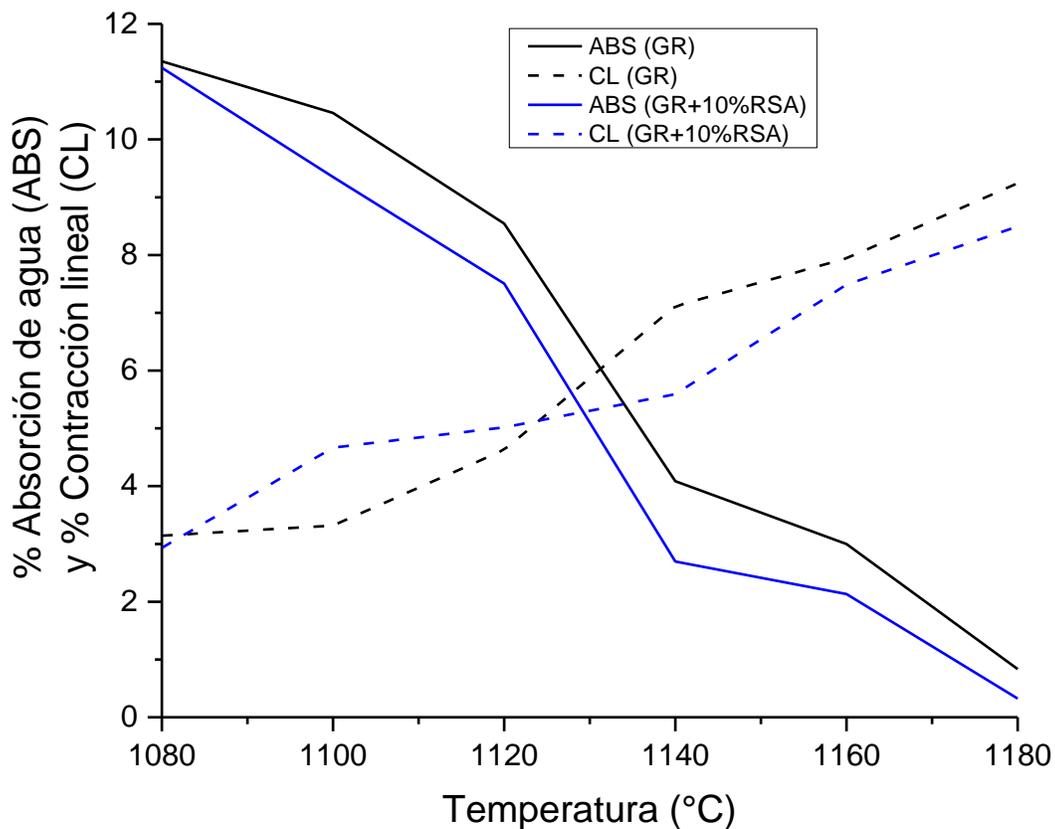


Figura 5.8.- Diagramas de gresificación del GR y del GR+10%RSA.

En la figura 5.8., se muestra como al incorporar un 10% en peso del RSA al GR y se lleva a cabo un proceso de cocción a una temperatura de 1140°C, se obtiene un porcentaje de absorción de agua del 2.70%. Obteniendo así, una menor porosidad

interna que la que se obtiene sin la adición del RSA sometidas a un proceso de cocción a 1160°C, generando así un ahorro energético en el proceso de cocción. Tomando en cuenta que se puede esperar que también mejoren sus propiedades mecánicas.

Otra mejora considerable, es que si se lleva a cabo la producción de baldosas cerámicas a gran escala, se reduce el uso de la materia prima en un 10 % en peso, además de utilizar un residuo que actualmente es desechado en el río chiquito de la ciudad de Morelia Michoacán, evitando así, una serie de efectos nocivos al ecosistema.

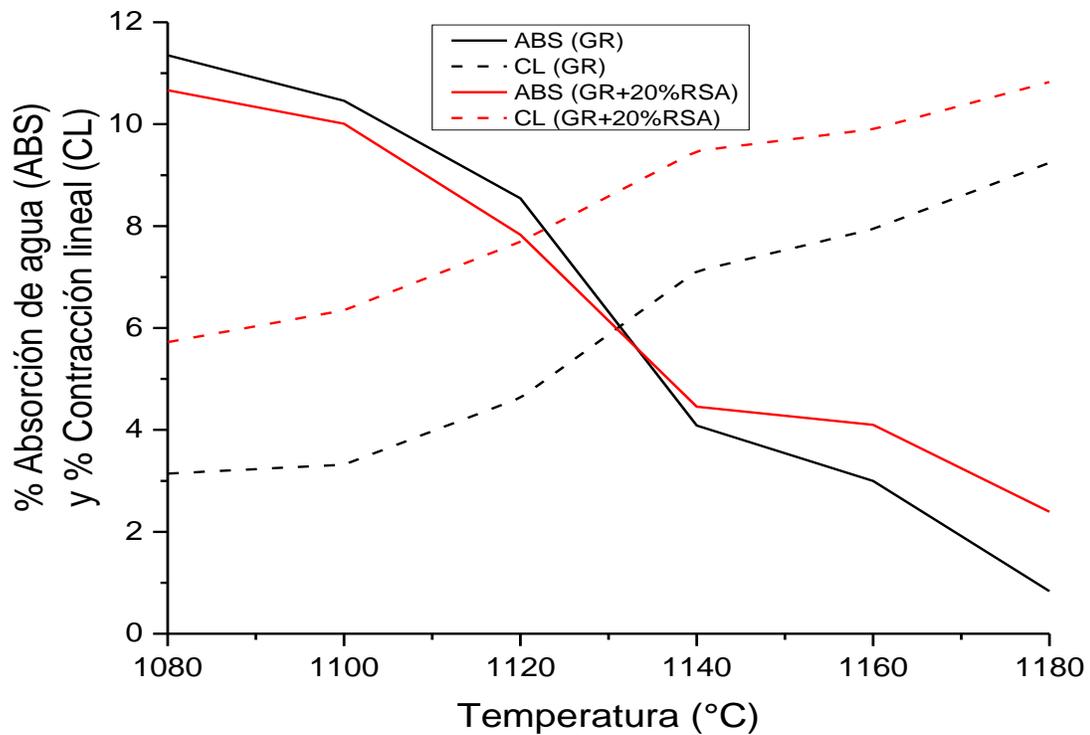


Figura 5.9.- Diagramas de gresificación del GR y del GR+20%RSA.

En la figura 5.9., se puede observar que la porosidad abierta (porcentaje de absorción de agua) aumenta, pero no en gran medida en comparación con la contracción lineal al incorporar un 20% del RSA al GR. Por lo tanto no es factible incorporar esta cantidad del RSA al GR debido a que se espera que las características mecánicas no mejoren en comparación del GR.

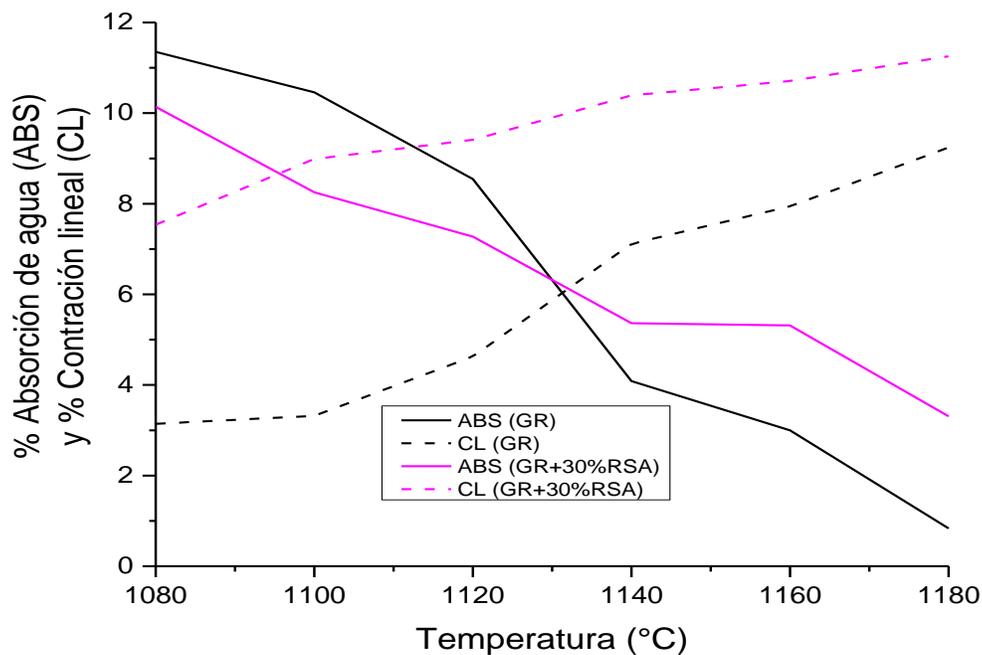


Figura 5.10.- Diagramas de gresificación del GR y del GR+30%RSA.

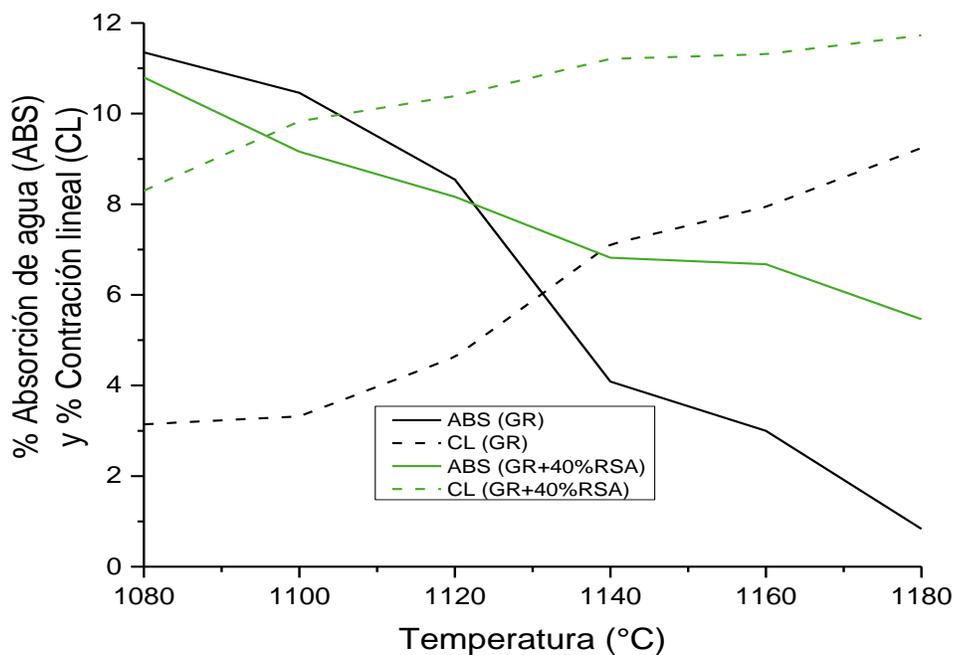


Figura 5.11.- Diagramas de gresificación del GR y del GR+40%RSA.

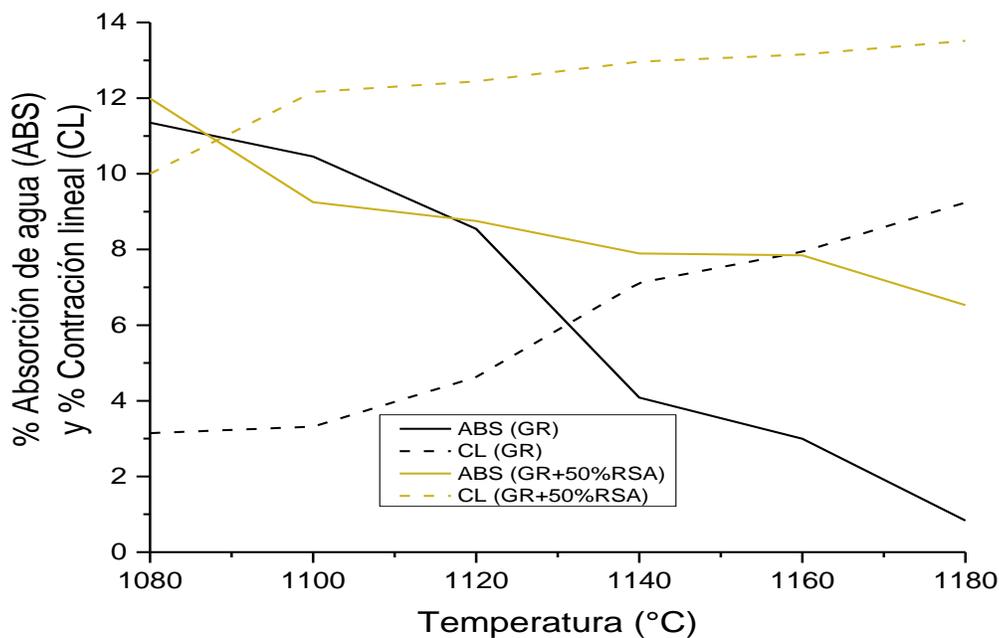


Figura 5.12.- Diagramas de gresificación del GR y del GR+50%RSA.

