

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“DISEÑO DE UN COMPUESTO FORMADO POR UN DESECHO
AGROINDUSTRIAL Y UNA ARCILLA NATURAL COMO ALTERNATIVA
DE USO EN LA ELABORACIÓN DE PIEZAS CERÁMICAS”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN DISEÑO

PRESENTA:
DALILA RUBICELA CRUZ FABIÁN

CODIRECTORES:
I.D. ARMANDO LÓPEZ TORRES
DR. VÍCTOR G. JIMÉNEZ QUERO

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, 29 DE FEBRERO DEL 2016.

DEDICATORIA

A mi madre

A mi padre

*quienes me han dado su vida,
su apoyo y son mi ejemplo
de superación inalcanzable.*

*A quienes siempre han reforzado y siguen
reforzando mi ánimo por continuar.*

*A quienes durante todo este tiempo me han
brindado su valiosa compañía.*

*A mis hermanos Iván Edú y Elio César,
a mi familia.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mis padres

María Fabián M. y Eldo Cruz M.

A Dios por darnos siempre nuevas oportunidades.

A mis directores de Tesis. Ing. Armando López Torres y

Dr. V. Guillermo Jiménez Quero.

A mis revisores: Dra. Patricia Gallegos Acevedo,

Dr. Guillermo Juárez López y M.A.V. Alejandro Bravo Guzmán.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR-IPN) Unidad Oaxaca por las instalaciones y equipo facilitado, al Ing. Margarito Ortiz G. del laboratorio de materiales.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca, al taller de Cerámica, Instituto de Diseño, Instituto de Minería y al Laboratorio de Materiales Avanzados.

A los maestros:

Juan Ruiz (del taller de cerámica del ICAPET), Darío (del taller "Donají") y

Claudio Jerónimo (del Taller "Canela") por los conocimientos y equipos brindados para el desarrollo del presente proyecto.

Al los Proyectos: "Adición de desechos industriales a una matriz arcillosa para la elaboración de ladrillos sinterizados" Clave SIP: 20151128

y "Ceniza de bagazo de caña como constituyente de materiales cerámicos artesanales" Clave SIP: 20161629, por la continuación de la presente investigación.

ÍNDICE

RESUMEN 1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	6
1.2. JUSTIFICACIÓN.	8
1.3. ANTECEDENTES.	11
1.3.1. Aplicaciones de la CBC.	11
1.3.2. Aplicaciones de la CBC en cerámica roja y vidriada.	13
1.3.3. Aplicaciones del mucílago de nopal en cerámicos y arcillas.	17
1.4. OBJETIVOS.	18
1.4.1. Objetivo general.	18
1.4.2. Objetivos particulares.	18
1.4.3. Metas.	19
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	20
1.6. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.	22
1.6.1 Metodología cuantitativa	22
1.6.2 Diseño de Experimentos	26
CAPÍTULO II. MARCO REFERENCIAL	
2.1. LOS MATERIALES CERÁMICOS	32
2.2. LA CERÁMICA.	32
2.2.1. Materias primas de la cerámica	33
2.2.2. Clasificación de la cerámica	34
2.2.3. Principales propiedades	37
2.2.4. Procesos cerámicos artesanales	39
2.2.5. Concepción de piezas cerámicas	43
2.2.6. Aplicaciones	45
2.3. LAS ARCILLAS.	47
2.3.1. Clasificación de las arcillas	49
2.3.2. Principales características y propiedades	55
2.3.3. Cambios por la acción de la temperatura	57

2.3.4. Caracterización y normatividad de las arcillas	58
2.3.5. Materiales aditivos de las arcillas	62
2.3.6. Utilización de sílice en las arcillas	65
2.4. CENIZAS QUE SE AGREGAN A LAS ARCILLAS.	67
2.4.1. Ceniza de huesos	67
2.4.2. Ceniza de una hoguera	67
2.4.3. Ceniza de madera	67
2.4.4. Ceniza de bagazo de caña	68
2.5. AGLUTINANTES ORGÁNICOS USADOS EN LAS ARCILLAS.	70
2.5.1 Mucílago de nopal	70

CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. DISEÑO DEL EXPERIMENTO.	74
3.1.1. Factores, niveles y variables respuesta	74
3.2. ELECCIÓN DE MATERIALES.	79
3.2.1. Recolección de la ceniza	79
3.2.2. Obtención de la arcilla	79
3.3. FASE I.	81
SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO DE LOS MATERIALES	
3.3.1. Equipo y Métodos	81
3.4. FASE II.	86
EVALUACIÓN DE MEZCLAS ARN-CBC EN ESTADO PLÁSTICO	
3.4.1. Equipo y Métodos	86
3.4.2. Extracción y uso del mucílago de nopal	88
3.5. FASE III.	89
ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROBETAS SINTERIZADAS	
3.5.1. Equipo y Métodos	89
3.5.1.1. <i>Elaboración de Probetas</i>	89
3.5.1.2. <i>Evaluación física y mecánica de Probetas</i>	96
3.5.1.2.1 <i>Contracción Lineal</i>	96
3.5.1.2.2 <i>Absorción de Agua y P. Aparente</i>	100
3.5.1.2.3 <i>Resistencia a la Flexión</i>	103
3.5.1.2.4 <i>Resistencia a la Compresión</i>	106

3.6. FASE IV.	109
PROPUESTAS PARA LA ELABORACIÓN DE PIEZAS CERÁMICAS	
3.6.1. Equipo y Métodos	109
3.6.1.1. <i>Baldosa cerámica.</i>	110
3.6.1.2. <i>Pieza ornamental artesanal.</i>	111

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE LA FASE I.	114
4.1.1. Tratamiento de los materiales	114
4.1.2. Análisis Químico de la ARN y CBC	115
4.2. RESULTADOS DE LA FASE II.	117
4.2.1. IP Y CL de mezclas ARN-CBC	117
4.2.2. Influencia del MN en mezclas ARN-CBC	120
4.3. RESULTADOS DE LA FASE III.	121
4.3.1. Contracción Lineal.	121
4.3.2. Absorción de Agua y Porosidad Aparente	122
4.3.3. Resistencia a la Flexión.	124
4.3.4. Resistencia a la Compresión.	125
4.4. RESULTADOS DE LA FASE VI.	127
4.4.1. Piezas cerámicas propuestas.	127

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES.	132
5.2 RECOMENDACIONES.	135
Referencias.	137
Glosario	145
APÉNDICE A Determinación de los límites de plasticidad	149
APÉNDICE B Resultados de los límites de plasticidad de mezclas ARN-CBC.	157
APÉNDICE C Elaboración de piezas cerámicas.	161
APÉNDICE D Prueba Preliminar	165

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Fig. 1.1.-</i> Metodologías del proyecto. Fuente: Elaboración propia.	29
<i>Fig. 2.1.-</i> Clasificación de las materias primas de la cerámica. Fuente: Rado, 1990.	33
<i>Fig. 2.2.-</i> Proceso cerámico tradicional. Fuente: Birkz, 1981.	42
<i>Fig. 2.3.-</i> Proceso cerámico Barniz en Crudo o Cocción de una vez. Fuente: Birkz 1981..	43
<i>Fig. 2.4.-</i> Límites de consistencia según Atterberg. Fuente: Elaboración propia.	59
<i>Fig. 2.5.-</i> Carta de plasticidad para clasificación de suelos de partículas finas en el laboratorio. Fuente: Juárez y Rico 2009.	60
<i>Fig. 2.6.-</i> Zona para las barbotinas de colado. Fuente: http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Practica6.PropiedadesArcillas.PLASTICIDAD.pdf	61
<i>Fig. 2.7.-</i> Diagrama de Casa Grande. Fuente: http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Practica6.PropiedadesArcillas.PLASTICIDAD.pdf	61
<i>Fig. 2.8.-</i> Desechos sólidos generados en la producción de azúcar. Fuente: Balakrishnan y Batra, 2011.	69
<i>Fig. 3.1.-</i> Fases del experimento. Fuente: Elaboración propia.	75
<i>Fig. 3.2.-</i> Ceniza de Bagazo de caña CBC. Fuente: Toma propia.	79
<i>Fig. 3.3.-</i> Tiraderos de CBC. Fuente: CIIDIR-Oaxaca.	79
<i>Fig. 3.4.-</i> Formación de tallas de arcilla. Fuente: Toma propia.	80
<i>Fig. 3.5.-</i> Tallas de arcilla. Fuente:Toma propia..	80
<i>Fig. 3.6.-</i> Secado al Sol. Fuente: Toma propia.	80
<i>Fig. 3.7.-</i> Trituradora. Fuente:Toma propia.	81
<i>Fig. 3.8.-</i> M. de Bolas. Fuente:Toma propia.	81
<i>Fig. 3.9.-</i> Pulverizadora. Fuente: Toma propia.	82
<i>Fig. 3.10.-</i> Equipo Rotap. Fuente: Toma propia.	82
<i>Fig. 3.11.-</i> Arcilla tamizada por la malla a) #40, b) #60, c) #100 y d) #200 ASTM. Fuente: Toma propia.	82
<i>Fig. 3.12.-</i> Equipo y accesorios para determinar Límites de atterberg. Fuente: Toma propia.	83
<i>Fig. 3.13.-</i> LL, LP y CL de muestras de arcilla. Fuente: Toma propia.	83
<i>Fig. 3.14.-</i> Arcilla decantada, tamizada #-080. Fuente: Toma propia.	84
<i>Fig. 3.15.-</i> Tamizado de la CBC. Fuente: Toma propia.	85
<i>Fig. 3.16.-</i> Mezcladora Eléctrica y Pulverizadora de Bola. Fuente: Toma propia.	86
<i>Fig. 3.17.-</i> Mezclas con ARN-CBC-AGUA. Fuente: Toma propia..	87
<i>Fig. 3.18.-</i> Proceso de extracción del mucílago. Fuente:Toma propia.	88
<i>Fig. 3.19.-</i> ARN-CBC-MN-AGUA para elaborar mezclas. Fuente: Toma propia.	89
<i>Fig. 3.20.-</i> Proceso general de las probetas. Fuente: Elaboración propia.	90

Fig. 3.21.- Mezcla de polvos ARN-CBC. Fuente: Toma propia. 91

Fig. 3.22.- Moldes utilizados para la elaboración de probetas. Fuente: Toma propia. 91

Fig. 3.23.- Elaboración de probetas. Fuente: Toma propia. 92

Fig. 3.24.- Total de probetas elaboradas y su proceso de secado. Fuente: Toma propia. 94

Fig. 3.25.- Horno cerámico eléctrico y colocación de probetas. Fuente: Toma propia. 94

Fig. 3.26.- Horno cerámico de gas y colocación de las probetas. Fuente: Toma Propia. 95

Fig. 3.27.- Cambio de color en probetas antes y después del sinterizado. Fuente: Toma propia. 95

Fig. 3.28.- Probetas sinterizadas a 1080°C. Fuente: Toma propia. 95

Fig. 3.29.-Línea de referencia para medir la contracción. Fuente: Toma propia. 97

Fig. 3.30.-Ranuras semicirculares. Fuente: Toma propia. 97

Fig. 3.31.- Secado de probetas. Fuente: Toma propia. 97

Fig. 3.32.- Tres de los nueve compuestos después del secado. Fuente: Toma propia. 98

Fig. 3.33.- Los nueve compuestos después del sinterizado. Fuente: Toma propia. 98

Fig. 3.34.- Medición de la contracción lineal. Fuente: Propia. 99

Fig. 3.35.- Secado de probetas. Fuente propia. 100

Fig. 3.36.- Enfriado de probetas en un desecador. Fuente propia.. . . . 100

Fig. 3.37.- Bases de alambre. Fuente: Toma propia. 101

Fig. 3.38.- Probetas hervidas. Fuente: Toma propia. 101

Fig. 3.39.- *Tarado* de la canasta suspendida y peso de la probeta. Fuente: Toma propia. 101

Fig. 3.40.- Secado de probetas. Fuente: Toma propia. 102

Fig. 3.41.- Determinación del peso de probetas. Fuente: Toma propia. 102

Fig. 3.42.- Medición de probetas antes de la fractura. Fuente: Toma propia. 103

Fig. 3.43.- Secado y almacenamiento de probetas. Fuente propia. 103

Fig. 3.44.- Dispositivo para la prueba. Fuente: Toma propia. 104

Fig. 3.45.- Prensa Hidráulica. Fuente: Toma propia. 104

Fig. 3.46.- Fractura de probetas sinterizadas. Fuente: Toma propia. 105

Fig. 3.47.- Probetas Sinterizadas a 1000°C fracturadas a flexión. Fuente: Toma propia. 105

Fig. 3.48.- Medición, secado y peso de probetas. Fuente: Toma propia. 106

Fig. 3.49.- Prensa Hidráulica. Fuente: Toma propia. 107

Fig. 3.50.- Fractura a compresión de las probetas. Fuente: Toma propia. 107

Fig. 3.51.- Total de probetas sinterizadas y evaluadas a compresión. Fuente: Toma propia. 108

Fig. 3.52.- Identificación de piezas en la cerámica arquitectónica. Fuente: Ferrer, 2007. 109

Fig. 4.1.- Granulometría de las arcillas triturada, molida y pulverizada. Elaboración: Fuente propia. 114

Fig. 4.2.- Micrografías de la ARN. 10.0kV 9mm x200UVD. Fuente CIIDIR-Oaxaca. 116

Fig. 4.3.- Micrografías de la ARN. 10.0kV 5.9mm x1.00k UVD. Fuente CIIDIR-Oaxaca.	116
Fig. 4.4.- Micrografías de la CBC. 20kV x200. Fuente CIIDIR-Oaxaca.	116
Fig. 4.5.- Micrografías de la CBC. 10.0kV 61mm x1.00k UVD. Fuente CIIDIR-Oaxaca.	116
Fig. 4.6.- Índice de Plasticidad y Porcentaje de Contracción lineal. Fuente: Elaboración propia	117
Fig. 4.7.- LL en mezclas con altos % de CBC. Fuente: Toma propia.	118
Fig. 4.8.- Ubicación de las mezclas en la carta de plasticidad. Fuente: Elaboración propia.	119
Fig. 4.9.- Ubicación de las mezclas para su posible uso en barbotinas. Fuente: Elaboración propia..	119
Fig. 4.10.- Ubicación de las mezclas para su posible uso en extrusión. Fuente: Elaboración propia.	119
Fig. 4.11.- Resultado del uso del mucílago de nopal. Fuente: Elaboración propia.	120
Fig. 4.12.- Contracción Lineal de Probetas sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.	121
Fig. 4.13.- Absorción de Agua de Probetas Sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.	123
Fig. 4.14.- Porosidad Aparente de Probetas Sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.	123
Fig. 4.15.- Resistencia a la flexión de Probetas Sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.	124
Fig. 4.16.- Resistencia a la compresión de probetas sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.	125
Fig. 4.17.- Baldosas cerámicas y sus propiedades generales. Fuente: Elaboración y toma propia..	128
Fig. 4.18.- Pantalla cerámica para lámpara y sus propiedades generales. Fuente: Elaboración y toma propia.	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. <i>Clasificación de la cerámica según los tipos más importantes.</i> Fuente: Rado, 1990.	35
Tabla 2.2. <i>Cerámica Arquitectónica.</i> Fuente: Clasificación basada entre otros, en los apuntes del curso “Metodología de intervención en la conservación y restauración de los materiales cerámicos” (Ferrer 2007).	36
Tabla 2.3. <i>Arcillas comerciales y sus principales usos.</i> Fuente: Barry y Grant, 2007.	49
Tabla 3.1 <i>Factores de la fase I del experimento.</i> Fuente: Elaboración propia.	76
Tabla 3.2 <i>Factores, niveles y variables respuesta fase I.</i> Fuente: Elaboración propia.	76
Tabla 3.3 <i>Factores establecidos en la fase II.</i> Fuente: Elaboración propia.	77
Tabla 3.4 <i>Factores, niveles y variables de la fase II.</i> Fuente: Elaboración propia.	77
Tabla 3.5 <i>Factores identificados para la fase III.</i> Fuente: Elaboración propia.	78
Tabla 3.6 <i>Factores, niveles y variables respuesta para la fase III.</i> Fuente: Elaboración propia.	78
Tabla 3.7 <i>Diseño de proporciones ARN-CBC.</i> Fuente: Elaboración propia.	87
Tabla 3.8. <i>Cantidad de probetas elaboradas.</i> Fuente: Elaboración propia.	93
Tabla 4. 1 <i>Índices de plasticidad y contracción lineal de las arcillas.</i> Fuente: Elaboración propia.	115
Tabla 4.2 <i>Composición química de la ARN y CBC.</i> Fuente: CIIDIR-IPN.	115
Tabla 4.3 <i>Volumen de contracción y factor de contracción de probetas ARC-CBC.</i> Fuente: Elaboración propia.	122
Tabla 4.4 <i>Densidad de probetas evaluadas a compresión.</i> Fuente: Elaboración propia.	126

EFFECTO DE LA SUSTITUCIÓN DE UN DESECHO AGROINDUSTRIAL A UNA ARCILLA NATURAL EN ESTADO PLÁSTICO COMO ALTERNATIVA PARA LA ELABORACION DE PIEZAS CERÁMICAS.

Quez Fabán Dalila R., Jiménez Quero Victor G., López Torres Armando.
 1 Universidad Tecnológica de la Mixteca
 2 Instituto Politécnico Nacional, CIDIR Unidad Oaxaca.
 Área Temática 6: Tecnología y biotecnología ambiental.



INTRODUCCIÓN

Después de la trituración de la caña y extracción de jugo del último molino para la obtención de azúcar y etanol se generan millones de toneladas de bagazo por año, en el 2013 en nuestro país se generaron cerca de 58.6 millones de toneladas. Por cada tonelada de caña procesada el 25% es bagazo y el 0.6% es de ceriza la cual no tiene uso alguno (Balakrishnan y Batra, 2011; Iyer, et al., 2002), actualmente es vertida en tiraderos a cielo abierto, contaminando el suelo, el agua y el aire provocando daños a la salud de los habitantes cercanos al ingenio azucarero.

Es por lo anterior que en este proyecto se sustituye **arcilla natural (AR)** por **ceriza de Bagazo de Caña (CBC)** y se evalúa su comportamiento en el proceso cerámico para determinar la factibilidad de su uso. Se reportan los resultados parciales de esta sustitución únicamente en estado plástico de la mezcla. Se reportó además el uso del **mucllago de nopal (MN)** como aglutinante natural para aprovechar sus propiedades y mejorar la plasticidad.



OBJETIVOS

Evaluar en estado plástico, el efecto de la sustitución de Ceriza de Bagazo de Caña en diferentes porcentajes en una arcilla natural, por medio de la determinación de los límites de Atterberg.

METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo tres procesos para obtener la arcilla en polvo: triturado, molido y pulverizado, posteriormente, para obtener diferentes tamaños de partículas de arcilla, se tamizaron por cuatro mallas en un equipo Rotap. Se obtuvieron 18 polvos y después de analizar su rendimiento se seleccionaron siete de ellos; además se colectó una muestra de arcilla en húmedo directamente de un taller cerámico. Se realizaron las pruebas de Límites de Atterberg, se compararon el índice plástico (IP) y la contracción lineal (CL). Lo anterior permitió seleccionar una arcilla para mezclarla con CBC. La ceriza fue tamizada por la malla #200 ASTM. Se realizó el diseño de proporciones CBC-AR y se obtuvieron 13 muestras a las cuales se les determinaron sus IP y CL para evaluar el efecto de la CBC.

Tres porcentajes más de CBC-AR fueron utilizados para las pruebas con mucllago de nopal diluido al 50% en el agua para saturar la arcilla.



=18 polvos de arcilla
selección por rendimiento en la granulometría de cada proceso

8 muestras de arcilla para determinar índices de plasticidad y contracción lineal
la muestra de arcilla con el mayor índice de plasticidad (IP)

ADICIÓN DE CBC

Tamizada con la malla #200 ASTM

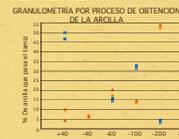


USO DEL MUCLLAGO DE NOPAL

Se determinaron los Límites de Atterberg y la Contracción Lineal de las 16 muestras:



RESULTADOS



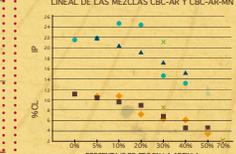
ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y CONTRACCIÓN LINEAL DE LA ARCILLA

PRUEBA DE PLASTICIDAD	MALLA ASTM	IP	NCL
TITRADA	1 -40	23	10.83
2 -100	23.8	10.63	
3 -200	24.96	11.03	
MOLIDA	4 -40	22.9	11.74
5 -100	22.6	12.97	
6 -200	24.23	13.27	
PULVERIZADA	7 -100	36.2	13.74
DECANTADA	8 -80	26.29	11.43

ÍNDICE MAS ALTO: Arcilla a utilizar para las mezclas con CBC

BAJO RENDIMIENTO: ARCILLA Utilizada en el taller

ÍNDICES DE PLASTICIDAD Y DE CONTRACCIÓN LINEAL DE LAS MEZCLAS CBC-AR Y CBC-AR-MN



CONCLUSIONES

El proceso óptimo de obtención de arcilla en polvo fue el triturado y tamizado por la malla #200 ASTM debido al alto rendimiento obtenido.

El mejor comportamiento en estado plástico se presentó en la arcilla 10CBC-M ya que es la muestra con el más alto índice de plasticidad y una contracción lineal baja, demostrando así la factibilidad de la sustitución de arcilla por CBC. En cuanto al mucllago, su uso produjo un aumento importante en el índice de plasticidad, sin embargo la contracción lineal también aumentó, por lo cual su beneficio no es considerable en este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos por el apoyo y espacio facilitado para las pruebas a los talleres de cerámica, del Instituto de Capacitación y Productividad para el Trabajo del Estado de Oaxaca (ICAPET).

Los resultados parciales de esta investigación
fueron presentados en el
XIV CONGRESO INTERNACIONAL Y
XX CONGRESO NACIONAL DE CIENCIAS AMBIENTALES 2015
en la modalidad exposición cartel clave TB-118
organizado por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla a través del
Instituto de Ciencias y la Facultad de Ingeniería Química.

Así como en el
II CONGRESO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA 2015
en el área de sustentabilidad con clave IS20 llevado a cabo por la universidad
Autónoma de Sinaloa a través de la Facultad de Ingeniería Mochis.

y fueron aceptados para participar en el
VII CONGRESO NACIONAL DE CIENCIA E INGENIERÍA EN MATERIALES 2016
en la modalidad exposición cartel clave P191 con sede en la
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

RESUMEN

En la presente investigación se diseñó y evaluó un compuesto elaborado con arcilla natural (ARN) y un desecho agroindustrial: Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) para determinar su factibilidad de uso en cerámica. En primer lugar se seleccionó el tratamiento más adecuado para la Arcilla (ARN); posteriormente se evaluó en estado plástico, el efecto de la sustitución parcial de ARN por diferentes porcentajes de CBC en los índices de plasticidad (IP) y contracción lineal (CL). En algunas pastas (con mayores porcentajes de CBC) se utilizó mucílago de nopal (MN) diluido en el agua de saturación de las mezclas como aglutinante natural con la finalidad de incrementar la plasticidad.

Finalmente, se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de probetas elaboradas con ARN-CBC y sinterizadas a tres temperaturas diferentes. Los resultados obtenidos demuestran que el tratamiento adecuado para la ARN es el triturado y tamizado por la malla #200. Los índices de plasticidad mayores se obtuvieron en mezclas de ARN-CBC (90% - 10% respectivamente) y ARN-CBC (80% - 20%, respectivamente). La plasticidad y la consistencia de las pastas con altos porcentajes de CBC no fueron mejorados con el uso de MN, sin embargo en la mezcla ARN-CBC (70%-30%, respectivamente) la plasticidad aumentó. Los resultados de las pruebas en estado sinterizado demostraron que la menor contracción lineal se obtuvo en la mezcla ARN-CBC (60%-40%, respectivamente), que al incrementar la cantidad de CBC aumentaron los porcentajes de absorción de agua y porosidad, y disminuyeron la resistencia a la compresión y a la flexión. El compuesto elaborado con ARN-CBC (80%-20%, respectivamente) es factible para ser utilizado en la elaboración de piezas cerámicas de tipo artesanal, en primer lugar se obtiene un mejor control dimensional en las piezas finales en el modelado y en el uso de moldes, en segundo lugar la porosidad obtenida es una ventaja en algunas piezas y en tercer lugar las resistencias obtenidas son adecuadas para objetos artesanales. Además, desde el punto de vista ambiental, utilizar CBC en cerámica, es una opción para contrarrestar el problema de su disposición final.



CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

“La intención de usar y elaborar productos ecológicos es parte de un proceso mundial en que se asume la responsabilidad ante el peligro representado para todos los seres vivos por el deterioro del medio natural y la salud” - Palacios, 2012.

El problema de la contaminación que se genera por las diferentes actividades industriales es de tal magnitud, que existen acuerdos internacionales sobre la reducción de sus residuos, en su mayoría no son éxitos pero forman parte de la base para reducir el daño que causan al medio ambiente.

En este sentido, se propone la siguiente investigación la cual considera generar una aplicación práctica para un desecho de la industria azucarera, la Ceniza de Bagazo de Caña (CBC), que actualmente es depositada en campos al aire libre, contaminando agua, aire y suelo.

Para la estructuración del problema se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva de artículos científicos para encontrar y conocer los resultados que se han obtenido en proyectos de investigación en los cuales se ha trabajado con la CBC. Destacan investigaciones en las que se ha empleado esta ceniza como sustituto parcial de cemento portland y arcilla roja.

Es por lo anterior que surge la inquietud de utilizar esta ceniza combinada con una arcilla (material natural y de bajo impacto ambiental que proviene de la tierra y por lo tanto no perturba gravemente el equilibrio ecológico de la naturaleza), para diseñar, elaborar y evaluar un material para su uso en la elaboración de piezas cerámicas. Además, se consideró emplear un aglutinante natural debido a sus propiedades viscosas, ya que según investigaciones anteriores, la ceniza en altas cantidades da a la arcilla poca consistencia, que se pretende compensar con la presencia del *mucílago* de nopal (MN).

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agotamiento de recursos y la liberación de contaminantes al ambiente han llegado a un extremo preocupante, que compromete la calidad de vida y la supervivencia de las generaciones presentes y futuras, así como el propio crecimiento económico (Palacios, 2012). La contaminación del suelo, agua y aire, se extiende rápidamente de manera exagerada y afecta a todos los seres vivos, además de la biosfera en la que habitamos.

Tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, las industrias consumen grandes cantidades de recursos naturales y generan una severa contaminación ambiental (SEMARNAT, 2010). Tal es el caso de la industria azucarera en la que después de la trituración de la caña y extracción de jugo del último molino (para la obtención de azúcar y etanol) se generan millones de toneladas de bagazo por año; tan solo en el año 2013, en nuestro país, se generaron cerca de 58.6 millones de toneladas (CONADESUCA, 2014).

Actualmente, este bagazo se emplea comúnmente como combustible para las calderas, para generar vapor que se emplea en los procesos de las mismas fábricas y en las turbinas para la producción de energía eléctrica (Souza et al., 2011). Después de la calcinación del bagazo se genera una gran cantidad de Ceniza de Bagazo de Caña (CBC), se estima que por cada tonelada de caña procesada, el 25% es bagazo y el 0.6% es de ceniza (Balakrishnan y Batra, 2011; Iyer et al., 2002). Esta ceniza al ser un desecho, no tiene uso alguno y se deposita en tiraderos a cielo abierto causando contaminación del suelo y del aire. Al lavar las calderas se vierte al río y contamina el agua.

Para tratar de dar solución parcial a este problema, se han desarrollado proyectos de investigación, en los cuales se ha empleado como sustituto parcial de bloques de suelo compactado y de cemento portland por CBC para la elaboración de morteros y concretos hidráulicos. Los resultados han sido positivos desde los puntos de vista científico, tecnológico y ambiental.

También se han desarrollado algunos proyectos de investigación en los cuales se ha sustituido arcilla por CBC para la elaboración de piezas de cerámica roja y cerámica vidriada. Sin embargo, en la mayoría de proyectos se reporta la aplicación de pos-tratamientos como el recalcinado y/o molido a la CBC antes de su combinación con arcilla. Además, estos proyectos han sido escasos y sólo se han desarrollado en otros países. No se tiene registro alguno en México en donde se haya desarrollado un proyecto de este tipo.

A parte del problema ambiental, en la cerámica se presentan también algunos problemas sobre todo en piezas realizadas con arcillas muy finas, excesivamente viscosas, ya que se rompen durante el secado y la cocción, por lo tanto se le adicionan materiales no plásticos para mejorar sus propiedades (Rado, 1990). En algunos casos se usan materiales fundentes (como el feldespatos) y/o materiales no plásticos (como el cuarzo) para mejorar el proceso de sinterizado y las propiedades finales de la cerámica (Teixeira et al., 2008).

Por otra parte, se consideró la incorporación del mucílago de nopal, como sustituto parcial del agua empleada, para mejorar la consistencia y la manipulación de la pasta de arcilla en estado plástico y por sus propiedades adhesivas (León, 2010). Esto debido a que la CBC al ser un material que disminuye la plasticidad de las pastas cerámicas que la contienen (Borlini et al., 2006) se espera sea útil como agente adhesivo de la pasta en estado plástico, haciendo a su vez que el secado de la pieza antes de la cocción sea más lenta y evite algún tipo de agrietamiento, problema muy común en las arcillas.

Por lo anterior, se desarrolló el presente proyecto con la finalidad de evaluar un material elaborado con arcilla y CBC (tamizada únicamente), para su aplicación en la elaboración de piezas cerámicas artesanales.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Ante los grandes desastres originados a causa del calentamiento global, en México existen acuerdos y convenios internacionales firmados en lo referente a los residuos que consideran la necesidad imperante de reducir, reciclar y reutilizar la mayor cantidad de desechos generados por los procesos industriales y de producción de energía para evitar un mayor deterioro del planeta (Instituto Nacional de Ecología, 2007).

Actualmente, México ocupa el sexto lugar en el mundo en la producción de caña de azúcar (Vergara y Díaz, 2010). Su producción se registra en 15 estados de la República, cinco de los cuales aportan el 71% de la producción nacional en los ciclos 2010/2011, estos son: Veracruz, San Luis Potosí, Jalisco, Oaxaca y Chiapas (SAGARPA, 2012).

A través de los planes de la metodología de Producción más limpia (P+L) de la industria azucarera, se han eliminado algunos aspectos negativos que se presentan durante el proceso de obtención del azúcar y etanol, sin embargo, el problema de la disposición final de la ceniza de bagazo de caña (CBC) todavía se sigue presentando y solo se deposita en grandes extensiones de terreno a la intemperie contaminando el aire y provocando serios problemas respiratorios en los habitantes de las comunidades donde se ubican los tiraderos a cielo abierto de la CBC.

Balakrishnan y Batra (2011), así como Iyer y colaboradores (2002) afirman que de una Tonelada de caña de azúcar triturada, el 0.6% resulta en ceniza. Por lo tanto, en la producción nacional (zafra 2011/2012) y en la aproximada del 2013 se cosecharon 46,231,229 ton y 58,616,981 ton de caña, resultando 277,387.374 ton y 351,701.886 ton de ceniza en México respectivamente (SAGARPA 2012, 2014).

De aquí la importancia de este proyecto desde el punto de vista ambiental, ya que se trata de darle un uso a la gran cantidad de CBC que se genera en nuestro país en la producción de un material cerámico, además se reduce el consumo de materiales crudos vírgenes ya que la extracción de la arcilla deteriora notablemente el paisaje.

Faria y Holanda (2013) mencionan que para elaborar productos cerámicos, se utilizan grandes cantidades de material arcilloso lo que implica la escasez de material de buena calidad en las locaciones cercanas.

Desde el punto de vista tecnológico se obtendrán algunos porcentajes óptimos de CBC en la arcilla que no afecten las propiedades que ya posee y en el mejor de los casos las mejore. Además, una pasta cerámica de calidad debe poseer ciertas características de manipulación en estado plástico, baja contracción, secado sin fracturas antes y después de la cocción (Fuentes et al., 2008). Se espera por lo tanto, en este caso particular, que con la incorporación de la CBC a la arcilla se superen algunos problemas que se presentan actualmente en las piezas cerámicas (en estado plástico y sinterizado). Los principales problemas son: agrietamiento antes y después de la cocción, rotura de un porcentaje de piezas después de la cocción, bajo control dimensional, fragilidad y baja resistencia. Será muy válido así también que al agregar la ceniza a la arcilla, no se afecten las propiedades que ya posee (dureza, plasticidad, contracción, absorción, etc.). Los conocimientos adquiridos durante la materia de Materiales y Procesos: Cerámica y Vidrio, cursada durante mi formación profesional, podrán ser aplicados, tales como el conocimiento de las características básicas de los materiales cerámicos, sus procesos de transformación, las técnicas y sus aplicaciones en el ámbito del diseño. Un ingeniero en diseño, como creador de entornos, espacios, objetos e imágenes, cuenta con las habilidades de perfeccionar, mejorar e implementar una solución integral.