En las figuras 5.10., 5.11. y 5.12., se observa como el porcentaje de absorción de agua y el porcentaje de contracción lineal son más estables, sin embargo, aumentan de manera considerable en comparación con el GR y por lo tanto, **no es factible la incorporación del 30, 40 y 50% en peso del RSA al GR**, ya que perjudica sus propiedades mecánicas.

Lo anterior se pudiera deber al contenido de agua y materia orgánica presente en el RSA, generando al momento del proceso de cocción, fracturas internas en el material y al momento de sinterización no se reduce en gran medida su porosidad interna. Para corroborar lo anterior fue necesario realizar un Análisis Térmico Diferencial (ATD).

.- Análisis Térmico Diferencial (ATD-TG) del RSA.

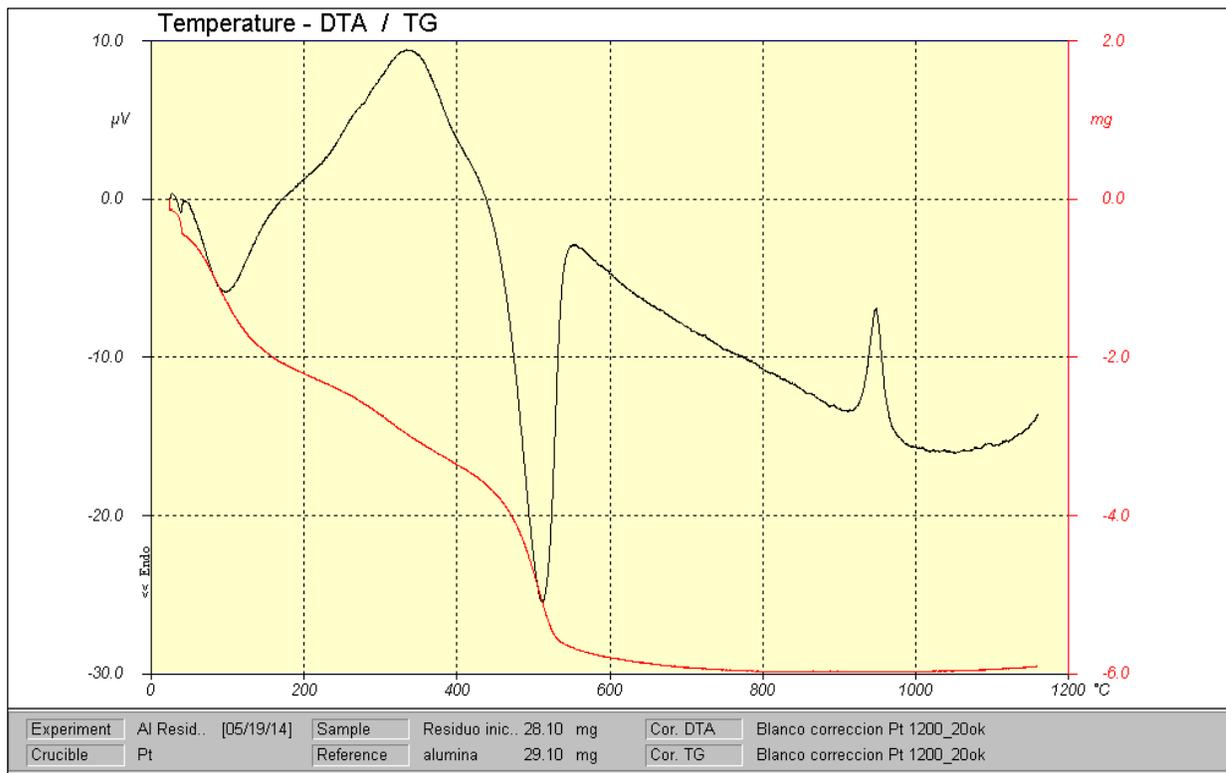


Figura 5.13.- Termograma diferencial (ATD-TG) del RSA.

En la figura 5.13., se muestra el análisis termodiferencial (ATD) del RSA, el cual presenta un característico pico endotérmico que se desarrolla a los 100°C, asociado a la pérdida del agua de interestrato; a continuación se presenta un nuevo pico endotérmico, a partir de los 520°C, consecuencia de la eliminación de los hidroxilos OH⁻ y la materia orgánica presente en el RSA, mientras alrededor de los 960°C se presenta un pico exotérmico, asociado a la cristalización de la mullita o alúmina. De forma correspondiente, el análisis termogravimétrico (TG), presenta una fuerte pérdida de peso, tanto a los 100°C como hacia los 520°C, es decir, cuando se desarrolla respectivamente la eliminación del agua del interestrato y se produce el inicio de la pérdida de los hidroxilos OH⁻ y la materia orgánica.

Naturalmente, no se observa ninguna variación a los 960°C, puesto que esta reacción exotérmica no contempla la eliminación de materia, si no únicamente la liberación de la energía de enlace.

.- Contenido de agua y materia orgánica del RSA.

Con la finalidad de que el RSA no presentara contenido de agua y materia orgánica al incorporarlo al GR, se pesaron 7 muestras del RSA en crisoles de porcelana y se sometieron a un proceso de cocción a 600°C durante 4 h. Posteriormente se enfriaron mediante la temperatura interna del horno y se volvió a medir su peso. Finalmente se calculó el porcentaje de agua y materia orgánica mediante la ecuación 5.1.

$$\%MO = \left(\frac{m_i}{m_f} \right) \times 100\% \quad (5.1.)$$

Dónde:

%MO: Es el porcentaje de agua y materia orgánica, presente en el RSA.

m_i : Es el peso de la muestra inicial.

m_f : Es el peso de la muestra después del proceso de cocción.

Tabla 5.10.- Contenido de agua y materia orgánica presentes en el RSA.

Muestra	m_i (g)	m_f (g)	%MO
1	18.05	14.50	19.66
2	18.19	14.60	19.74
3	20.36	16.40	19.45
4	17.48	14.00	19.91
5	18.18	14.60	19.69
6	18.29	14.60	20.17
7	26.99	21.50	20.34

%MO, promedio = 19.78%

El contenido de agua y materia orgánica presentes en el RSA es del orden del 20%, lo que pudiera causar el efecto de perjudicar las características del GR a partir de su incorporación en un 20%, debido los incrementos del porcentaje de absorción de agua y del porcentaje de contracción lineal.

En base a las pruebas realizadas anteriormente, se decidió solo hacer pruebas con mezclas del pavimento de gres rojo con 10% y 20% en peso de RSA, previamente calcinado a 600°C, para observar si su porcentaje de absorción de agua y su porcentaje de contracción lineal disminuía más que en el caso de las muestras elaboradas en base al GR+10%RSA.

Diagramas de gresificación del RSA previamente calcinado a 600°C.

Tabla 5.11.- % Absorción de agua y % Contracción lineal del RSA previamente calcinado a 600°C.

PORCENTAJES DE ABSORCIÓN DE AGUA Y DE CONTRACCIÓN LINEAL DEL RSA CALCINADO A 600°C.						
T (°C)	Dinicial (mm)	Dfinal (mm)	% CL	Wseco (g)	Whumedad (g)	% ABS
1080	50.35	45.79	9.96	16.50	21.33	29.27
1100	50.35	43.63	15.40	14.44	18.35	27.08
1120	50.35	42.1	19.60	15.78	19.31	22.37
1140	50.44	39.43	27.92	14.89	16.28	9.34
1160	50.38	39.05	29.01	16.52	17.84	7.99
1180	50.34	38.89	29.44	15.35	16.55	7.82

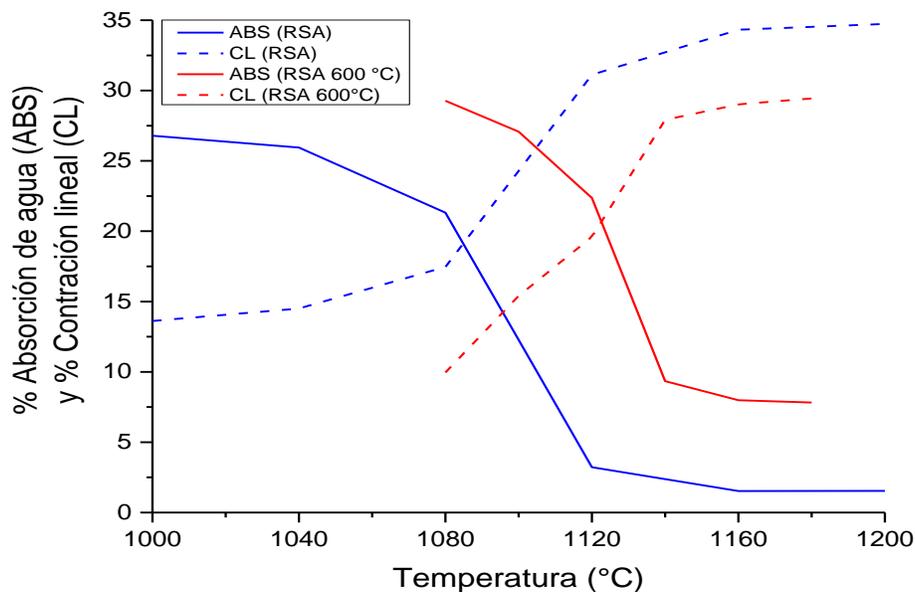


Figura 5.14.- Diagramas de gresificación del RSA y del RSA a 600°C.

Se puede observar en la figura 5.14., que en el caso del RSA previamente calcinado a 600°C, la contracción lineal disminuye ya que no contiene agua y materia orgánica que presentaba anteriormente, sin embargo, el porcentaje de absorción de agua aumenta considerablemente ya que el RSA perdió prácticamente toda su plasticidad. Este efecto pudiera no afectar físicamente en gran medida al incorporarse al GR, debido que solo se necesitan cantidades del 10 y 20% en peso.

Tabla 5.12.- % Absorción de agua y % Contracción lineal del GR+10%RSA previamente calcinado a 600 °C.

PORCENTAJES DE ABSORCIÓN DE AGUA Y DE CONTRACCIÓN LINEAL DEL GR + 10% RSA CALCINADO A 600°C.						
T (°C)	Dinicial (mm)	Dfinal (mm)	% CL	Wseco (g)	Whumedad (g)	% ABS
1080	50.18	48.40	3.68	14.10	15.84	12.34
1100	50.19	48.30	3.91	12.43	13.66	9.90
1120	50.21	47.50	5.71	13.68	14.80	8.19
1140	50.22	47.10	6.62	12.08	12.40	2.65
1160	50.19	46.62	7.66	11.97	12.12	1.25
1180	50.19	46.20	8.64	13.79	13.82	0.22

Tabla 5.13.- % Absorción de agua y % Contracción lineal del GR+20%RSA calcinado previamente a 600 °C.

PORCENTAJES DE ABSORCIÓN DE AGUA Y DE CONTRACCIÓN LINEAL DEL GR + 20% RSA CALCINADO A 600°C.						
T (°C)	Dinicial (mm)	Dfinal (mm)	% CL	Wseco (g)	Whumedad (g)	% ABS
1080	50.32	48.10	4.62	13.08	14.91	13.99
1100	50.31	47.75	5.36	12.83	14.15	10.29
1120	50.31	47.2	6.59	12.97	14.11	8.79
1140	50.3	46.22	8.83	12.73	13.32	4.63
1160	50.29	45.92	9.52	11.99	12.32	2.75
1180	50.31	45.54	10.47	11.97	12.11	1.17

En las tablas 5.12., y 5.13., se muestra como el porcentaje de contracción lineal aumenta de 3.68 a 8.64% y el porcentaje de absorción de agua disminuye de 12.34 a 0.22% en intervalos de temperatura de 1080 a 1180°C para el caso de la mezcla de GR

+10%RSA. Por otra parte de 4.62 a 10.47% de contracción lineal y de 13.99 a 1.17% de absorción de agua para el caso de GR+20%RSA.