Desde el punto de vista económico se espera que este nuevo material permita elaborar piezas de mayor calidad y que la artesanía de barro pueda incrementar sus precios finales, con ello el artesano podrá incrementar sus ingresos y, consecuentemente mejorar sus condiciones de vida. Además, que el uso de un desecho puede disminuir los precios de producción.

Desde el punto de vista social, el Estado de Oaxaca, desde tiempos prehispánicos, ha sido reconocido a nivel nacional e internacional, por la creatividad de su arte en barro (cerámica y sobre todo alfarería). Esto es un claro ejemplo que muestra la transformación de las materias primas de una región, en objetos de diseños variados, múltiples formas, usos, colores, armonías, produciendo una gran cantidad de artefactos. Así mismo, la promoción del desarrollo humano, social y económico de los artesanos, es prioritario para el desarrollo social y económico del estado (Morales, 2007; Rivas, 2007). Con este proyecto se pretende también, contribuir a la labor de éste arte, al proponer el uso del ya mencionado desecho agroindustrial y adicionarlo a la pasta de arcilla natural de la región para elaborar piezas.

Finalmente, la presente investigación implica un proceso experimental que abarca la selección de materiales, sus combinaciones, su evaluación, los análisis en las propiedades obtenidas, y a nivel de propuesta se elaboran dos piezas cerámicas para la experimentación del compuesto obtenido.

1.3. ANTECEDENTES

La idea de emplear cenizas viene desde tiempos muy antiguos, los chinos y los hindúes, trabajaron con cenizas de la cáscara de arroz y arcilla calcinada, fabricaban cementos hidráulicos mezclando estos residuos con cal. Los griegos y los romanos lo hacían con base en cenizas volcánicas, dando como resultados, estructuras durables y con un impacto medioambiental mucho menor.

Actualmente se adicionan cenizas a las arcillas en diversas investigaciones en donde utilizan aditivos (desechos orgánicos o industriales) tal como la cáscara de arroz o la ceniza de la combustión del carbón que sustituyen a una matriz cerámica (Rawlings et al., 2006).

1.3.1. Aplicaciones de la CBC

La CBC, desecho generado en la combustión del bagazo de caña en la industria azucarera se ha usado para diferentes propósitos (Balakrishnan y Batra, 2011).

Recientemente, la CBC ha sido usada como material *puzolánico* para tratar de mejorar las propiedades mecánicas del mortero y el concreto (Ganesan et al., 2007; Frías et al., 2011). Se ha reemplazado en ellos por más del 20% del cemento, dependiendo de su actividad *puzolánica* la cual depende a su vez de varios parámetros como: tamaño de la partícula, mientras más fina la partícula de CBC será más resistente el mortero que la contenga (Cordeiro et al., 2008), temperatura de calcinación adecuada (superior a los 600°C), naturaleza cristalina o amorfa y su composición química. Algunas ventajas que se han obtenido son: desarrollo de alta resistencia temprana, reducción en la permeabilidad al agua, apreciable resistencia a la penetración, etc.

También se identificó que la CBC producida por molienda vibratoria proporciona densidad más alta del mortero (Morales et al., 2009; Ganesan et al., 2007). Se intenta así mitigar la contaminación de la industria del cemento, además de promover la eco-eficiencia del ciclo de producción del cemento y del uso del concreto.

Varios de los beneficios evidentes de la CBC que se obtuvieron en estos estudios internacionales se deduce fueron debidos al postratamiento que recibió la CBC por ejemplo un proceso de molido o una activación térmica, las cuales requieren un alto consumo energético.

Aigbodion y colaboradores (2010) en Nigeria, evaluaron la mezcla de CBC, goma arábica y agua, resultando una mezcla plástica y se elaboraron pequeños bloques, se calcinaron a varias temperaturas desde 200°C hasta 1400°C. Concluyen que la CBC puede soportar temperaturas arriba de 1600°C, adecuada para elaborar productos refractarios y cerámicos como aislantes térmicos, filtros de membrana y cerámicas estructurales.

Loh et al., (2013) mencionan que en Malasia, una de las aplicaciones ecoamigables y de bajo costo, ha sido el empleo de la CBC con goma arábica y agua, para producir cerámica y productos refractarios. Encontraron también que una combustión completa de ceniza de bagazo de caña ocurre a los 800°C (8h), mientras que la cristalización de los minerales ocurre alrededor de los 650°C.

A nivel nacional se encuentran casos de estudio en la Universidad Veracruzana, en donde se han hecho pruebas con la CBC logrando la sustitución de hasta un 6% en el contenido de cemento en mezclas de mortero sin afectar su resistencia (Hernández, 2011).

En el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, del Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR – IPN Unidad Oaxaca), se han llevado a cabo proyectos de investigación sobre la aplicación de CBC para la elaboración de morteros y concretos hidráulicos, así como para reemplazar el cemento en la elaboración de bloques de suelo compactado.

1.3.2. Aplicaciones de la CBC en cerámica roja y vidriada

Se encontraron registros internacionales en donde se menciona que el gobierno de la India, ha impulsado el uso de CBC y de ceniza volante, para hacer caminos, ladrillos, concreto y relleno en minas (Dhadse et al., 2008).

Algunas de las aplicaciones de la CBC y que conciernen principalmente a la presente investigación, son las que han empleado CBC como ingrediente para obtener pastas cerámicas debido a su alto contenido de sílice (Borlini et al., 2005; Vieira et al., 2006; Teixeira et al., 2008).

Hernández Martirena y colaboradores (1998), Caldas y colaboradores (2000), Borlini y colaboradores (2006); Teixeira y colaboradores (2008) han incorporado CBC en cuerpos cerámicos (ladrillos y tejas), mostrando una variación en la composición química de las cenizas y en la cristalinidad del sílice lo que podría causar efectos diferentes en las propiedades de cada material cerámico sinterizado (Souza et al., 2011) en Brasil.

Borlini y colaboradores (2006) en Brasil, estudiaron el efecto que provoca el tamaño de las partículas de la CBC en la adición a la cerámica roja, las mezclas fueron preparadas con adiciones de 5 y 10% de ceniza de bagazo de caña y de arcilla con diferentes tamaños de partículas, 149 μm (malla 100), 75 μm (malla 200) y 44 μm (malla 325). Los especímenes fueron moldeados con 20 MPa de presión y sinterizados a 900 y 1050°C. Las propiedades evaluadas fueron: densidad aparente, contracción diametral, absorción de agua y fuerza mecánica por compresión diametral. Los resultados mostraron que el tamaño de partícula no influye significativamente en las propiedades finales de la arcilla utilizada, sin embargo, las partículas más pequeñas ayudaron a la sinterización a 1050°C.

Los trabajos de Texteira y colaboradores (2008) en Brasil, muestran a la CBC como potencial reemplazo del cuarzo (SiO_2) en la cerámica roja, pues demostraron que el mayor componente de la ceniza es SiO_2 (>89%). En su procedimiento experimental, usó 0%, 5%, 8%, y 10% de ceniza en una arcilla usada para tejas, con temperaturas de 800°C hasta 1200°C y llegó a la conclusión que para reducir la plasticidad se puede usar la CBC con la ventaja de que contiene algunos óxidos fundentes, porque realmente no observó cambios significativos, tomándola como material de relleno que reduce la plasticidad, mejorando la manipulación y el proceso de producción.

Souza y colaboradores (2011) en Brasil, realizaron un proyecto de investigación en el cual incorporaron CBC a una arcilla para elaborar tejas. Incorporaron hasta un 60% de ceniza. Los resultados demostraron que empleando temperaturas de calcinación arriba de los 1000°C, la ceniza tiene pequeña influencia en los materiales cerámicos, por arriba de esta temperatura, la ceniza participa en el proceso de sinterizado y en la formación de nuevas e importantes fases. Adicionaron CBC en un 0%, 20%, 40% y 60% con temperaturas de 500°C hasta 1200°C. Sostienen que la arcilla es plástica principalmente por la cantidad de caolinita, que las cenizas tienen composiciones variables de acuerdo al tipo de suelo en donde crece la caña. Compararon sus resultados con los valores estándar establecidos para los materiales cerámicos, y concordaron así que son factibles para su uso, pese a que la incorporación del cuarzo de la CBC inhibe la formación de *mullita* que es un mineral formado en el proceso de cocción y es la responsable de la dureza y resistencia del material cerámico. Concluyen que es factible el uso de la ceniza de bagazo de caña en la industria de la cerámica, contribuyen a la disminución de desechos y reservan por mayor tiempo los bancos de materiales arcillosos.

Barbieri y colaboradores (2013) en Italia, propusieron el uso de la CBC como una solución sustentable en construcciones, sustituyéndola en bloques de arcilla cerámicos. La presencia del 5% de ceniza en la mezcla final, provoca una mínima

reducción de la contracción de la arcilla, con respecto a los bloques estándar, y no observaron disminución alguna del peso. Las propiedades mecánicas fueron mejoradas, en bloques cocidos a 1000°C la resistencia que se obtuvo fue alrededor de los 28MPa. Estos resultados comprobaron que debido al contenido de sílice (61%) de la CBC, es apta para el relleno y la reducción de la plasticidad en los bloques. La composición mineralógica de la ceniza, le da propiedades similares a las arenas finas usadas en la industria cerámica para disminuir la plasticidad de las pastas arcillosas. La adición del desecho es limitado a 5%, para alcanzar un equilibrio entre los efectos positivos (disminución del peso e incremento de la porosidad) y los efectos negativos (incremento de la absorción de agua y la disminución de la resistencia).

Faria y Holanda (2013) Brasil, incorporan la CBC como un material crudo alternativo para la cerámica roja, en específico en bloques y tejas, en cantidades de 0% hasta un 20% de CBC usándolo como un componente no-plástico, que proporciona soporte estructural y retiene la forma de la pieza durante la etapa del secado y sinterizado. Las probetas las elaboraron con presión uniaxial y las sinterizaron a temperaturas desde 700 hasta 1100°C. Se evaluó la contracción lineal, la densidad aparente, la absorción de agua y la fuerza de tensión. Confirman que el uso de este desecho en un reemplazo parcial, reduce problemas ambientales de la industria azucarera, así como el empleo de recursos materiales crudos usados en la industria cerámica. Concluyen que las propiedades resultantes son fuertemente dependientes de la adición del desecho y de la temperatura.

En cuanto a la cerámica vidriada, en la antigüedad, los alfareros orientales, utilizaban cenizas en sus barnices como un fundente más, después de observar el efecto que causaban las cenizas arrastradas al interior de la cámara en las cocciones con leña en alta temperatura (Taller de cerámica Unzueta, n.d.).

Garavaglia (2008), en la MEMORIA SOBRE CENIZA escribe que para los ceramistas la ceniza vegetal (calcinando cualquier tipo de vegetal) es materia

de gran interés pues por su composición química resulta inmejorable en la formulación de *vidriados*, los cuales otorgan a las piezas calidades de color y textura irreproducibles.

También existen estudios (Vieira et al., 2004; Pinatti et al., 2006; Rawlings et al., 2006; Teixeira et al, 2010) basados en desechos con sílice que han sido evaluados con respecto a su utilización por la industria cerámica para producir cerámica vidriada.

Así también se experimentó con una solución de ceniza agregándole CaO y Na₂O las cuales producían una *frita* de vidrio, reportando resultados factibles de emplear CBC para producir cerámica vidriada (Texteira et al. 2010)Brasil-España.

A nivel nacional, no se han encontrado registros de investigaciones en donde utilicen la CBC para la elaboración de piezas cerámicas. Por lo anterior y de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, se propone esta investigación cuyo tema principal es la adición de la ceniza de bagazo de caña en un material crudo arcilloso, que bajo las condiciones de: porcentaje de CBC como sustituto parcial de la arcilla y temperaturas adecuadas en una cocción cerámica, puedan proporcionar resultados favorables.

1.3.3. Aplicaciones del mucílago de nopal en cerámicos y arcillas

El nopal en México ha sido utilizado desde tiempos precolombinos de manera empírica como agente modificador de las propiedades funcionales de diversos productos (pinturas naturales, shampoos, etc.).

El mucílago de nopal se ha usado como materia prima para retoques, repellos o terminados en muros, así como para pinturas ecológicas, impermeabilizante natural, mordiente natural para fijar colorantes. También se ha usado en cerámica en la industria del concreto por sus propiedades adhesivas (León, 2010), así también como agente modificador de la viscosidad, retardando los tiempos de fraguado, reduciendo la fluidez, retardando la hidratación del cemento (Ramírez et al., 2012).

En el campo de la arcilla, el mucílago ha sido usado como *engobe* y como un recubrimiento en bloques de arcilla, dando buenos resultados, logrando detener en 80% el impacto del deterioro que provocan los factores ambientales en estas antiguas edificaciones de adobe. Este último caso es un antecedente de una pasta hecha con arcillas de la región de la ciudad de Mexicali, a las que se agregó mucílago de nopal como un aglutinante natural (Bionero, 2011).

Vargas y colaboradores (1986) utilizaron mucílago de nopal para estabilizar enlucidos (acabados superficiales en muros o lozas) de barro con el fin de mejorar su resistencia a las lluvias. Martínez (2007) utilizó el mucílago para consolidar adobes y estudió su efecto en los mismos. Aranda (2012) estudió el efecto de la adición de mucílago en el agua de mezclado para elaborar bloques de tierra compactados. Las anteriores investigaciones, presentaron resultados que demostraron que usar mucilago de nopal en suelos es factible y útil como agente estabilizador de arcillas tanto en el cuerpo como en su recubrimiento.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Diseñar y evaluar un compuesto formado por un desecho agroindustrial (Ceniza de Bagazo de Caña) y una arcilla natural, por medio de pruebas en estado plástico y sinterizado, como alternativa de uso en la elaboración de piezas cerámicas artesanales.

1.4.2. Objetivos Particulares

1. Determinar el equipo que será empleado para el tratamiento y obtención de la arcilla con base en el rendimiento y la plasticidad presentada por la misma.
2. Interpretar los análisis químicos de la Arcilla natural (ARN) y la Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) para estimar la compatibilidad de su composición y morfología de acuerdo con la literatura.
3. Proponer el diseño de mezclas ARN-CBC con diferentes porcentajes para evaluarlas por medio de pruebas de plasticidad y contracción (Límites de Atterberg) y conocer su comportamiento en estado plástico.
4. Analizar el efecto del mucílago de nopal, en las pastas con mayores cantidades de CBC, sustituido en el agua de mezclado.
5. Analizar las normas American Society for Testing Materials (ASTM) de cada prueba para generar las probetas con las características establecidas y evaluar sus propiedades físicas y mecánicas.
6. Analizar las propiedades y características de las probetas resultantes para identificar el porcentaje óptimo y la sinterización óptima de los compuestos formados.
7. Proponer piezas cerámicas con la aplicación del compuesto diseñado.

1.4.3. Metas

- Seleccionar y utilizar los equipos para el tratamiento y obtención de la arcilla para comparar el rendimiento.
- Realizar pruebas de plasticidad a las muestras con mayor rendimiento y con base en su índice de plasticidad (IP) y contracción lineal (CL), seleccionar la arcilla que se utilizará durante todo el proyecto.
- Preparar las muestras de ARN seleccionada para el proyecto y de CBC y enviarlas a analizar químicamente.
- Utilizar dos tipos de mezclado de polvos y seleccionar uno con base en pruebas de plasticidad y contracción lineal de las muestras obtenidas.
- Seleccionar dos mezclas que permitan utilizar la mayor cantidad del desecho con los valores más altos de IP y/o CL más baja.
- Extraer mucílago de nopal (MN) con el procedimiento de extracción acuosa y diseñar mezclas ARN-CBC-MN para determinar sus IP y CL.
- Elaborar probetas con las dos mezclas seleccionadas y la arcilla control (100% arcilla) para sinterizarlas a 3 temperaturas (900°C, 1000°C, 1080°C).
- Ensayar las probetas para conocer su absorción de agua y porosidad aparente (norma ASTM C373-88), su contracción lineal (ASTM C326-03), su resistencia a la flexión (ASTM C 773-88) y su resistencia a la compresión (ASTM C674-88).
- Elaborar las tablas y gráficas de los compuestos ARN-CBC resultantes de las proporciones de sustitución y sinterizados a diferentes temperaturas.
- Elaborar dos piezas cerámicas con un método artesanal para demostrar un uso productivo de la CBC en la cerámica como alternativa de solución al problema de su disposición final.

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

En el presente proyecto se diseñará (elaborará y evaluará) un compuesto en el que se sustituirá parcialmente una arcilla natural por un desecho agroindustrial: ceniza de bagazo de caña (CBC) para su uso en piezas cerámicas artesanales.

Para la elaboración de la pasta se empleará agua bidestilada y mucílago de nopal el cual se utilizará como aglutinante natural con fines de comparación para identificar si existe una mejora en la moldeabilidad y plasticidad de las pastas en porcentajes definidos.

Se realizará un proceso cerámico, desde la obtención de la materia prima, hasta la sinterización de las probetas. La sinterización se llevará a cabo a tres temperaturas, siendo la máxima de 1080°C ya que la arcilla es de baja temperatura y por otra parte no se dispone de hornos con temperaturas mayores.

El equipo utilizado será facilitado en la Universidad Tecnológica de la Mixteca (Taller de cerámica, Instituto de Minería y Laboratorio de Materiales) así como en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, del Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca) gracias al convenio realizado con la Universidad.

Algunas fases del proceso cerámico serán realizadas en el taller de alfarería y cerámica del Instituto de Capacitación y Productividad para el Trabajo del Estado de Oaxaca (ICAPET) con la colaboración del Maestro Juan Ruiz. La sinterización a 900°C y 1000°C serán realizadas en la Universidad y la sinterización a 1080°C será realizada en el Taller "Canela" con la colaboración del Maestro Claudio Jerónimo.

Durante la investigación, al referirse a piezas cerámicas sólo se estarán considerando las arquitectónicas, de acuerdo a la clasificación de Ferrer (2007) la cual descarta aquellas piezas que están en contacto directo con el ser humano (generalmente usadas como utensilios de cocina). Los resultados y el comportamiento de la arcilla son específicos del caso particular investigado, serán utilizados para conocer si la arcilla puede ser utilizada sustituyéndola parcialmente por CBC sin afectar las propiedades y cualidades que ya posee o si incluso las mejora.

Por último se identificará un compuesto final para elaborar dos piezas cerámicas las cuales se proponen de manera provisional en función de las variaciones inherentes de un proceso de elaboración artesanal y de un estudio previo de las especificaciones requeridas para cada producto final. La metodología de diseño de las piezas finales no concierne a la presente investigación.

Las probetas elaboradas se evaluarán con las siguientes normas: C373-88, C326-03, C674-88 y C 773-88 de la American Society for Testing Materials (ASTM).

1.6. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

1.6.1. Metodología cuantitativa

Tomando como base la metodología cuantitativa de Hernández Sampieri y colaboradores (2006), en donde se plantea un problema de estudio delimitado y concreto dividido en 10 etapas fundamentales, en un orden estrictamente riguroso, los puntos que considera la presente investigación son los siguientes:

1. Idea.

Concepción del tema a investigar, a partir de experiencias individuales, investigaciones anteriores y de la revisión de la bibliografía:

Uno de los primeros intereses fué el tema de la reducción de la contaminación del medio ambiente y el uso de recursos naturales (arcilla en la cerámica); al investigar se encontraron registros que mencionan la posibilidad de combinar desechos industriales con ciertos materiales para elaborar materiales ecológicos. En el CIDIIR Unidad Oaxaca, se han investigado cementos sustituidos parcialmente por cenizas, Y en este caso se valoró el uso de un desecho agroindustrial en un material con menor impacto ambiental, como lo es la arcilla. Otros artículos encontrados mencionan la sustitución de cerámica roja por CBC pero sometidas a post-tratamientos con alta demanda de energía, de aquí surge la idea de combinar Arcilla con CBC obteniéndolas con la menor cantidad de energía posible.

2. Planteamiento del problema.

Estructurar formalmente la idea de investigación. Se desarrolla la idea a través de los objetivos, justificación, viabilidad y evaluación de las deficiencias en el conocimiento del problema:

La disposición final de la CBC, es uno de los principales problemas de la industria azucarera sobre todo en la cuestión ambiental, por lo tanto para poder disminuir parcialmente los daños que ésta ceniza causa, se optó por usarla en piezas cerámicas, las cuales a su vez presentan problemas en su proceso de elaboración. Se planteó conocer la posibilidad de usar CBC únicamente tamizándola con mallas estandarizadas para disminuir su tamaño de partícula y evitar los post-tratamientos que mencionan las demás investigaciones. Se planteó la posibilidad de la mejora de las propiedades de la arcilla, como la contracción lineal, la absorción y la resistencia.

3. Revisión de la Literatura y Desarrollo del Marco Teórico.

Consiste en hacer una revisión exhaustiva y continua de la bibliografía como artículos internacionales, publicados en revistas de gran importancia en el área de ciencias. Esta revisión debe ser selectiva. Se hace principalmente para buscar lo que se ha investigado anteriormente así como las variables significativas que puedan ser medidas. Es la teoría que guiará el estudio:

Se revisaron principalmente artículos de revistas El Sevier y de la Sociedad Americana de Cerámica, entre otros, encontrando referencias claves para el desarrollo del proyecto. Además se revisaron libros de cerámica.

4. Visualización del alcance del estudio.

Se determinan los límites y pasos específicos del proceso de investigación. Se determina el alcance del estudio (exploratorio, correlacional, descriptivo o explicativo) para definir la estrategia de la investigación:

Se determinó el proyecto como exploratorio y se propuso la estrategia, se determinaron los alcances y las limitaciones. Se revisaron los instrumentos y equipos disponibles para el desarrollo del proyecto.

5. Definición de Variables.

Se recolectan los datos, se concreta la investigación y las variables a incluir, las cuales deben ser comprensibles, precisas, concretas, observables y medibles. Deben relacionarse con técnicas disponibles para probarse:

Se definió el título del proyecto así como las variables a incluir las cuales fueron los porcentajes de CBC como sustituto de una arcilla, temperaturas de sinterización y un porcentaje de un aglutinante natural para la elaboración de las mezclas. Se revisaron las normas de la American Society for Testing Materials (ASTM) para las pruebas físico-mecánicas de las arcillas.

6. Desarrollo del diseño de investigación.

Es el plan o estrategia concebida para obtener la información que se requiere en una investigación. Se aporta una evidencia respecto de los lineamientos de la investigación. Los diseños cuantitativos pueden ser experimentales o no experimentales:

Se incorporó el Diseño experimental a este proyecto ya que en un experimento se manipulan de manera intencional dos variables independientes (porcentaje de CBC y temperatura de sinterización) para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre seis variables dependientes (índice plástico, porcentaje de contracción lineal, absorción, porosidad, resistencia a la flexión y a la compresión). En este proyecto se seleccionó un Experimento Factorial (dos o más variables independientes que incluyen dos o más niveles de presencia en cada una de ellas) como punto de partida.

7. Definición y selección de la muestra.

Se determinan los materiales, equipos y métodos a emplear según normas para la obtención de los objetos de estudio siendo muy útil comparar las muestras que se

han empleado en otras investigaciones con la revisión de la literatura:

Se elaboraron las mezclas y probetas de acuerdo a cada fase del proyecto establecida, para su estudio y utilización en la investigación. Se utilizaron dos muestras de materiales principales: La CBC tamizada por la malla #200 ASTM y la ARN tamizada por la malla #200 obtenida mediante pruebas en la fase I.

8. Recolección de los datos.

Se define la forma idónea de recolectar los datos de acuerdo con las etapas previas y sobre todo con las pruebas a realizar. Se elabora un plan detallado de procedimientos que conduzcan a reunir datos con cuestionarios, escalas, observación, pruebas estandarizadas, etc. Se realizan las pruebas, se obtienen, se codifican, se archivan y se preparan los datos para su análisis:

Los datos del proyecto se obtuvieron mediante pruebas estandarizadas y fueron proyectados en tablas y gráficas comparativas, las cuales se analizaron. Los resultados de cada fase, permitieron continuar con la fase siguiente de manera continua.

9. Análisis de los datos.

Exploración de los datos. Se analizan cuantitativamente por variable y se visualizan. Se realizan análisis adicionales como la comparación de resultados con predicciones y estudios previos, se pueden utilizar tablas, diagramas, cuadros, histogramas, graficas circulares, polígonos de frecuencia, u otro tipo de gráficas; se preparan los resultados para presentarlos:

Los datos obtenidos en cada etapa del proyecto se graficaron y se cuantificaron, este análisis de datos permitió hacer la selección para realizar la fase posterior.

10. Elaboración del reporte de resultados.

Selección del tipo de reporte a presentar, formato y contexto. Preparación del material adicional correspondiente. Presentación de los resultados en tablas, diagramas y modelos estadísticos. Escritura formal de tesis.

Todo lo anterior permitió la obtención de conclusiones y la redacción de la tesis. La secuencia de los puntos anteriores pueden observarse en la Fig. 1.1.

1.6.2. Diseño de Experimentos

En ingeniería, la experimentación desempeña un papel importante en el diseño de nuevos productos, el desarrollo, mejoramiento y el desempeño de procesos (Montgomery, 2006). Las pautas generales propuestas por Montgomery para el diseñar experimentos se observan en la Fig. 1.1. A continuación se describe cada una de ellas:

1. Identificación y exposición del problema.

Darse cuenta que existe un problema que requiere experimentación. En esta etapa se desarrollan todas las ideas acerca de los objetivos del experimento.

2. Elección de los factores y los niveles.

Factores: Grupo específico de tratamientos (temperatura, humedad, presión, tipos de suelo, etc). Pueden ser cualitativos o cuantitativos. En un factor cuantitativo sus niveles pueden asociarse con puntos en una escala numérica, como la temperatura, la presión o el tiempo. Los factores cualitativos, son aquellos cuyos niveles no pueden ordenarse por magnitud, como los operarios, los cambios de turno, un método de mezclado, entre otros. Se pueden clasificar de la siguiente manera:

* FACTORES POTENCIALES DEL DISEÑO:

- Factores de diseño. Son los que se seleccionan para hacerlos variar y estudiarlos en el experimento.

- Factores que se mantienen constantes. Son variables que pueden tener cierto efecto sobre la variable de respuesta pero que para los fines del experimento no son de interés, por lo que se mantienen fijos en un nivel específico.

- Factores a los que se permite variar. Aquellos factores con los que se trabaja bajo el supuesto de que sus efectos sobre la variable de respuesta son pequeños.

* FACTORES PERTURBADORES:

- Factores controlables. Aquellos cuyos niveles pueden ser ajustados por el experimentador.

- Factores no controlables. Aquel factor que varía de manera natural.

Los niveles se definen como las diversas categorías de dichos factores. La elección de los niveles se lleva a cabo por medio del conocimiento del proceso que incluye una combinación de la experiencia práctica y conocimientos teóricos.

Las réplicas son determinadas observaciones de cada factor en sus diferentes niveles. La réplica implica una repetición independiente del experimento básico. Son llamadas también unidades experimentales y cada tratamiento se aplica de manera independiente a dos o más de éstas (Kuehl, 2003).

3. Selección de la variable de respuesta.

La variable de respuesta es la variable que responde a los cambios deliberados de los factores y que nos brinda información del proceso o sistema. Para seleccionar la variable de respuesta, el experimentador deberá tener la certeza de que la variable proporciona información útil acerca del proceso bajo estudio.

4. Elección del diseño experimental.

Esta parte implica la consideración del tamaño de la muestra (número de réplicas), la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos experimentales y la determinación de si entran en juego restricciones sobre la aleatorización. Los diseños factoriales son los más adecuados para estudiar el efecto de las variables y su respuesta de acuerdo a la modificación de las condiciones de prueba. En cada réplica completa del experimento se investigan las combinaciones posibles de los niveles de los factores (Sabino, 1996).

5. Realización del experimento.

Monitoreo del proceso para asegurar que todo se esté haciendo conforme a la planeación. Es conveniente realizar algunas corridas piloto o de prueba, ya que proporcionan información acerca de la consistencia del material experimental, una comprobación del sistema de medición, una idea aproximada del error experimental y la oportunidad de poner en práctica la técnica experimental global. Se revisan las decisiones tomadas en los pasos anteriores.

6. Análisis de los datos.

Deberán usarse métodos para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo. Con frecuencia los métodos gráficos simples desempeñan un papel importante en el análisis e interpretación de datos.

7. Conclusiones y recomendaciones.

Una vez analizados los datos, el experimentador debe sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción. Los métodos

gráficos también suelen ser útiles en esta etapa, en particular para presentar los resultados. A medida que avanza un programa experimental, es común abandonar algunas variables de entrada e incorporar otras, modificar la región de exploración de algunos factores o incorporar nuevas variables de respuesta.

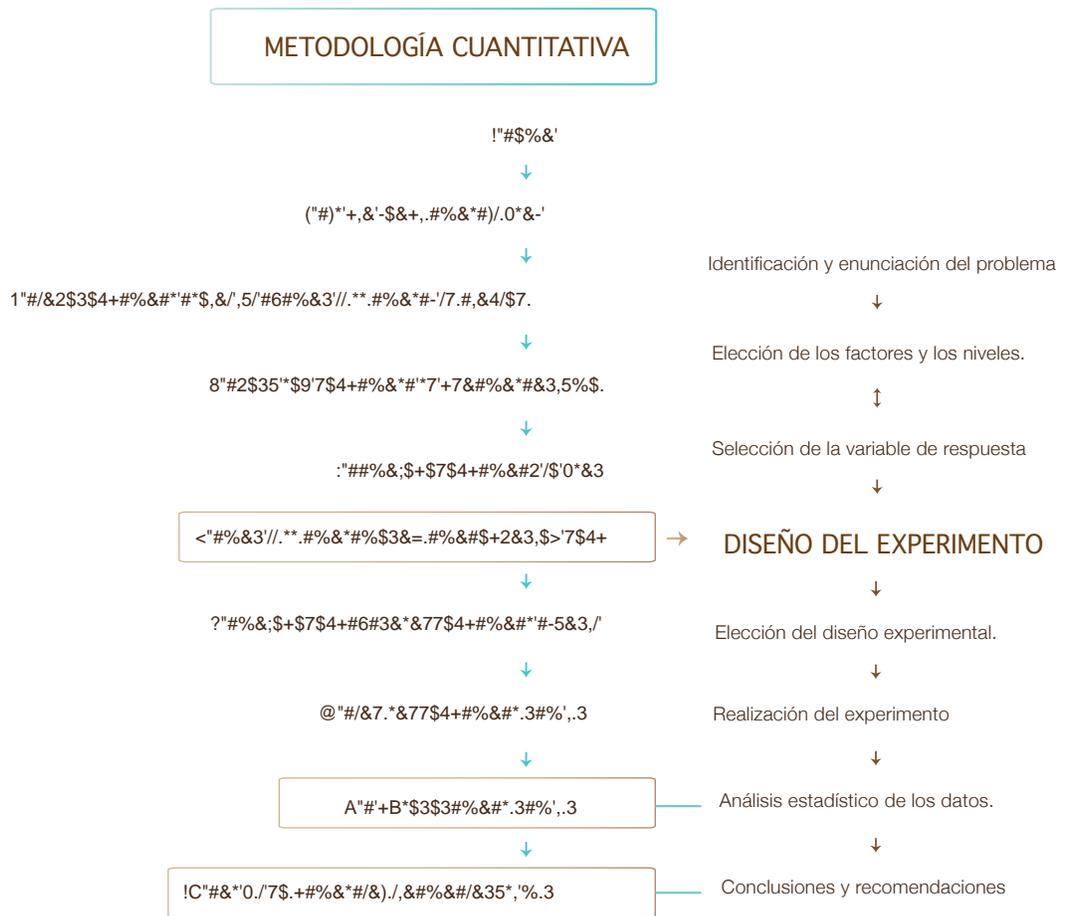


Fig. 1.1.- Metodologías del proyecto. Fuente: Elaboración propia.