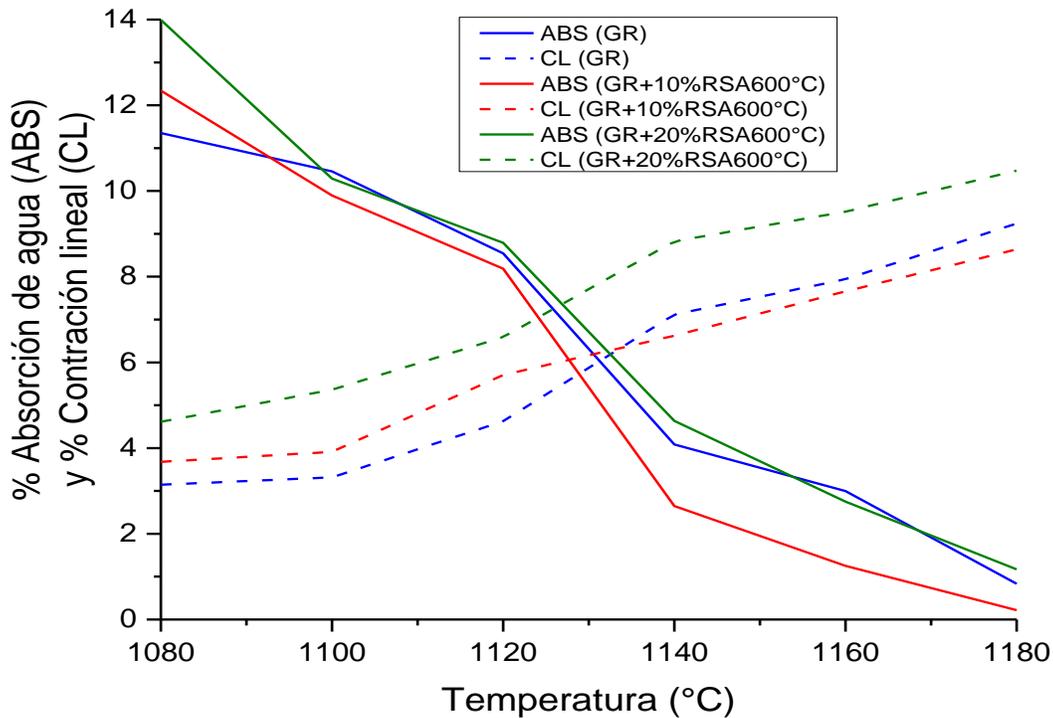


Figura 5.15.- Diagramas de gresificación del GR, GR+10%RSA calcinado y GR+20%RSA calcinado.

En la figura 5.15., se puede observar que nuevamente se mejoran las características del gres rojo con la adición del 10 % del RSA pero previamente calcinado a 600°C. Esto debido a la reducción de la porosidad abierta, factor que mejora a las características mecánicas del GR. Obteniendo baldosas cerámicas con un porcentaje de porosidad abierta del orden del 2.65% a una temperatura de 1140°C, 20°C menos que el proceso tradicional utilizando solamente el GR (1160°C), generando al mismo tiempo contracciones lineales ligeramente menores que el GR. Sin embargo, la incorporación en un 20% del RSA previamente calcinado a 600°C al GR no genera cambios significativos en cuanto al porcentaje de absorción del agua y aumenta su contracción lineal, lo que nos indica que no es factible su incorporación en dicha proporción.

Resistencia mecánica a la flexión.

Las piezas que se analizaron fueron especímenes de GR, GR + 10%RSA y GR +10%RSA previamente calcinado a 600°C. Siendo sometidas a procesos de cocción a temperaturas de 1140°C y 1160°C, debido a que a estas temperaturas se mejoró notablemente sus contracciones lineales y su porosidad abierta. El proceso de cocción se describió en el apartado 4.3.2.

Tabla 5.14.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR a 1140°C.

GR A 1140 °C					
Espécimen	Espesor(mm)	Ancho (mm)	RM (Kg/cm²)	Fza. Max. (N)	ME (KN/cm²)
1	6.07	29.60	174.10	181.40	980
2	6.15	29.80	158.50	166.20	850
3	6.14	29.66	144.15	153.20	820
PROMEDIO			158.92	166.93	883
DESVIACIÓN ESTANDAR			12.23	11.52	69

En la tabla 5.14., se muestra que el GR sometido a un proceso de cocción a una temperatura de 1140°C presenta una resistencia mecánica de 158.92 Kg/cm² ± 12.23 Kg/cm², una fuerza máxima a la rotura de 166.93 N ± 11.52 N y un módulo de elasticidad (módulo de Young) de 883 KN/cm² ± 69 KN/cm².

Tabla 5.15.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR+10%RSA a 1140°C.

GR + 10% RSA A 1140 °C					
Espécimen	Espesor(mm)	Ancho (mm)	RM (Kg/cm²)	Fza. Max. (N)	ME (KN/cm²)
1	3.55	29.02	243.66	72.60	1520
2	3.31	29.05	244.90	63.40	1740
3	3.42	29.03	246.54	70.26	1654
PROMEDIO			245.03	68.75	1638
DESVIACION ESTANDAR			1.18	3.90	91

En la tabla 5.15., se puede observar que al incorporar un 10% del RSA al GR, sometido a un proceso de cocción con una temperatura de 1140°C, presenta una

resistencia mecánica del orden de $245.03 \text{ Kg/cm}^2 \pm 1.18 \text{ Kg/cm}^2$, 54.18% más que el GR y un aumento del módulo de elasticidad del 85.50%, presentando un valor de $1638 \text{ KN/cm}^2 \pm 91 \text{ KN/cm}^2$.

Tabla 5.16.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR+10%RSA calcinado a 1140°C.

GR 10% RSA(CALCINADO A 600°C) A 1140 °C					
Espécimen	Espesor(mm)	Ancho (mm)	RM (Kg/cm ²)	Fza. Max. (N)	ME (KN/cm ²)
1	2.98	29.03	250.16	52.60	1650
2	3.28	29.21	243.26	53.40	1630
3	3.18	29.15	245.12	55.48	1698
PROMEDIO			246.18	53.83	1659
DESVIACION ESTANDAR			2.91	1.21	29

En la tabla 5.16., se muestra como los parámetros de resistencia mecánica y del módulo de elasticidad de la incorporación de un 10% en peso del RSA previamente calcinado a 600°C son del mismo orden que el de los especímenes del GR + 10%RSA sin calcinar, sometidos a un proceso de cocción con una temperatura de 1140°C. Y aunque aumenta su resistencia mecánica a la flexión, **no es conveniente utilizar al RSA calcinado para incorporarlo al GR, ya que genera un costo energético extra para su preparación.**

Tabla 5.17.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR a 1160°C.

GR A 1160 °C					
Espécimen	Espesor(mm)	Ancho (mm)	RM (Kg/cm ²)	Fza. Max. (N)	ME (KN/cm ²)
1	6.13	28.82	242	239	1680
2	5.87	28.65	244.24	225.60	1650
3	5.83	28.66	247.80	232.68	1789
PROMEDIO			244.68	232.43	1706
DESVIACION ESTANDAR			2.39	5.47	60

En la tabla 5.17., se muestra que el GR sometido a un proceso de cocción a una temperatura de 1160°C presenta a una resistencia mecánica de $244.68 \text{ Kg/cm}^2 \pm 2.39$

Kg/cm², una fuerza máxima a la rotura de 232.43 N ± 5.47 N y un módulo de elasticidad (módulo de Young) de 1706 KN/cm² ± 60 KN/cm².

Los parámetros de resistencia mecánica y de módulo de elasticidad presentan un comportamiento similar al del GR+10%RSA, pero este último con 20°C menos en el proceso de cocción y generando un ahorro de materia prima al agregar un 10% del RSA.

Tabla 5.18.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR+10%RSA a 1160°C.

GR + 10% RSA A 1160 °C					
Espécimen	Espesor(mm)	Ancho (mm)	RM (Kg/cm²)	Fza. Max. (N)	ME (KN/cm²)
1	3.10	28.66	275.45	68.70	1990
2	3.25	28.64	277.78	64.20	1880
3	3.35	28.63	280.96	66.79	1940
PROMEDIO			278.06	66.56	1937
DESVIACION ESTANDAR			2.26	1.84	45

En la tabla 5.18., se puede observar que al incorporar un 10% del RSA al GR, sometido a un proceso de cocción con una temperatura de 1160°C, presenta una resistencia mecánica del orden de 278.06 Kg/cm² ± 2.26 Kg/cm², 13.64% más que el GR a 1160°C y un aumento del módulo de elasticidad del 13.54%, presentando un valor de 1937 KN/cm² ± 45 KN/cm².

Tabla 5.19.- Resistencia mecánica a la flexión, fuerza máxima y módulo de elasticidad del GR+10%RSA calcinado a 1160°C.

GRES 10% RSA(CALCINADO A 600°C) A 1160 °C					
Espécimen	Espesor(mm)	Ancho (mm)	RM (Kg/cm²)	Fza. Max. (N)	ME (KN/mm²)
1	3.02	28.30	346.69	85.20	2760
2	3.11	28.07	395.52	101.60	3366
3	3.17	28.22	408.36	115.78	3778
PROMEDIO			383.52	100.86	3301
DESVIACION ESTANDAR			26.57	12.50	418

En la tabla 5.19., se puede observar que al incorporar un 10% del RSA calcinado a 600°C al GR, sometido a un proceso de cocción con una temperatura de 1160°C, presentan aumentos considerables en su resistencia mecánica del orden de 383.52 Kg/cm² ± 26.57 Kg/cm², 56.74% más que el GR a 1160°C y un aumento del módulo de elasticidad del 93.49%, presentando un valor de 3301 KN/cm² ± 418 KN/cm².

Tomando en cuenta que una baldosa cerámica de calidad debe presentar una porosidad abierta del orden de ≤3% (porcentaje de absorción de agua), y analizando las tablas 5.14.-5.19., la mejor alternativa para la elaboración de baldosas cerámicas son las muestras de GR+10%RSA a 1140°C, debido a que no requiere un previo tratamiento térmico para su preparación y se obtienen mejores propiedades mecánicas, además de generar un ahorro energético en el proceso de cocción de las baldosas cerámicas elaboradas en base al GR (20°C menos en el proceso de cocción tradicional a 1160°C), un ahorro de materia prima del orden del 10% y principalmente un aprovechamiento y uso al RSA que actualmente actúa como un desecho perjudicando a los principales cuerpos de agua de la ciudad de Morelia Michoacán.

A continuación se presentan las densidades aparentes y la colorimetría de las piezas elaboradas en base al GR+10%RSA a diferentes temperaturas de cocción.

Densidades aparentes del GR+10%RSA a diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 5.20.- Densidades aparentes del GR+10%RSA a diferentes temperaturas de cocción.

GR + 10% RSA			
Temperatura	m(gr)	mHG(gr)	pap (g/cm ³)
1180°C	12.42	63.87	2.64
1160°C	13.60	72.50	2.55
1140°C	13.36	71.67	2.53
1120°C	13.72	80.33	2.32
1100°C	12.94	76.59	2.29
1080°C	13.79	86.44	2.17

En la tabla 5.20., se muestra como aumentan las densidades aparentes de las muestras de GR+10%RSA en el intervalo de temperaturas de 1080°C hasta 1180°C, con valores que van desde 2.17 g/cm³ hasta 2.64 g/cm³.

Colorimetría del GR+10%RSA a diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 5.21.- Colorimetría del GR+10%RSA a diferentes temperaturas de cocción.

GRES (G) + 10% DE RSA			
Temperatura	L*(DG5)	a*(D65)	b*(D65)
1180°C	40.78	14.47	12.18
1160°C	42.82	18.60	16.73
1140°C	43.39	19.63	17.91
1120°C	46.49	23.61	23.94
1100°C	47.25	23.90	24.66
1080°C	51.60	25.27	28.69

En la tabla 5.21., se muestran los resultados numéricos de los parámetros colorimétricos L*, a* y b* del GR+10%RSA a diferentes temperaturas de cocción, estos parámetros indican que al aumentar la temperatura de cocción, la tonalidad de las piezas con cada vez más oscuras, más rojizas y menos amarillas.

5.3.- ELABORACIÓN DE LADRILLOS.

Barro Natural (BN), como aditivo al RSA para la elaboración de ladrillos.

Debido a que el RSA disminuyó su grado de plasticidad debido a la incorporación del Sulfato de Aluminio y la Sílice activada en el proceso de potabilización de la planta potabilizadora Vista Bella, fue necesario la incorporación de un Barro Natural proveniente de la zona de la tenencia Morelos, cercana a la presa de Cointzio, presente como yacimiento natural, para que actuara como un agente ligante en las partículas del RSA.



Figura 5.16.- Yacimiento natural del BN.

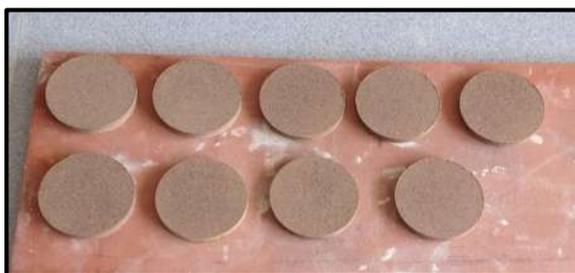


Figura 5.17.- Piezas en verde del BN.



Figura 5.18.- Piezas del BN sometidas a un proceso de cocción a temperaturas de 1100°C a 1200°C.

Difracción de Rayos X.