Molino B. #40
A
11.74 %



Molino B. #100
2
12.97%



Molino B #200
13
10.72 %



Triturada #40
10
10.83%



Triturada #100
6
10.63%



Triturada #200
5
12.28%



Triturada #200
13



Triturada y Mol #200
5
10.84%



Triturada #200
A
8.96%

CAPITULO II

MARCO REFERENCIAL

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. LOS MATERIALES CERÁMICOS

Uno de los 5 grupos principales de materiales clasificados de acuerdo a la estructura electrónica de sus átomos, los cuales son responsables de sus propiedades mecánicas y físicas, es el grupo de los materiales cerámicos. Según Shackelford (2005), éstos grupos son: metales, cerámicos y vidrios, polímeros, semiconductores y materiales compuestos.

Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos no metálicos, constituidos por elementos metálicos y no metálicos enlazados principalmente mediante enlaces iónicos y/o covalentes. Las composiciones químicas de estos materiales varían considerablemente, desde compuestos sencillos a mezclas de muchas fases complejas enlazadas (Smith, 1998).

2.2. LA CERÁMICA

Tradicionalmente se ha definido como el arte de fabricar objetos de arcilla cocida, definición originada a partir de las primeras cerámicas conocidas y trabajadas, en donde a materiales arcillosos que se encontraban en la naturaleza, se les agregaba agua para poder modelarlos. Sin embargo, pronto se descubrió que se podían obtener mejores resultados si las arcillas naturales eran mezcladas con otros materiales que permitieran mejorar sus características antes o después de la cocción (Hald, 1986).

La cerámica también se ha definido como todo artículo elaborado a partir de sustancias inorgánicas, primeramente moldeadas y posteriormente endurecidas por el fuego. El nombre procede de la palabra griega "keramos" que significa arcilla.

La cerámica tradicional, es también denominada como química de los silicatos y está constituida por tres materias primas básicas: Arcilla ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Sílice (SiO_2) y Feldespato ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ó $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) que contienen como elemento común al Sílice (Vázquez, 2005).

2.2.1. Materias primas de la cerámica

La cerámica se compone de diferentes materias primas (Fig. 2.1), las materias plásticas son todas las arcillas compuestas de minerales arcillosos, los dos grupos más importantes son: la arcilla china, que es una arcilla pura y las arcillas sedimentarias. Estos materiales plásticos, contienen una cantidad apreciable de cuarzo (material no plástico).

Este cuarzo puede estar en la naturaleza asociado con la arcilla como un mineral accesorio, o puede ser cuarzo que se ha añadido como pedernal. El pedernal, cuyo color es negro, es una variedad del sílex, compuesto por cristales de cuarzo extremadamente pequeños, unidos entre sí por moléculas de agua. Al calentar a una temperatura de 400°C es despedida del agua y a 1100°C el cuarzo se transforma en cristobalita. El sílex contiene a menudo cal a modo de impureza, lo que favorece la conversión (Rado, 1990).

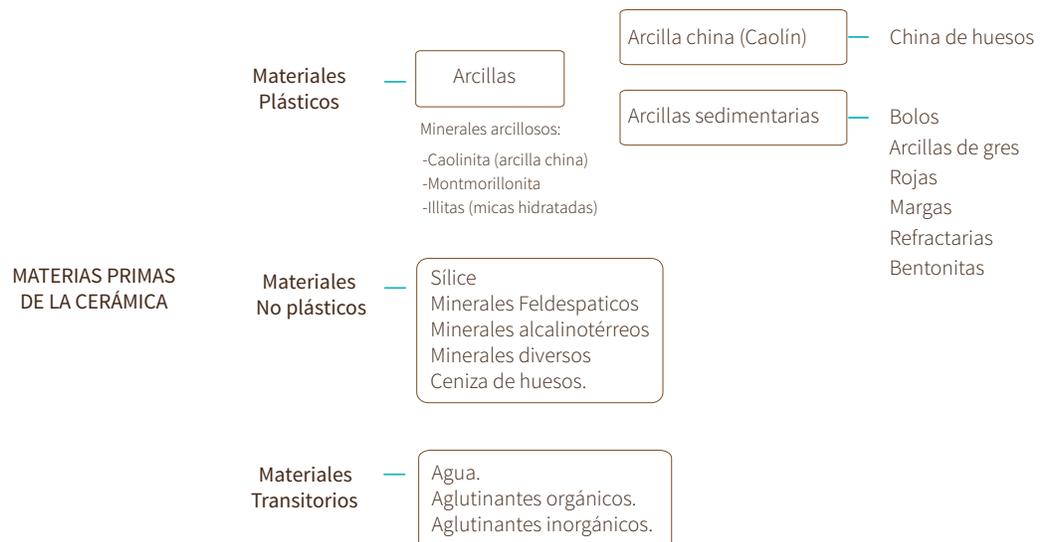


Fig. 2.1.- Clasificación de las materias primas de la cerámica. Fuente: Rado, 1990.

Los materiales no plásticos en su mayoría son: Sílice (que en estado libre se encuentra en la naturaleza generalmente como cuarzo) y minerales diversos (arena, cuarzo), también cenizas. Tienen como funciones principales adicionarse a las arcillas demasiado plásticas para reducir el efecto y posibilitan que las propiedades deseadas puedan ser obtenidas a bajas temperaturas de cocción. Existen algunas arcillas que son bastante impuras que no necesitan la adición de minerales no plásticos, ya que en su mismo proceso de formación natural, ya los contiene. Es común también que se utilicen materiales fundentes (feldespatos, bauxita) y materiales colorantes (compuestos metálicos).

Las materias transitorias son también materias primas de la cerámica: el agua es el más importante e indispensable aunque los aglutinantes son opcionales. Las materias primas transitorias son utilizadas como materiales auxiliares que no forman parte del producto final, pero que son indispensables en la manufactura, los aglutinantes orgánicos también forman parte de este grupo, así como los sintéticos, generalmente preferidos, pues son mejor controlados. Pueden influenciar las propiedades reológicas de las arcillas, así como mejorar la plasticidad, incrementar la resistencia antes de la cocción, actuar como floculantes (coagulantes) o como defloculantes, sin embargo, algunos presentan efectos secundarios, como el crecimiento bacteriano, o espumado, para esos casos debe utilizarse el antídoto apropiado (Rado, 1990).

2.2.2. Clasificación de la cerámica

Debido a que la cerámica es resultado de una diversa combinación de sustancias minerales, los tipos de pastas y cuerpos cerámicos son muy numerosos, por lo que suele tener diversos criterios de clasificación: de acuerdo a su temperatura de cocción (baja, media y alta), por su densidad (porosas y densas), por su color (blancas o coloreadas), entre otras (Vázquez, 2005).

2.2.2.1. De acuerdo a los tipos más importantes.

Según los tipos más importantes la cerámica se clasifica en cerámica porosa y cerámica densa (Tabla 2.1.).

Tabla 2.1. Clasificación de la cerámica según los tipos más importantes.

TIPO	MATERIAS PRIMAS(%)	TEMPERATURA DE COCCIÓN (°C)		COLOR Y CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
		PRIMERA COCCIÓN	COCCIÓN DE BARNIZ	
CERÁMICA POROSA				
ALFARERÍA	Arcilla (impura)	900	1000-1100	Marrón-rojo A veces sin barnizar
MAYÓLICA	Arcilla (impura) Arena Fundentes	900	1000-1100	Marrón cubierto por un barniz blanco opaco
LOZA				
de Arcilla	Arcilla (bajo contenido de Fe) Sílex u otros materiales de Sílice Arena de Cuarzo	900	1000-1100	Color Blancuzco Siempre barnizada Fabricación industrial
de Cal	Arcilla Magras naturales con alto contenido de cal Sílice Libre Caliza, Talco o Mármol			
Feldespática	Arcilla China y Bolos Sílice Libre, Sílex Calcinado Minerales Feldespáticos (Pegmatita o piedra de Cornualles)			
CERÁMICA DENSA				
GRES	Arcilla (de fusión natural) o arcilla más fundentes y materiales de sílice.	1100-1300	1000-1100	Gris, amarillo, etc. A veces sin cocción de barniz, efecto de barniz a la sal al final de la primera cocción.
PORCELANA				
Blanda (Fritada, de Magnesita, Altamente feldespática, Semiporcelana)	Arcilla China Feldespato Cuarzo	900-1000	1250-1350	Blanco-blancuzco
Dura	Arcilla China Feldespato Cuarzo	900-1000	1400	Blanco Azulado Traslúcido
China Vítreo	Bolos Arcilla China Minerales Feldespáticos Cuarzo	1100-1250	1000-1100	Blancuzco-blanco Ligeramente translúcido
China de Huesos	Arcilla China Piedra de Cornish Ceniza de huesos	1250	1100	Blanco Puro Traslúcido

Fuente: Rado, 1990.

Ferrer (2007), también clasifica a la cerámica en porosa y no porosa pero utiliza el término “arquitectónica” definiéndola como toda aquella cerámica que ennoblece a la arquitectura (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. *Cerámica Arquitectónica.*

	CLASE	VARIEDAD	CUBIERTA		TEMPERATURA DE COCCIÓN	USO MÁS COMÚN
POROSA	Alfarería Alfarería Artística	Ladrillos Tejas Terracota	no/sí		900° - 1000°C	Ladrillo macizo o hueco, teja, atañor. Revestimientos en general y elementos ornamentales
	Mayólica	Engobada Barnizada Esmaltada	sí		920° - 980°C	Revestimientos en general: - Horizontales - Verticales - Mixto
	Loza	Loza fuerte	sí		1250° - 1280°C	
NO POROSA	Porcelana	Opaca	sí		1250° - 1495°C	Revestimientos en general.
	Gres	Gres Industrial	Gres Rojo	no	950° - 1100°C	Pavimentos: - Internos - Externos
		Gres Fino	Gres de pavimento	sí	1130° - 1200°C	Pavimentos de alta resistencia a la abrasión

Fuente: Clasificación basada entre otros, en los apuntes del curso “Metodología de intervención en la conservación y restauración de los materiales cerámicos” (Ferrer 2007).

2.2.2.2. De acuerdo a sus propiedades y aplicaciones (Barry y Grant, 2007)

1. Cerámica tradicional

Usualmente basada en arcilla, sílice y fundentes. Las arcillas constituyen el cuerpo principal del material. La sílice (también llamada sílex o cuarzo) funde a altas temperaturas y es el material refractario de los cerámicos tradicionales. El feldespato potásico, cuya composición básica es $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ funde a bajas temperaturas y se transforma en vidrio cuando la mezcla cerámica se somete a altas temperaturas y une los componentes refractarios. Los artículos que se fabrican son de gran volumen, tales como ladrillos y tejas, piezas de baño, alfarería y loza. Hay algunas tendencias a igualar la cerámica tradicional con baja

tecnología, sin embargo en algunos casos utiliza manufactura de alta tecnología. La maquinaria y herramientas complejas son frecuentemente utilizadas y asociadas con procesos de control asistidos por computadora. Este tipo de cerámica ha sido utilizada desde hace más de 25,000 años.

2. Cerámica avanzada

Se conoce también como cerámica especial, técnica o de ingeniería. Constituida de compuestos puros o casi puros como el Óxido de aluminio, Carburo de Silicio, Nitruro de Silicio, entre otros. Con ella se fabrican nuevos materiales tales como materiales hospedantes, láser, piezas eléctricas cerámicas, cerámica para memorias dinámicas de acceso aleatorio (RAMs dinámicas), etc., frecuentemente son producidos en pequeñas cantidades debido a los altos precios. Tienen altas propiedades mecánicas, alta resistencia a la corrosión/oxidación y propiedades eléctricas, ópticas y/o magnéticas. Se ha venido desarrollando aproximadamente desde 100 años atrás a la fecha.

2.2.3. Principales propiedades

Las propiedades de los materiales cerámicos varían mucho debido a diferencias en los enlaces. En general, los materiales cerámicos son típicamente duros y frágiles con baja tenacidad y ductilidad. Se comportan usualmente como buenos aislantes eléctricos y térmicos debido a la ausencia de electrones conductores. Normalmente poseen temperaturas de fusión relativamente altas, buena estabilidad química y térmica debido a sus fuertes enlaces y elevada resistencia a la compresión. Debido a estas propiedades, los materiales cerámicos son indispensables para muchos de los diseños en ingeniería (Barry y Grant, 2007).

Porosidad. Es una de las propiedades de los cerámicos sin embargo, los poros pueden ser considerados como un tipo especial de defecto superficial. En un material cerámico los poros pueden estar interconectados o bien cerrados. La porosidad aparente mide los poros interconectados y determina la permeabilidad,

es decir, la facilidad con la cual pasan gases y otros fluidos a través del componente cerámico (Askeland, 1998).

Contracción Lineal. Todas las arcillas y pastas experimentan contracción al secar, debido a la eliminación de capas finas de agua presentes entre las partículas. Se considera que en el secado ocurre transporte de líquido y vapor. Investigadores han demostrado que la concentración de vapor es directamente proporcional a la porosidad. Durante el secado de los sólidos, la contracción está presente y ésta puede depender de las condiciones en que se efectúe el secado, de la estructura del material y de la geometría de los productos (Fuentes et al., 2008). El secado ocurre por atracción capilar, cuando la superficie de la masa de arcilla esta ligeramente seca, sale afuera más agua del interior de la masa. A medida que la película de agua entre las partículas de arcilla se pierde por evaporación, las partículas se acercan mas entre sí cerrando el espacio que había sido ocupado por el agua. La cantidad de esta contracción de secado dependerá del tamaño de las partículas de arcilla y de la cantidad de agua que las separaba. Las arcillas que tienen un tamaño de partícula muy fino se contraen más por la presencia de más intersticios llenos de agua que se cierran. Inversamente las arcillas más abiertas, esto es con partículas de tamaño más grande, o con adiciones de materiales no plásticos, se contraen menos. Aunque la contraccion es lenta, crea un problema para determinar cualquier objeto cerámico.

Rigidez y resistencia. La rigidez y la resistencia de una pieza se obtienen durante la sinterización. Durante el calentamiento, la arcilla se deshidrata eliminando el agua que forma parte de la estructura cristalina de la caolinita y empieza la vitrificación, o la fusión. Las impurezas y el agente fundente reaccionan con las partículas cerámicas plásticas y no plásticas, produciendo una fase líquida de bajo punto de fusión en las superficies de grano. El líquido ayuda a eliminar la porosidad y, después del enfriamiento, se convierte en un vidrio rígido que une a las partículas cerámicas. Esta fase vítrea proporciona una unión cerámica, pero también causa una contracción adicional de la totalidad del cuerpo cerámico. Los cuerpos cerámicos

son mas resistentes a compresión que a tensión. El tamaño y la fracción en volumen de los poros en los cerámicos son factores importantes que afectan a su resistencia (Smith, 1998). La resistencia mecánica de los cuerpos de cerámica es controlada predominantemente por la porosidad, contenido de vidrio, tamaño de los cristales, tipos de cristales. Estos factores dependen de la fase a la cual las reacciones que ocurren durante el sinterizado son detenidas. Esto a su vez es dirigido por la composición, contenido en impurezas y tamaño de las partículas de la materia prima, así como por la temperatura y otros aspectos de la cocción (Rado, 1990).

2.2.4. Procesos cerámicos artesanales

Preparación de la arcilla: Este material, después de seco y triturado en granos, ya sea por medio de batido a mano, con mazos o por medio de algún equipo como el molino vertical, se humedecen con agua, y se dejan saturar durante 24 horas al menos; después se diluyen en una tina, moviéndolos por medio de un agitador, se dejan reposar, y se decanta la papilla fluida en cubos de depósito escalonados y con tamices, en las que se deja la materia hasta que las partículas arcillosas se hayan sedimentado.

Mezcla de materiales: La pasta necesaria para la elaboración de objetos cerámicos, exige una masa homogénea tanto mayor cuanto más alta sea la temperatura de cocción a que deban exponerse las piezas, con objeto de que la contracción se verifique por igual, y no produzca la deformación de los objetos elaborados. Las materias homogéneas obtenidas separadamente reducidas a partículas sumamente finas, conducen a verificar una mezcla más homogénea de estas materias separadamente preparadas (García, 2001).

Una vez obtenida la mezcla, es necesario, sobre todo cuando la incorporación se ha verificado al estado fluido, eliminar la mayor cantidad de agua posible que contenga, para evitar que el agua separe las sustancias según su densidad.

Esta desecación se puede llevar a cabo mediante diferentes procedimientos: Por evaporación, ya sea espontánea, empleando el calor o con ayuda de materiales absorbentes y porosos como el yeso; por filtración con o sin presión o ayudada de la compresión; por condensación del vapor.

Amasado de las pastas. Obtenida una masa consistente, debe ser amasada para que presente uniformidad en su composición. Las maneras de realizar esta operación, según la mayor o menor finura de las pastas son diversas: en equipos mecánicos como amasadores de ruedas, con los pies descalzos, pisada por búfalos, caballos, empleando cilindros compresores, o bien de forma manual. Esto se hace con la finalidad de comprimirla y extraer todo el aire que pueda quedar interpuesto. La pasta estará bien trabajada hasta que, deshaciendo un fragmento entre los dedos, no se perciba ninguna burbuja de aire en su interior.

Conformación de la pieza. Las técnicas de conformación son diversas y se pueden encontrar en el apartado 2.2.5.

Secado y eliminación del aglutinante. El propósito es eliminar agua y la humedad del cuerpo cerámico plástico antes de ser sometido a altas temperaturas. Se somete a un secado lento y controlado. Generalmente el agua se elimina a menos de 100°C y puede tardar alrededor de 24 horas para un trozo de cerámica grande. La mayoría de los aglutinantes orgánicos pueden extraerse de las piezas por calentamiento en el rango de 200°C a 300°C.

El secado se facilita por la presencia de cualquier tipo de partículas no plásticas, las cuales tienden a tomar mucha menos agua que la arcilla y por ello se secan mas fácilmente. Para conseguir un secado uniforme de toda la pieza, se controla cuidadosamente la temperatura y la humedad, minimizando así esfuerzos, distorsión y agretamiento.

Todas las operaciones del proceso exigen un gran cuidado y limpieza, se debe evitar la incorporación del polvo y de cualquier otra sustancia a la pasta cerámica; basta con la presencia de un cabello en la pasta para inutilizar un objeto construido

con ella, ya que al descomponerse la materia orgánica con el calor en la cocción, los gases que desprende producirían hendiduras y defectos en la pieza.

Cocido: Sea cualquiera la naturaleza del combustible empleado, la forma del horno y los objetos que deban cocerse, el fuego debe conducirse de modo que empiece por un caldeo lento, llamado pequeño fuego; y termine por un golpe de calor que se llama gran fuego. El pequeño fuego siempre es necesario, porque la arcilla al perder su agua a temperaturas superiores de ebullición, es necesario que la desprenda lentamente a fin de evitar que los objetos se agrieten.

La vitrificación y la cocción (sinterización) son las últimas etapas del proceso, en la sinterización, se consigue que pequeñas partículas del material se mantengan unidas por difusión en estado sólido. El proceso de sinterizado implica el calentamiento gradual del horno hasta la temperatura necesaria para realizar el trabajo deseado sobre la cerámica y luego su enfriamiento, también gradualmente, hasta la temperatura ambiente (Rhodes, 1999).

La vitrificación ocurre únicamente en la porcelana, en productos arcillosos estructurales y en algunos componentes electrónicos que contienen una fase cristalina, la cual sirve como medio de reacción para que la difusión pueda tener lugar a menor temperatura que en el resto del material sólido cerámico. Este tratamiento ocurre a elevadas temperaturas por medio de las cuales la fase cristalina se licúa y rellena los poros del material. Esta fase cristalina líquida puede reaccionar también con alguno de los sólidos restantes del material refractario. Bajo enfriamiento, la fase líquida solidifica para formar una matriz vítrea que une las partículas que no han fundido.

Una de las secuencias que se sigue en la fabricación de una pieza cerámica de manera tradicional es la mostrada en la Fig. 2.2. en donde existe una primera sinterización llamada "cocción del biscuit", seguido de esa primera cocción las piezas cerámicas reciben el nombre de "bizcocho" o "biscuit".

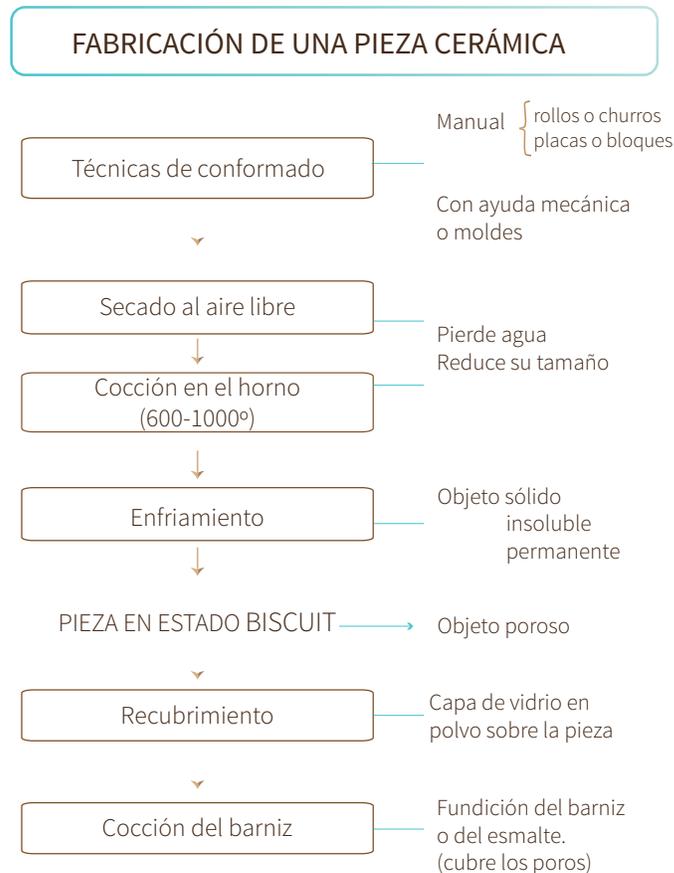


Fig. 2.2.- Proceso cerámico tradicional. Fuente: Birkz, 1981.

Otro sistema cerámico muy importante consiste en combinar las sinterizaciones, del biscuit y del barniz en un único proceso en donde la pieza se cuece sólo una vez a la temperatura necesaria (Fig. 2.3).

Aunque resulta económica desde el punto de vista del combustible, puede resultar en un porcentaje de piezas estropeadas bastante alto. La decoración de las piezas puede efectuarse en cualquier estado, desde el estado de la arcilla plástica hasta el momento final con la pieza ya barnizada. En este caso debe efectuarse una tercera cocción que se lleva casi únicamente a cabo en los procesos industriales.



Fig. 2.3.- Proceso cerámico Barniz en Crudo o Cocción de una vez. Fuente: Birkz, 1981.

2.2.5. Concepción de piezas cerámicas

Después de que la pasta está en disposición de ser empleada, se procede a elaborar una pieza seleccionando una de las técnicas de conformado de piezas cerámicas. Sin profundizar en el proceso de diseño, se puede comenzar con la elaboración de bocetos para definir la forma de la pieza, y después de seleccionar uno, se comienza a manipular la arcilla para la creación de la pieza. Comúnmente, la pasta se amasa y se comprime enérgicamente con las manos formando esferas que se arrojan con fuerza sobre la mesa de trabajo. De este modo se desprenden las burbujas que se han desarrollado en la pasta durante el tiempo que se ha dejado reposar. Existen muchas maneras de amasado, pero se sabe que se ha logrado el objetivo de éste cuando al partir un fragmento no se observa la existencia de burbujas de aire en la pasta.

Algunas de las diferentes técnicas para elaborar objetos cerámicos, ya sean con algún equipo, herramienta, o de forma manual, son:

1. Torneado. La pasta húmeda se coloca sobre la cabeza de un torno, se humedecen las manos con barbotina (pasta diluida en agua) y con el movimiento del torno, se rodea la pasta elevándola para alargar la pasta y producir la figura deseada, se introducen los pulgares en el centro de la figura para forjar un hueco en el objeto.

2. Modelado manual. Existen dos formas básicas de este tipo de modelado: con la superposición de rollos o con placas unidas a diferentes ángulos.

3. Moldeado. La pasta se aplica sobre el molde del cual toma la forma; los moldes han de ser siempre de una materia absorbente; ordinariamente se hacen de yeso o tierra cocida porosa (para que la pieza moldeada pueda desprenderse de su matriz es necesario que el agua de su superficie pueda ser absorbida).

4. Moldeo o colado en barbotina. Se emplea barbotina que al verterla en un molde de yeso, éste absorbe una parte del agua de esta pasta líquida y una porción de la pasta forma en la superficie del molde una capa adherente, que se nota separando la barbotina que quedó en estado líquido (escurrido o fundición con drenaje). Se obtienen piezas delgadas o de mayor o menor espesor dependiendo del tiempo que se deje la pasta líquida en el molde antes de vaciar la pasta restante. Cuando la pasta restante no se vacía y se obtiene un sólido relleno, se le llama fundición compacta.

5. Prensado. La materia prima cerámica puede ser prensada en estado seco, plástico o húmedo, dentro de un troquel para formar productos con una forma determinada. El prensado se puede definir como la compactación uniaxial simultánea en un troquel.

6. Extrusión. Las secciones transversales sencillas y las formas huecas de los materiales cerámicos se pueden producir por extrusión de estos materiales en estado plástico a través de un troquel de embutir. Los equipos utilizados generalmente son las máquinas de extrusión tipo tornillo sin fin de vacío, que fuerzan al material cerámico plástico a pasar a través de un troquel de acero duro o de otra aleación por un tornillo sin fin accionado mediante un motor.

Posteriormente se siguen otras operaciones tales como la reunión de partes, o el rematado que tiene por objeto perfeccionar, pulir, adornar y completar una pieza ya preparada por las técnicas anteriores, lo anterior exige grandes conocimientos y habilidades que generalmente son realizados por artistas o diseñadores.

Una vez terminadas las piezas, se deben conservar secas, verificando una desecación lenta para evitar fracturas y que no produzca accidentes que puedan deformarlas o inutilizarlas antes de ser sometidas a altas temperaturas. Generalmente, la eliminación de agua puede tardar al rededor de 24 horas.

Todos los productos cerámicos pueden recibir colores en su superficie. Algunas veces los materiales colorantes están mezclados en el cuerpo de la pasta.

2.2.6. Aplicaciones

Las aplicaciones varían desde productos de alfarería, fabricación de ladrillos, azulejos y losetas, utensilios de cocina, tubos de albañal, vidrio, materiales refractarios, imanes, dispositivos eléctricos, piezas de electrodomésticos, fibras y abrasivos. En la mayoría de las aplicaciones los productos tienen una propiedad esencial o una combinación particular de propiedades que no puede ser obtenida con ningún otro material, esto determina la base de su selección.

Productos estructurales como ladrillos para la construcción, tuberías de desagüe, tejas de drenaje, tejas de cubiertas, losetas para pisos, porcelana eléctrica, porcelana china, sanitarios, entre otros, están hechos de arcilla natural que contiene los tres componentes básicos ya sea de forma controlada o no según sea el caso (arcilla, sílice, feldespatos).

Se elaboran productos de cerámica porosa como ladrillos, tejas, tubos, macetas, *chamota*, mayólica, alfarería, vasijas, jarrones, materiales refractarios, baldosas, mayólica, artículos sanitarios, esculturas cerámicas y objetos artísticos. De cerámica no porosa se fabrican, baldosines, baldosas, piezas resistentes al ácido,

tubos barnizados con sal, depósitos para ácidos, loza artística, diversos tipos de porcelana, etc. (Hald,1986).

Tanto para los constructores como para los diseñadores, las piezas cerámicas son elementos muy importantes en la arquitectura que les permiten desarrollar proyectos con amplias posibilidades aplicándolas como revestimientos, pavimentos, entre otros, tanto en interiores como en exteriores.

2.2.6.1. Aplicaciones cerámicas en el futuro

En el área de las cerámicas avanzadas existen grandes oportunidades para la ingeniería en cerámica y la ciencia de materiales. Entre las aplicaciones importantes están (Barry y Grant, 2007):

1. Cerámicas estructurales.

Herramientas de corte, componentes de desgaste, intercambiadores de calor, y piezas de motores. Sus propiedades principales son alta dureza, baja densidad, resistencia mecánica a alta temperatura, resistencia a la fluencia, resistencia a la corrosión e inercia química.

2. Cerámica en electrónica.

Usada en aplicaciones diversas como capacitores y dieléctricos, varistores, sistemas microelectromecánicos (MEMS), sustratos y circuitos integrados.

3. Biocerámicos.

Usados en el cuerpo humano. Una de las respuestas de estos materiales es disolverse en el cuerpo.

4. Recubrimientos y películas.

Utilizados para modificar las propiedades superficiales de un material.

5. Los materiales compuestos (composites).

Usan la cerámica como fase matriz y/o fase de refuerzo. A través del refuerzo con fibras aumentan la resistencia a la fractura. Cuando la cerámica es la fase de refuerzo (con una matriz de metal), el resultado suele ser un incremento en la resistencia, en la resistencia al desgaste y una resistencia a la fluencia mejorada.

6. Nanocerámica.

Son ampliamente utilizados en los productos cosméticos, tales como protectores solares, y sabemos que son críticas en muchas aplicaciones de catálisis, pero su uso en pilas de combustible, recubrimientos y dispositivos.

2.3. LAS ARCILLAS

La materia prima principal y plástica de la cerámica tradicional es la arcilla, la cual se define como el producto del envejecimiento geológico de la superficie de la Tierra, producto final debido a los agentes de descomposición química, de numerosos minerales, silicatos principalmente, que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas. Es un granito descompuesto y disgregado por la erosión y está formada básicamente de alúmina y sílice. La arcilla china o caolín es la verdadera arcilla madre, sólo sílice, alúmina y agua (claras en su cocción). Todos sus descendientes contienen impurezas las que dan a la arcilla su valor y carácter diverso en la elaboración cerámica.

Se presentan generalmente en capas muy regulares en los terrenos estratificados, formados en el seno de las aguas, dulces o saladas, intercaladas entre capas de gres, calcáreas, etc. Se encuentran muy a menudo restos fósiles, orgánicos, vegetales y animales en estos sedimentos.

Como mineral, la arcilla está compuesta principalmente por silicatos de aluminio hidratados: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, con pequeñas cantidades de otros óxidos como TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O y K_2O y en algunas ocasiones, presentan silicatos de magnesio, hierro u otros metales también hidratados. Las partículas de los minerales de

la arcilla suelen ser de forma aplanada, adoptando una forma laminar. Estos minerales tienen una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica (un átomo de silicio rodeado de cuatro de oxígeno, disponiéndose en forma de tetraedro) y la aluminica (retículas de octaedros, dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno al rededor). Omitiendo a las impurezas siempre presentes en las muestras reales. Caolinita es el nombre dado a esta sustancia de arcilla pura (Rhodes 1990).

En 1995 como un termino global, se determinó que la arcilla se refiere a un material que se forma naturalmente y se compone principalmente de minerales de grano fino, generalmente es plástica con el contenido de agua adecuado y se vuelve un material duro cuando se somete a la acción del calor (Mukherjee, 2013).

Las arcillas dependen altamente del tipo de mineral arcilloso que contenga, que hace que ésta al estar húmeda, con la cantidad adecuada de agua que la haga plástica, tienda a mantener cualquier forma que se le dé. Cuando la arcilla plástica se seca se contrae alrededor de un 5%. Algunas arcillas hasta un 8%. Aunque esta contracción es lenta, crea un problema para determinar cualquier objeto hecho de arcilla plástica.

Las arcillas comúnmente contienen materias extrañas, pueden ser fragmentos mucho mayores que las partículas arcillosas, y otras veces tienen igual grado de divisibilidad; se requiere separar las materias para un trabajo final sin impurezas, agregándoles una cantidad conveniente de agua, y decantándolas después, así las partículas finas quedan en suspensión y son arrastradas por el agua decantada, mientras que los fragmentos gruesos de ciertas sustancias se precipitan al fondo de los recipientes. Casi todas las arcillas que produce la naturaleza, después del lavado anterior, dejan unos residuos más o menos notables, ásperos al tacto, y generalmente pueden ser granos de cuarzo (que se reconocen en su desigual fractura, que nunca es laminosa; en su dureza, color y transparencia), trozos de feldespato (menos duro que el cuarzo, en cristales más o menos limpios y opalinos), mica (se presenta en

láminas muy delgadas y anchas, se conserva en suspensión mucho más tiempo que las sustancias anteriores), mira (visible desde luego en la arcilla a causa de sus láminas brillantes y delgadas), ó pirita de hierro (formada por cristales o granos de disulfuro de hierro, pesados, y teniendo el brillo metálico y el color amarillo del latón).

Arcilla es el nombre general que se le da a las capas de silicatos con tamaños de partículas de <2 micrómetros. Existen seis tipos de arcillas comerciales que se distinguen por su composición, plasticidad, color y características de sinterizado (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. *Arcillas comerciales y sus principales usos.*

TIPO	USOS PRINCIPALES	COMENTARIOS
Arcilla de Bolos	Pisos, azulejos, tejas	También llamadas arcillas plásticas mejoran la trabajabilidad
Bentonita	Artículos sanitarios, arenas de fundición, absorbentes.	Canadá es el principal productor
Arcilla común	Ladrillos, Cemento	También llamada arcilla de ladrillos El color rojo proviene del contenido de Fe
Arcilla alta temp.	Refractarios	Contienen de 25-45% de alúmina
Arcilla esméctica	Absorbentes	Trabajadores textiles limpian la lana cruda amasándola con agua y tierra fina la cual absorbe aceite, suciedad y otros contaminantes
Caolín	Papel	Es una arcilla blanca principalmente compuesta por Caolinita, un silicato hidratado de aluminio

Fuente: Barry y Grant, 2007.

2.3.1. Clasificación de las arcillas

2.3.1.1. *Por su estructura reticular (Juárez y Rico, 2001)*

1. Caolinitas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Formadas por una lámina silícica y otra alumínica, superpuestas indefinidamente. No permiten la penetración de moléculas de agua entre ellas. Son relativamente estables en presencia de agua.

2. Montmorillonitas. $[(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O]$. Formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. Las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad produciendo en algunos casos arcillas expansivas. Son fuertemente inestables en presencia de agua.

3. Illitas $[(OH)_4 \cdot K_y (Si_{8-y} \cdot Al_y) (Al_4 \cdot Fe_4 \cdot Mg_4 \cdot Mg_6) O_{20}]$ generalmente con $y=1.5$. Su estructura es parecida a la de las montmorillonitas con una expansividad menor. Forman grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen.

2.3.1.2. De acuerdo a su formación

1. Arcillas primarias o residuales. Son las que se han formado en el lugar de sus rocas madres y no han sido transportadas por el agua, viento o el glaciar. Puesto a que la arcilla no ha sido suspendida en el agua no se ha clasificado selectivamente en los distintos tamaños de partículas y granos grandes y pequeños de arcilla se encuentran mezclados entre sí. Los depósitos de arcillas primarias, tienden a ser de grano grueso y relativamente no plásticas. Tienen alto grado de pureza, blancura y están libres de minerales o contaminación orgánica. La mayoría de los caolines son arcillas primarias.

2. Arcillas secundarias. Son aquellas que han sido desplazadas del lugar de las rocas madres originales. El viento y los glaciares pueden transportar la arcilla pero principalmente es el agua. Son más comunes que las primarias. La acción del agua en las corrientes tiende a moler la arcilla en partículas de tamaño más y más pequeño. Luego, cuando el agua de la corriente comienza a tranquilizarse, algo del material que transporta se deposita. Las arcillas transportadas son propensas a contener hierro, cuarzo, mica y otras impurezas como el lignito, una forma de carbón que se produce con la arcilla cuando se deposita por sedimentación en lugares poco profundas o lagos donde hay mucha vegetación. La gran mayoría de estas arcillas contienen suficiente hierro para hacer que se cuezan a un color anteado,

marrón o rojo, y la temperatura de cocción es bastante baja. Las arcillas plásticas son arcillas secundarias de elevada plasticidad con poco contenido de hierro.

2.3.1.3. Por su importancia (Rado, 1990)

1. Arcillas Chinas, son las más puras, la mayoría están compuestas únicamente por caolinita. Son arcillas primarias (residuales), es decir se encuentran en su lugar de formación, están libres de óxidos que manchen por lo tanto adoptan con la cocción un color blanco. Constituyen el principal ingrediente de las porcelanas, y el único material arcillosos en las semiporcelanas, debido a que son las únicas arcillas cuyo contenido en hierro es lo suficientemente bajo como para producir el color blanco y translúcido en el producto cocido. Son utilizadas en alfarería para aclarar el color.

2. Arcillas sedimentarias. La mayoría son arcillas secundarias, contienen alto grado de plasticidad y resistencia en estado plástico. Están compuestas principalmente por caolinita desordenada además de uno o varios minerales arcillosos distintos (haloisita, montmorillonita, entre otros). Estas arcillas se clasifican a su vez en:

- Bolos. Varían en su composición química. En estado plástico estas arcillas son a menudo oscuras de color, grises, azules, o bien negras por las impurezas inorgánicas. En estado cocido algunas tienen ligera coloración o son casi blancos. La impureza que más prevalece es la arena de cuarzo, en algunos bolos se presentan hasta en un 66%, correspondiendo a un 80% total de sílice.

- Arcillas de gres. Son un tipo de bolos con un índice alto de impurezas, principalmente álcalis (tierras alcalinas) utilizadas para producir objetos completamente densos (vitrificados) a temperaturas relativamente bajas con poco fundente adicional o sin él.

- Bentonitas. Es el más desordenado de los materiales arcillosos, es considerada como derivada de cenizas volcánicas. Absorbe el agua muy rápidamente por lo

que se expande hasta cinco veces su volumen en seco. Es excesivamente plástica por lo que requiere aditivos. No se usa normalmente en la alfarería, excepto ocasionalmente en China de huesos (adicionando bentonita no más del 5%) para proporcionarle una considerable mejora en plasticidad y resistencia en seco. Una cantidad alta de bentonita estropearía el color de la cocción por el alto contenido de hierro que forma cristales marrón oscuro.

-Otros tipos. Arcillas rojas: Son las de mayor interés en la alfarería, poseen alto contenido de hierro (hasta 10%) el cual actúa como un fuerte fundente. Poseen temperaturas de cocción bajas. Son las más abundantes. Arcillas magras: mezclas naturales de arcilla y tiza, son friables. Algunas contienen CaO como fundente adicional. Arcillas refractarias: Son muy duras, deben ser trituradas con piedras antes de usarse y mezclarse con agua. Contienen bajas cantidades de impurezas fundentes. Son el material utilizado para los contenedores refractarios y otros accesorios de los hornos cerámicos.

2.3.1.4. Por origen, composición y utilidad (Rhodes, 1990)

1. Caolín. Escaso en la naturaleza, Indispensable para hacer porcelana blanca pura o china. Son arcillas primarias y se formaron por la meteorización del feldespato. Son de partículas de tamaño grueso y por ello no plásticos comparados con las arcillas sedimentarias. Están relativamente libres de impurezas minerales como el hierro. Rara vez se utiliza solo, se le añaden otros materiales para aumentar su trabajabilidad y disminuir la temperatura del horno necesaria para lograr un producto duro y denso.

2. Arcillas plásticas. Opuestas al caolín por sus propiedades (mayor contenido de hierro, más fusibles, más plásticas y de tamaño de partículas fino) a menudo se combinan en pastas de arcilla. En algunos lugares la llaman arcilla de bolos.

3. Arcillas refractarias. Son resistentes al calor, resisten la fusión o deformación hasta al rededor de los 1500°C. Se utiliza como aditivo refractario en pastas. En pastas para grandes piezas o esculturas, la textura abierta y gruesa de algunas arcillas refractarias hacen de ellas un aditivo ideal.

4. Arcillas para gacetas. Bastante refractaria y suficientemente plástica para ser conformada por modelado y cuando está cocida debe formar un cuerpo denso y tenaz resistente al choque térmico. Se usan frecuentemente como aditivo en las pastas para loza y barro cocido.

5. Arcilla para loza. Arcillas plásticas que se vitrifican de 1200°C a 1300°C. Son arcillas secundarias que cambian ampliamente en color, plasticidad y temperatura de cocción. Muchas arcillas son adecuadas para loza sin ninguna adición. Puede tomar vidriados de cualquier tipo.

6. Arcillas para barro cocido. Son las más comunes, contienen hierro y otras impurezas minerales en suficiente cantidad para hacer que se endurezcan por cocción de 950°C a 1100°C aprox. Puede ser roja, marrón, verdosa o gris por la presencia del hierro. Generalmente se le adiciona arena o arcilla no plástica.

7. Otras clases de arcilla. Arcilla superficial: La que se utiliza para adobes o ladrillos secados al sol, casi no tiene plasticidad y contiene un alto porcentaje de arena. Arcilla apedernalada: es refractaria que se compacta en una masa relativamente dura, densa parecida a la roca. El esquisto: es una roca metamórfica formada por la naturaleza a partir de la arcilla sedimentaria, tiene muy poca plasticidad, se utiliza como aditivo para ladrillos u otros productos pesados. La bentonita: es una arcilla de origen volcánico, se utiliza para dar plasticidad a las pastas de arcilla y como emulsionante en los vidriados. No puede usarse sola debido a su tendencia a aumentar su tamaño cuando se humedece y por su viscosidad y contracción extremadamente elevada. Arcilla para terracota: es una arcilla de cocción a bajo fuego, tiene una estructura abierta de grano grueso que permite un secado rápido y uniforme. La bauxita o la diaspora: son arcillas que contienen un elevado porcentaje

de alúmina, pueden ser altamente refractarias. Gumbo: es una arcilla superficial muy plástica y viscosa que tiene una gran cantidad considerable de materia orgánica.

2.3.1.5. Por su aplicación a las industrias cerámicas (García, 2001)

1. Arcillas Caolines. Exclusivamente empleadas en la fabricación de porcelana; son ásperos, secos al tacto y forman pastas con dificultad; cuando se les separa por el lavado las materias extrañas que las acompañan, no es posible fundirlas en el horno de porcelana.

2. Arcillas Plásticas. Suaves y casi viscosas al tacto, se pueden pulimentar con los dedos: con el agua producen una pasta tenaz y resistente, a veces algo traslúcida en los bordes; son muy refractarias y adquieren gran solidez y dureza por acción del calor. Son caolines transportados por las aguas que en el movimiento se van mezclando con otras sustancias térreas y metálicas, que le comunican otros colores y condiciones diferentes.

3. Arcillas Smécticas o tierra de bataneros. Grasa y viscosa al tacto, se pulimenta con la uña y forma en poco tiempo con el agua un barro poco dúctil: su color varía del gris amarillento al verde oscuro; su fractura se compacta; tiene gran atracción molecular; se funde al fuego de porcelana, y contiene casi siempre magnesia, a la que debe algunos de sus caracteres exteriores. Se encuentra abundantemente en los terrenos terciarios.

4. Arcillas Figulinas. Presentan las propiedades físicas de las arcillas plásticas; suaves al tacto y formando con el agua una pasta tenaz; pero en general son menos compactas, más inconsistentes, y se diluyen mejor en el agua; algunas están fuertemente coloreadas por el óxido férrico, y llegan a adquirir una coloración de un rojo intenso en la cocción. Son fusibles a temperaturas bajas. Se emplean en la fabricación de lozas y alfarería de pasta porosa y rojiza; se elaboran estatuas y vasijas llamadas de tierras cocidas que se usan para el adorno de jardines; se encuentra en los terrenos sedimentarios, y suele estar acompañada de piritas de hierro.

5. Arcillas Efervescentes o Margas. Están compuestas de una mezcla mecánica de carbonato de cal y arcilla, recibiendo el nombre de marga caliza o el de arcilla margosa de acuerdo a su composición. Producen efervescencias tratadas por un ácido, desprendiéndose ácido carbónico; tienen poca consistencia, y tratadas por el agua, producen una pasta que no es fácil de moldear; sometidas a la acción del calor son sumamente fusibles.

6. Arcillas Ocreas. Son secas, silíceas, coloreadas en rojo por el óxido de hierro cuando está anhidro, o en amarillo cuando está hidratado; de ellas se obtiene el ocre amarillo y el ocre rojo, empleados en los colores ordinarios al temple, la coloración de papeles pintados, etc.

7. Arcillas Ligeras. Tienen un carácter particular; seca al tacto, produce un polvo duro que sirve para pulimentar la plata; se diluye difícilmente en el agua, y apenas reúne cualidades plásticas; resiste al fuego y adquiere una extremada dureza, sin lograr una gran densidad por ello sobrenada en el agua, mientras no se ha remojado bien; suele empearse para la fabricación de ladrillos ligeros.

2.3.2. Principales características y propiedades

El tamaño de grano de la pieza final está determinado principalmente por el tamaño de las partículas del polvo original. Además, conforme se incrementa la cantidad de fundente, se reduce la temperatura de fusión; se forma más vidrio y los poros se hacen más pequeños. Un menor tamaño de grano inicial acelera la vitrificación al generar más superficies en las cuales pueda ocurrir.

Las arcillas son fácilmente maleables, y se caracterizan por su propiedad plástica, determinada por su contenido en partículas coloidales, por su contenido de partículas más finas de forma laminar y por su contenido de agua. La forma laminar ejerce una influencia importante en la compresibilidad del suelo, y el

tamaño pequeño propio de las partículas de arcilla (inferior a 0.002 mm) hace que la permeabilidad del conjunto sea muy baja.

La plasticidad es la propiedad de una arcilla por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse. Cuanto más plástica sea una arcilla, más resistencia desarrollará en estado seco. Los experimentos realizados por Atterberg, Terzaghi y Goldshmidt revelaron que la plasticidad de los suelos se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares, que generan campos que actúan como condensadores e influyen en las moléculas del agua (Juárez y Rico, 2009).

Las arcillas más cargadas de alúmina son las que mejores condiciones reúnen de plasticidad, y son las que contienen más agua de composición. Las arcillas adquieren por acción del calor, propiedades sumamente notables, las cuales son dureza, cohesión, contracción y sonoridad (García, 2001).

Otra de las propiedades significativas de las arcillas es la contracción. El efecto acumulativo de cada partícula acercándose a su vecina es la contracción de toda la masa. Conocer la contracción lineal de una arcilla permite al diseñador determinar el tamaño adecuado de los moldes o de la presión a aplicar para producir un objeto cerámico. La contracción y el secado están casi siempre relacionados con la estructura del grano de la arcilla y por ello también con la plasticidad.

En el caso de objetos hechos de arcilla muy plástica, el secado puede ser un problema serio, no solo por la excesiva contracción si no también por la tendencia de la arcilla a curvarse y agrietarse.

Altas temperaturas de sinterizado o partículas más pequeñas se produce mayor vitrificación, menos porosidad y una densidad superior. Una densidad más elevada mejora las propiedades mecánicas, aunque reduce la calidad aislante del ladrillo o de la lozeta (Askeland, 1998).

2.3.3. Cambios por la acción de la temperatura

Durante la cocción se producen profundos cambios en la arcilla, el material que una vez fue plástico adquiere dureza. El primer cambio en la cocción es la terminación de su secado. Cambio que debe hacerse lentamente o de lo contrario la formación de vapor podría causar su estallido. Para facilitar el secado rápido y seguro, se emplean equipos de secado de humedad. Las piezas húmedas se calientan a casi 100°C en un lugar cerrado manteniendo una humedad cercana del 100%, luego la humedad se reduce gradualmente y las piezas, calientes en toda la masa, se secan rápidamente.

En un ambiente húmedo, como la arcilla es *higroscópica*, puede de nuevo absorber la humedad del aire. Si la arcilla se calienta a 125°C, se evaporará toda el agua absorbida. Si la arcilla se ha secado en el aire y con calor suave, la masa puede humedecerse de nuevo y moldearse tantas veces como se quiera. En cambio, la plasticidad se pierde si la arcilla se somete a un proceso de cocción. Aproximadamente a los 350°C el agua químicamente combinada, comienza a eliminarse, agua que no debe confundirse con el agua de los poros y de la plasticidad que escapa durante el secado de la pieza.

Alrededor de los 500°C la arcilla estará completamente deshidratada y ya no se ablandará o desintegrará en el agua. Habrá perdido su plasticidad. Su cambio químico es irreversible.

A los 573°C se produce el proceso de *inversión*, en donde los cristales de cuarzo sufren un cambio conocido como cambio de cuarzo alfa a beta, ajuste que consiste en un ligero aumento de volumen (2%) que es reversible.

A los 900°C aprox. se completa la oxidación, o descomposición de los elementos que no son óxidos, tales como materias orgánicas como carbón, o inorgánicas como los carbonatos o sulfatos. A esta temperatura, la evaporación del agua ligada químicamente es completa.

Las arcillas vitrifican a distintas temperaturas, según su composición, que van de los 1000°C hasta por encima de 1800°C (Rhodes,1990). La vitrificación es un endurecimiento, compactación y finalmente una transformación parcial de la arcilla en vidrio, resultado de fusiones de algunos componentes de la arcilla, especialmente el óxido de hierro. Por su numerosa cantidad de óxidos, tiende a fundir gradualmente. A mayor temperatura, las impurezas fundentes, pueden fundirse en pequeñas cuentas de vidrio. La vitrificación da a la arcilla resistencia, pero también la formación de nuevos crecimientos cristalinos en la pasta, especialmente los cristales de *mullita* enlazando la estructura dándole cohesión y resistencia.

En la arcilla cocida (especialmente la arcilla roja), se notan a veces descoloridos o manchas claras, que se deben al contenido de sales en la arcilla, especialmente sulfatos. Las sales pasan a la superficie con el agua evaporada durante el secado, y allí se depositan en cantidades apreciables, siendo a veces visibles en la arcilla antes de ser cocida. Aparecen en puntos prominentes y especialmente en los lugares donde el objeto es más grueso. La formación de manchas pueden evitarse con un fuerte cepillado húmedo del objeto de arcilla seca, antes de la cocción. Si aparecen después de la cocción, pueden quitarse con pinceladas de ácido fluorhídrico y agua en iguales cantidades (con ventilación adecuada).

2.3.4. Caracterización y normatividad de las arcillas

Una de las características más importantes a evaluar en las arcillas es su composición química obtenida a través de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) y su composición mineralógica (fases minerales y cristalinas) determinada con la técnica de difracción por Rayos X (DRX), ya que influyen directamente en las propiedades de las piezas cerámicas obtenidas.

La caracterización de las arcillas generalmente comprende el análisis morfológico (con microscopía electrónica de barrido), térmico como termogravimetría (TG), análisis térmico diferencial (ATD) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), así

como el análisis físico-mecánico de las arcillas sinterizadas (porosidad, absorción de agua, resistencia a la flexión, etc.) (Santos et al., 2011).

Para determinar la necesidad de cambios en la arcilla, y la cantidad de las adiciones que darán como resultado una pasta para barro cocido más utilizable, la pasta puede ser valorada a través de ciertos ensayos tradicionales. Para determinar la utilidad de la arcilla regularmente se usan las siguientes pruebas según el Dr. Zhang Hongquan: Ensayo de impurezas solubles, ensayo del exceso de arena u otros fragmentos minerales, ensayo de la plasticidad, ensayo del agua de plasticidad y de la contracción por secado, ensayo para determinar la posible zona de temperaturas de cocción del material, inspección visual, el color de cocción y porcentaje de absorción en muestras cocidas a distintas temperaturas, ensayo de contracción, ensayo de floculación, entre otras.

Una de las principales pruebas para medir la plasticidad de las arcillas es el método de Límites de Atterberg, en honor a Albert Mauritz Atterberg, científico sueco que demostró que la plasticidad no es una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un polvo, y esa misma con gran contenido de agua, puede presentar propiedades de un lodo o suspensión líquida. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente. Atterberg demostró que la plasticidad de un suelo se puede expresar usando dos parámetros: límite líquido y límite plástico, y a su vez también los definió. Definió cinco estados de los suelos según su contenido de agua en forma decreciente, fases por las que el suelo va experimentando al irse secando (líquido, semilíquido, plástico, semisólido, sólido) (Fig. 2.4).

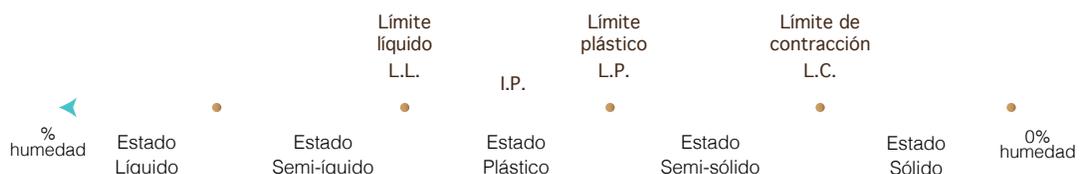


Fig. 2.4.- Límites de consistencia según Atterberg. Fuente: Elaboración propia.

El límite líquido es el porcentaje de humedad que posee un suelo cuando se halla en el límite entre el estado líquido y estado plástico, el límite plástico corresponde a la menor humedad a la cual un suelo se puede moldear y el índice de plasticidad es la diferencia de los dos límites anteriores e indica el intervalo de trabajabilidad de la arcilla. Estableció criterios para distinguir las fronteras de éstos estados, llamándolos límites de consistencia o bien conocidos como Límites de Atterberg.

Por lo tanto a las fronteras que definen el intervalo plástico del suelo, les llamó límites de plasticidad. Y a la diferencia entre ellos, índice plástico (IP) (Juárez y Rico, 2009). Con estos parámetros se puede conocer si la plasticidad de cada arcilla es baja, media o alta, ubicándolos en el diagrama de Casagrande (Fig. 2.5).

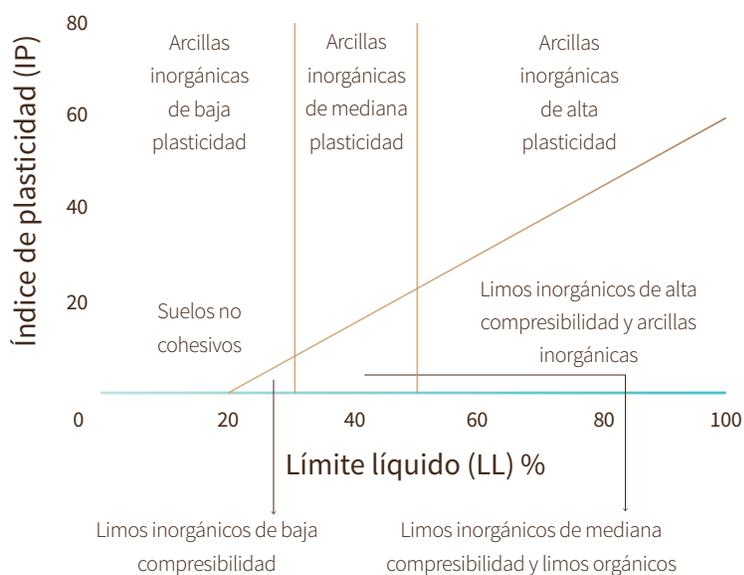


Fig. 2.5.- Carta de plasticidad para clasificación de suelos de partículas finas en el laboratorio. Fuente: Juárez y Rico, 2009.

La medida de la plasticidad puede utilizarse como control de materias primas o barbotinas, ubicándolas en una gráfica que determina la zona óptima para las barbotinas de colado (Fig. 2.6).

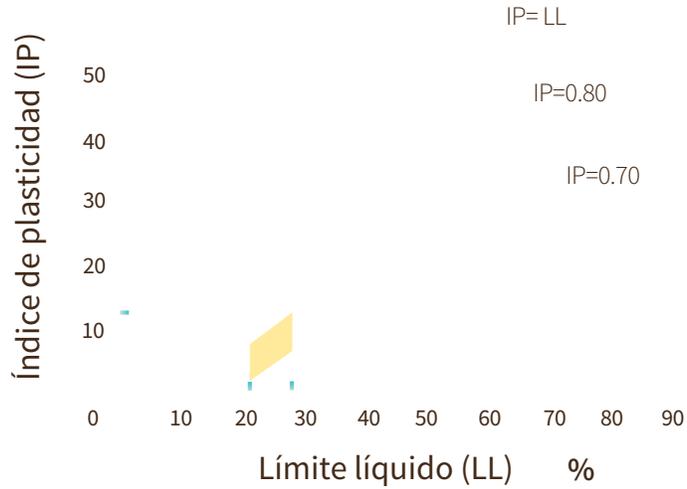


Fig. 2.6.- Zona para las barbotinas de colado. Fuente: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Practica6.PropiedadesArcillas.PLASTICIDAD.pdf>

Más determinaciones sistemáticas de los límites de Atterberg permitieron a Casagrande delimitar unas zonas de propiedades óptimas de las pastas arcillosas para la extrusión, esto puede verse en la Fig. 2.7.

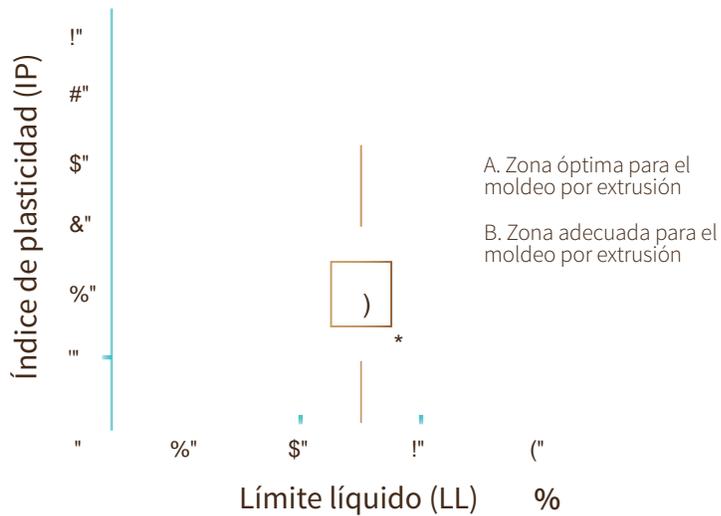


Fig. 2.7.-Diagrama de Casa Grande. Fuente: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Practica6.PropiedadesArcillas.PLASTICIDAD.pdf>

Para la caracterización físico-mecánica de las arcillas sinterizadas, se pueden utilizar diferentes métodos de prueba, una serie de normas estandarizadas para comprobar y evaluar la importancia de las propiedades de los materiales se encuentran en las normas de la ASTM (American Society for Testing Materials) la cual es una de las organizaciones internacionales de desarrollo de normas más grandes del mundo y sus pruebas son aceptadas mundialmente y abarcan áreas como metales, pinturas, plásticos, textiles, petróleo, construcción, energía, medio ambiente, productos de consumo, servicios médicos, dispositivos y productos electrónicos, entre muchas otras.

Las normas utilizadas para materiales cementosos, de cerámica, concreto y mampostería se identifican con la letra C en el título de cada norma y para materiales varios, como suelos con la letra E.

2.3.5. Materiales aditivos de las arcillas

En la práctica es necesario hacer adiciones a la arcilla natural de materiales no-plásticos para que ésta cumpla con las necesidades prácticas de conformación y cocción en el proceso cerámico.

La arcilla puede cambiar su composición para adecuarse a necesidades específicas de un proyecto determinado, agregando generalmente materiales no plásticos o fundentes. Las cantidades de dichas sustancias que se deben añadir, depende de muchas circunstancias, de acuerdo al empleo de la arcilla (torneado o modelado), entre otras.

Para los cambios de color o textura, se aumenta o disminuye su rugosidad granular. Los cambios en la plasticidad mejoran su manipulación (consistencia) y la disminución de la contracción, esto se logra añadiendo arcillas y otros materiales de más o menos plasticidad y de diferentes tamaños de partículas.

Los ajustes de reacción a la cocción son cambios para bajar la temperatura de maduración o para elevarla y tener un grado de densidad óptimo. Para mejorar el acoplamiento de los vidriados, o alterar el punto de vidriado y de fusión de la masa, la masa puede hacerse más refractaria con la adición de materias de difícil fusión, y al contrario, las materias fáciles de fundir (fundentes), pueden rebajar la temperatura necesaria para la cocción, o aumentar la compactación de la masa y su grado de vitrificación a un grado determinado de temperatura.

Para mejorar la moldeabilidad, la arcilla grasa requiere adiciones de desgrasantes de grano grueso y de especies arcillosas menos plásticas.

Los rellenos o desgrasantes, tales como el pedernal (sílex), la *chamota*, o arcilla calcinada hacen que la pasta seque con seguridad sin deformación ni agrietamientos y disminuyen el valor de la contracción.

La adición, más común es el grog (*chamota*), que es simplemente cerámica ya cocida en el horno y pulverizada, permite un rápido secado de la arcilla y un buen cocido. Cuenta con propiedades absorbentes. Da una mayor consistencia a la pasta que se usará en el torno.

Los antifloculantes se usan en las arcillas para colar, sirven para dispersar partículas de la arcilla, entre los más comunes están el silicato sódico, carbonato sódico, cenizas de sosa, todas éstas proporcionan a la arcilla un carácter líquido. Entre otros están: Hidróxido sódico, pirofosfato tetrasódico, tanato sódico.

El feldespato actúa sobre la arcilla llevando la totalidad de la masa a un punto de fusión, la hace fácilmente fusible, tiñe de rojo a la arcilla. Actúa como vitrificante para las piezas que se cuecen a temperaturas superiores a 1150°C. Con arcillas que se cuecen a temperaturas más bajas, el feldespato solo actúa como desgrasante.

Pedernal o cuarzo pulverizado (Sílice) aumenta la resistencia de la pasta a la deformación y da dureza y estabilidad a la pasta final semivitrificada. El pedernal

también posibilita una mayor facilidad para acoplar un vidriado a la pasta, aumenta el grado de encogido (del cuerpo o del barniz) y muchas veces, en cantidades adecuadas, evita el agrietamiento. El cuarzo y el feldespatos también pueden disminuir la contracción y promover el secado rápido (Rhodes 1990).

La bentonita le da a la pasta una cohesión adicional y una sustentación adicional a la arcilla modelada, aumenta la plasticidad. Hace gris la pasta.

Los fundentes, controlan el punto de fusión y endurecimiento de la arcilla, se cuece a un grado satisfactorio de densidad a cualquier temperatura que se utilice. Ejemplos: el feldespatos, las fritas, el Litio, óxidos alcalinos y alcalino-térreos.

El silicato de magnesio (talco) en cantidades altas aporta una temperatura de fusión baja.

La mica, potásica y magnésica (biotita), a altas temperaturas, obran como vitrificantes.

La perlita (ceniza volcánica) se le adiciona para hacer una pasta más ligera.

Los óxidos de hierro dan el color de sustancia terrosa y mejoran la acción de los álcalis fundentes, el titanio ayuda a la cristalización.

La cal (carbonato cálcico o dolomita 1% ó 2%, es un fundente auxiliar catalizador de la porcelana). También aclara el color en una pasta de arcilla natural.

La frita, cuando se almacena en la arcilla por un cierto tiempo se disuelve y la arcilla plástica se vuelve plástica floja, blanda e imposible de conformar.

El sulfato de Aluminio o sulfato magnésico, neutraliza los álcalis y causa eflorescencias o forma escorias sobre la superficie de la arcilla.

La materia orgánica como el carbón, en pequeñas cantidades, actúa como goma o adhesivo para aportar trabajabilidad y plasticidad a la pasta. Demasiada puede hacerla pegajosa, difícil y de contracción elevada.

Pueden hacerse pastas de arcillas ligeras mezclando agregados combustibles con arcilla plástica. Estos se queman y desaparecen en la cocción dejando vacíos

en la estructura cocida (aserrín, posos de café, huesos de fruta o similares). En el estado plástico tales adiciones orgánicas a la arcilla actúan como grog, añadiendo rugosidad y facilitando el secado. Durante la cocción se produce la combustión completa de los agregados sin dificultad.

2.3.6. Utilización de sílice en las arcillas

La sílice cristalina, desde hace ya varios años, ha sido considerada como un constituyente indispensable de la pasta cerámica, sin embargo se le han atribuido dificultades en la manufactura cerámica (Dinsdale, 1963).

La sílice cristalina (silex o arena de cuarzo triturada) provoca los siguientes efectos:

1. Las piezas se rompen si son cocidas o enfriadas a una temperatura muy baja y con una rapidez muy alta.
2. Reduce la resistencia mecánica de la cerámica.
3. Disminuye la resistencia al shock por calentamiento en los objetos a cocer.
4. Afecta de forma negativa el aspecto del barniz.

Todos estos defectos se originan en el proceso de la *inversión*, durante la cocción de la pieza, y a pesar de los efectos negativos, la sílice cristalina continua siendo utilizada, pues no se ha descubierto un sustituto adecuado de precio equivalentemente bajo. La función de la sílice depende del tipo de cerámica en el que es introducido. En variedades porosas, actúa como un relleno. En cerámica densa, como la porcelana, ayuda a la formación de vidrio (y puede también mejorar la resistencia mecánica) (Rado,1990).

En los estados crudo y el bizcocho (en donde las piezas ya tuvieron su primera cocción), generalmente se procede a decorar con diversas técnicas, entre ellas con barniz (vidrio, fundido y luego solidificado en la superficie de la pieza, lo que da lugar a una cubierta no porosa que alarga la vida de la pieza y lo vuelve más higiénico y fácil de limpiar), y es el sílice el principal componente de éste.