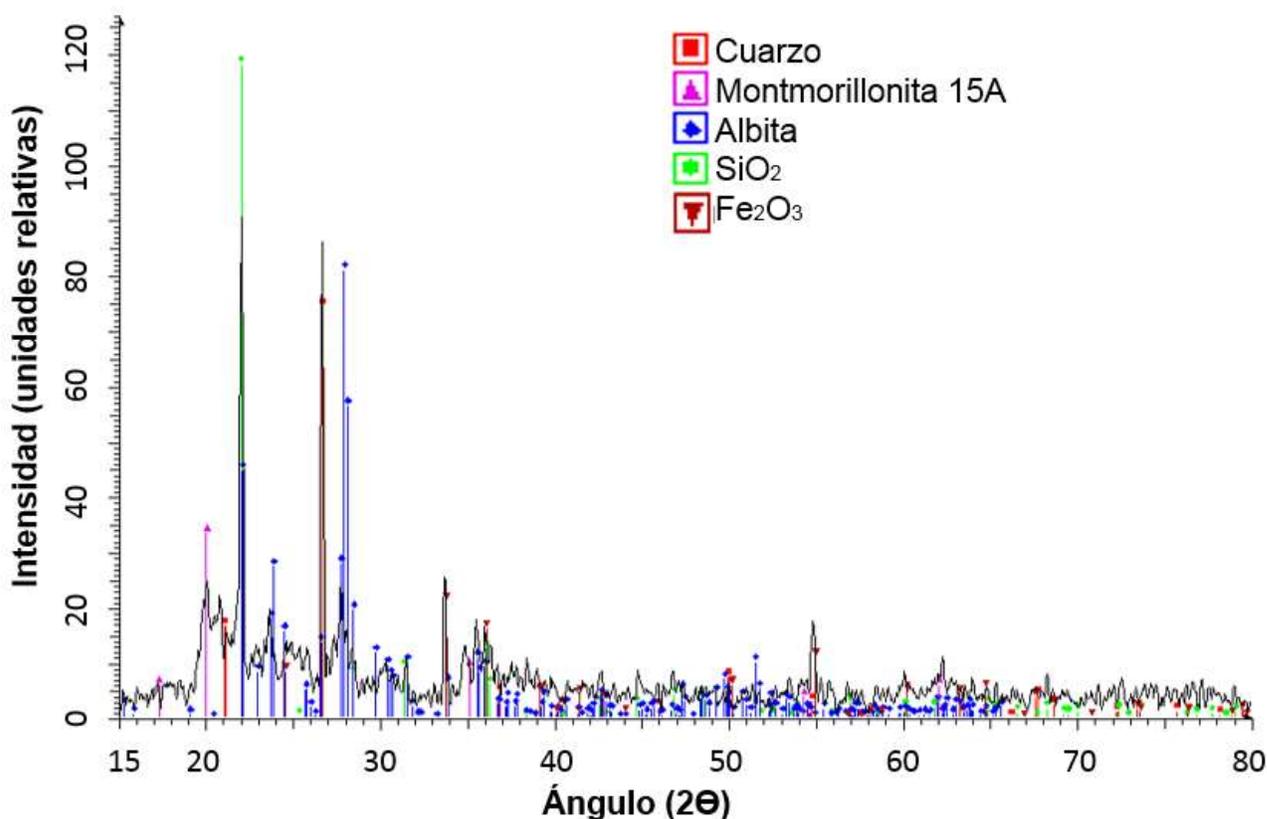


Figura 5.19.- Difractograma de Rayos X del BN.

En la figura 5.16., se presenta el difractograma de rayos X del BN, escaneado con irradiación $\text{CuK}\alpha$ (40 kV, 45 mA), en el intervalo [$15^\circ - 80^\circ$] en la escala 2θ con pasos de 0.050° en lapsos de 1.5 s. Mostrando los minerales presentes en dicho material, como son el caso del cuarzo y la sílice que indica que la muestra presenta características fundentes y de buena resistencia mecánica, obteniendo puntos de vitrificación por debajo de 1100°C (Díaz y Torrecillas, 2002). También se aprecia la presencia de materiales arcillosos (aluminosilicatos), como son los casos de la Montmorillonita de la familia de la esmectita, la cual genera propiedades de adsorción en el BN (Arvanitopyannis y Col., 1989) y la presencia de la Albita de la familia de las micas. Finalmente la presencia del Fe_2O_3 , que provoca una coloración rojiza al material el momento de la cocción, en comparación del color gris que presenta en verde (figuras 5.17. y 5.18).

Análisis Térmico diferencial (TG-ATD).

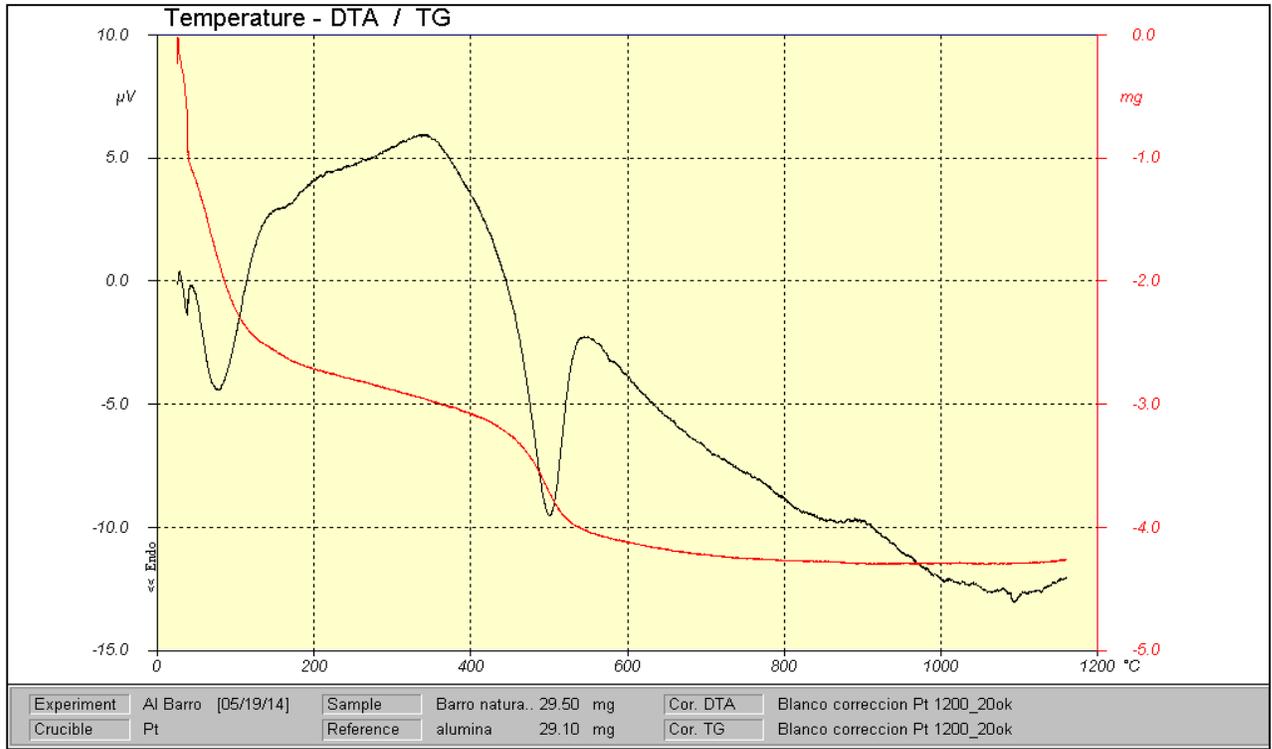


Figura 5.20.- Termograma diferencial (ATD-TG) del BN.

En la figura 5.20., se muestra el termograma diferencial (ATD-TG) del BN, en el cual se puede apreciar la presencia de un pico endotérmico a una temperatura próxima a los 100°C, asociado a la pérdida del agua de interestrato y nuevamente una señal endotérmica a una temperatura de 570°C, este efecto térmico se atribuye a la transición de fase de cuarzo α a cuarzo β (aumento fuerte de volumen) (ATC, 2004).

.- Determinación de las dimensiones en base a la norma NMX-C-038-ONNCCE-2013.

Debido a que el proceso de cocción de los ladrillos se realizó un horno artesanal (figura 4.17.), la cocción de estos no se realiza de manera homogénea, por lo cual se colocaron los especímenes en diferentes niveles y posiciones en dicho horno.

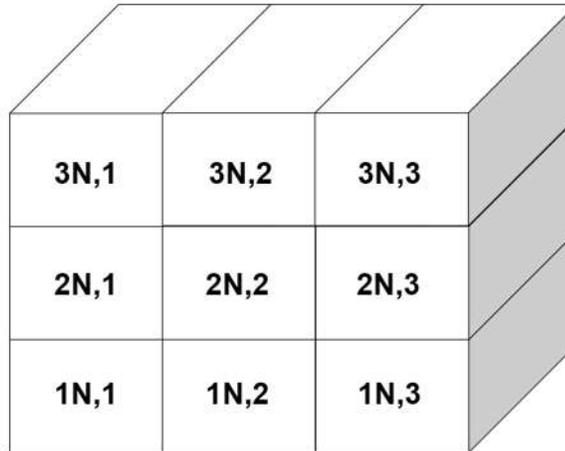


Figura 5.21.- Distribución de los ladrillos en el horno artesanal.

Los ladrillos que se analizaron fueron primeramente los elaborados en la región de la tenencia Morelos, los cuales se comercializan en la ciudad de Morelia, en base a unas mezclas de arcillas típicas de la región de la tenencia Morelos (PTM). Por otra parte se analizaron los ladrillos elaborados en base al RSA mezclados con BN en una proporción en peso de un 50-50 y un 70-30%.

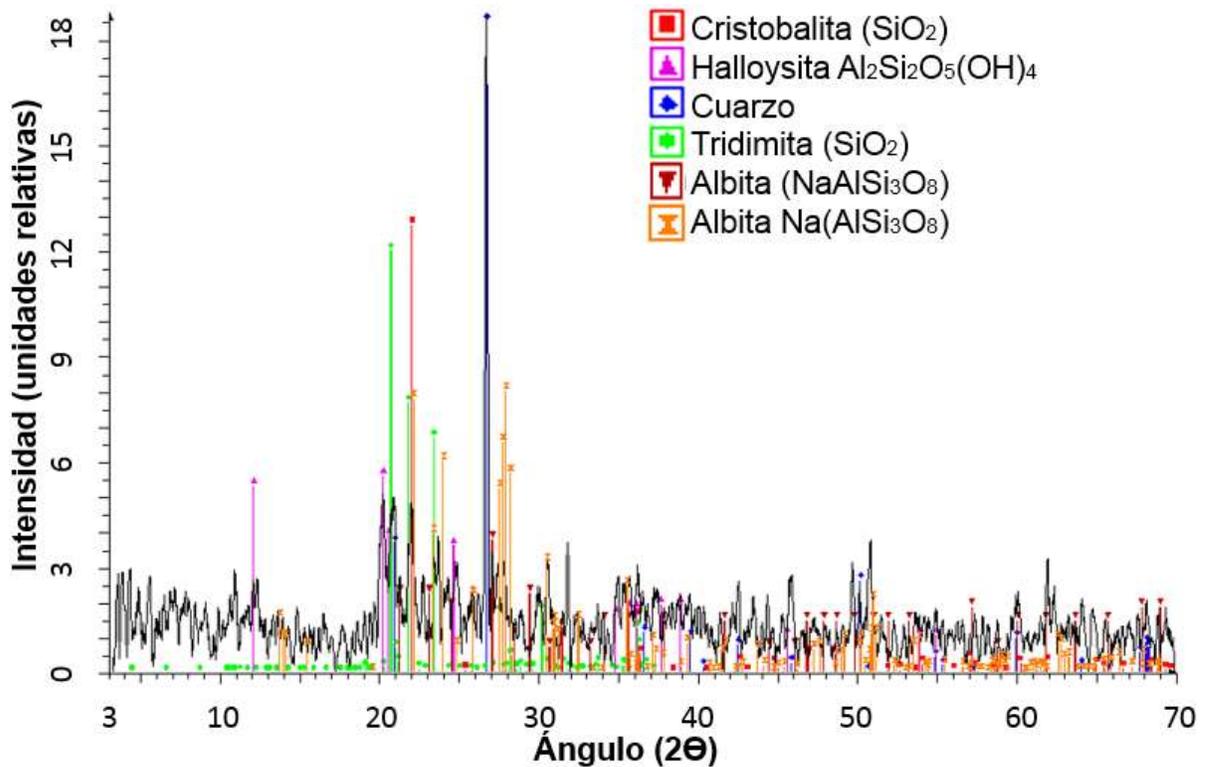


Figura 5.22.- Difractograma de rayos X de la PTM.

En la figura 5.22., se presenta el difractograma de rayos X de la PTM, escaneado con irradiación CuK α (40 kV, 45 mA), en el intervalo [3° - 70°] en la escala 2 Θ con pasos de 0.020° en lapsos de 0.6 s. Mostrando los minerales presentes en dicho material, como son el caso del Cuarzo, la Cristobalita y la Tridimita que indican que la muestra presenta características fundentes y de buena resistencia mecánica, obteniendo puntos de vitrificación por debajo de 1100°C (Díaz y Torrecillas, 2002). También se aprecia la presencia de materiales arcillosos (aluminosilicatos), como son los casos de la Halloysita, arcilla presente en el RSA la cual genera propiedades de plasticidad y la presencia de la Albita de la familia de las micas.