El barniz está formado básicamente de sílice que también es un componente mayoritario de la arcilla. Por sí solo tiene un punto de fusión muy alto (cercano a 1700°C), pero funde a una temperatura muy inferior gracias a la adición de un agente fundente como el óxido de plomo, bórax o sodio. La presencia de alúmina (óxido de aluminio), también un ingrediente de la arcilla que tiene un punto de fusión aún más alto, consigue que la mezcla tenga una estabilidad y adherencia durante el estado fundido sobre la superficie de la cerámica.

Para evitar el agrietamiento hay que modificar el cuerpo cerámico o el mismo barniz. Una adición de sílice en forma de pedernal o cuarzo aumentará el grado de *merma* o encogido del cuerpo si se añade a la arcilla, y disminuirá el grado de *merma* del barniz si se añade al barniz. En cualquier caso, la sílice consigue colocar al barniz en el estado de compresión necesario.

Al barnizar la pieza, se tiene un objeto de cerámica vitrificada (vidriada) o también conocida como vítrea. La sílice vítrea tiene un bajo coeficiente de dilatación y por tal razón su presencia controla el acoplamiento del vidriado a la pasta. Cuando se usan los vidriados la sílice no tiene propiedades indeseables, excepto que cuando está presente en cantidades excesivas puede hacer que el vidriado esté infracocido a la temperatura prevista o puede producir devitrificación o la formación de cristales en el vidriado enfriado. Ningún color de vidriado es afectado adversamente por la sílice.

Los vidriados que funden a 1250°C o más (de gran fuego), tendrán tres o cuatro veces más de sílice que de los otros componentes combinados. Alrededor del 60% de la corteza terrestre está hecha de sílice; un hecho que indica la dureza, durabilidad y resistencia al cambio químico por disolución de este óxido. Estas son las propiedades deseables que aporta a los vidriados y es una regla general en la realización de vidriados que debe añadirse al vidriado tanta sílice como sea posible. Los vidriados de gran fuego son de dureza superior en comparación con los de bajo fuego porque puede incorporárseles más sílice.

2.4. CENIZAS QUE SE AGREGAN A LAS ARCILLAS

2.4.1. Ceniza de huesos

Producida de huesos de ganado vacuno pues están libres de óxido de hierro a diferencia de los huesos de otros animales o del hombre. Estas cenizas son extremadamente finas, alcanzando la categoría coloidal, es decir de menos de un micrómetro de diámetro, proporcionando así cierta plasticidad.

La ceniza de huesos al ser suspendida en agua presenta un cierto número de cambios químicos que influyen considerablemente el comportamiento plástico de la mezcla de china de huesos (Rado, 1990).

2.4.2. Ceniza de una hoguera

Las cenizas del material residual de una cocción en la hoguera, fuente rica de potasio, tiene una composición química tan completa y variada que ha inducido a muchos analistas a buscar las bases científicas de sus propiedades particulares. Es un fundente que puede dar una gran variedad de colores, texturas y superficies (Birkz, 1981).

2.4.3. Ceniza de Madera

La ceniza de madera rica en potasio es un fundente y se combina con la arcilla – alúmina y sílice – para dar lugar a un barniz para gres. Los barnices a base de cenizas poseen escaso número de ingredientes empleados y la amplia gama de colores, texturas y calidades que derivan de los elementos presentes en la ceniza es variada. Los resultados son únicos. Como las cenizas pueden variar enormemente en su composición, debido al tipo de árbol o a las condiciones del suelo en que crecieron y que aportan sustancias químicas variadas necesarias para su nutrición, la industria cerámica que precisa obtener colores o resultados repetibles no se

interesa por este tipo de barnices. Los barnices a base de cenizas pueden tener un color que va del blanco cremoso al naranja fuerte, pasando por verdes y grises, tanto en cocciones oxidantes como reductoras para gres.

Si la ceniza contiene mucho potasio, el álcali puede tener efectos bastante notorios. Cuanto más alto es el contenido en potasio de una ceniza, más poderoso el fundente en el barniz y más vidrioso es el resultado. Los ceramistas reducen el contenido de potasio de una ceniza después de haber procedido al tamizado; simplemente vierten el líquido que sobre (hidróxido potásico) después de sedimentar la ceniza. Este proceso se conoce con el nombre de lavado (Birkz 1981).

2.4.4. Ceniza de bagazo de caña (CBC)

En las fábricas azucareras, durante el proceso de extracción de azúcar, se produce vapor mediante unas calderas para generar energía quemando el bagazo de caña de azúcar que es la fibra que resulta de la extracción del jugo de la caña y de la molienda y se lleva a cabo un proceso de combustión. El bagazo de caña de azúcar, luego de ser calcinado, genera una ceniza que es acumulada y vertida como desecho en tiraderos a cielo abierto (Fig. 2.8).

En Brasil e Italia, principalmente, se han elaborado cerámicas rojas, empleando una mezcla de arcilla y ceniza de bagazo de caña. Se rescatan de la literatura, algunas teorías como son: La ceniza no funciona como fundente a menos que sea rica en óxidos alcalinos y alcalinotérreos, los cuales al funcionar como fundentes, bajan la temperatura de fusión y la viscosidad. La contracción lineal disminuye con mayor porcentaje de adición de CBC. Altos contenidos de CBC se evitan, ya que la resistencia disminuye. El alto contenido de cuarzo en la ceniza, hace que ésta se comporte como material de relleno, reduciendo la plasticidad, mejorando la trabajabilidad y el proceso de producción.

La ceniza y las proporciones siempre serán diferentes en cada proyecto pues las composiciones de ceniza y arcilla dependen del suelo en donde crezca la caña o



Fig.2.8.- Desechos sólidos generados en la producción de azúcar.
Fuente: Balakrishnan y Batra, 2011.

de donde se colecte la arcilla, sin embargo la CBC en todos los casos, se compone mayormente de Sílice. Los factores que influyen los resultados son: el contenido de humedad, la temperatura de cocción, el tamaño de partícula y la presión de compactación de la pieza.

La formación de fases líquidas incrementan la contracción lineal disminuyendo la porosidad en casos con 60% de CBC y a una temperatura de 1100°C. La baja porosidad de las muestras incrementa su densidad aparente y por ende su resistencia mecánica, sin sobrepasar nunca la resistencia de la muestra control sin embargo la plasticidad se ve siempre reducida por la adición de CBC. Aunque la incorporación de CBC (cuarzo) inhibe la formación de *mullita* (la cual proporciona dureza y resistencia al material cerámico), puede comportarse como material no plástico y así disminuir la contracción lineal. Solo a temperaturas arriba de 1000°C, la ceniza participa en las fases líquidas formando *mullita* y cristobalita (formas del sílice). La CBC tiene la ventaja de estar libre de componentes tóxicos como metales pesados (Umamaheswaran y Batra, 2008).

2.5. AGLUTINANTES ORGÁNICOS USADOS EN LAS ARCILLAS

Estas materias primas, que no forman parte del producto final en la alfarería pero son vitales en la manufactura, pueden ser llamadas aglutinantes orgánicos. Aunque unidas al agua, las cantidades implicadas suelen ser aproximadamente del 30%, las cantidades de aglutinantes orgánicos por si solos no suelen exceder del 0.5 %. Pueden ser aglutinantes naturales o sintéticos, tales como goma arábica, goma de tragacanto, harina de cereales, almidón, emulsiones de cera, alginatos, acrilatos, celulosas, carboxi-metil-celulosas, alcoholes polivinilicos, etc. El principal propósito de estos aglutinantes, es el influenciar las propiedades reológicas de las arcillas, así como de sus mezclas con otros minerales, por ejemplo mejorar la plasticidad e incrementar la resistencia mecánica de los objetos antes de la cocción (Rado, 1990). En el presente proyecto se utilizará mucílago de nopal para determinar su influencia en las pastas cerámicas con altas cantidades de CBC.

2.5.1. Mucílago de nopal

Se sabe que el nopal al sufrir un daño mecánico, comienza a exudar un compuesto viscoso, para sellar y posteriormente reparar este daño. Este compuesto es llamado mucílago el cual modifica las propiedades de los líquidos donde interviene.

El mucílago de nopal se ha utilizado como adhesivo orgánico, retardante del secado y como auxiliar en la conservación de la humedad necesaria al actuar como agente impermeabilizante, el cactus de "Castilla" (*Opuntia-ficus indica*) es el más usado debido a la baja cantidad de espinas. Este mucílago polisacárido tiene una composición química similar a la de las *pectinas*, y contiene proporciones de L-arabinosa, D-galactosa, L-rhamnosa y D-xylosa, también ácido D-galacturoni. Diversas especies del nopal contienen diversos

porcentajes de mucílago (Torres, 2005), que adicionado a la arcilla nos permitiría una mayor adhesión de la masa y mejoraría su trabajabilidad según los datos anteriores. Para su extracción se han utilizado diversos procesos. Uno de ellos consiste en cortar las hojas de nopal con un rayador de manera transversal y mezclar con agua destilada a una relación nopal/ agua 1:1.5 por peso. Posteriormente se cuecen durante 3 horas sometidos a agitación constante en una estufa a temperatura no mayor de 60 °C, luego se filtran por los tamices #16 (1.19 mm), #100 (0.149 mm) y #200 (0.074 mm). La solución obtenida se preserva adicionando benzoato de sodio al 0.5% por peso (Hernández, 2012).



CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El experimento de la investigación se llevó a cabo en cuatro fases, cada una con diferentes factores y niveles. En la primera fase, se seleccionó el equipo y tratamiento para la Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) y para la Arcilla Natural (ARN). Se compararon su morfología y composiciones químicas. Posteriormente, en la segunda fase se evaluó el efecto de la sustitución parcial de ARN por CBC (en seis porcentajes y dos tipos de mezclado) en los índices de plasticidad (IP) y contracción lineal (CL) de las mezclas; también se evaluó adicionalmente la sustitución de mucílago de nopal (MN) en el agua de mezclado únicamente con fines de comparación en la plasticidad de las mezclas. En la tercera fase, se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de probetas elaboradas con dos porcentajes de sustitución de CBC en ARN y el control (100%ARN), y sinterizadas a tres temperaturas diferentes. En la cuarta y última fase, se elaboraron piezas cerámicas de tipo artesanal para demostrar la factibilidad del compuesto diseñado. En la Fig. 3.1. se muestra un diagrama en donde se indican las fases que integran el experimento.

3.1. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

3.1.1. Factores, niveles y variables respuesta

Factores, niveles y variables respuesta de la Fase I

Con base en la descripción de la metodología, para la fase I, se clasificaron los factores integrándolos en la Tabla 3.1, también se muestra en la Tabla 3.2 el experimento diseñado, en donde los factores fueron el tratamiento de la arcilla y el tamaño de partícula de la misma, con sus respectivos niveles. Los equipos 1, 2 y 3 con sus niveles de tamizado correspondientes tuvieron variables respuesta de rendimiento, plasticidad y contracción para poder seleccionar el tratamiento óptimo

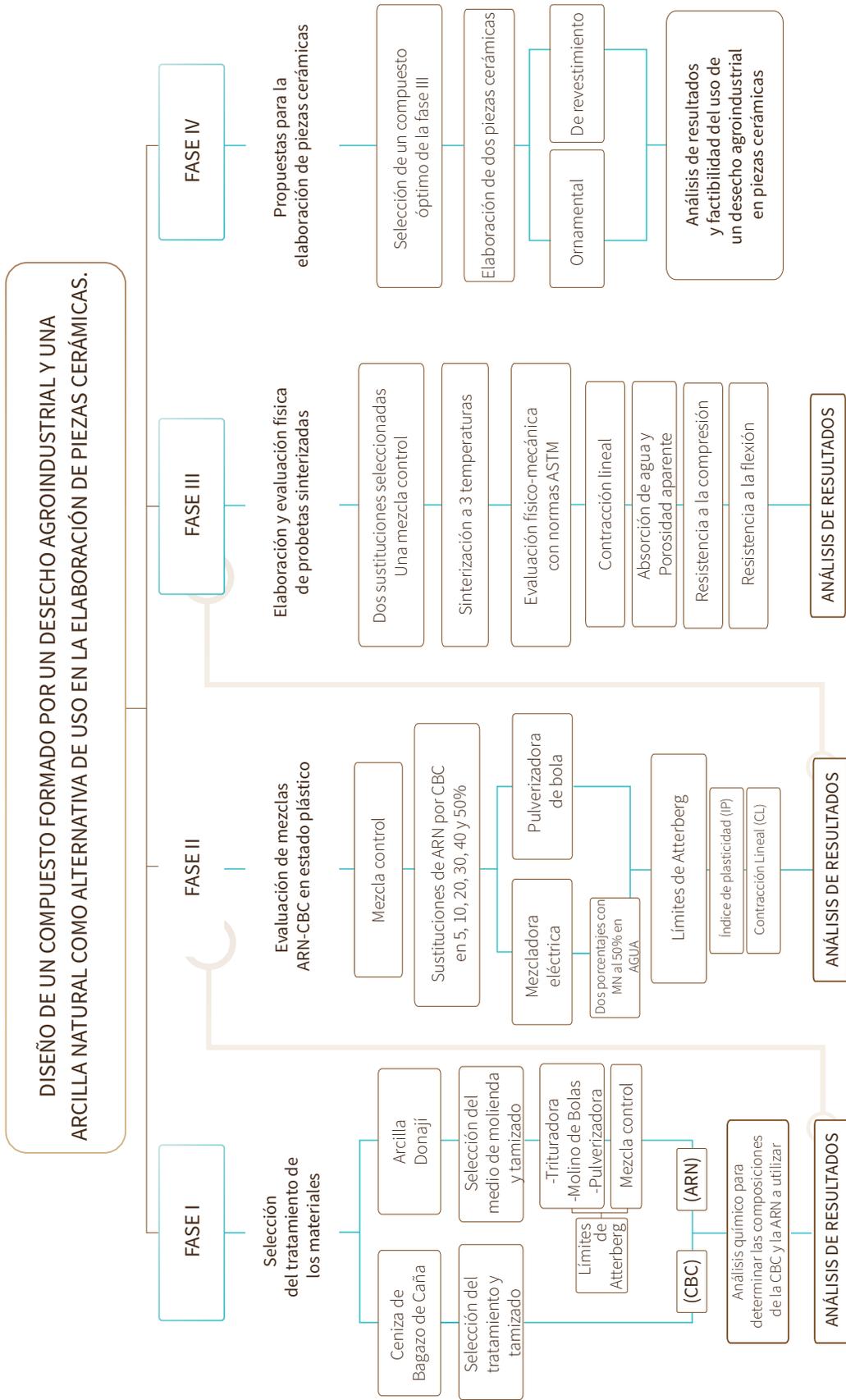


Fig. 3.1.- Fases del experimento. Fuente: Elaboración propia.

de la arcilla a utilizar así como los parámetros de plasticidad. El nivel 4 se usó únicamente con fines de comparación con los valores de plasticidad y contracción obtenidos en los niveles anteriores, este nivel fué usado para determinar los IP y CL de la arcilla tal como es utilizada en el taller cerámico del ICAPET y en el taller Donají, pero fué descartada ya que la combinación de los materiales en las fases siguientes requerían un arcilla seca y en polvo.

Tabla 3.1 Factores de la fase I del experimento.

FACTORES POTENCIALES	
De diseño	!"#\$%&'()*'+, %&'%-./0+--.%1\$.23
Constantes	/0+--.%&'4*%5"65\$%#0\$7"&\$0%8%5"65\$%(. *+&\$
Variables	9.0".+,"%*.).40.-%(*')0'%54'6)0.6:%;45'&.&%'%'-%.5("'*)'
FACTORES PERTURBADORES	
Controlables	<04'(.6%=36"+.6%0'-. ">.&6%#\$0%4*.%5"65.%#06\$*.%?@4""%#0'6"*).%-.%!6"6AB%<04'(.6%@435"+.6%#\$0%C.(\$0.)\$0"\$6%D6#"+ "->.&\$6
No Controlables	E\$* & "+\$*6%.5("'*).-6%8%&'-%'@4"#B

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.2 Factores, niveles y variables respuesta fase I.

FACTORES	NIVEL (Equipo)	NIVEL (Tamizado malla)	VARIABLES RESPUESTA
Tipo de tratamiento de la arcilla, equipo	1. Molino de Bolas	#-40	- Selección por Rendimiento
		#-60	
		#-100	
		#-200	
Tamaño de partícula de la Arcilla, tamizado	2. Trituradora	#-40	- Índices de Plasticidad (IP)
		#-60	
		#-100	
		#-200	
	3. Pulverizadora	#-40	- %Contracción Lineal (CL)
		#-60	
		#-100	
		#-200	
	4. Decantada	#-080	- IP - CL

Fuente: Elaboración propia.

Factores, niveles y variables respuesta de la Fase II

En esta fase se diseñaron mezclas ARC-CBC y ARN-CBC-MN y los factores que se establecieron se muestran en la Tabla 3.3.

Identificando los factores del experimento: Porcentaje de CBC, Tipo de mezclado y porcentaje de mucílago de nopal, se obtuvieron nuevos niveles y variables respuesta pertenecientes a la fase II. Se incluyó además una mezcla control (100% ARN- 0%CBC) (Tabla 3.4).

Tabla 3.3 Factores establecidos en la fase II.

FACTORES POTENCIALES	De diseño	!1", \$26 < \$ / (' # 6 + 6 # , += 2 (0 & " , + & - / \$ (> ? > @ (, 1 2 6 \$ 2 + / 1 / (\$: # , * - & A 1 / (\$ (B 1 0 & -
	Constantes	C" , + -- & (, 1 3 1 (3 & 6 \$ " + & - (% & ' \$ 9
	Variables	D & " + & , += 2 (2 & 6 # " & - (\$ 2 6 " \$ (3 # \$ ' 6 " & ' @ (E # 3 \$ / & / (\$ 2 (- & 3 % + \$ 2 6 \$ 9 (> & 2 6 + / & / (\$ (& A # & (\$ 2 (, & / & (3 # \$ ' 6 " & (, 1 2 (> ? > 9
FACTORES PERTURBADORES	Controlables	! " # \$ % & ' () * + , & ' (" \$ & - + . & / & ' (0 1 " (# 2 & (3 + ' 3 & (0 \$ " 1 2 & (4 5 # + \$ 2 (0 " \$ \$ 2 6 & (- & (7 \$ + ' 8 9 (: + ' 3 1 ' (\$ 5 # + 0 1 ' (; (0 " 1 , \$ ' 1 ' 0 & " & (6 1 / & ' (- & ' (3 # \$ ' 6 " & 9
	No Controlables	> 1 2 / + , + 1 2 \$ ' (& 3 % + \$ 2 6 & - \$ ' (; / (\$ - (\$ 5 # + 0 1 9

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.4 Factores, niveles y variables de la fase II.

FACTORES	NIVELES (% CBC)	NIVELES (Equipo)	VARIABLES RESPUESTA
CBC, %	0		
	5		- Índices de Plasticidad
	10	- Mezcladora eléctrica	
	20		
	30	- Pulverizadora de Bola	- %Contracción Lineal
	40		
Tipo de mezclado, equipo	50		
	30	- 50% de mucílago en el agua de saturación de las mezclas elaboradas con una mezcladora eléctrica	- Índices de Plasticidad
	50		- %Contracción Lineal
Mucílago, %	70		

Fuente: Elaboración propia.

Factores, niveles y variables respuesta de la Fase III

En esta fase se establecieron los factores de acuerdo a la literatura, para la elaboración y sinterización de probetas ARC-CBC como se indica en la Tabla 3.5.

Los niveles y variables respuesta de la Tabla 3.6, corresponden al diseño del experimento de la fase III, en donde después de elaborar probetas, se sometieron a pruebas físicas y mecánicas para conocer sus propiedades principales.

Tabla 3.5 *Factores identificados para la fase III*

FACTORES POTENCIALES	De diseño	Probetas elaboradas con ARN-CBC.
	Constantes	%de sustitución de CBC, temperaturas de sinterización.
	Variables	Manufactura artesanal de las probetas. Tipo de sinterización (horno eléctrico y de gas)
FACTORES PERTURBADORES	Controlables	Pruebas realizadas por una misma persona (quien presenta la tesis), se cuidó que las condiciones fueran lo mas exactas e iguales en todas las pruebas.
	No Controlables	Dos hornos distintos. Temperatura exacta del horno de gas.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.6 *Factores, niveles y variables respuesta identificados para la fase III*

FACTORES	NIVEL (%CBC)	NIVEL (Temp.°C)	VARIABLES RESPUESTA
CBC en las probetas, %	0 (Control)	900	• Contracción Lineal
Temperatura de las probetas, °C	20	1000	• Absorción de agua
	40	1080	• Porosidad Aparente
			• Resistencia a la Flexión
			• Resistencia a la Compresión

Fuente: Elaboración propia.

3.2. ELECCIÓN DE MATERIALES

3.2.1. Recolección de la Ceniza

La Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) (Fig. 3.2) fue colectada en el *Ingenio Azucarero* “Constancia”, perteneciente al Grupo Beta San Miguel, principal productor de Caña de azúcar en el país, ubicado en Tezonapa, Veracruz. Esta ceniza es generada por la calcinación del bagazo a temperaturas entre 550 y 700°C y es recuperada por aspersión de agua durante la producción de caña. Comúnmente es desechada en tiraderos a cielo abierto en un predio propiedad del ingenio (Fig. 3.3).



Fig. 3.2.-Ceniza de Bagazo de caña (CBC).
Fuente: Toma propia.



Fig. 3.3.- Tiraderos de CBC.
Fuente: CIIDIR-Oaxaca

3.2.2. Obtención de la Arcilla

Las “tallas de arcilla” fueron adquiridas en un taller artesanal ubicado a 20 minutos de la ciudad de Oaxaca de Juárez, en la Agencia Donají. El proceso de formado de las tallas se realiza en un espacio contiguo al banco de arcilla, en donde la arcilla se limpia de piedras y arenas gruesas mediante un lavado en una pequeña piscina de barro con un agitador motorizado de su propia fabricación que está formado por unas aspas que mueven la arcilla con impurezas.

Después se tamiza y se coloca en unos espacios delimitados a los que llaman tendales para formar ahí las tallas (prismas rectangulares de arcilla) Posteriormente, se dejan secar al sol hasta obtener una consistencia húmeda pero suficientemente rígida para retirarlas (Fig. 3.4).



Fig. 3.4.- Formación de tallas de arcilla. Fuente: Toma propia.

Obtenidas las tallas (Fig. 3.5), se cortaron en láminas y se secaron por completo al sol (Figura 3.6), luego se disgregaron con un mazo para disminuir el tamaño de los trozos. Posteriormente se comenzó con el tratamiento de la arcilla que se menciona en el apartado 3.3.1.1.



Fig. 3.5.- Tallas de arcilla. Fuente:Toma propia.



*Fig. 3.6.-*Secado al Sol. Fuente: Toma propia.

3.3. FASE I

SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO DE LOS MATERIALES

En esta fase se seleccionó el equipo adecuado para el tratamiento y la obtención de partículas finas de ARN para una combinación con la ceniza obtenida en polvo. La selección se realizó con base en su rendimiento y plasticidad. Además se compararon las composiciones químicas de la ARN y la CBC y la morfología de sus partículas.

3.3.1. Equipo y Métodos

3.3.1.1. Tratamiento de la arcilla.

Se seleccionó el equipo para el tratamiento y la obtención de la ARN en partículas diminutas secas. La selección se realizó con base en su rendimiento y plasticidad. Para lo anterior, la arcilla se dividió en tres porciones y cada una se trató empleando tres equipos diferentes:

1. Trituradora (Marca COMESA). Al vaciar la arcilla en trozos a través de la boquilla superior, inmediatamente se obtuvo el material en polvo requerido para las muestras y en el menor tiempo en relación a los demás procesos (Fig. 3.7).



Fig. 3.7.- Trituradora. Fuente:Toma propia.

2. Molino de bolas (Marca COMESA). Se vació una cantidad determinada en dos recipientes del molino y se molió con 25 bolas de porcelana cada uno durante 20 minutos (Fig. 3.8).



Fig. 3.8.- M. de Bolas. Fuente:Toma propia.

3. Pulverizadora (Marca ROCKLABS). Se vació una cantidad mínima en el recipiente y el tiempo establecido fué de 0.5 minutos ya que de acuerdo a las pruebas preliminares con ese tiempo se obtuvieron menores aglomeraciones de arcilla en forma de pastillas debido a los golpes del proceso (Fig. 3.9).



Fig.3.9.-Pulverizadora. Fuente: Toma propia.

Posteriormente, el material obtenido con los tres equipos diferentes se tamizó por separado empleando un equipo Rotap (Marca EQUIPAR) (Fig. 3.10) con cuatro mallas (#40, #60, #100 y #200 ASTM) (Fig. 3.11).



Fig. 3.10.- Equipo Rotap. Fuente: Toma propia.

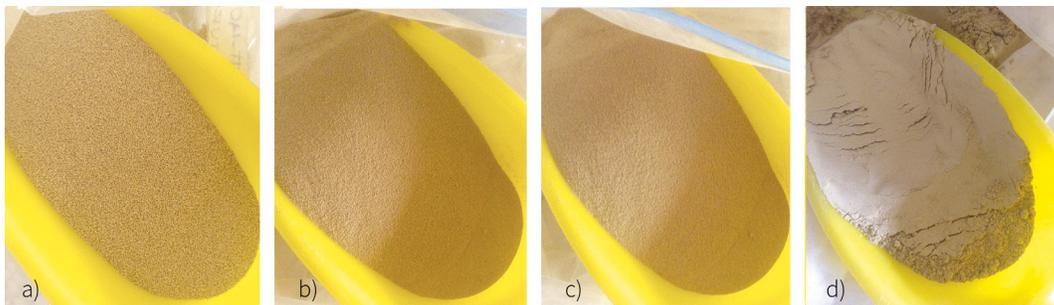


Fig. 3.11.- Arcilla tamizada por la malla a) #40, b) #60, c) #100 y d) #200 ASTM. Fuente: Toma propia

De las 12 muestras obtenidas por los tres equipos y sus cuatro respectivos tamizados, se seleccionaron siete con base en los máximos rendimientos, y se sometieron a pruebas de plasticidad con ayuda de una copa de casa grande y otros accesorios indispensables (Fig. 3.12).



Fig. 3.12.- Equipo y accesorios para determinar Límites de atterberg. Fuente: Toma propia.

Se determinaron los índices de plasticidad (IP) con sus respectivos límites líquidos (LL), límites plásticos (LP) y también las contracciones lineales (CL) de cada una de las muestras (Fig. 3.13). Se utilizó el método de prueba de Límites de Atterberg y se tomó como base la norma D4318 – 10¹ Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils de la American Society for Testing and Materials (ASTM) tal como se indica en el APÉNDICE A.



Fig. 3.13.- LL, LP y CL de muestras de arcilla. Fuente: Toma propia.

Junto con las siete muestras, también se evaluó la muestra decantada, únicamente con fines de comparación para conocer la plasticidad de la arcilla, la cual es obtenida directamente del proveedor en húmedo y se le aplicó el proceso común del taller de cerámica del ICAPET: Luego de obtener las tallas de arcilla, las saturan durante 24 horas, las decantan y eliminan el agua que queda en la superficie con impurezas, posteriormente la tamizan con una malla número 080 en líquido (Fig. 3.14).



Fig. 3.14.- Arcilla decantada, tamizada #-080.
Fuente: Toma propia.

Luego de evaluar las muestras, se seleccionó la que presentó mayor rendimiento y mayor índice de plasticidad, para ser utilizada en las siguientes fases.

3.3.1.2. Proceso de obtención de la ceniza.

Para la obtención de la CBC se evitó cualquier tipo de post-tratamiento con excesiva demanda de gasto energético, por lo tanto únicamente se tamizó durante cuatro minutos por la malla #200 (75 μ m)ASTM (Fig. 3.15) en un equipo Rotap (Marca EQUIPAR).



Fig. 3.15.- Tamizado de la CBC.
Fuente: Toma propia.

3.3.1.3. Análisis químicos

La ARN y a la CBC se enviaron a analizar, y se les realizó:

-Un análisis químico en el laboratorio del Servicio Geológico Mexicano, estación Oaxaca, empleando los métodos de Gravimetría, Volumetría y Fluorescencia RX para conocer su composición química.

-Un análisis a través de la técnica de microscopía electrónica de barrido en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido, perteneciente al Laboratorio Nacional de Nanotecnología del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) Unidad Chihuahua, para conocer la forma y las características superficiales de sus partículas. Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido de presión variable (marca HITACHI).

3.4. FASE II

EVALUACIÓN DE MEZCLAS ARN-CBC EN ESTADO PLÁSTICO

En la segunda etapa se evaluó en estado plástico, el efecto de la sustitución parcial de ARN por CBC en diferentes porcentajes y el efecto del tipo de mezclado de los materiales en los índices de plasticidad (IP) y en la contracción lineal (CL). También se evaluó la sustitución de mucílago de nopal en el agua de mezclado para conocer sus efectos en la plasticidad de las pastas con altos porcentajes de CBC.

3.4.1. Equipo y Métodos

Se diseñaron 12 mezclas con la ARN (obtenida por la trituradora y cribada por la malla #200) y con CBC en seis porcentajes (0, 5, 10, 20, 30, 40 y 50%). Para combinar los materiales se emplearon dos equipos: una mezcladora eléctrica con ciclos de 10 min. (HAMILTON BEACH) y una pulverizadora de bola con ciclos de 15 min. (Marca FRITSCH) (Fig. 3.16).



Fig.3.16.- Mezcladora Eléctrica y Pulverizadora de Bola.

Fuente: Toma propia.

De los procesos anteriores se obtuvieron 13 combinaciones diferentes incluyendo la mezcla control (Tabla 3.7). Para la elaboración de las mezclas se utilizó agua bidestilada (marca HYCEL) con variaciones en la cantidad utilizada para cada mezcla debido a la naturaleza absorbente de la CBC (Fig. 3.17).

Tabla 3.7 *Diseño de proporciones ARN-CBC.*

		Muestra #	%ARN	%CBC	%AGUA
EQUIPO DE MEZCLADO	MEZCLADORA E.	1	100	0	35.55
		2	95	5	36.78
		3	90	10	38.92
		4	80	20	42.62
		5	70	30	47.77
		6	60	40	51.31
		7	50	50	54.52
	PULVERIZADORA DE B.	8	95	5	36.78
		9	90	10	38.92
		10	80	20	42.62
		11	70	30	47.77
		12	60	40	51.31
		13	50	50	54.52

Fuente: Elaboración propia.



Fig. 3.17.- Mezclas con ARN-CBC-AGUA. Fuente: Toma propia.

Los dos porcentajes finales fueron seleccionados en base a los resultados obtenidos en las pruebas de Límites de Atterberg de cada mezcla del diseño de proporciones. El desarrollo de las pruebas de plasticidad puede consultarse en el APÉNDICE A.

De acuerdo con los valores de plasticidad y contracción lineal, se seleccionaron sólo dos mezclas, que junto con el control, se utilizaron en la siguiente etapa.

3.4.2. Extracción y uso del Mucílago de Nopal (MN)

En esta etapa se utilizó Mucílago de Nopal (MN), el cual es un aglutinante natural, y se obtuvo de la siguiente manera:

Se recolectó el nopal (especie *Opuntia ficus-indica*) en el Museo de la Grana Cochinilla “Tlapanochestli” ubicado en San Bartolo Coyotepec, Oaxaca. Se lavaron y se cortaron en trozos de manera que la parte interior de los nopales estuviera expuesta. Se colocaron en agua desionizada previamente calentada a 60°C aproximadamente sin rebasar esa temperatura, por tres horas y moviendo los trozos constantemente. Luego se tamizó por las mallas #100, #200 y #325. El mucílago extraído se obtuvo con una proporción nopal:agua de 1:1.5 (Fig. 3.18).



Fig. 3.18.-Proceso de extracción del mucílago. Fuente:Toma propia.

Para observar la influencia del MN en las mezclas de ARN con sustituciones altas de CBC, y determinar algún cambio en su plasticidad se elaboraron tres mezclas con 30, 50 y 70% de CBC en la ARN, la mezcla de polvos fue realizada con la Mezcladora eléctrica y después cada mezcla se saturó con agua bidestilada sustituida al 50% con MN (Fig. 3.19). Estas muestras con MN se sometieron a pruebas de Límites de Atterberg (ver APÉNDICE A).



Fig. 3.19.- ARN-CBC-MN-AGUA para elaborar mezclas. Fuente: Toma propia.

3.5. FASE III

ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN FÍSICA DE PROBETAS SINTERIZADAS

Se evaluaron las propiedades físico-mecánicas de acuerdo a la normatividad de la ASTM de probetas elaboradas con mezclas ARN-CBC (en dos % seleccionados en la fase anterior) y la mezcla control (100% arcilla). Estas tres mezclas se sinterizaron a tres temperaturas, obteniendo en total 9 compuestos.

3.5.1. Equipo y Métodos

3.5.1.1. Elaboración de probetas

Para la elaboración de las probetas se llevó a cabo el procedimiento que comenzó desde la fase uno y se resume en la Fig. 3.20.

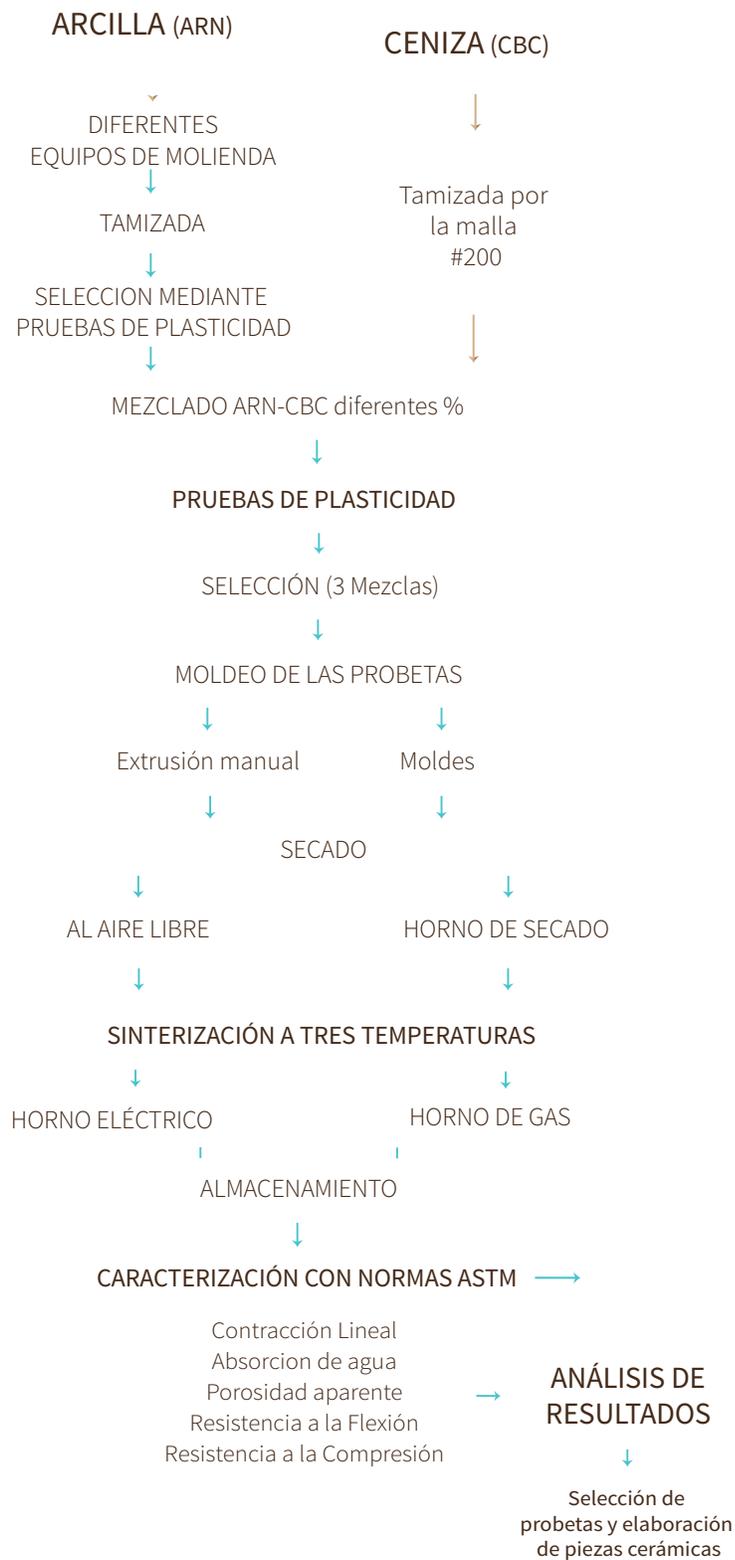


Fig.3.20.- Proceso general de las probetas. Fuente: Elaboración propia.

Con base en la normatividad internacional perteneciente a la Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (ASTM) se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de las probetas cerámicas, se requirieron ciertas especificaciones en las formas y tamaños de las probetas.

El proceso comenzó con la mezcla de polvos ARN-CBC en la mezcladora eléctrica (Fig. 3.21) y después de saturar cada mezcla por 24 horas y posteriormente amasarlas, se fabricaron probetas de manera artesanal utilizando unos moldes elaborados con las dimensiones basadas en las especificaciones de cada prueba (Fig. 3.22). En total se elaboraron nueve réplicas de cada grupo de probetas para cada uno de los nueve compuestos (con las variables de tres porcentajes de sustitución y tres temperaturas de sinterización).



Fig.3.21.- Mezcla de polvos ARN-CBC.
Fuente: Toma propia.

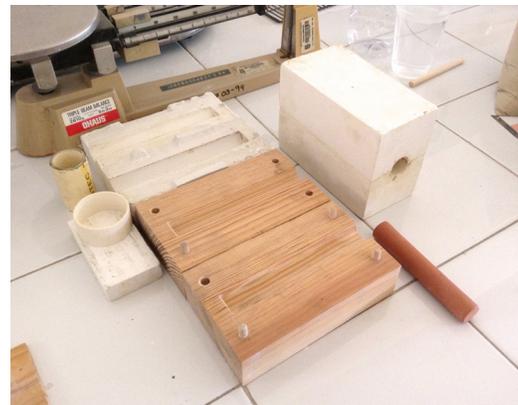


Fig.3.22.- Moldes utilizados para la elaboración de probetas. Fuente: Toma propia.

Para los ensayos de contracción lineal, las probetas fueron elaboradas con las siguientes dimensiones: 19mm de diámetro y 127 mm de altura y se utilizó un molde de PVC formando cada probeta por medio de extrusión manual. Después cada probeta se colocó en canales elaborados del mismo material (PVC) para evitar cualquier tipo de deformación. De ésta probeta se prepararon 11 réplicas por cada uno de los nueve compuestos.

Para las pruebas de absorción de agua y porosidad aparente, las probetas no requirieron dimensiones exactas, únicamente debían pesar al menos 50g y debían estar libres de cualquier tipo de vidriado, de bordes puntiagudos y de esquinas; se elaboraron 6 probetas por cada compuesto, usando moldes de PVC. Se manipularon cuidadosamente para que no presentaran algún tipo de grietas.

Para las pruebas de flexión se utilizaron cilindros de 19.2 mm de diámetro y 153 mm de longitud. La preparación de probetas se llevó acabo de manera tradicional, siguiendo las prácticas usadas en la producción manual con un molde de yeso. Se tomaron las debidas precauciones en la formación de cada una para que los especímenes se mantuvieran horizontales ayudados de una sección transversal uniforme.

Para las pruebas de resistencia a la compresión se elaboraron probetas cilíndricas de 20 mm de diámetro y 40 mm de largo con moldes de PVC, para cada compuesto se elaboraron 11 probetas.

En total se elaboraron 351 probetas para el desarrollo de la investigación. En la Fig. 3.23 se observa el uso de los moldes de PVC y de Yeso en la elaboración de probetas. En la Tabla 3.8 se presentan las características y la cantidad total de probetas por cada prueba físico-mecánica.



Fig. 3.23.- Elaboración de probetas.

Fuente: Toma propia.

Tabla 3.8. Cantidad de probetas elaboradas.

PRUEBA	TIPO DE PROBETA	PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN		TEMP. DE COCCIÓN (°C)	RÉPLICAS	TOTAL DE PROBETAS	
		CBC	ARN				
!"#\$%&!(#) *#+&*	!,-,/01)/2) 3455)/2) /,652701)8 39:55)/2 ;-7<0;	=>	3==>	4== 3=== 3=?=	33 33 33	44	
		9=>	?=>	4== 3=== 3=?=	33 33 33		
		@=>	A=>	4== 3=== 3=?=	33 33 33		
		=>	3==>	4== 3=== 3=?=	A A A		M@
		9=>	?=>	4== 3=== 3=?=	A A A		
		@=>	A=>	4== 3=== 3=?=	A A A		
%+C'C\$+#!'& &)*&) !"IH%+C'(# @=55)/2);-7<0;	!,-,J./01)/2) 9=55)/2) /,652701)8) @=55)/2);-7<0;	=>	3==>	4== 3=== 3=?=	33 33 33	44	
		9=>	?=>	4== 3=== 3=?=	33 33 33		
		@=>	A=>	4== 3=== 3=?=	33 33 33		
		=>	3==>	4== 3=== 3=?=	33 33 33		44
		9=>	?=>	4== 3=== 3=?=	33 33 33		
		@=>	A=>	4== 3=== 3=?=	33 33 33		
\$"\$&*)D+)H%"B+\$&C					RM3		

Elaboración: Fuente propia.

Después de elaborar las probetas, se secaron a temperatura ambiente durante cinco días aproximadamente (Fig. 3.24).



Fig. 3.24.- Total de probetas elaboradas y su proceso de secado. Fuente: Toma propia.

Posteriormente 117 probetas fueron sinterizadas a 900°C y otras 117 a 1000°C en un horno cerámico eléctrico (termostato Marca WEST) (Fig. 3.25) en el taller de cerámica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.



Fig. 3.25.- Horno cerámico eléctrico y colocación de probetas. Fuente: Toma propia.

Cada sinterización se realizó de frío a frío en un tiempo de 24 horas, manteniendo la temperatura requerida (900°C ó 1000°C) durante 60 minutos.

Las 117 probetas restantes se sinterizaron a 1080°C en un horno de gas (de elaboración artesanal en el taller de cerámica "Canela") (Fig. 3.26). La sinterización

se realizó en un tiempo de 24 horas de frío a frío y la temperatura 1080°C se mantuvo por 6 minutos aproximadamente.



Fig. 3.26.- Horno cerámico de gas y colocacion de las probetas. Fuente: Toma Propia.

Después del sinterizado, en cada una de las tres cocciones se observó un cambio en el color de las probetas (Fig. 3.27).

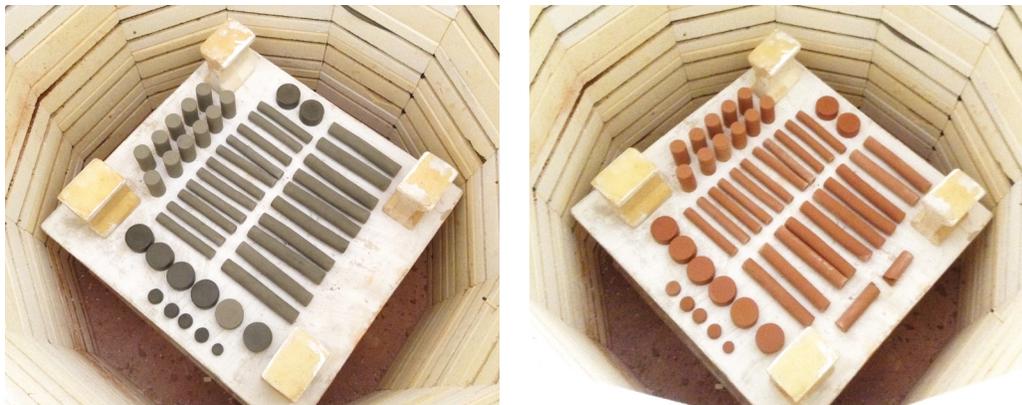


Fig. 3.27.- Cambio de color en probetas antes y después del sinterizado. Fuente: Toma propia.

En la Fig. 3.28 se observan las 117 probetas sinterizadas a 1080°C .



Fig. 3.28.- Probetas sinterizadas a 1080°C . Fuente: Toma propia.

3.5.1.2. Evaluación física y mecánica de probetas

Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de las probetas de acuerdo a las siguientes normas de la ASTM:

- C 326 -03 Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays.
- C 373-88 Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products .
- C 674 – 88 (Reapproved 1999) Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials.
- C 773 – 88 (Reapproved 1999) Standard Test Method for Compressive (Crushing) Strength of Fired Whiteware Materials.

3.5.1.2.1. Contracción Lineal

Con base en la norma C 326-03 Método de prueba estándar para la contracción en el secado y cocido de cerámica elaborada con arcilla, se llevó a cabo el proceso siguiente.

Después de elaborar las 99 probetas de contracción, y una vez que obtuvieron la suficiente rigidez para ser manipuladas, cada una se identificó y se marcó con una línea de referencia de contracción de 101.6 mm. La línea de referencia fué marcada con el filo de una cuchilla en un punto cero y en 101.6 mm marcándolas tan pronto como las barras pudieran ser manipuladas sin distorsión (Fig. 3.29).

Posteriormente las probetas fueron colocadas en superficies de madera con ranuras semicirculares (Fig. 3.30) y se secaron al sol a una temperatura ambiente (20 a 40°C aproximadamente) durante 24 horas.



Fig. 3.29.-Línea de referencia para medir la contracción. Fuente: Toma propia.



Fig. 3.30.-Ranuras semicirculares. Fuente: Toma propia.

El propósito de las ranuras semicirculares fue mantener la rectitud de las probetas durante el secado, durante este periodo de secado las barras fueron giradas 90° en varias ocasiones en intervalos de dos horas para eliminar posibles deformaciones verticales.

Luego se colocaron por 24 horas más en un horno de secado a 110°C (Fig. 3.31) y una vez secas, se midió la distancia entre las marcas de referencia de cada una con una precisión aproximada de 0.1 mm con un vernier electrónico.



Fig. 3.31.- Secado de probetas. Fuente: Toma propia.

Se registró el promedio de cada grupo de 11 mediciones (Fig. 3.32), para poder determinar la contracción de las probetas después del secado.



Fig. 3.32.- Tres de los nueve compuestos después del secado. Fuente: Toma propia.

Posteriormente, las probetas se sometieron a un proceso de sinterizado con la temperatura correspondiente (33 probetas a 900°C, 33 probetas a 1000°C y 33 probetas a 1080°C) (Fig. 3.33).



Fig. 3.33.- Los nueve compuestos después del sinterizado. Fuente: Toma propia.

Finalmente, se midieron una vez más (Fig. 3.34) para conocer la contracción por sinterizado. Se calcularon las contracciones totales (por secado y sinterizado), el volumen de contracción y el factor de contracción de cada compuesto.

Para determinar la contracción lineal del secado como un porcentaje de la longitud plástica se aplicó la siguiente fórmula:

$$S_d = [(L_p - L_d) / L_p] \times 100$$

En donde:

S_d = contracción lineal del secado, %,
 L_p = longitud plástica del espécimen, y
 L_d = longitud del espécimen seco.



Fig. 3.34.- Medición de la contracción lineal. Fuente: Propia.

Para calcular la contracción lineal total después del secado y del sinterizado de los especímenes de arcilla como un porcentaje de longitud plástica se utilizó la fórmula:

$$S_t = [(L_p - L_f) / L_p] \times 100$$

En donde:

S_t = Contracción lineal total después del secado y del sinterizado, %,
 L_p = Longitud plástica de los especímenes de prueba, y
 L_f = Longitud del espécimen después del sinterizado.

El volumen de contracción se calculó de la contracción lineal final, como sigue:

$$\text{Volumen de contracción \%} = [1 - (1 - S/100)^3] \times 100$$

En donde:

S = contracción lineal total después del secado y sinterizado, %

El factor de contracción se usa para convertir tamaños finales (de piezas sinterizadas) a tamaños en estado plástico o a tamaños de sus respectivos moldes.

El factor se calculó como sigue:

$$\text{Factor de contracción} = L_p / L_f$$

En donde:

L_p = longitud plástica del espécimen, y
 L_f = Longitud del espécimen sinterizado.

3.5.1.2.2. Absorción de Agua y Porosidad Aparente

Esta prueba realizada se basó en la norma C 373-88 Método de prueba estándar para la absorción de agua, densidad aparente y gravedad específica aparente de productos cerámicos cocidos, la cual determina propiedades estructurales que pueden ser requeridas para una aplicación determinada.

Después de elaborar las probetas, se secaron a una temperatura de 110°C en un horno BOEKEL durante 24 horas (Fig. 3.35) y posteriormente se enfriaron en un desecador (Fig. 3.36). Se pesaron (con una precisión de 0.01 gramos) para determinar la masa seca (D).



Fig. 3.35.- Secado de probetas.
Fuente: propia.



Fig. 3.36.- Enfriado de probetas en un desecador. Fuente propia.

Posteriormente se colocaron en recipientes con agua bidestilada para hervirlos durante cinco horas cuidando que las probetas se cubrieran de agua todo el tiempo. Se utilizaron bases de alambre sostenidas en las orillas de los recipientes para separar las probetas del fondo, de los lados y del contacto entre sí, de acuerdo a la norma (Fig. 3.37). Después de hervirlos, se dejaron saturados durante otras 24 horas más (Fig. 3.38) para determinar posteriormente los siguientes valores:



Fig. 3.37.- Bases de alambre.
Fuente: Toma propia.



Fig. 3.38.- Probetas hervidas.
Fuente: Toma propia.

Masa suspendida (S). Para calcularla, cada probeta se mantuvo dentro del agua sin tocar fondo con ayuda de una canasta de alambre conectada a la balanza de precisión y se pesó con una precisión de 0.01 g (Fig. 3.39).



Fig. 3.39.- Tarado de la canasta suspendida y peso de la probeta. Fuente: Toma propia.

Masa saturada (M). Cada probeta se retiró del agua e inmediatamente se secó superficialmente con una tela húmeda antipelusa para remover el exceso de agua de su superficie. El secado se realizó enrollándola suavemente en la tela la cual fue previamente saturada y exprimida para no absorber el agua contenida en la probeta (Fig. 3.40). En seguida se pesó con una precisión de 0.01 g (Fig. 3.41).



Fig. 3.40.- Secado de probetas.
Fuente: Toma propia.



Fig. 3.41.- Determinación del peso de probetas. Fuente: Toma propia.

Todas las operaciones de la prueba en general, fueron completadas tan rápido como fue posible para minimizar los errores causados por la evaporación del agua en las probetas.

Una vez obtenidos los valores anteriores se calcularon los porcentajes de Absorción de Agua y Porosidad Aparente con las siguientes fórmulas:

Para los cálculos se asume que: 1cm^3 de agua pesa 1 g.

M= Masa saturada, S= Masa suspendida, D= Masa seca

Las fórmulas utilizadas fueron las siguientes:

Volumen exterior, V, en centímetros cúbicos: $V=M-S$

Volumen de los poros abiertos VOP, en cm^3 : $VOP= M-D$

y el Volumen de las porciones impenetrables VIP, en cm^3 : $VIP = D-S$

Porosidad aparente, P, expresa en % la relación del volumen de los poros abiertos del espécimen con su volumen exterior: $P= [(M-D) / V] \times 100$

La absorción de agua, A, expresada en porcentaje, es la relación entre la masa de agua absorbida y la masa del espécimen seco: $A= [(M-D) / D] \times 100$

3.5.1.2.3. Resistencia a la Flexión

Se llevó a cabo con base en la norma C 674-88 Método de prueba estándar para determinar las propiedades de flexión en materiales cerámicos.

Este método de prueba se utiliza para determinar el módulo de ruptura el cual puede ser requerido en especificaciones de producto.

Previo a las pruebas se midieron los diámetros aproximados de cada probeta en cuatro puntos equidistantes cercanos a la ruptura y se determinó el promedio para los cálculos posteriores (Fig. 3.42).

En primer lugar se almacenaron en un horno eléctrico (marca BOEKEL) a 110°C durante 24 horas, después se mantuvieron en el horno antes de probarlos. Se tuvo el cuidado para evitar un choque térmico y evitar resultados erróneos (Fig. 3.43).



Fig. 3.42.- Medición de probetas antes de la fractura. Fuente: Toma propia.



Fig. 3.43.- Secado y almacenamiento de probetas. Fuente propia.

Para determinar el módulo de ruptura, cada probeta se apoyó sobre un dispositivo elaborado para la prueba (Fig. 3.44) con soportes espaciados 5 pulgadas (127mm)± 2% entre centros, con los especímenes sobrepasados de cada lado 6.4 mm como mínimo.



Fig. 3.44.- Dispositivo para la prueba. Fuente: Toma propia.

Posteriormente se utilizó una prensa marca GEOTEST de 667 Kg. (Fig.3.45) en la que se aplicó a cada probeta una carga directa en un ángulo de 90° sobre la mitad de cada una, en un punto medio entre los soportes a una velocidad uniforme (deformación de 1 mm de la probeta en 58 segundos) hasta que ocurrió la fractura de las mismas (Fig. 3.46).



Fig. 3.45.- Prensa Hidráulica. Fuente: Toma propia.

En total se realizaron tres pruebas de resistencia a la flexión con 33 probetas cada una, 11 de ellas fueron previamente sinterizadas a 900°C , 11 a 1000°C y 11 a 1080°C (Fig. 3.47).

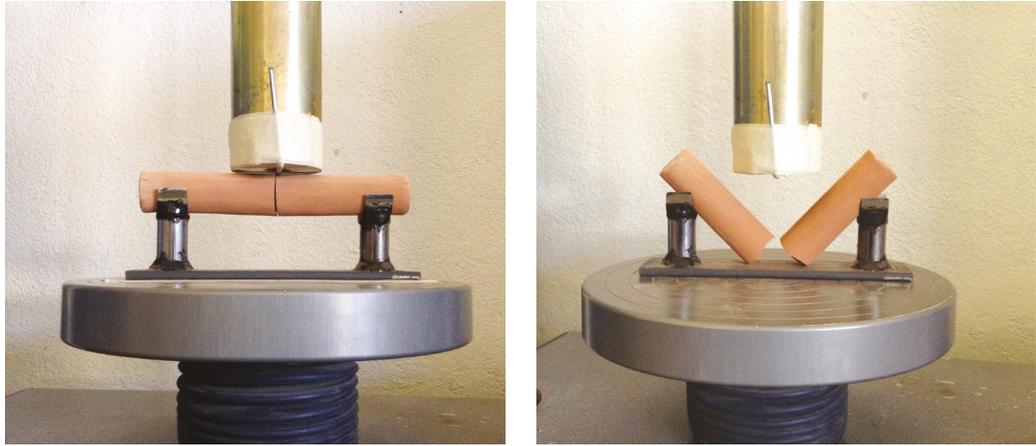


Fig. 3.46.- Fractura de probetas sinterizadas. Fuente: Toma propia.



Fig. 3.47.- Probetas Sinterizadas a 1000°C fracturadas a flexión. Fuente: Toma propia.

Finalmente se calculó el módulo de ruptura promedio de las probetas con la fórmula siguiente:

$$M = \frac{8PL}{\pi d^3}$$

En donde:

M= módulo de ruptura, psi (MPa);

P= carga en la ruptura, lbf (N);

L=distancia entre soportes, pulgadas (mm);

d= diámetro del espécimen, pulgadas (mm).

3.5.1.2.4. Resistencia a la Compresión

En esta prueba se tomó como base la norma C 773-88 Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión (prueba destructiva) del material cerámico cocido.

La prueba de resistencia a la compresión es una medida del potencial de utilidad de carga de un cerámico. Idealmente debe ser probado en su mayor resistencia.

Se utilizó el procedimiento aplicable a los productos de loza cerámica con niveles de resistencia de bajo a moderados (hasta 1030 MPa) según la norma establecida.

Después de elaborar las probetas y sinterizarlas a sus respectivas temperaturas (33 probetas a 900°C, 33 probetas a 1000°C y 33 probetas a 1080°C, cada grupo con los tres porcentajes de CBC), se descartaron todas las piezas que presentaron fracturas a simple vista. Luego se midieron (para conocer sus áreas de contacto), se secaron (110°C) durante 24 horas en un horno de secado, se pesaron y se almacenaron en un desecador (Fig. 3.48).



Fig. 3.48.- Medición, secado y peso de probetas. Fuente: Toma propia.

Posteriormente, cada probeta se centró cuidadosamente en una máquina de prueba (Prensa Hidráulica marca ELVEC de 120 TON) entre bloques de contacto (Fig. 3.49), se le aplicó una carga continua (240 kgf/s) hasta su fractura (Fig. 3.50) y se registró su carga máxima.



Fig. 3.49.- Prensa Hidráulica.
Fuente: Toma propia.

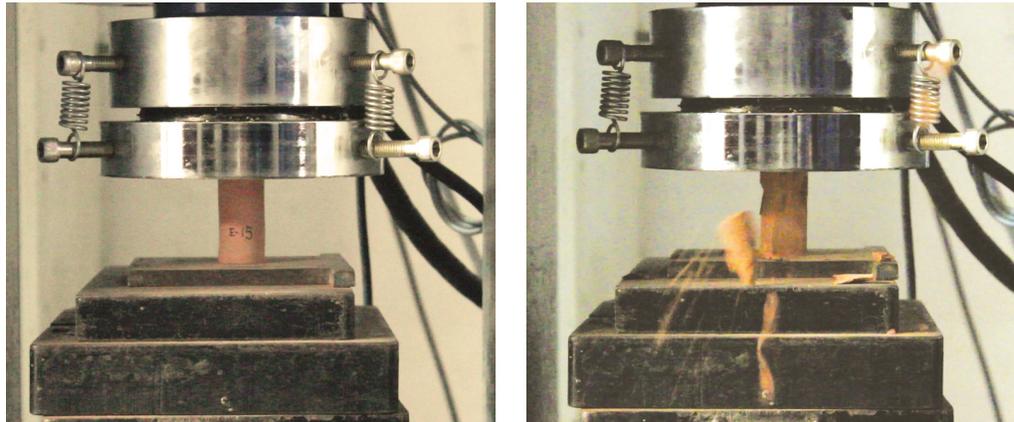


Fig. 3.50.- Fractura a compresión de las probetas. Fuente: Toma propia.

Se registraron y se evaluaron las cargas promediando cada grupo de probetas para obtener los resultados de los nueve compuestos (Fig. 3.51).

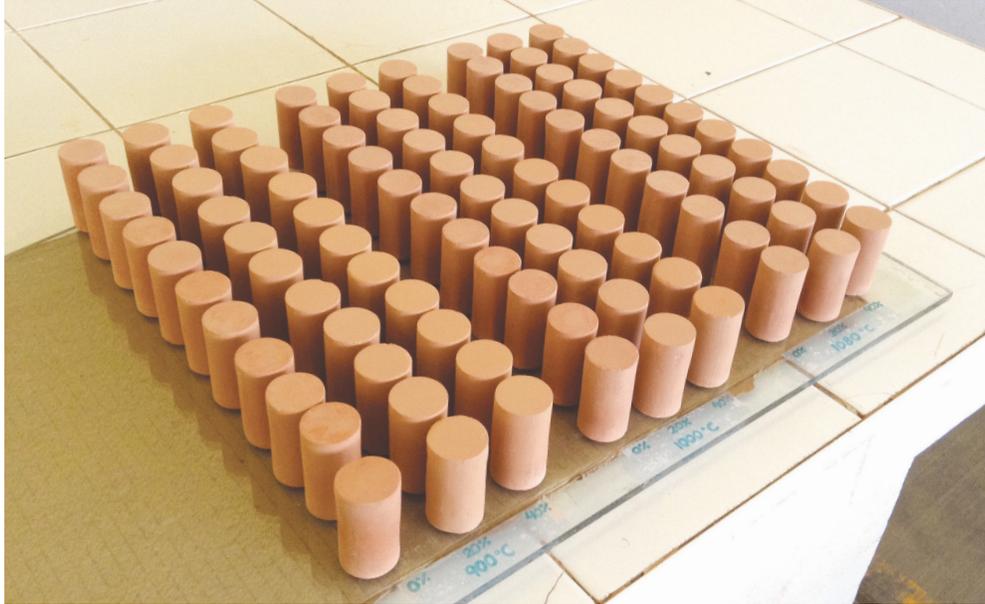


Fig. 3.51.- Total de probetas sinterizadas y evaluadas a compresión. Fuente: Toma propia.

La resistencia a la compresión se calculó con la siguiente fórmula:

$$C = P/A$$

En donde:

C= resistencia a la compresión de espécimen (MPa);

P= carga total sobre el espécimen en la falla (N); y

A= area calculada de la superficie de contacto del espécimen (mm²).

3.6. FASE IV

PROPUESTAS PARA LA ELABORACIÓN DE PIEZAS CERÁMICAS.

En la fase anterior se seleccionó un compuesto (formado con un porcentaje de CBC en la ARN y sinterizado a una de las tres temperaturas) con base en las propiedades resultantes.

3.6.1. Equipo y Métodos

Para determinar la factibilidad del uso del compuesto seleccionado, se tomaron en cuenta los valores de sus propiedades obtenidas y se propuso la elaboración de dos piezas cerámicas para la experimentación del material tomando como referencia la clasificación de Ferrer (2007) de la cerámica arquitectónica.

La primera consiste en una pieza cerámica arquitectónica de revestimiento vertical (una baldosa) y la segunda en un elemento ornamental (Fig. 3.52).

	CLASE	VARIEDAD	CUBIERTA	TEMPERATURA DE COCCIÓN	USO MÁS COMÚN
➔ POROSA	Alfarería Alfarería Artística	Ladrillos Tejas Terracota	➔ no/sí	➔ 900° - 1000°C	Ladrillo macizo o hueco, teja, atañor. Revestimientos en general y elementos ornamentales
	Mayólica	Engobada Barnizada Esmaltada	sí	920° - 980°C	Revestimientos en general: - Horizontales - Verticales - Mixto
	Loza	Loza fuerte	sí	1250° - 1280°C	
NO POROSA	Porcelana	Opaca	sí	1250° - 1495°C	Revestimientos en general.
	Gres	Gres Industrial	Gres Rojo no	950° - 1100°C	Pavimentos: - Internos - Externos
		Gres Fino	Gres de pavimento sí	1130° - 1200°C	Pavimentos de alta resistencia a la abrasión

Fig. 3.52.- Identificación de piezas en la cerámica arquitectónica. Fuente: Ferrer, 2007.

3.6.1.1. Baldosa cerámica.

Los materiales cerámicos destinados a revestimientos están clasificados por las normas ISO 13006 UNE-EN 14411 (validadas en México por la Norma Mexicana NMX-C-422-ONNCCE-2002) en función de la absorción de agua, del sistema de moldeo y de la existencia o no de esmalte superficial (Salvador, 2014).

El valor de resistencia a la flexión adecuado en la pieza se verificó utilizando un apartado de la norma EN 14411 Baldosas cerámicas. (Definiciones, clasificación, características y marcado), en donde una baldosa cerámica se define como una placa de poco grosor fabricada en arcilla, sílice, fundentes, colorantes y otros materiales, generalmente utilizada como revestimiento para suelos, paredes y fachadas. Se fabrica mediante molturación, tamizado, amasado, humidificación, y se moldea por prensado, extrusionado, colado u otros procedimientos generalmente a temperatura ambiente. Seguidamente es secada y esmaltada a altas temperaturas. Las baldosas cerámicas pueden ser esmaltadas, no esmaltadas o engobadas y son incombustibles e inalterables por la luz.

Esta norma exige ciertos requisitos mínimos de resistencia para cada tipo de baldosa de acuerdo a la clasificación establecida.

El compuesto ARN-CBC seleccionado para la elaboración de la pieza presenta un porcentaje de absorción del 33.14% por lo tanto se encuentra clasificado en el grupo BIII (baldosas con alta absorción) el cual considera a los productos que presentan más del 10% de absorción de agua. También indica que si su valor medio de capacidad de absorción de agua es superior al 20%, el fabricante debe declarar el valor.

Este grupo propone mínimos para el Módulo de Ruptura según el grosor de la baldosa, y para grosores <7.5 mm el valor mínimo es de 15 N/mm^2 . Por lo tanto una baldosa con el grosor mayor al indicado y elaborado con el compuesto ARN-CBC seleccionado, al presentar un valor de 23.81 N/mm^2 cumple con la

norma establecida. Sin embargo, se decidió por seguridad, elaborar una baldosa para revestimiento vertical (de pared), las cuales requieren menores resistencias que las de pavimento.

Parte de la elaboración de la baldosa se encuentra en el APÉNDICE C.

3.6.1.2. Pieza ornamental artesanal.

Para la experimentación con el compuesto seleccionado se propuso una segunda pieza elaborada artesanalmente con la técnica de modelado y la técnica decorativa denominada excisión (en el APÉNDICE C se observa parte del proceso de elaboración).