- **Ladrillos elaborados en la región de la tenencia Morelos.**

Tabla 5.22.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos cocidos en el primer nivel del horno.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos			
Especimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
LC,1N,1	22.80	11.60	5.80
LC,1N,2	22.70	11.70	5.90
LC,1N,3	22.80	11.70	5.80
LC,1N, promedio	22.77	11.67	5.83

Tabla 5.23.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos cocidos en el segundo nivel del horno.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos			
Especimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
LC,2N,1	23.10	11.90	5.90
LC,2N,2	23.00	11.90	6.10
LC,2N,3	23.20	12.00	6.10
LC,2N, promedio	23.10	11.93	6.03

Tabla 5.24.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos cocidos en el tercer nivel del horno.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos			
Especimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
LC,3N,1	23.60	12.30	6.20
LC,3N,2	23.50	12.30	6.30
LC,3N,3	23.50	12.10	6.40
LC,3N, promedio	23.53	12.23	6.30

En las tablas 5.22.-5.24., se muestra como las dimensiones de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos se ven afectadas por la posición en la que los ladrillos se encuentren ubicados en el horno artesanal, con labores que van desde 22.70cm hasta 23.60cm de largo, de 11.60cm hasta 12.30cm de ancho y de 5.80cm hasta 6.40cm de altura.

Tabla 5.25.- Dimensiones promedio de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos			
Especimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
LC, promedio	23.13	11.94	6.06
LC, Desv. Est.	0.31	0.23	0.19

En la tabla 5.25., se muestran los valores promedios de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos, obteniendo valores de 23.13cm \pm 0.31 cm de largo, 11.94cm \pm 0.23 cm de ancho y 6.06 cm \pm 0.19 cm de altura.

- Ladrillos elaborados en base a un 50% en peso de RSA + 50% en peso de BN.

Tabla 5.26.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 50% RSA + 50% BN cocidos en el primer nivel del horno.

Ladrillo elaborado con 50% RSA + 50% BN			
Espécimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
50RSA,50BN,1N,1	22.50	11.60	5.80
50RSA,50BN,1N,2	22.50	11.50	5.70
50RSA,50BN,1N,3	22.40	11.60	5.70
50RSA,50BN,1N, promedio	22.47	11.57	5.73

Tabla 5.27.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 50% RSA + 50% BN cocidos en el segundo nivel del horno.

Ladrillo elaborado con 50% RSA + 50% BN			
Espécimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
50RSA,50BN,2N,1	22.70	11.70	5.80
50RSA,50BN,2N,2	22.80	11.60	5.80
50RSA,50BN,2N,3	22.70	11.60	5.70
50RSA,50BN,2N, promedio	22.73	11.63	5.77

Tabla 5.28.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 50% RSA + 50% BN cocidos en el tercer nivel del horno.

Ladrillo elaborado con 50% RSA + 50% BN			
Espécimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
50RSA,50BN,3N,1	22.90	11.80	6.10
50RSA,50BN,3N,2	23.00	11.90	5.80
50RSA,50BN,3N,3	23.00	11.70	5.90
50RSA,50BN,3N, promedio	22.97	11.80	5.93

En las tablas 5.26.-5.28., se muestra como las dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN al momento de someterse al proceso de cocción presentan un poco más de contracción lineal en base a los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos, esto se debe que el RSA es un material más fundente que el

caso de la pasta artesanal que utilizan en la tenencia Morelos para la elaboración de ladrillos. También se ve afectada por la posición en la que los ladrillos se encuentren ubicados en el horno artesanal, con labores que van desde 22.40cm hasta 23.00cm de largo, de 11.50cm hasta 11.90cm de ancho y de 5.70cm hasta 6.10cm de altura.

Tabla 5.29.- Dimensiones promedio de los ladrillos elaborados en base a un 50% RSA + 50% BN.

Ladrillo elaborado con 50% RSA + 50% BN			
Especimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
50RSA, 50BN, promedio	22.72	11.67	5.81
50RSA, 50BN, Desv. Est.	0.20	0.10	0.09

En la tabla 5.29., se muestran los valores promedios de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN, obteniendo valores de 22.72cm ± 0.20 cm de largo, 11.67cm ± 0.10 cm de ancho y 5.81 cm ± 0.09 cm de altura.

- **Ladrillos elaborados en base a un 70% en peso de RSA + 30% en peso de BN.**

Tabla 5.30.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 70% RSA + 30% BN cocidos del primer nivel del horno.

Ladrillos elaborados con 70%RSA+30%BN			
Especimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
70RSA,30BN,1N,1	22.10	11.20	5.50
70RSA,30BN,1N,2	22.20	11.30	5.60
70RSA,30BN,1N,3	22.10	11.20	5.50
70RSA,30BN,1N, promedio	22.13	11.23	5.53

Tabla 5.31.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 70% RSA + 30% BN cocidos del segundo nivel del horno.

Ladrillos elaborados con 70%RSA+30%BN			
Espécimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
70RSA,30BN,2N,1	22.30	11.40	5.70
70RSA,30BN,2N,2	22.40	11.50	5.80
70RSA,30BN,2N,3	22.30	11.40	5.80
70RSA,30BN,2N promedio	22.33	11.43	5.77

Tabla 5.32.- Dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 70% RSA + 30% BN cocidos del tercer nivel del horno.

Ladrillos elaborados con 70%RSA+30%BN			
Espécimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
70RSA,30BN,3N,1	22.40	11.60	6.00
70RSA,30BN,3N,2	22.50	11.60	6.00
70RSA,30BN,3N,3	22.50	11.50	5.90
70RSA,30BN,3N, promedio	22.47	11.57	5.97

En las tablas 5.30.-5.32., se muestra como las dimensiones de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN al momento de someterse al proceso de cocción presentan un poco más de contracción lineal que los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos y los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN, esto se debe a que presenta mayor cantidad del RSA (material fundente que aumenta más la contracción lineal de los ladrillos). También se ve afectada por la posición en la que los ladrillos se encuentren ubicados en el horno artesanal, con labores que van desde 22.10cm hasta 22.50cm de largo, de 11.20cm hasta 11.60cm de ancho y de 5.50cm hasta 6.00cm de altura.

Tabla 5.33.- Dimensiones promedio de los ladrillos elaborados en base a un 70% RSA + 30% BN.

Ladrillos elaborados con 70%RSA+30%BN, promedio			
Espécimen	Largo (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
70RSA, 30BN, promedio	22.31	11.41	5.76
70RSA, 30BN, Desv. Est.	0.14	0.14	0.18

En la tabla 5.33., se muestran los valores promedios de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN, obteniendo valores de 22.31cm ± 0.14cm de largo, 11.41cm ± 0.14cm de ancho y 5.76cm ± 0.18 cm de altura.

5.3.3.- Capacidad de absorción de agua en 24h en base a la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013.

Tabla 5.34.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del primer nivel del horno.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos				
Espécimen	Msss (Kg)	Ms (Kg)	Pa (Kg)	A (dm ³ /m ³)
LC,1N,1	2.92	2.48	1.31	273.29
LC,1N,2	2.98	2.53	1.30	270.24
LC,1N,3	2.95	2.55	1.29	238.55
LC,1N, promedio	2.95	2.52	1.30	260.69

Tabla 5.35.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del segundo nivel del horno.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos				
Espécimen	Msss (Kg)	Ms (Kg)	Pa (Kg)	A (dm ³ /m ³)
LC,2N,1	2.85	2.45	1.27	253.16
LC,2N,2	2.86	2.44	1.26	262.50
LC,2N,3	2.87	2.41	1.27	287.50
LC,2N, promedio	2.86	2.43	1.27	267.72

Tabla 5.36.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del tercer nivel del horno.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos				
Espécimen	M_{sss} (Kg)	M_s (Kg)	Pa (Kg)	A (dm³/m³)
LC,3N,1	2.80	2.33	1.27	306.54
LC,3N,2	2.79	2.36	1.26	282.35
LC,3N,3	2.78	2.35	1.26	283.55
LC,3N, promedio	2.79	2.35	1.26	290.81

En las tablas 5.34.–5.36., se muestran las absorciones de agua en 24h de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos en los diferentes niveles del horno, mostrando además como el peso de los ladrillos disminuye conforme aumenta el nivel de la posición en la que se encontraban en el horno al momento del proceso de cocción, obteniendo valores de 2.55Kg hasta 2.33Kg. El mismo comportamiento se presenta en los especímenes saturados y superficialmente secos (M_{sss}) con valores desde 2.78 Kg hasta 2.98Kg. Los valores de los pesos de los ladrillos ahogados van desde 1.31Kg hasta 1.26Kg.

Tabla 5.37.- Capacidades de absorción de agua promedio en 24h de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos				
Espécimen	M_{sss} (Kg)	M_s (Kg)	Pa (Kg)	A (dm³/m³)
LC, promedio	2.87	2.43	1.28	273.08
LC, Desv. Est.	0.07	0.07	0.02	12.87

En la tabla 5.37., se muestran los valores promedios de las capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos, con valores de 273.08 dm³/m³ ± 12.87 dm³/m³, el equivalente al 27.3% de los especímenes. Estos valores están por encima del límite permitido en base a la norma mexicana **NMX-C-404-ONNCE-2012** para los ladrillos elaborados para arcilla artesanal (23%, 230 dm³/m³).

Tabla 5.38.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del primer nivel del horno.

Ladrillos elaborados en base a un 50%RSA + 50%BN				
Espécimen	Msss (Kg)	Ms (Kg)	Pa (Kg)	A (dm³/m³)
50RSA,50BN,1N,1	2.80	2.40	1.24	259.62
50RSA,50BN,1N,2	2.82	2.41	1.25	261.15
50RSA,50BN,1N,3	2.82	2.40	1.25	267.52
50RSA,50BN,1N, promedio	2.81	2.40	1.25	262.76

Tabla 5.39.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del segundo nivel del horno.

Ladrillos elaborados en base a un 50%RSA + 50%BN				
Espécimen	Msss (Kg)	Ms (Kg)	Pa (Kg)	A (dm³/m³)
50RSA,50BN,2N,1	2.86	2.42	1.23	269.94
50RSA,50BN,2N,2	2.85	2.41	1.22	269.94
50RSA,50BN,2N,3	2.85	2.42	1.24	267.08
50RSA,50BN,2N, promedio	2.85	2.42	1.23	268.99

Tabla 5.40.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del tercer nivel del horno.

Ladrillos elaborados en base a un 50%RSA + 50%BN				
Espécimen	Msss (Kg)	Ms (Kg)	Pa (Kg)	A (dm³/m³)
50RSA,50BN,3N,1	2.89	2.41	1.23	289.16
50RSA,50BN,3N,2	2.88	2.41	1.22	283.13
50RSA,50BN,3N,3	2.87	2.40	1.22	284.85
50RSA,50BN,3N, promedio	2.88	2.41	1.22	285.71

En las tablas 5.38.-5.40., se muestran los resultados de las capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a 50%RSA+50%BN. Estos valores se presentan del orden de 259.62 dm³/m³ hasta 289.16 dm³/m³ dependiendo del nivel del horno donde se sometieron al proceso de cocción. El peso de los ladrillos secos presentan valores que van de 2.40Kg hasta 2.42Kg. Mientras que los ladrillos saturados y superficialmente secos presentan pesos que van desde 2.80Kg hasta 2.89Kg.

Finalmente se presentan los pesos de los especímenes ahogados en agua, presentando valores desde 1.22Kg hasta 1.25Kg.

Tabla 5.41.- Capacidades de absorción de agua promedio en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN.

Ladrillos elaborados en base a un 50%RSA + 50%BN				
Especimen	Msss (Kg)	Ms (Kg)	Pa (Kg)	A (dm ³ /m ³)
50RSA, 50BN, promedio	2.85	2.41	1.23	272.49
50RSA, 50BN, Desv. Est.	0.03	0.01	0.010	9.69

En la tabla 5.41., se muestran la capacidad de absorción promedio de agua de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN, con valor de 272.49 dm³/m³ ± 9.69 dm³/m³. Este valor está un poco por encima del permitido por la norma mexicana NMX-C-404-ONNCE-2012 para los ladrillos elaborados con arcilla artesanal (23%, 230 dm³/m³).

Tabla 5.42.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del primer nivel del horno.

Ladrillos elaborados en base a un 70%RSA + 30%BN				
Especimen	Msss (Kg)	Ms (Kg)	Pa (Kg)	A (dm ³ /m ³)
70RSA,30BN,1N,1	2.18	1.98	1.18	200.00
70RSA,30BN,1N,2	2.17	1.97	1.19	204.08
70RSA,30BN,1N,3	2.16	1.96	1.19	206.19
70RSA,30BN,1N, promedio	2.17	1.97	1.19	203.42

Tabla 5.43.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del segundo nivel del horno.

Ladrillos elaborados en base a un 70%RSA + 30%BN				
Especimen	Msss (Kg)	Ms (Kg)	Pa (Kg)	A (dm ³ /m ³)
70RSA,30BN,2N,1	2.14	1.93	1.18	218.75
70RSA,30BN,2N,2	2.15	1.94	1.17	214.29
70RSA,30BN,2N,3	2.14	1.93	1.16	214.29
70RSA,30BN,2N promedio	2.14	1.93	1.17	215.77

Tabla 5.44.- Capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del tercer nivel del horno.