La pieza consistió en un cilindro cerámico 'calado', con el objetivo de conocer las características plásticas del material con las dos técnicas mencionadas. La temperatura de sinterizado se seleccionó de acuerdo a los valores más altos de resistencia a la flexión y a la compresión obtenidas en la fase anterior. El cilindro cerámico, entre otros usos puede ser utilizado como pantalla cerámica.



CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE LA FASE I

4.1.1. Tratamiento de los materiales

Los resultados de la fase uno muestran que los procesos más adecuados de tratamiento y obtención de la arcilla en polvo fueron: el molido y el triturado ya que más del 50% de las muestras obtenidas pasaron la malla #-200 (Fig. 4.1) con lo que se optimiza la obtención del material.

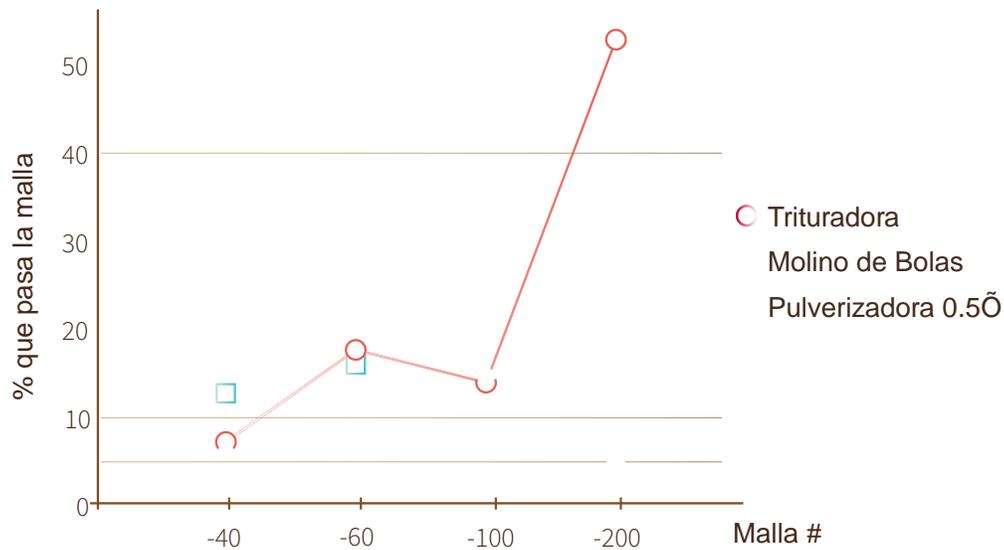


Fig. 4.1.- Granulometría de las arcillas triturada, molida y pulverizada. Elaboración: Fuente propia.

Al analizar los resultados de los índices de plasticidad (IP) y contracción lineal (CL) de las muestras de ARN (Tabla 4.1), se obtuvo lo siguiente: la muestra que obtuvo el IP mayor fue la muestra pulverizada, sin embargo fue también la que presentó el mayor porcentaje de CL así como un menor rendimiento, por lo que se descartó para la siguiente etapa.

De las muestras restantes, se seleccionó la que presentó un mayor rango de plasticidad, es decir la que obtuvo el IP más alto y la que presentó un menor porcentaje de CL, la muestra fue la triturada y tamizada por la malla #-200. Por lo tanto, se determinó que los tratamientos óptimos para la obtención de la ARN fueron: el triturado y tamizado por la malla #200. La muestra obtenida de esta forma fue la seleccionada para emplearse en las siguientes fases del proyecto.

Tabla 4.1 Índices de plasticidad y contracción lineal de las arcillas.

PRUEBAS DE PLASTICIDAD	MUESTRA#	MALLA ASTM #	IP	%CL
TRITURADA	!	"#\$	%&	!\$'(&
	%	"!\$\$	%&'(!\$'#&
	&	"%\$\$	%)'*#	!!\$&
MOLIDA)	"#\$	%%'*	!!'+)
	,	"!\$\$	%%'#	!%'*+
	#	"%\$\$	%)'%&	!!'%+
PULVERIZADA	+	"!\$\$	&#'%	!&'+)
DECANTADA	*	"(\$	%'#%'*	!!)'&

Con fines de comparación

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Análisis Químico de la ARN y la CBC

El análisis químico reveló que las composiciones de los dos materiales son similares (en su mayoría están compuestos por SiO₂), lo que permite estimar que una sustitución parcial de ARN por CBC no afectaría negativamente las propiedades del material final en el proceso cerámico (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Composición química de la ARN y CBC.

ELEMENTO/COMPUESTO	ARN	CBC
"#\$%&!%!'>?*@\$7\$&!!!!!!D ₃ G ₁ F	9/0=1	9/0=9!
"# \$%&!%!'()*+\$&!!!!!!D ₃ G ₁ F!!	<04=	301=
E!DO&Q)*F!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!D ₃ E ₁ F	1024	/012
"# \$%&!%!',,\$--&!.. DE'GF	909/	M
"#\$%&!%!',,\$--&!...!!!!!!D ₃ E ₁ G ₁ F	/034	;0:/
"#\$%&!%!'H&Q)8\$&!!!!!!D ₃ P ₃ GF	3022	1034
"#\$%&!%!'5)67'8\$&!!!!!!D ₃ 56GF!!	90;4	90/!
"#\$%&!%!'5)76)7'8&!!!!!!D ₃ 57GF!!	:0:/	:092
"#\$%&!%!'C&%\$&!!!!!!D ₃ N ₃ G ₁ F	L:0:1	90;k
"#\$%&!%!'EB8R&-&! D ₃ H ₃ G ₁ F	:093	:02!
A\$B#\$%&!%!'C\$*\$&!DC\$ ₃ GF	;0;;	;=01<
"#\$%&!%!'O\$Q)7\$&! DO\$ ₃ G ₁ F	:02:	:04#
HI%(\$%)!J&-!\$67\$+\$B7!9:::K(91039	9:0:1

Fuente: Elaboración propia.

Con las micrografías de los materiales en polvo se pudo observar que algunas partículas de arcilla se presentan aglomeradas, la mayoría se encuentran dispersas y presentan cierta esfericidad. Son irregulares en forma y tamaño (Fig. 4.2). Se distinguen ciertas partículas de forma laminar en la Fig. 4.3.

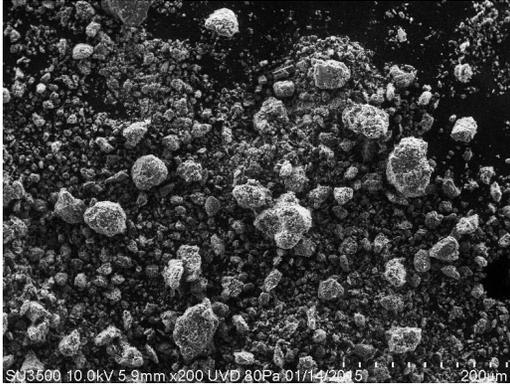


Fig. 4.2.- Micrografías de la ARN.
10.0kV 9mm x200UVD
Fuente CIIDIR-Oaxaca.

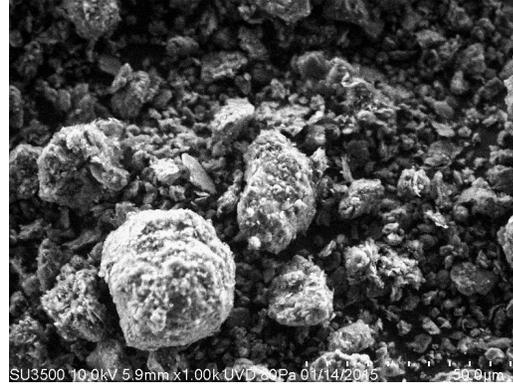


Fig. 4.3.- Micrografías de la ARN.
10.0kV 5.9mm x1.00k UVD
Fuente CIIDIR-Oaxaca.

También se observó que las partículas de la CBC presentan formas irregulares, entre las que se distinguen algunas de forma laminar y otras de aspecto fibroso. Se espera que estas formas contribuyan al acoplo de partículas unas sobre otras, para mejorar o no alterar las propiedades tanto en estado plástico como sinterizado (Fig. 4.4 y 4.5).

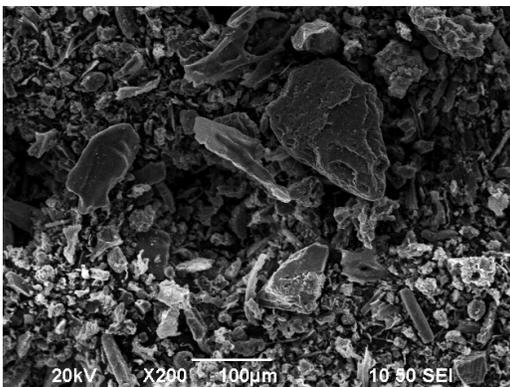


Fig. 4.4.- Micrografías de la CBC.
20kV x200
Fuente CIIDIR-Oaxaca.

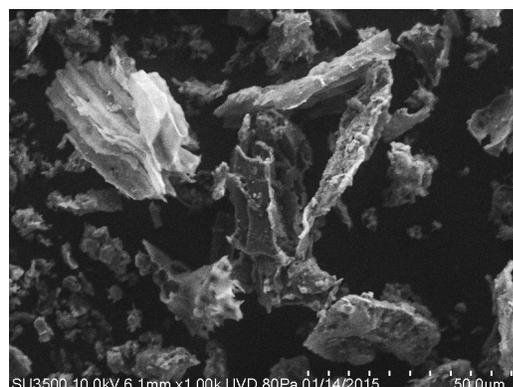


Fig. 4.5.- Micrografías de la CBC.
10.0kV 61mm x1.00k UVD
Fuente CIIDIR-Oaxaca.

4.2. RESULTADOS DE LA FASE II

4.2.1. Índices de plasticidad y contracción lineal de mezclas ARN-CBC

Los resultados de la segunda etapa muestran que los índices de plasticidad más altos fueron obtenidos en las mezclas que contenían 10% y 20% de CBC, y la contracción lineal menor fue obtenida en la mezcla con el 40% de CBC, las tres elaboradas con la mezcladora eléctrica (Fig. 4.6).

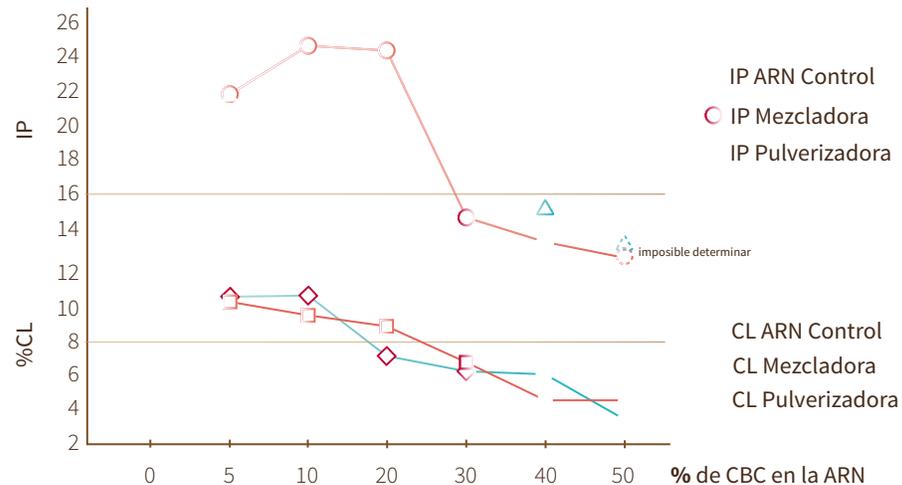


Fig. 4.6.- Índice de Plasticidad y Porcentaje de Contracción lineal. Fuente: Elaboración propia.

El equipo de mezclado seleccionado fué la mezcladora eléctrica, ya que a pesar de que la pulverizadora obtuvo pastas más homogéneas y presentó una tendencia lineal: a mayor cantidad de ceniza la plasticidad disminuyó, la mezcladora eléctrica presentó los niveles más altos de plasticidad. La pulverizadora obtuvo el valor más bajo en contracción lineal, sin embargo, no fué significativo comparado con la mezcladora y por otra parte el mayor rendimiento se obtuvo con la mezcladora. La adición de ceniza hizo que la pasta fuera más plástica en algunos porcentajes pese a su contenido de sílice. El sílice es utilizado, entre otras cosas, para reducir la plasticidad en las pastas de arcilla que por su grado de plasticidad tan alto, su manejo es muy complicado (Rado, 1990). "Se sabe que las partículas individuales de la arcilla son generalmente aplanadas y por ello pueden deslizarse las unas

sobre las otras, especialmente cuando están mojadas. Esta característica hace que la arcilla se estire y sea más fácil de moldear” (Toctaquiza, 2008), por lo tanto se puede inducir que la forma de algunas de las partículas de CBC ayudan al deslizamiento de las partículas de la ARN.

Es importante mencionar que los índices de plasticidad en las mezclas con sustituciones altas de CBC fueron imposibles de determinar debido a la naturaleza antiadherente de las mismas, lo que impedía la obtención del límite líquido (LL):

Cuando la mezcla presentó un brillo óptimo, lo que indicaba que la cantidad de agua era suficiente, se manipuló en la copa de casa grande y se presentaron dificultades ya que cuando la ranura cerraba en los primeros golpes y se verificaba su unión, se abría completamente sin obtener el contacto necesario de 13mm como se muestra en la Fig. 4.7.

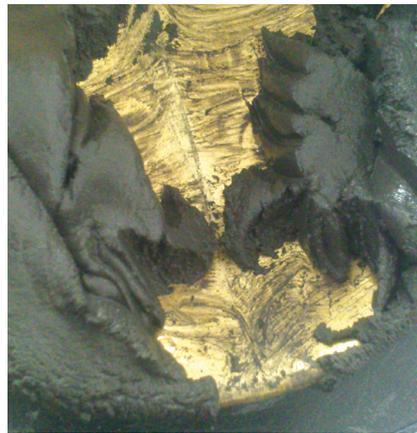


Fig. 4.7.- LL en mezclas con altos % de CBC. Fuente: Toma propia.

Con los índices de plasticidad y límites líquidos obtenidos, que se pueden consultar en el APÉNDICE B, fué posible ubicar las mezclas de ARN-CBC elaboradas con la mezcladora eléctrica en la carta de plasticidad y en las gráficas de Atterberg. En la Fig. 4.8, la mezcla seleccionada para la siguiente fase (80%-20% ARN-CBC) se ubica en la clasificación de Arcillas Inorgánicas de alta plasticidad. Esta selección se hizo debido al mayor aprovechamiento de CBC.

También se determinó que ninguna de las mezclas ARN-CBC es apta para ser usada en barbotinas tal como lo indica la Fig. 4.9, sin embargo las mezclas con los porcentajes de 0, 5 y 20% de CBC son óptimas para su uso con técnicas de extrusión para la elaboración de piezas cerámicas (Fig. 4.10).

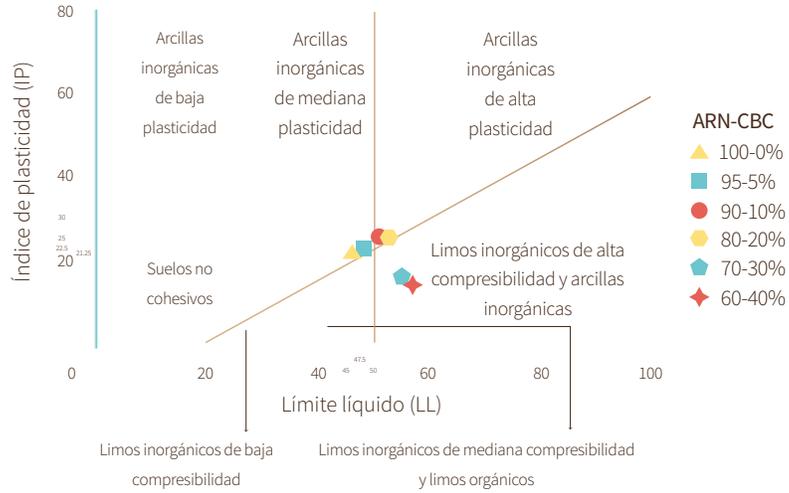


Fig. 4.8.- Ubicación de las mezclas en la carta de plasticidad. Fuente: Elaboración propia.

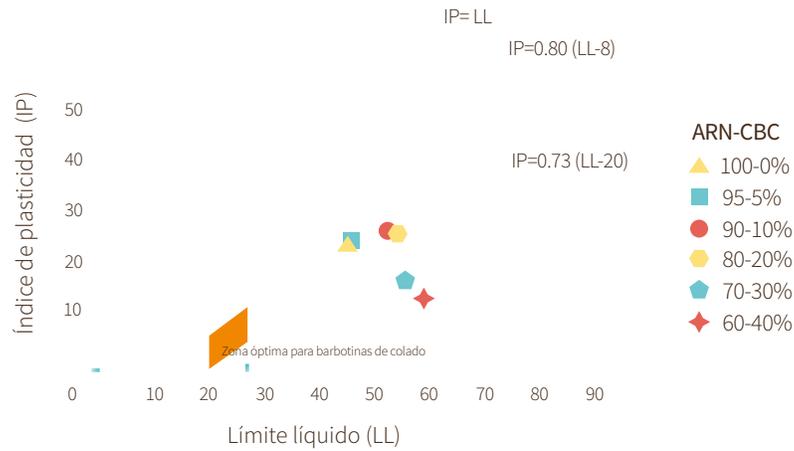


Fig. 4.9.- Ubicación de las mezclas para su posible uso en barbotinas. Fuente: Elaboración propia.

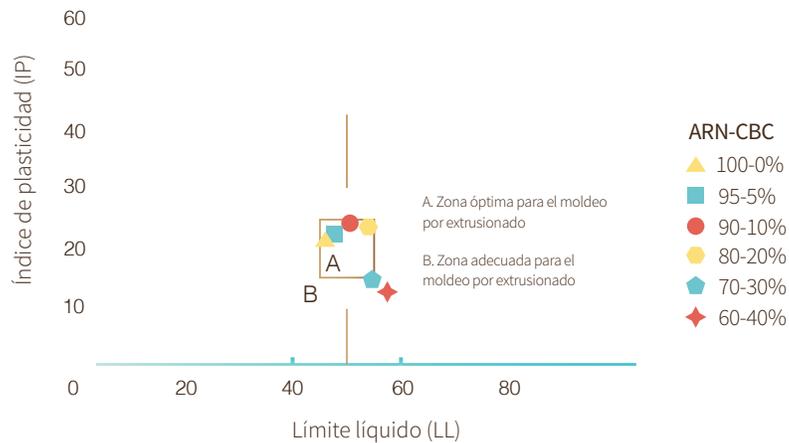


Fig. 4.10.- Ubicación de las mezclas para su posible uso en extrusión. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Influencia del MN en mezclas ARN-CBC

Para evaluar la influencia de la adición de mucílago de nopal (MN), se compararon mezclas elaboradas con la mezcladora eléctrica (ARN-CBC) y con adiciones de mucílago sustituido al 50% en el agua de saturado. Con base en los resultados de la Fig. 4.11 se observó que la plasticidad aumentó en la mezcla con 30% de CBC y mucílago, comparado con la mezcla sin el aglutinante, sin embargo la contracción también aumentó, lo que determinó que utilizar mucílago, en éste porcentaje específico afecta negativamente las propiedades de contracción lineal a pesar de mejorar la plasticidad.

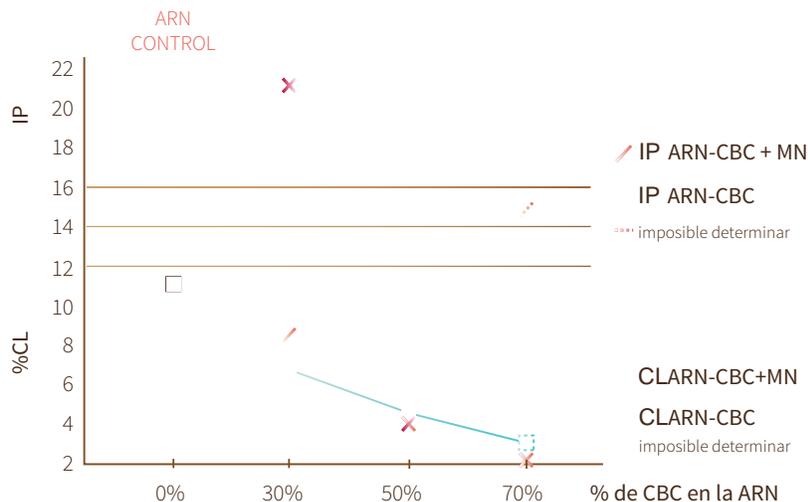


Fig. 4.11.- Resultado del uso del mucílago de nopal. Fuente: Elaboración propia.

Para las mezclas 50% y 70% de CBC, no se registraron resultados, ya que como se mencionó anteriormente, no fué posible determinar sus Límites de Atterberg debido a su naturaleza antiadherente lo que no permitió la unión de la ranura tal como lo indica la norma. Utilizar MN no mejora la plasticidad ni la consistencia en estas mezclas con altas cantidades de CBC.

4.3. RESULTADOS DE LA FASE III

Se muestran los resultados de las pruebas físico-mecánicas de las probetas cerámicas elaboradas con dos porcentajes de CBC (20% y 40%) en la ARN y con la muestra control (100% ARN), sinterizadas a tres temperaturas (900, 1000 y 1080°C).

4.3.1. Contracción Lineal

A mayores cantidades de sustitución de ceniza en la arcilla la contracción lineal disminuye (Fig. 4.12). Se deduce que por el incremento de la temperatura se empezaron a formar fases líquidas ya que a mayores valores la contracción lineal aumentó. De acuerdo con la literatura, para temperaturas hasta 1000°C las piezas cerámicas rojas son sinterizadas predominantemente mediante un mecanismo vía estado sólido, arriba de los 1000°C las piezas se sinterizan por flujo viscoso (Milheiro et al. 2005; Reed, 1995). Esto explica la contracción mayor en las temperaturas altas. Las probetas elaboradas con la mezcla que contenía 40% de CBC y calcinadas a 900°C, presentaron el menor porcentaje de contracción lineal, mostrando incluso mejor desempeño que las probetas control.

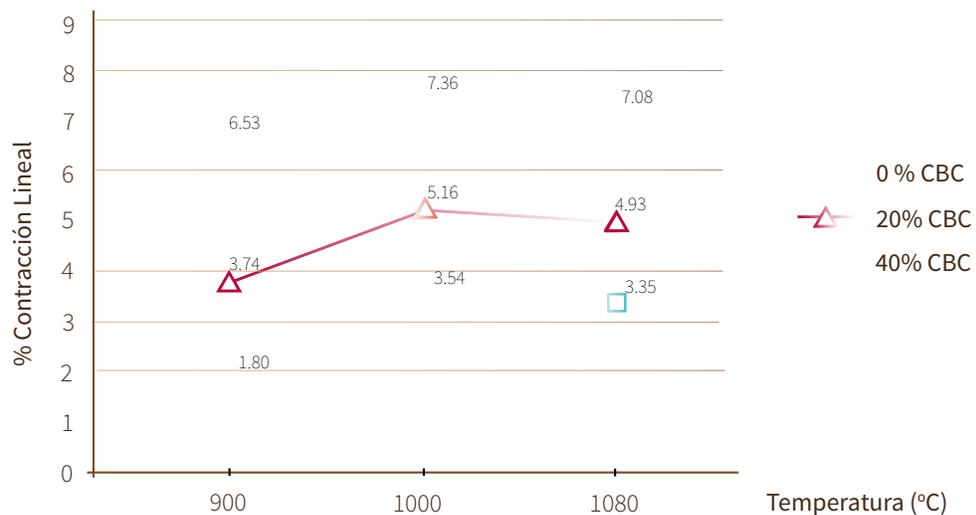


Fig. 4.12.- Contracción Lineal de Probetas sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.

El volumen de contracción y el factor de contracción se registraron en la Tabla 4.3, estos valores permiten conocer las dimensiones finales que tendrán las piezas cerámicas con base en sus dimensiones antes de secarse.

Tabla 4.3 *Volumen de contracción y factor de contracción de probetas ARC-CBC.*

% CBC	% ARN	TEMP.	VOL. DE CONTRACCIÓN	FACTOR DE CONTRACCIÓN
0	100	900	18.34	1.069
0	100	1000	20.50	1.079
0	100	1080	19.78	1.076
20	80	900	10.80	1.038
20	80	1000	14.71	1.054
20	80	1080	14.07	1.051
40	60	900	5.30	1.018
40	60	1000	10.26	1.036
40	60	1080	9.72	1.034

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Absorción de Agua y Porosidad Aparente

Al incrementar la cantidad de CBC los porcentajes de absorción de agua y porosidad aumentan. La temperatura sólo influyó de manera positiva en las probetas elaboradas con 40% de CBC ya que al incrementar la temperatura el porcentaje de absorción disminuye; este comportamiento se puede atribuir a la sinterización por flujo viscoso. Una reducción en la porosidad es atribuida a la formación de una fase líquida, la cual facilita el proceso de difusión durante el sinterizado, principalmente arriba de los 1000°C cuando la fase líquida incrementa y rellena los poros abiertos (Souza et al., 2011). De las probetas elaboradas con mezclas de ARN-CBC, las elaboradas con 20% de CBC y calcinadas a 1080°C, presentaron los porcentajes

de absorción y porosidad más bajos. Se puede determinar que existe una mayor facilidad al pasar gases y otros fluidos a través de las probetas con mayor cantidad de CBC (Fig. 4.13 y Fig. 4.14).

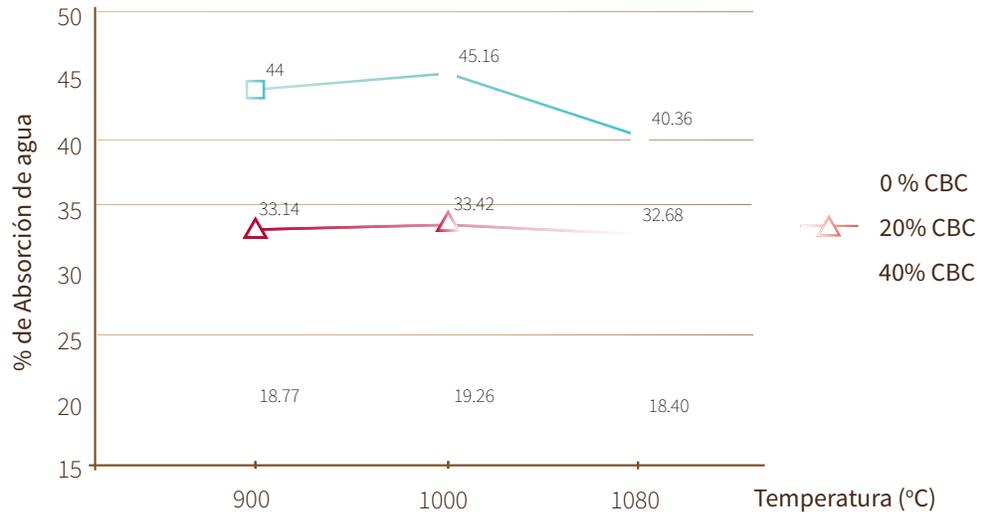


Fig. 4.13.- Absorción de Agua de Probetas Sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.

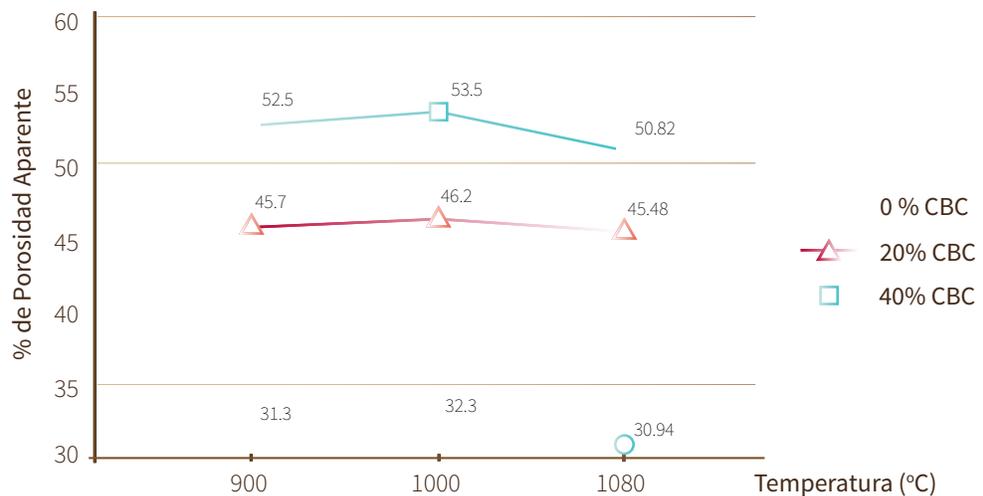


Fig. 4.14.- Porosidad Aparente de Probetas Sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Resistencia a la Flexión

Respecto a la resistencia a la flexión, los resultados mostraron que al incrementar la cantidad de CBC los valores de resistencia disminuyen y al incrementar la temperatura los valores aumentan (Fig. 4.15).

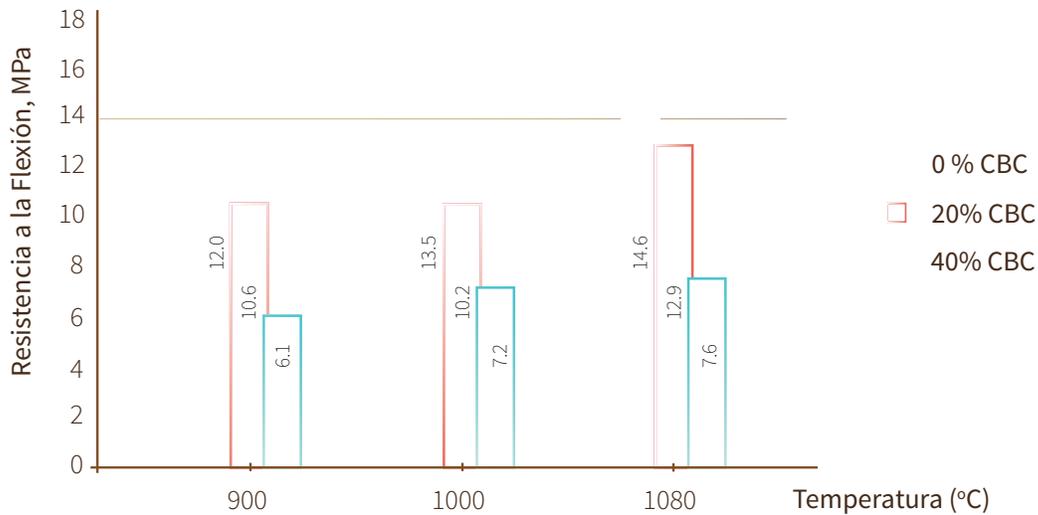


Fig. 4.15.- Resistencia a la flexión de Probetas Sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.

De las probetas elaboradas con mezclas de ARN-CBC, las elaboradas con 20% de CBC y calcinadas a 1080°C, presentaron los mejores resultados, lo que corresponde con lo obtenido en las pruebas de absorción y porosidad. Este resultado puede ser atribuido a la desaparición de la materia orgánica del desecho presentando en las muestras mayor cantidad de poros (Borlini et al., 2006), o bien a la presencia de óxido de silicio, el principal constituyente mineralógico de la CBC que muchas veces es el responsable de los efectos críticos en las arcillas (Dinsdale, 1963). Se observa también que los valores de la mezcla 20% CBC a 900°C y 1080°C están muy cercanos a los valores control, lo que indica que la resistencia a la flexión no es afectada considerablemente por la CBC.

4.3.4. Resistencia a la Compresión

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se muestran en la Fig. 4.16. En esta figura se observa que las probetas con mayor contenido de CBC presentan las resistencias más bajas. Se observa también que las resistencias incrementan con el aumento de la temperatura de sinterización sin superar las probetas control.