Ladrillos elaborados en base a un 70%RSA + 30%BN				
Espécimen	Msss (Kg)	Ms (Kg)	Pa (Kg)	A (dm³/m³)
70RSA,30BN,3N,1	2.13	1.91	1.15	224.49
70RSA,30BN,3N,2	2.12	1.90	1.15	226.80
70RSA,30BN,3N,3	2.13	1.90	1.16	237.11
70RSA,30BN,3N, promedio	2.13	1.90	1.15	229.47

En las tablas 5.42.-5.44., se muestran los resultados de las capacidades de absorción de agua en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN. Estos valores se presentan del orden de 200 dm³/m³ hasta 237.11 dm³/m³ dependiendo del nivel del horno donde se sometieron al proceso de cocción. El peso de los ladrillos secos presentan valores que van de 1.90Kg hasta 1.96Kg. Mientras que los ladrillos saturados y superficialmente secos presentan pesos que van desde 2.12Kg hasta 2.18Kg. Finalmente se presentan los pesos de los especímenes ahogados en agua, presentando valores desde 1.15Kg hasta 1.19Kg.

Tabla 5.45.- Capacidades de absorción de agua promedio en 24h de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN.

Ladrillos elaborados en base a un 70%RSA + 30%BN				
Espécimen	Msss (Kg)	Ms (Kg)	Pa (Kg)	A (dm³/m³)
70RSA,30BN, promedio	2.15	1.94	1.17	216.22
70RSA, 30BN, Desv. Est.	0.02	0.03	0.01	10.64

En la tabla 5.45., se muestra la capacidad de absorción promedio de agua de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN, con valor de 216.22 dm³/m³ ± 10.64 dm³/m³. Este valor está por debajo del permitido en base a la norma mexicana NMX-C-404-ONNCE-2012 para los ladrillos elaborados con arcilla artesanal (23%, 230 dm³/m³). Lo que induce a que puedan contener mayor resistencia a la compresión que los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos. Por otra parte los ladrillos elaborados en base a un

70%RSA+30%BN presentan valores de peso del orden de 2.15Kg \pm 0.02Kg, **con valores de hasta 450g menos que los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos.**

.- Resistencia a la compresión en base a la norma mexicana NMX-C-036, 2013.

Tabla 5.46.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del primer nivel del horno.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos			
Espécimen	Área(cm²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm²)
LC,1N,1	264.48	18795.00	71.06
LC,1N,2	265.59	18842.00	70.94
LC,1N,3	266.76	18951.00	71.04
LC,1N, promedio	265.61	18862.67	71.02

Tabla 5.47.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del segundo nivel del horno.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos			
Espécimen	Área(cm²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm²)
LC,2N,1	274.89	17998.00	65.47
LC,2N,2	273.70	18121.00	66.21
LC,2N,3	278.40	18054.00	64.85
LC,2N, promedio	275.66	18057.67	65.51

Tabla 5.48.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos del tercer nivel del horno.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos			
Espécimen	Área(cm²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm²)
LC,3N,1	290.28	16484.00	56.79
LC,3N,2	289.05	16785.00	58.07
LC,3N,3	284.35	16985.00	59.73
LC,3N, promedio	287.89	16751.33	58.20

En las tablas 5.46.-5.48., se muestran las ares, carga máxima y resistencia a la compresión de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos. Cuyos valores de resistencia a la compresión van desde 58.07 Kgf/cm² hasta 71.06 Kgf/cm² dependiendo del nivel del horno.

Tabla 5.49.- Resistencias a la compresión promedio de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos.

Ladrillos elaborados en la tenencia Morelos			
Espécimen	Área(cm ²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm ²)
LC, promedio	276.39	17890.56	64.91
LC, Desv. Est.	9.11	870.01	5.25

En la tabla 5.49., se muestran los valores promedios de las áreas, cargas máxima y resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos. Cuyo valor de resistencia a la compresión es del orden de 64.91 Kgf/cm² ± 5.25 Kgf/cm². **Estos valores están por debajo de lo que indica la norma mexicana NMX-C-404-ONNCE-2012 para ladrillos con dimensiones de longitud menores a 300mm (30cm) macizos y elaborados con arcilla (70 Kgf/cm²).**

Tabla 5.50.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del primer nivel del horno.

Ladrillo elaborado con 50% RSA + 50% BN			
Espécimen	Área(cm ²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm ²)
50RSA+50BN,1N,1	261.00	19356.00	74.16
50RSA+50BN,1N,2	258.75	19458.00	75.20
50RSA+50BN,1N,3	259.84	19564.00	75.29
50RSA+50B,1N, promedio	259.86	19459.33	74.88

Tabla 5.51.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del segundo nivel del horno.

Ladrillo elaborado con 50% RSA + 50% BN			
Espécimen	Área(cm²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm²)
50RSA+50BN,2N,1	265.59	19112.00	71.96
50RSA+50BN,2N,2	264.48	18952.00	71.66
50RSA+50BN,2N,3	263.32	18875.00	71.68
50RSA+50BN,2N, promedio	264.46	18979.67	71.77

Tabla 5.52.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN del tercer nivel del horno.

Ladrillo elaborado con 50% RSA + 50% BN			
Espécimen	Área(cm²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm²)
50RSA+50BN,3N,1	270.22	18542.00	68.62
50RSA+50BN,3N,2	273.70	18326.00	66.96
50RSA+50BN,3N,3	269.10	18225.00	67.73
50RSA+50BN,3N, promedio	271.01	18364.33	67.77

En las tablas 5.50.-5.52., se muestran las áreas, cargas máxima y resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN. Cuyos valores de resistencia a la compresión van desde 66.96 Kgf/cm² hasta 75.29 Kgf/cm² dependiendo del nivel del horno.

Tabla 5.53.- Resistencias a la compresión promedio de los ladrillos elaborados en base a un 50%RSA+50%BN.

Ladrillo elaborado con 50% RSA + 50% BN			
Espécimen	Área(cm²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm²)
50RSA+50BN, promedio	265.11	18934.44	71.47
50RSA+50BN, Desv. Est.	4.57	448.17	2.91

En la tabla 5.53., se muestran los valores promedios de las áreas, cargas máxima y resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos. Cuyo valor de resistencia a la compresión es del orden de 71.47 Kgf/cm² ± 2.91 Kgf/cm². **Estos**

valores están en el límite que indica la norma mexicana NMX-C-404-ONNCE-2012 para ladrillos con dimensiones de longitud menores a 300mm (30cm) macizos y elaborados con arcilla.

Tabla 5.54.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del primer nivel del horno.

Ladrillo elaborado con 70%RSA + 30%BN			
Espécimen	Área(cm²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm²)
70RSA+30BN,1N,1	259.84	21986	84.61
70RSA+30BN,1N,2	261.00	22109	84.71
70RSA+30BN,1N,3	258.75	23486	90.77
70RSA+30BN,1N, promedio	259.86	22527	86.70

Tabla 5.55.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del segundo nivel del horno.

Ladrillo elaborado con 70%RSA + 30%BN			
Espécimen	Área(cm²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm²)
70RSA+30BN,2N,1	254.22	21105.00	83.02
70RSA+30BN,2N,2	257.60	22109.00	85.83
70RSA+30BN,2N,3	254.22	23486.00	92.38
70RSA+30BN,2N promedio	255.35	22233.33	87.08

Tabla 5.56.- Resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN del tercer nivel del horno.

Ladrillo elaborado con 70%RSA + 30%BN			
Espécimen	Área(cm²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm²)
70RSA+30BN,3N,1	259.84	19879.00	76.50
70RSA+30BN,3N,2	261.00	20105.00	77.03
70RSA+30BN,3N,3	258.75	21632.00	83.60
70RSA+30BN,3N, promedio	259.86	20538.67	79.05

En las tablas 5.54.-5.56., se muestran las áreas, cargas máxima y resistencias a la compresión de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN. Cuyos valores

de resistencia a la compresión van desde 76.50 Kgf/cm² hasta 92.38 Kgf/cm² dependiendo del nivel del horno.

Tabla 5.57.- Resistencias a la compresión promedio de los ladrillos elaborados en base a un 70%RSA+30%BN.

Ladrillo elaborado con 70%RSA + 30%BN			
Espécimen	Área(cm ²)	Carga Máxima (Kgf)	RC (Kgf/cm ²)
70RSA+30BN, promedio	258.36	21766.33	84.27
70RSA+30BN, Desv. Est.	2.13	876.33	3.70

En la tabla 5.57., se muestran los valores promedios de las áreas, cargas máxima y resistencias a la compresión de los ladrillos en base a un 70%RSA+30%BN. Cuyo valor de resistencia a la compresión es del orden de 84.27 Kgf/cm² ± 3.70 Kgf/cm². **Estos valores están por encima del límite que indica la norma mexicana NMX-C-404-ONNCE-2012 (70 Kgf/cm²) en el orden del 20.38%, para ladrillos con dimensiones de longitud menores a 300mm (30cm) macizos y elaborados con arcilla.**

5.4.- ELABORACIÓN DE UNA PASTA CERÁMICA.

.- Diagramas de gresificación de mezclas con RSA y BN.

Se analizaron mezclas de 50% en peso de RSA con %50 en peso de BN (cuya caracterización se describió en el apartado 5.3.1., y mezcla con una relación en peso del 70% de RSA y 30% de BN.

Tabla 5.58.- % Absorción de agua (ABS) y % Contracción lineal (CL) de mezclas de 50%RSA+50%BN a diferentes temperaturas de cocción.

50% RSA + 50% BN						
T (°C)	Dinicial (mm)	Dfinal (mm)	% CL	Wseco (g)	Whumedad (g)	%ABS
1000	50.23	47.10	6.65	13.39	15.91	18.82
1040	50.23	46.10	8.96	13.51	15.63	15.69
1080	50.22	45.34	10.76	13.66	15.36	12.45
1120	50.22	44.30	13.36	13.75	15.01	9.16
1160	50.22	44.18	13.67	13.97	15.12	8.23
1200	50.23	43.81	14.65	14.88	16.03	7.73

En la tabla 5.58., se muestran los valores de los porcentajes de contracción lineal y de absorción de agua a diferentes temperaturas de cocción de la mezcla de 50% en peso del RSA + 50% en peso de BN. Estos valores van desde 13.39% de contracción lineal con 18.82% de absorción de agua hasta un 14.65% de contracción lineal con un 7.73% de absorción de agua.

Tabla 5.59.- % Absorción de agua (ABS) y % Contracción lineal (CL) de mezclas de 70%RSA+30%BN a diferentes temperaturas de cocción.

70% RSA + 30% BN						
T (°C)	Dinicial (mm)	Dfinal (mm)	% CL	Wseco (g)	Whumedad (g)	% ABS
1000	50.24	46.09	9.00	12.81	15.42	20.37
1040	50.19	45.66	9.92	12.03	14.31	18.95
1080	50.21	44.39	13.11	13.13	14.74	12.26
1120	50.23	43.46	15.58	12.58	13.12	4.29
1160	50.23	43.25	16.14	12.92	13.32	3.10
1200	50.21	43.18	16.28	12.82	13.17	2.73

En la tabla 5.59., se muestran los valores de los porcentajes de contracción lineal y de absorción de agua a diferentes temperaturas de cocción de la mezcla de 70% en peso del RSA + 30% en peso de BN. Estos valores van desde 9.00% de contracción lineal con 20.37% de absorción de agua hasta un 16.28% de contracción lineal con un 2.73% de absorción de agua.

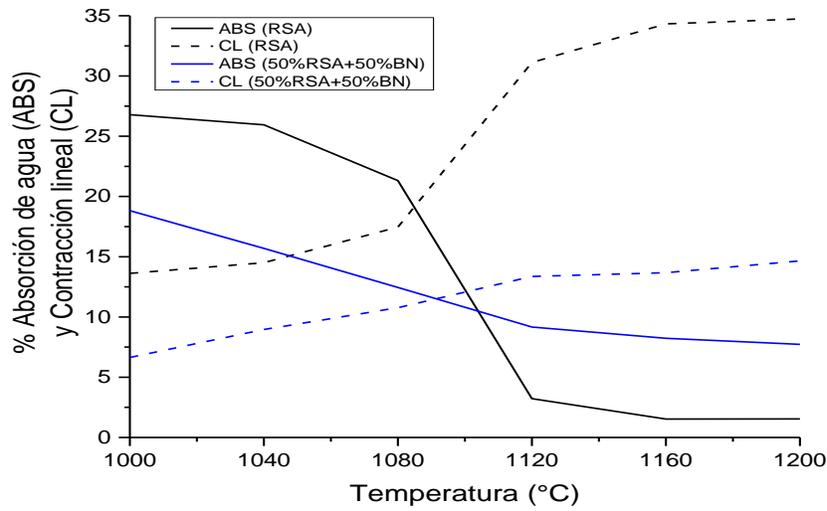


Figura 5.23.- Diagramas de gresificación del RSA y del 50%RSA+50%BN.

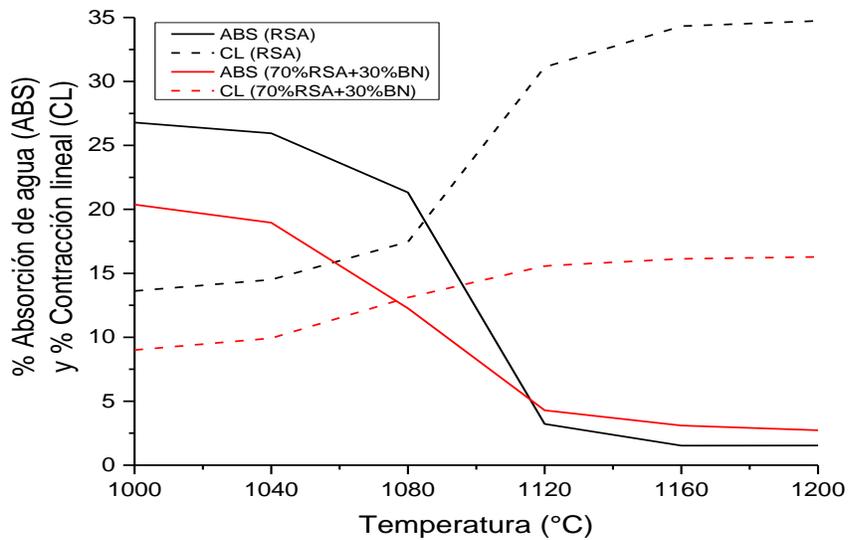


Figura 5.24.- Diagramas de gresificación del RSA y del 70%RSA+30%BN.

Observando las figuras 5.23., y 5.24., se demuestra que es mejor utilizar la composición en peso de 70% RSA + 30%BN ya que el porcentaje de absorción de agua no aumenta en gran proporción en comparación con la mezcla de 50% RSA + 50%BN. Además se aprecia claramente la estabilización y la disminución de la contracción lineal. En este momento se puede concluir que **la mejor cantidad del RSA para su uso en alfarería es del 70% en peso + 30% del BN**. No obstante para aumentar la plasticidad del material es necesario la incorporación del caolín EPK.

Caolín EPK (C).

El caolín EPK (C) es una arcilla cuya fórmula química es $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Se considera un caolín plástico, lo cual representa algo excepcional ya que el caolín rara vez presenta una buena plasticidad. Esto se debe a que se trata de una arcilla en estado de transición de arcilla primaria a arcilla secundaria. La formación del caolín se debe a la descomposición del feldespato por la acción del agua y del dióxido de carbono. Está formado por pequeñas capas hexagonales de superficie plana. En su estructura cristalina se distinguen dos láminas, una formada por tetraedros en cuyos vértices se situarían los átomos de oxígeno y en el centro estaría ocupada por el átomo de silicio y otra formada por octaedros, en cuyos vértices se situarían los átomos del grupo hidroxilo y el oxígeno y en el centro el átomo de aluminio.

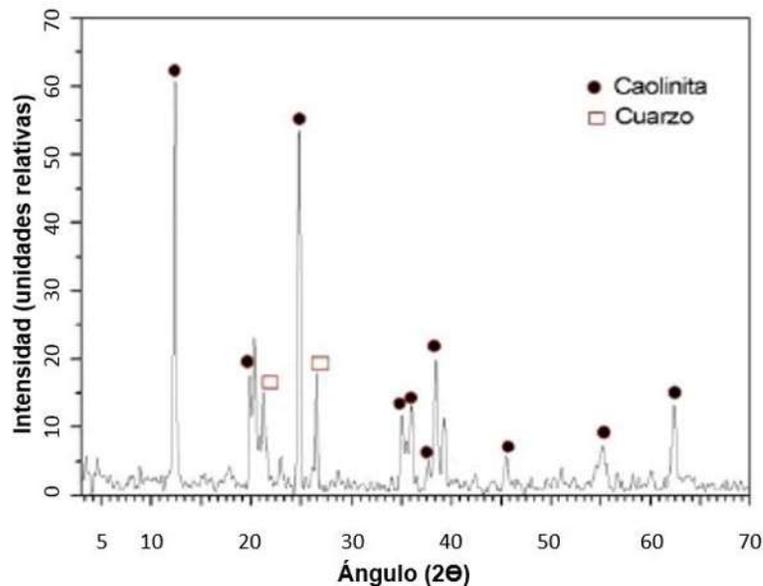


Figura 5.25.- Difractograma de Rayos X del caolín EPK.

En la figura 5.25., se muestran las fases cristalinas presentes en el Caolín EPK, en las que se presentan la Caolinita que le da la plasticidad al material y el Cuarzo que le proporciona fundencia.

Tabla 5.60.- Análisis químico y características del caolín EPK.

Componente	Composición (wt%)
SiO ₂	45.3
Al ₂ O ₃	38.38
Fe ₂ O ₃	0.30
TiO ₂	1.44
MgO	0.25
CaO	0.05
Na ₂ O	0.27
K ₂ O	0.04
LOI(950)	13.97
Densidad (g/cm³)	2.62
Tamaño medio de partícula (µm)	1.43
Área superficial específica (m²/g)	24

Diagramas de gresificación de mezclas con RSA, BN y C.

Tabla 5.61.- % Absorción de agua (ABS) y % Contracción lineal (CL) de mezclas de 70%RSA+20%BN+10%C a diferentes temperaturas de cocción.

70% RSA + 20% BN + 10% C						
T (°C)	Dinicial (mm)	Dfinal (mm)	% CL	Wseco (g)	Whumedad (g)	% ABS
1000	50.19	45.81	9.56	11.86	14.59	23.02
1040	50.18	45.25	10.90	11.44	13.86	21.15
1080	50.22	43.73	14.84	11.23	12.90	14.87
1120	50.19	40.51	23.90	11.10	11.60	4.50
1160	50.18	40.28	24.58	11.57	11.98	3.54
1200	50.18	40.16	24.95	12.67	13.08	3.24

En la tabla 5.61., se muestran los valores de los porcentajes de contracción lineal y de absorción de agua a diferentes temperaturas de cocción de la mezcla del 70% en peso del RSA + 20% en peso de BN + 10% en peso de C. Estos valores van desde 9.56% de contracción lineal con un 23.02% de absorción de agua hasta un 24.95% de contracción lineal con un 3.24% de absorción de agua.

Tabla 5.62.- % Absorción de agua (ABS) y % Contracción lineal (CL) de mezclas de 70%RSA+15%BN+15%C a diferentes temperaturas de cocción.

70% RSA + 15% BN + 15% C						
T (°C)	Dinicial (mm)	Dfinal (mm)	% CL	Wseco (g)	Whumedad (g)	% ABS
1000	50.19	45.72	9.78	11.37	13.98	22.96
1040	50.17	45.06	11.34	11.49	13.85	20.54
1080	50.18	43.87	14.38	11.16	12.93	15.86
1120	50.20	40.43	24.17	11.46	11.95	4.28
1160	50.21	40.12	25.15	11.20	11.59	3.48
1200	50.20	39.93	25.72	10.71	11.01	2.80

En la tabla 5.62., se muestran los valores de los porcentajes de contracción lineal y de absorción de agua a diferentes temperaturas de cocción de la mezcla del 70% en peso del RSA + 15% en peso de BN + 15% en peso de C. Estos valores van desde 9.78% de contracción lineal con 22.96% de absorción de agua hasta un 25.72% de contracción lineal con un 2.80% de absorción de agua.

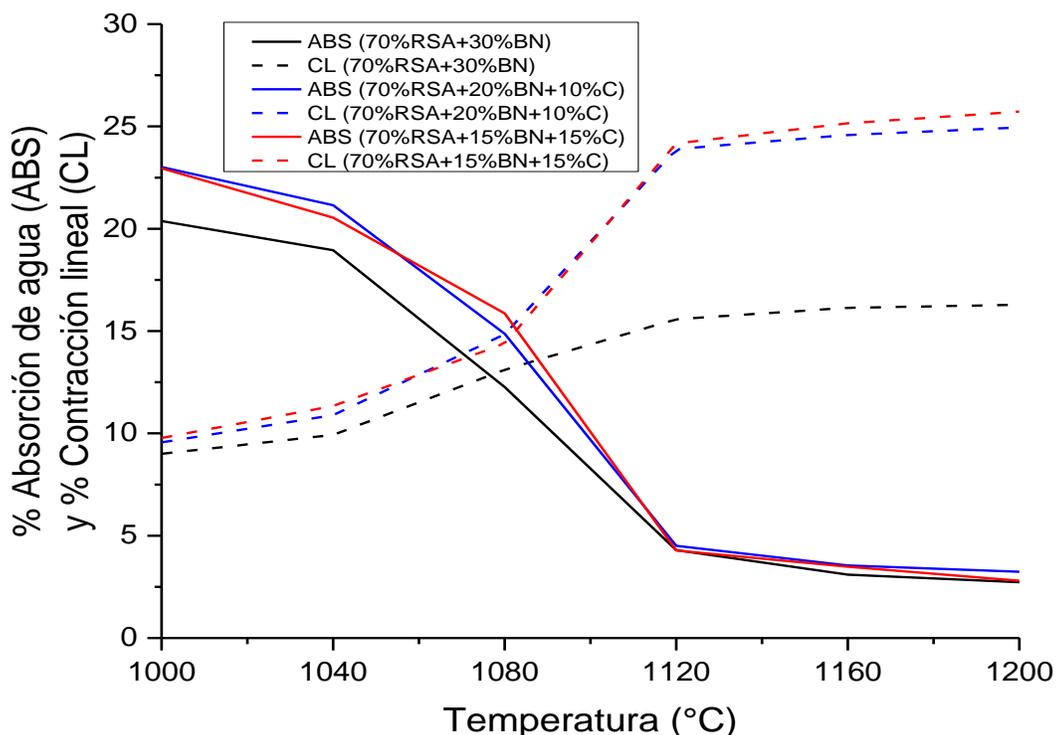


Figura 5.26.- Comparación de los diagramas de gresificación del RSA adicionando Barro Natural y Caolín EPK.

En la figura 5.26., se observa que al adicionar caolín EPK (C) a la mezcla del RSA con BN, la contracción lineal aumenta, este comportamiento se debe a que el caolín EPK al hacer un componente plástico, provoca una mayor sinterización en las partículas al momento del proceso de cocción. Por otra parte se observa que el comportamiento de los diagramas de gresificación con las composiciones de caolín EPK al 10 y 15% es prácticamente el mismo. Por lo que es preferible utilizar la mezcla de 70%RSA+20%BN+10%C, ya que se utiliza menor cantidad del reactivo caolín EPK, el cual representa mayor costo en comparación con el BN que se presenta en la naturaleza de manera natural en formas de yacimientos.

.- Limites de Atterberg.

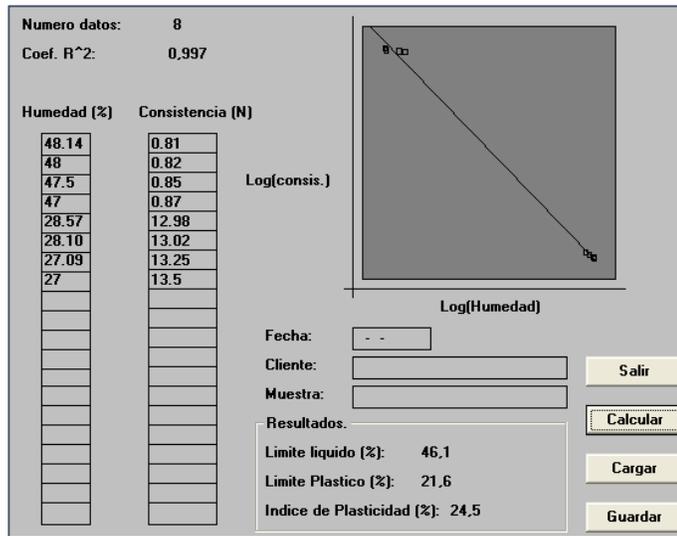


Figura 5.27.- Limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad de la mezcla de 70%RSA+20%BN+10%C.

En la figura 5.27., se muestran valores necesarios de pares de datos de humedad y consistencia para obtener los parámetros de límite líquido, limite plástico e índice de plasticidad de la mezcla de 70%RSA+20%BN+10%C, obteniendo valores del orden de 46.1%, 21.6% y 24.5% respectivamente.

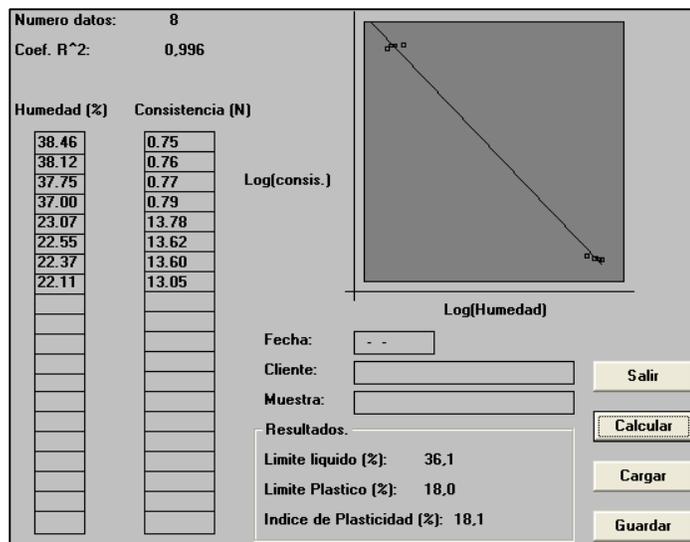


Figura 5.28.- Limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad de la mezcla de 70%RSA+15%BN+15%C.

En la figura 5.28 se muestran valores necesarios de pares de datos de humedad y consistencia para obtener los parámetros de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de la mezcla de 70%RSA+15%BN+15%C, obteniendo valores del orden de 36.1%, 18.0% y 18.1% respectivamente.

De las figuras 5.24., y 5.25., se puede concluir que **es mejor utilizar la mezcla de 70%RSA+20%BN+10%C para productos alfareros**, debido que se necesita una menor cantidad del reactivo caolín EPK para obtener un límite plástico del orden del 21.6% (3.6% más que el que se obtiene con la mezcla del 70%RSA+15%BN+15%C).

CONCLUSIONES

Generales.

- El RSA presenta en su composición química a la arcilla ferruginosa en estado coloidal halloysita 7A de morfología cilíndrica aglomerada y con tamaños de partícula del orden de $3.78\mu\text{m} \pm 1.28\mu\text{m}$.
- Se realizó el aprovechamiento del RSA mediante la elaboración de baldosas cerámicas, ladrillos artesanales y mediante la elaboración de una pasta cerámica de alfarería, evitando así el desperdicio del material residual en los principales cuerpos de agua de la ciudad de Morelia.
- La adición del Sulfato de Aluminio y la Sílice Activada en el proceso de potabilización de la planta potabilizadora Vista Bella, provocan que los materiales elaborados en base al RSA presenten mejores propiedades mecánicas que algunos productos comerciales de la ciudad de Morelia.

Baldosas cerámicas.

- Las condiciones óptimas para la elaboración de baldosas cerámicas de calidad (3% de porosidad abierta) se logran mediante la incorporación de un 10% en peso del RSA al GR, generando un ahorro en la materia prima, empleando un material que actúa como un desecho en la ciudad de Morelia.
- Se generó un ahorro energético del proceso de cocción de las baldosas cerámicas, mediante la disminución de la temperatura de operación desde un valor de 1160°C hasta una temperatura de 1140°C .
- A 1140°C las baldosas cerámicas presentan una porosidad abierta del orden del 2.69% (en comparación del 4.08% del GR) y una contracción lineal del orden del 5.59% (en comparación del 7.11% del GR), lo que genera menor porosidad abierta y menor contracción lineal de las piezas cerámicas.
- La incorporación del RSA en un 10% en peso al GR y sometido a un proceso de cocción de 1140°C , genera un aumento del orden del 54.18% en la resistencia mecánica presentando un valor de 245.03 Kg/cm^2 , y un aumento del 85.50% del módulo de elasticidad con valor de 1638 KN/cm^2 en base al GR.

- No es factible la adición de un 20% a un 50% en peso del RSA al GR, debido a que no disminuye la porosidad abierta ni aumenta la contracción lineal del GR. Lo que provoca que sus resistencias mecánicas no sean mejores.

Elaboración de ladrillos.

- Las condiciones óptimas para la elaboración de ladrillos artesanales se logran mediante una mezcla del 70% en peso del RSA y un 30% en peso del BN.
- Los ladrillos presentan una capacidad de absorción de agua del orden de 216.22 dm³/m³. 6% menos del valor permitido por la norma mexicana NMX-C-404-ONNCE-2012 (23%, 230 dm³/m³), con valores de peso del orden de 2.15Kg, representando hasta 450g menos que los ladrillos elaborados en la tenencia Morelos (ladrillos comerciales en la ciudad de Morelia).
- Los ladrillos presentan valores de resistencia a la compresión del orden de 84.27 Kgf/cm². 20.38% mayor del límite que exige la norma mexicana NMX-C-404-ONNCE-2012 (70 Kgf/cm²).

Pasta cerámica.

- Para obtener una pasta cerámica para alfarería en base al RSA es necesario que dicha pasta contenga un 70% en peso del RSA, 20% en peso de BN y 10% en peso de C, con un límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del orden del 36.1%, 18.0% y 18.1% respectivamente.

RECOMENDACIONES

- Incorporar en un 10 y un 20% en peso del RSA a un revestimiento cerámico. Evaluando su porcentaje de porosidad abierta y su porcentaje de contracción lineal en un intervalo de temperatura de 1000°C a 1120°C en intervalos de 20°C, mediante diagramas de gresificación, con la finalidad de mejorar las resistencias mecánicas de las baldosas cerámicas utilizadas como revestimientos cerámicos.
- Utilizar el RSA como contenedor de carga, almacenamiento y liberación del benzotriazol, evaluando su tiempo de liberación y su rendimiento anticorrosivo del cobre y metales de transición en un medio salino.
- Evaluar la capacidad del RSA como barrera de aislamiento cuando se utiliza como nanorelleno de diferentes nanocompuestos cuando son sometidos a procesos de reacción a elevadas temperaturas.
- Utilizar al RSA como un soporte catalítico en diferentes reacciones de polimerización, evaluando la actividad catalítica de diferentes especies moleculares, así como la separación y recuperación del catalizador.
- Utilizar el RSA como transporte de fármacos y comparar su rendimiento con los que generan los nanotubos de carbono.

REFERENCIAS

ATC, 2004. Asociación Española de Técnicos Cerámicos. Tecnología Cerámica Aplicada Volumen I.SACMI.

Arvanitopyannis I., Eleftheriadis I., Tsatsaroni, E., 1989, Influence of pH adsorption of dye-containing effluents with different bentonites: Chemosphere, 18(9-10), 1707-1711.

Baird C., 2001. Química ambiental. Editorial Reverte: 437-441.

Barry M., 1993. Escultura, modelado y cerámica. Técnicas y materiales. 18-32.

Bravo E. M., Medina O. L., García O., Prat C. y Barrera G., 2007. Tecnologías agroecológicas para la restauración de suelos degradados en la cuenca de Cointzio, Michoacán, INIFAP.

Bergaya F., Theng B. K. G., Lagaly G., 2010. Handbook of Clay Science. Developments in Clays Science. 1.

Cravero F., Martínez G., Pestalardo F., 2009. Yacimientos de halloysita en Mamil Choique, provincia de río negro, Patagonia. Universidad Nacional del Sur.

Cruz G. A. M., 2007. La contaminación de suelos y aguas. Su prevención con nuevas sustancias naturales. Universidad de Sevilla. 19-23.

Daria V.A., y Dmitry G.S., 2008. Material Today. 11

Díaz R. L. A., Torrecillas R., 2002. Arcillas Cerámicas. Una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Instituto Nacional del Carbón. Oviedo, España.

Dmitry G.S., Lamaka S.V., Yasakau K.A., Zheludkevich M.L., Ferreira M.G., y Mohwald H. J. Phys, 2008. Chem. C, 958.

DOF, 2003. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. México.

Escardino B. A., Amoros A. J. L. y Navarro E. J. E., 1981. Estudios de pastas de gres para pavimentos. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Valencia.

García V. A., 2004. Cerámica tradicional y no tradicional. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Consultor de AICE, Castellón de la plana.

García R. E., 2004. Las arcillas: propiedades y usos. Universidad Complutense (Madrid). 3-10.

Guggenheim S. y Martin R. T., 1995. Definition of Clay and Clay Mineral: Join Report of the AIPEA Nomenclature and CMS Nomenclature Committees. 43, 255-256.

INE-CONAGUA, 2002. Presas de México. Presa de Cointzio, Distrito de Morelia y Querendaro, Michoacán.

INE, Semarnat, 2012. Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos. México.

ISO 10545-3,1997. Baldosas Cerámicas. Determinación de la absorción de agua, de la porosidad abierta, de la densidad relativa aparente y de la densidad aparente.

ISO 10545-4, 1997. Baldosas Cerámicas. Determinación de la resistencia mecánica a la flexión y de la carga de rotura.

ISO 10545-16, 1999. Baldosas Cerámicas. Determinación de pequeñas variaciones de color.

Joussein E., Petit S. y Delvaux B., 2007. Applied Clay Science 35. 17.

Jiménez C. B. E., 2001. La contaminación ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada. CIAM, FEMISCA. 194-200.

Juárez B. y Rico R., 2005. Mecánica de suelos. Tomo I. Ed., Limusa. 42-50.

Khan A., Shamsi M. H. y Choi T. S., 2009. Computational Materials Science 45. 257.

Kingery W. D., 2013. Introduction to Ceramics. John Wiley & Sons. Third Edition.

Lange. F. F., 1989. Powder Processing Science and Technology for Increased Reliability, J. Am. Ceram. Soc. 3-15.

Levis S. R. y Deasy P. B., 2003. International Journal of Pharmaceutics 253. 145.

Li C., Liu J., Qu X. y Yang Z., 2009. Journal of Applied Polymer Science 112. 2647.

- Lvov Y. M., Shchukin D. G., Mohwald H. y Price R. R., 2008. Halloysite Clay Nanotubes for Controlled Release of Protective Agents. 814-820. ACSNANO.
- Machado G. S., Castro K.A.D.F., Wypych F., y Nakagaki S., 2008. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 283. 99.
- Mingliang D., Baochun G., Demin J., 2006. European Polymer Journal 42. 1362.
- Morales G. J., 2005. Tecnología de los materiales cerámicos. Comunidad de Madrid. 187-197.
- Mroczek K., Kalisz S., Pronobis M. y Soltys J., 2011. The effect of halloysite additive on operation of boilers firing agricultural biomass. Fuel Processing Technology, 92, 845–855.
- NMX-C-036-ONNCCE-2013. Industria de la construcción. Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines. Resistencia a la compresión. Método de prueba.
- NMX-C-037-ONNCCE-2013. Industria de la construcción, concreto, bloques, ladrillos o tabiques y tabicones de concreto. Determinación de la absorción de agua.
- NMX-C-038-ONNCCE-2013. Industria de la construcción. Determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción.
- NMX-C-404-ONNCCE-2012. Industria de la construcción, mampostería, bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para su uso industrial. Especificaciones y métodos de ensayo.
- NOM-052-SEMARNAT-2005. Determinación de las características, procedimiento de identificación, clasificación y listados de los residuos peligrosos.
- Onoda G. Y. y Hench L. L., 1988. Ceramic processing before firing. John Wiley and sons.
- Padoa L., 1990. La cocción de productos cerámicos. Ed. Omega. Barcelona.
- Pasbakhsh P., Ismail H., Fauzi M. N. A. y Bakar A., 2010. Applied Clay Science 48. 405.
- Putnis A, 1992. Introduction to Mineral Sciences. Editor Cambridge University Press. 457-460.
- Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

- Ramírez S. B., Fernández E. V. R., Bero, Escribano J. S., Blas M. M. P. y Montiel A. G., 2009. Microporous and Mesoporous Materials 120.132.
- Ramos O. R., Sepúlveda M. R. y Villalobos M. F., 2003. El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis. Universidad Autónoma de Baja California. 137-145.
- Reed J. S., 1995. Introduction of the principles of ceramic processing. John Wiley and sons. New York.
- Regueiro M., Sánchez E., V. Sanz V. y Criado E., 1996. La industria cerámica en España. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 35. 439-452.
- Sánchez C. E. A. y Wagner G. A. I., 2008. "Modelo numérico para la operación óptima de un hidrosistema de aguas Subterráneas, IMTA.
- Semarnat, 2006. Bases para Legislar la Prevención y Gestión Integral de Residuos en México.
- Semarnat, 2012. Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. México.
- Tierrablanca E., García J. R., Roman P. y Silva R. C., 2010. Applied Catalysis A General 381.267.
- UNE-103-302-94, 1994. Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.
- UNE-56-533, 1975. Características físico-mecánicas. Determinación de las contracciones lineales y volumétricas.
- Vázquez M. E. C., 2005. Materiales Cerámicos. Propiedades, aplicaciones y elaboración.
- Vergaro V., Abdullayev E., Lvov Y. M., Zeitoun A., Cingolani R., Rinaldi R. y Leporatti S., 2010. Biomacromolecules 11. 820.

Wang F. F. Y., 1978. Treatise on Materials Science and technology. Vol. 9. Ceramic fabrications processes. Ed. Academic Press. New York.

Zhang L. y Liu P., 2008. Nanoscale Res Lett 3. 299.

Zhang L., Wang T. y Liu P., 2008. Applied Surface Science 255. 2091.

Zhixin Y., Yuanfang C., Baochun Z., Bingtao Z., Mingliang Y. y Demin Y., 2009. Polymer Plastics Technology and Engineering 48. 607.

Zhou, C. y Keeling, J., 2013. Fundamental and applied research on clay minerals: From climate and environment to nanotechnology. Applied Clay Science, 74, 3–9.