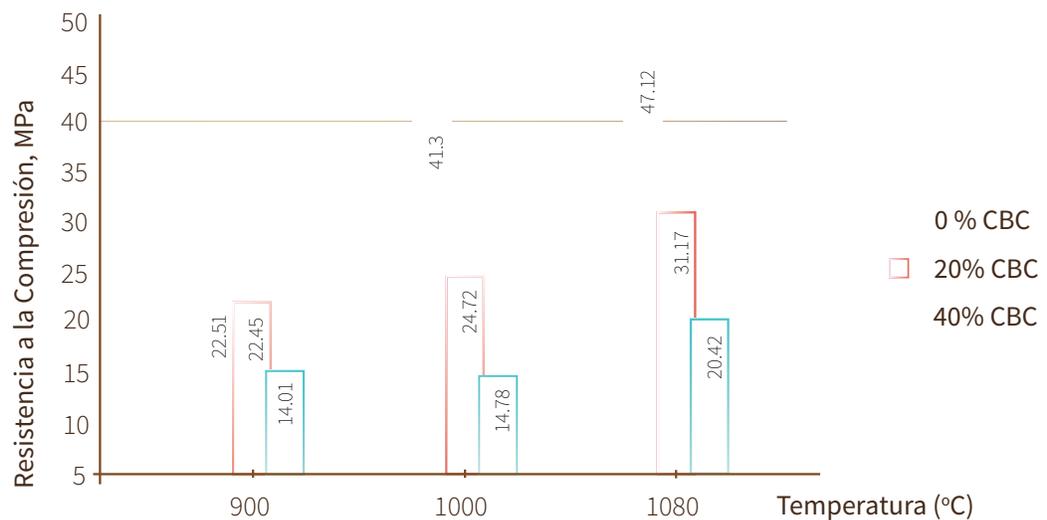


Fig. 4.16.- Resistencia a la compresión de probetas sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.

Sólo la mezcla con 80% de ARN y 20% de CBC igualó en resistencia a compresión a la mezcla control sinterizadas a 900°C . Estos resultados son correspondientes a los obtenidos en las pruebas de resistencia a la flexión.

La densidad de las probetas se registró en la Tabla 4.4, lo que permite determinar la ligereza de cada compuesto. El incremento de la temperatura de sinterizado en las probetas sin ceniza aumenta su ligereza, en cambio en probetas con ceniza ocurre lo contrario, a mayor temperatura se vuelven más pesadas. En términos generales el aumento del porcentaje de CBC en las probetas contribuye a la ligereza del material.

Tabla 4.4 Densidad de probetas evaluadas a compresión.

% CBC	% ARN	TEMP. (°C)	ALTURA PROMEDIO (cm)	MASA PROMEDIO (g)	DENSIDAD (g/cm ³)
0	100	900	5.08	47.15	1.78
0	100	1000	5.08	46.64	1.77
0	100	1080	5.08	46.03	1.75
20	80	900	5.08	40.13	1.46
20	80	1000	5.08	40.53	1.48
20	80	1080	5.08	41.18	1.50
40	60	900	5.08	35.34	1.25
40	60	1000	5.08	35.8	1.28
40	60	1080	5.08	36.46	1.32

Fuente: Elaboración propia.

4.3.5. Probetas Seleccionadas

Aunque el menor y mejor valor de contracción se observó a 900°C con el 40% de CBC, a mayores temperaturas de sinterización las resistencias incrementaron tanto a flexión como a compresión (sin superar las resistencias obtenidas en piezas elaboradas únicamente con ARN). Además las probetas con 20% de CBC presentaron valores más bajos de absorción, porosidad y valores más altos en las resistencias que las compuestas con el 40% de CBC. Por lo tanto las probetas seleccionadas fueron las que contenían ARN-CBC (80%-20%, respectivamente) y las cuales fueron sinterizadas a una temperatura de 900°C por haber alcanzado los valores de resistencia a la compresión de la arcilla control y a 1080°C por el incremento en las resistencias tanto a flexión como a compresión.

4.1. RESULTADOS DE LA FASE IV

4.1.1. Piezas cerámicas propuestas

Se concluyó entonces que el material elaborado con 80% de ARN y 20% de CBC (tamizado por la malla # 200) no afectó significativamente las propiedades de conformación comparadas con las de la arcilla control. Mejoró el control dimensional y su resistencia es adecuada con una sinterización a 900°C; a 1080°C las resistencias aumentaron. De tal manera se propusieron, sin profundizar en las especificaciones de los productos ni desarrollar el proceso de diseño, dos piezas que adicionalmente se han elaborado en esta última fase con el fin de demostrar la factibilidad de uso del compuesto diseñado.

Los resultados obtenidos de la aplicación del compuesto formado por un desecho agroindustrial y una arcilla natural fueron piezas estables con una buena plasticidad y consistencia. Las piezas elaboradas se muestran con sus datos correspondientes de porcentajes de composición, temperaturas de sinterización y propiedades en las Fig. 4.17 y Fig. 4.18. En la primera figura se incluye la comparación con dos baldosas cerámicas comerciales, que a pesar de tener características muy distintas (una de ellas está recubierta por varias capas de esmalte de alta dureza y determina que el comportamiento de la pieza depende del elemento que lo soporta), sus valores se encuentran proporcionalmente cercanos (con base en sus dimensiones) a los establecidos por cada empresa.

La segunda pieza presentó una notable ligereza debido a la adición de CBC. Utilizar el compuesto seleccionado, permite mantener la pasta durante lapsos de tiempo mayor con un comportamiento plástico óptimo para su modelado y su decorado, esto gracias a su alto índice plástico. Debido a su baja contracción lineal se controlan las dimensiones finales y se reduce la formación de grietas lo que favorece también el control del tiempo de elaboración al aplicar las técnicas de conformado.

BALDOSA CERÁMICA DE REVESTIMIENTO VERTICAL



FICHA DE PROPIEDADES GENERALES

Composición:	Arcilla ARN 80% Ceniza CBC 20%	Dimensiones:	17.5x10.5x1.4 cm !#\$%&'\$(&)*+ !!*/&'&\$01*+
Cantidad de agua de saturado	30.4 - 54.7%	Temperatura de sinterizado	900°C
Contracción Lineal	3.74%	Factor de Contracción L.	1.038
Absorción de Agua	33.14% !#, !!-./,	Porosidad Aparente	45.7%
Resistencia a la Flexión	10.61MPa !!-"234	Resistencia a la compresión	23.81MPa !!"\$#234
Densidad	1.46 g/cm ³ !\$(%/.56*+)	BALDOSA CERÁMICA	

!7489;;<=.*>:*<=.8>.49*;;4.*<*:84.*494.?= @4.A494.9?>=@:+:>B@<=. :B@>9:<9>=.
C.>&@>9:<9>=.+4*:D<.+4BE4;F.G4@\$.HH.3:>D4\$.I4J9:*4B@>K.G<<A>94@:?4.7489;;>94.L\$G\$M\$.
!!G>9á+:*4.349>8K.NOPLNPGGPIQ\$.R=+4;@>.8>.:N;@4.8E9>D4\$.S>@>9+:B4.TE>.B<.>=.EB.
>;>+>B@<.>=@9E* @E94;\$.LE.*<+A<9@4+:>B@<.8>A>B8>.8>;.>;>+>B@<.TE>;<.=<A<9@4\$.I4J9:*4B@>K.N;U459>=.L\$N..

Fig. 4.17.- Baldosas cerámicas y sus propiedades generales. Fuente: Elaboración y toma propia.

PANTALLA CERÁMICA ORNAMENTAL/ LÁMPARA

**FICHA DE PROPIEDADES GENERALES**

Composición:	Arcilla ARN 80% Ceniza CBC 20%	Dimensiones:	19x16x1.8 cm alto x diámetro x espesor
Cantidad de agua de saturado	30.4 - 54.7%	Temperatura de sinterizado	1080°C
Contracción Lineal	4.93%	Factor de Contracción L.	1.051
Absorción de Agua	32.68%	Porosidad Aparente	45.48%
Resistencia a la Flexión	12.98 MPa	Resistencia a la compresión	31.17MPa
Densidad	1.50 g/cm ³	PANTALLA CERÁMICA	

Fig. 4.18.- Pantalla cerámica para lámpara y sus propiedades generales. Fuente: Elaboración y toma propia.



CAPITULO V

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES

Con base en el análisis y discusión de resultados obtenidos en la presente investigación se concluye que para la ARN empleada es adecuado utilizar un pre-tratamiento que consiste en utilizar una trituradora para su obtención en polvo y tamizarla por la malla #200. La CBC sólo requiere ser tamizada por la malla #200.

En estado plástico, la mezcla de ARN-CBC (80%-20% respectivamente) con un porcentaje de agua de saturación aproximado de 42.62%, es la que presenta mayor índice plástico con el mayor aprovechamiento de CBC, lo que hace que la pasta tenga un mayor rango de plasticidad permitiendo que la manipulación de la arcilla al elaborar piezas pueda llevarse a cabo en lapsos de tiempo mayores. La mezcla de ARN-CBC (60%-40% respectivamente) con un porcentaje de agua de saturación aproximado de 51.31%, es la que presenta la menor contracción lineal después del secado.

El mucílago de nopal utilizado en mezclas ARN-CBC influye aumentando la plasticidad, sin embargo aumenta también los porcentajes de contracción lineal lo que hace que su uso no sea factible. Usarlo en mezclas con altas cantidades de CBC tampoco mejora la manipulación de las mismas.

En estado sinterizado, el compuesto seleccionado es el elaborado con 80% de ARN - 20% de CBC y es factible para ser utilizado en la elaboración de piezas cerámicas de tipo artesanal ya que debido al porcentaje de contracción obtenido se mejora el control dimensional en las piezas elaboradas. Sinterizado a una temperatura de 900°C obtiene un valor de porosidad alto pero adecuado para piezas que requieren algún tipo de vidriado, lo cual es una opción para mejorar su uso. Las resistencias obtenidas son útiles ya que no se requieren resistencias altas en piezas artesanales.

Mayores temperaturas de sinterización (1000°C y 1080°C) del compuesto seleccionado disminuyen sus valores de porosidad y absorción, e incrementan sus resistencias tanto a flexión como a compresión, sin embargo no superan las obtenidas en piezas elaboradas únicamente con ARN.

Las propiedades obtenidas sugieren un implemento en piezas que funcionen como elementos decorativos ligeros tales como cenefas, cornisas, revestimientos (baldosas) entre otras, las cuales no requieren altas resistencias, así como en materia escultórica en donde el peso de las piezas resulta un problema común. También pueden ser posibles aplicaciones en elementos filtrantes y aislantes térmicos.

Finalmente a nivel de propuesta, se sugieren algunas alternativas para demostrar la factibilidad del uso del compuesto, elaborando dos piezas cerámicas:

- Un mosaico de pared con la oportunidad y la recomendación de recibir un vidriado, ya que una pieza antes del vidriado requiere tener un acabado poroso y generalmente una sinterización a 900°C para una mejor adecuación.
- Un elemento ornamental (pantalla de lámpara) sinterizado a 1080°C, elaborado con un modelado artesanal y con la técnica de excisión. La baja contracción lineal del compuesto permite aplicar estas técnicas de manera óptima en las cuales se requiere una estabilidad dimensional que evite la aparición de grietas durante su elaboración.

A mayor cantidad de CBC en la ARN, el valor de densidad disminuye, por lo tanto la sustitución del 40% de ARN por CBC presenta los valores más bajos de densidad lo que nos indica su gran ligereza, sin embargo debe ser evitada ya que reduce aproximadamente la mitad de la resistencia control (100% ARN) tanto a flexión como a compresión.

Desde el punto de vista ambiental utilizar CBC tamizada por la malla #200 ASTM como sustituto parcial de ARN para la elaboración de piezas cerámicas, es una opción para la disposición final de este desecho agroindustrial que actualmente sólo contamina.

Gracias a la presente investigación se tuvo la experiencia de conjuntar las diferentes disciplinas y herramientas adquiridas en la formación de Ingeniería en Diseño desarrollando actividades multidisciplinarias que involucran creatividad, análisis, generación del conocimiento y sobre todo la aplicación de los mismos. La oportunidad de haber participado en congresos permite concluir que un Ingeniero en Diseño es competente en diferentes ramas de la investigación pues el diseño es parte de un amplio campo disciplinario lo cual permite aplicar los conocimientos e integrarlos.

5.2. RECOMENDACIONES

Con base en las observaciones, los análisis y los resultados de la investigación se propone lo siguiente:

1. Analizar químicamente las muestras sinterizadas con técnicas como la Difracción de rayos X (para conocer las fases minerales formadas), para determinar a profundidad las características del compuesto formado.

2. Utilizar sustituciones menores del 20% de CBC en la ARN para no disminuir notablemente la resistencia pero seguir en el intento de mitigar la contaminación que la ceniza genera.

3. Realizar pruebas térmicas debido a las características porosas obtenidas en el compuesto, así como pruebas de toxicidad para poder ampliar sus aplicaciones.

4. La propuesta de nuevos objetos cerámicos con base en las propiedades resultantes del compuesto ayudará a dar continuidad al uso de la ceniza de bagazo de caña como sustituto de arcillas naturales como un alternativa de uso del desecho en el proceso cerámico. La arcilla donají es una arcilla abundante que posee las mismas características en la mayoría de sus extracciones, lo que contribuye a la posible réplica y seguimiento del proyecto.

5. En las pruebas preliminares se llevó a cabo una sinterización a 1280°C de ARN-CBC. Ésta mezcla alcanzó su fase líquida y se solidificó al bajar la temperatura, esto ocurrió por ser una arcilla de baja temperatura, pero debido al color oscuro y a la textura lisa presentados después del sinterizado (ver APÉNDICE D) se sugiere un posible uso en vidriados cerámicos. Por lo anterior, también se recomienda el uso de la CBC en arcillas de alta temperatura.

REFERENCIAS

LIBROS

- Askeland, D. R. (1998). Ciencia e Ingeniería de los materiales. 3ª Edición. International Thompson Editores, S. A. de C. V., México.
- Barry, C. C. y Grant, N. M. (2007). Ceramic Materials Science and engineering. Editorial Springer, New York, USA.
- Birkz, T. (1981). Pequeño manual del ceramista. Ed. Omega. Barcelona, España.
- Ferrer Morales, A., (2007) La cerámica arquitectónica, su conservación y restauración. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, España.
- García L., M. (2001). Manual completo de artes cerámicas o fabricación de objetos de tierras cocidas. Secretaría de Cultura del Gobierno de Colima. México.
- Hald, P. (1986) Técnica de la Cerámica. Ed. Omega. Barcelona, España.
- Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado C., Baptista I. P. (2006) Metodología de la Investigación. Ed. McGraw-Hill. Mexico D.F.
- Juárez, B. E. y Rico, R. A., (2009). Mecánica de suelos. Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos. 2ª. Edicion. Ed. Limusa, México.
- Kuehl, Robert O. (2003). Diseño de experimentos: principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. Ed. Thomson/Learning, México.
- Montgomery, D.C. (2006). Diseño y análisis de experimentos, 2ª. Edicion, Ed. LIMUSA México.
- Mukherjee, S. (2013). The science of clays. Ed. Springer, India.
- Palacios Blanco, J.L., (2012). La casa ecológica. México: Trillas.
- Rado, P., (1990). Introducción a la tecnología de la ceramica. Ed. Omega. Barcelona.
- Reed, J. S. (1995). Principles of ceramics processing. 2ª. Edicion, Ed. Jhon Wiley & Sons. Inc., USA
- Rhodes, D. (1990). Arcilla y vidriado para el ceramista. Ediciones CEAC, S. A. Peru, Barcelona, España.
- Rhodes, D., (1999) Hornos para ceramistas. Ediciones CEAC, S.A. Barcelona España.

- Sabino, Carlos A. (1996). El proceso de investigación, 2a. edición, Ed. Lumen/Hvmanitas, Argentina.
- Shackelford, James F. (2005). Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros, 6a. edición, Ed. Pearson Educación, México.
- Smith W. F. (1998). Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. 3ª Edición. Ed. Mc Graw Hill, Madrid, España.
- (SAHOP, 1981) Instructivo para efectuar pruebas en suelos. Apoyo Didáctico. Volúmen I. Dirección General de servicios Técnicos, Departamento de laboratorios, Oficina de Estudios y Asesorías de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. México.
- Vergara González, R., y Díaz Carreño, M.A. (2010) El mercado de azúcar en México. Economía Actual. Revista de análisis de coyuntura económica 3 (1).
- Vázquez Malagón, E.d.C. (2005) Materiales Ceramicos. Propiedades, Aplicaciones Y Elaboracion. Centro de investigaciones de Diseño industrial. Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. D.F., México.

ARTÍCULOS

- Aigbodion, V.S., Hassan, S.B., Ause, T., Nyior, G.B. (2010). Potential Utilization of Solid Waste (Bagasse Ash). Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering 9 (1), 67-77.
- Balakrishnan, M., Batra, V.S., (2011). Valorization of solid waste in sugar factories with posible applications in India: A review [versión electrónica] . Journal of Environmental Management 92, 2886-2891. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/jenvman disponible en scienceDirect.
- Barbieri, L., Andreola, F., Lancellotti, I., Taurino, R., (2013). Management of agricultural biomass wastes: Preliminary study on characterization and valorisation in clay matrix bricks [versión electrónica]. Waste Management 33, 2307-2315. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/wasman.
- Borlini, M.C., Lopes, C.R., Monteiro, S.N., Vieira, C.M.F., (2005). Influence of Sugarcane Bagasse Ash in Substitution for the Fluxes of a Vitriified Ceramic Tile, 49th Brazilian Ceramic Congress, São Paulo, Brazil.
- Borlini, M.C., Mendonça, J.L.C.C., Conte, R.A., Pinatti, D.G., Vieira, C.M.F., Monteiro, S.N.,

- (2006). Effect of particle size of an ash from sugarcane bagasse in the properties of red ceramic. *Mater. Sci. Forum.* 530-531, 538-543.
- Caldas, A., Neto, A.A.M., John, V.M., Sobrinho, C.W.A.P., (2000). Tecnologias Alternativas para Habitação: O Uso de Cinzas Residuais para Produção de Novos Materiais e Componentes Construtivos. In: II Congresso Internacional de Tecnologia e Gestão da Qualidade na Construção Civil. Recife-PE, Brazil. <http://antoniomelo.pcc.usp.br/Publicações.htm>.
- Cordeiro GC, Toledo-Filho RD, Tavares LM, Fairbairn EMR.(2008) Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cem Concr Comp*, 30. 410–8
- Dhadse, S., Kumari, P., Bhagia, L.J., 2008. Fly ash characterization, utilization and government initiatives in India: a review. *Journal of Scientific and Industrial Research* 67, 11-18.
- Faria, K.C.P., Holanda, J.N.F.,(2013). Incorporation of sugarcane bagasse ash waste as an alternative raw material for red ceramic. *Cerâmica* 59, 473-480.
- Faria, K.C.P., Gurgel, R.F. , Holanda, J.N.F., (2012). Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. *Journal of environmental Management* 101, 7-12. Available at SciVerse ScienceDirect journal homepage www.elsevier.com/locate/jenvman
- Frías, M., Villar, E., Savastano, H., (2011). Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. *Cement and Concrete Composites* 33 (4), 490–496.
- Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K., 2007. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement Concr. Compos.* 29 (6), 515-524.
- Hernández Martirena, J.F., Middendorf, B., Gehrke, M., Budelmann, H., (1998). Use of wastes of the sugar industry as Pozzolana in lime-Pozzolana binders: study of the reaction. *Cement Concrete Res.* 20, 1525-1536.
- Iyer, P.V.R., Rao, T.R., Grover, P.D., (2002). *Biomass Thermo-Chemical Characterization*, third ed. IIT (Indian Institute of Technology), New Delhi.
- Loh,Y.R., Sujun, D., Rahman, M.E., Das, C.A., (2013), Sugarcane bagasse – The future composite material: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling* 75, 14-22
- Morales EV, Villar-Cociña E, Frías M, Santos SF, Savastano Jr H. (2009). Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): influence in the

pozzolanic activation. *Cement and Concrete Composites* 31, 22–8.

Pinatti, D.G., Conte, R.A., Borlini, M.C., Santos, B.C., Oliveira, I., Vieira, C.M.F., Monteiro, S.N., (2006). Incorporation of the ash from cellulignin into vitrified ceramic tiles. *J. Eur. Ceram. Soc.* 26, 305-310.

Ramírez, A.,S., Cano, B.P.F.de J., Julián, C., F., Gómez, Y., C. (2012). Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en patas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural. *Materiales de construcción* 62, 307, 327-341.

Rawlings, R.D., Wu, J.P., Boccaccini, A.R., (2006). Glass-ceramics: their production from wastes e a review. *Journal Mater. Sci.* 41, 733-761.

Souza, A.E., Teixeira, S.R., Santos, G.T.A., Costa, F.B., Longo, E., (2011). Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. *Journal of environmental Management* 92, 2774-2780. Available at ScienceDirect. journal homepage www.elsevier.com/locate/jenvman

Teixeira, S.R., Souza, A.E., Santos, G.T.A., Peña, A.F.V., (2008). Sugarcane bagasse ash as a potential quartz replacement in red ceramic. *Journal Am. Ceram. Soc.* 91, 1883-1887.

Teixeira, S.R., Romero, M., Ma Rincón, J., (2010). Crystallization of SiO₂-CaO-Na₂O glass using sugarcane bagasse ash as silica source. *Journal Am. Ceram. Soc.* 93, 450-455.

Vargas, N. J., Heeredia, Z. E., Bariola, B. J., Mehta, P. K. (1986). *Preservación de las construcciones de adobe en areas lluviosas*, Pontificia Universidad Católica del Perú. Universidad de California, Berkeley.

Vieira, C.M.F., Borlini, M.C., Monteiro, S.N., (2006). Incorporation of ash from sugarcane bagasse into clay bricks. *Ind. Ceram.* 26 (2), 107-113.

Vieira, C.M.F., Soares, T.M., Sánchez, R., Monteiro, S.N., (2004). Incorporation of granite waste in red ceramics. *Mat. Scien. Eng.* 373, 115-121.

TESIS

Aranda, Y. (2012). Tesis. Características del BTC ante diferentes concentraciones de mucílago de Nopal y Sábila agregadas al agua de mezclado. México.

Hernandez, J. U. (2011). Tesis de especialidad. Comportamiento mecánico y físico del mortero

a base de CBCA como árido en aplanados en Muros. Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Civil, Xalapa, México.

Hernández, E. F. (2012). Permeabilidad a cloruros y carbonatación en concreto conteniendo Mucílago de Nopal y Alginato. Tesis de Maestría. Instituto politécnico nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Oaxaca, México.

León, M. F. M. (2010). Secado por aspersion de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y su efecto en las propiedades reológicas de los polvos reconstituidos. Tesis de maestría. Instituto politécnico nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Oaxaca, México.

Martínez, C. F. (2007). La consolidación del adobe con mucílago de Nopal. Estudio de un caso: El Templo de la Antigua Misión de Nuestra Señora de Pilar y Santiago de Cocospera, Sonora. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Conservación, restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete", México.

Toctaquiza, O. (2008). "Optimización del proceso de cocción en la producción de ladrillos de cerámica roja en el cantón Chambo", Tesis de grado, Escuela Superior del Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Torres, G. K. F. (2005). Tesis de Licenciatura. Evaluación del Mucílago de Nopal (*Opuntia ficus indica*) como recubrimiento para inhibir el oscurecimiento en plátano deshidratado y su efecto en la calidad del producto. Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México.

Salvador, V. A. (2014). Proyecto Final de Grado. Comparativa de pavimentos para rehabilitación en edificación. Universitat Jaume I de Castellón. España.

REVISTAS

Dinsdale, A. (1963), Crystalline silica in whiteware bodies. *Trans.Brit.Ceram. Soc.* 62 (4),321.

Fuentes, R. R., Mejía, O. O., de la Rosa, A. M. G., Caudillo, B., Guzmán, A. J.J., Gallaga, O. Y. (Septiembre, 2008). Evaluación de Mezclas de Arcillas de la Región de Guanajuato. *Acta Universitaria*, 18 (3). pp. 20-26

Milheiro, F. A. C., Freire M.N., Silva, A. G. P., Holanda, J. N. F. (2005). "Densification behavior of a red firing Brazilian kaolinitic clay", *Ceram. Int.* 3, pp. 757-763.

Santos A., José D., Malagón V., Pedro Y.; Córdoba T., Elcy M. (2011). Caracterización de arcillas

y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna*, 78(167) 53-61, pp. 53-61.

PAGINAS WEB

Bionero (2011). Con técnicas de bioconstrucción, preservan edificios de tierra levantados en el siglo XVIII. Consultado el 8 de marzo de 2014 en <http://www.bionero.org/especiales/ecotips/con-tecnicas-de-bioconstruccion-preservan-edificios-de-tierra-levantados-en-el-siglo-xviii>

CONADESUCA (2014). Reportes estimados. Consultado el 10 de abril del 2014. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, pagina web para estimar la producción de los ingenios: <http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/reportes/reportes.php?tipo=ESTIMADO>)

Garavaglia, E., (2008), Memoria sobre ceniza. Consultado el 31 de Enero de 2014, Cátedra Cerámica Departamento Artes Visuales IUNA sede XUL SOLAR, <http://catedraceramica.blogspot.mx/2008/02/memoria-sobre-ceniza-apuntes-de-ctedra.html>

Instituto Nacional de Ecología (2007). Capítulo 7 Compromisos Internacionales. Consultado el 14 de abril 2014, <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/495/compromisos.html>

Morales, C. N. (2007). Cae venta de artesanías hasta 95 por ciento. Noticias, 11022, 16. Obtenido desde noticias-oax.com.mx

Rivas, S. C. (2007). Crédito de 50 mdp para artesanos oaxaqueños. Noticias de Oaxaca, 10947, 5. Obtenido en 26 de diciembre de 2007, desde noticias-oax.com.mx

SAGARPA (2012) Importancia de la agroindustria de la caña de azúcar. Consultado el 14 de marzo del 2014 en <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Documents/Cultivos%20Agroindustriales/Impactos%20Ca%C3%B1a.pdf>

SAGARPA y CONADESUCA (2014). Estimaciones. Consultado el 15 de marzo del 2014 en [http://www.campomexicano.gob.mx/](http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/reportes/salidaPDF.php?reporte=29&Grupo%5B1%5D=ESTADO&Grupo%5B2%5D=&Grupo%5B3%5D=&Grupo%5B4%5D=&Columna=ESTIMADO+DE+CA%D1A+A+INDUSTRIALIZAR%3CBR%3E%28TON%29&tipoorden=ASC&limiteN=&Zafras%5B%5D=2013&corridaSemana=semanas&recorrersemanas=1&Sector%5B%5D=0&Consortio%5B%5D=0&Estados%5B%5D=0&enviar=Ver+reporte&tipo=2&origen=ESTIMADO&info=&acse=)(http://www.campomexicano.gob.mx/)

azcf/reportes/reportes.php?tipo=ESTIMADO

SEMARNAT (2010). Industria con implicaciones de impacto ambiental. Consultado el 11 de abril del 2014, http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia_mce/html/mce_index.html#

Taller de cerámica Unzueta (n.d.). Investigación cenizas. Introducción. Consultado el 20 de Diciembre de 2013, <http://www.unzuetaceramica.com/cinzas/Introduccion-cs.htm>

GLOSARIO

BARBOTINA. Barro muy fluido, de la misma pasta que se trabaja.

CHAMOTA: Consiste en fragmentos de cerámicas ya cocidas anteriormente que se machacan para utilizarlas como desgrasante. La chamota al presentar un índice de expansión térmico igual al de la cerámica que se va a cocer no produce ningún problema durante la cocción ni durante su posible posterior uso como cerámica de cocina.

CERÁMICA VITRIFICADA O VÍTREA. Toda aquella que ya ha sido barnizada.

ENGOBE. En alfarería, pasta de arcilla que se aplica a los objetos de barro, antes de cocerlos, para darles una superficie lisa y vidriada.

FRITA. Masa obtenida por desmenuzamiento y fusión de diversos elementos (cal, sílice, potasa, etc.) que se utiliza para fabricar esmalte o porcelana vitrificada.

HIGROSCÓPICO. Propiedad de algunos cuerpos inorgánicos, y de todos los orgánicos, de absorber la humedad.

INGENIO AZUCARERO. Planta industrial dedicada al procesamiento, transformación e industrialización de la caña de azúcar.

INVERSIÓN. Proceso de la cocción de la cerámica en el cual los enlaces del cuarzo se modifican en dirección y longitud, a una temperatura de 573 ° C, produciéndose un aumento de volumen y en el enfriamiento reaccionando inversamente, esta contracción es aproximada del 2%.

MERMA. Disminución o reducción del volumen o la cantidad de una cosa.

MUCÍLAGO O HIDROCOLOIDE. Sustancia viscosa, de mayor o menor transparencia, que se encuentra en ciertas partes de algunos vegetales, tanto en hojas como tallos, raíces, entre otros y algunas leguminosas.

MULLITA: es un silicato de aluminio que enlaza la estructura entre si dándole cohesión y resistencia a la cerámica.

PASTA CERÁMICA. Mezcla de arcillas, o arcilla y otras sustancias minerales terrosas, que se mezclan para lograr una finalidad cerámica determinada.

PECTINA. Tipo de fibra soluble que en las plantas tiene la función de unir las células vegetales y determinar la porosidad de sus paredes celulares. En presencia de agua las pectinas

forman geles. Es un polisacárido complejo presente en las paredes celulares de los vegetales, especialmente en las frutas, que se utiliza como espesante en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética.

PUZOLÁNICA. Que actúa como puzolana.

PUZOLANA. Roca volcánica muy desmenuzada, de la misma composición que el basalto, la cual se encuentra en Puzol, población próxima a Nápoles, y en sus cercanías, y sirve para hacer, mezclada con cal, mortero hidráulico.

PROBETAS. Muestra de cualquier sustancia o material para probar sus propiedades, elasticidad, resistencia, etc.

SINTERIZAR. Cocer hasta el punto en que comienzan a cohesionarse los materiales.

SINTERIZACIÓN. Tratamiento térmico que transforma un producto en polvo en otro compacto. Es un tratamiento a alta temperatura, que hace que las partículas se unan por difusión en estado sólido y de manera gradual se reduzca el volumen del espacio de los poros entre las mismas. Es un paso frecuente en la fabricación de componentes cerámicos.

SÍLICE (SiO_2). Óxido principal y fundamental del vidriado. La sílice vítrea tiene un bajo coeficiente de dilatación y por tal razón su presencia controla el acoplamiento del vidriado a la pasta. Alrededor del 60% de la corteza terrestre está hecha de sílice. Aporta dureza, durabilidad y resistencia al cambio químico a los vidriados.

TARA. Señalar el peso de un recipiente en el valor 0 para pesar el material que contiene.

TENDAL. Conjunto de cosas tendidas para que se sequen.

VIDRIADO O BARNIZ. Es un compuesto de boro, sílice y plomo. El nombre de "vidriado" le viene dado por su parecido físico y químico con el vidrio.

VIDRIADO DE BAJO FUEGO. Aquellos que maduran a 1050°C o menos, contienen alrededor de dos partes de sílice por una parte de los otros ingredientes del vidriado.

VIDRIADO DE GRAN FUEGO. Aquellos que funden a 1250°C o más, tendrán tres o cuatro veces más de sílice que de los otros componentes combinados. Los vidriados de gran fuego son de dureza superior en comparación con los de bajo fuego porque puede incorporárseles más sílice.

APÉNDICES

APÉNDICE A

DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE PLASTICIDAD CON BASE EN LA NORMA D4318 - 10'1 MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE PLÁSTICO DE SUELOS.

Para conocer las características de plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios, uno de ellos es el método desarrollado por Albert Atterberg, método incluido en la norma de la ASTM Standard Test Methods for Liquid limit, plastic limit, and Plasticity Index of Soils.

Determinación del límite líquido (LL).

Para determinar el límite líquido de las muestras se utilizó una copa de casa grande calibrada con una altura de caída de un centímetro, una cápsula de porcelana de doce centímetros de diámetro, una espátula de acero flexible (siete punto cinco centímetros de longitud y dos centímetros de ancho punta redonda), un ranurador curvo, vidrios de reloj, una balanza de precisión, un horno de secado. La norma indica que las pruebas deben realizarse con muestras tamizadas por la malla #40, sin embargo, en esta investigación se utilizaron muestras que pasaron las mallas #60, #100 y #200 en la fase I y muestras que sólo pasaron la malla #200 en la fase II ya que las pruebas se usaron para comparar sus plasticidades entre sí.

Para cada una de las mezclas se utilizó el siguiente procedimiento: Se emplearon 250 gramos de material previamente tamizado y se saturó por 24 horas con agua bidestilada (Fig. A1).



Fig. A1.- Saturado de muestras. Fuente: propia

Se colocaron 150 grs. aproximadamente de cada muestra de arcilla en la copa de casa grande y se le efectuó una ranura trapecial (Fig. A2). Al golpear la copa 25 veces dejándola caer contra la superficie del equipo desde una altura de un cm a una velocidad de dos golpes por segundo (con ayuda de una manivela automática) los bordes de la ranura se pusieron en contacto en una longitud de trece mm (Fig. A3).

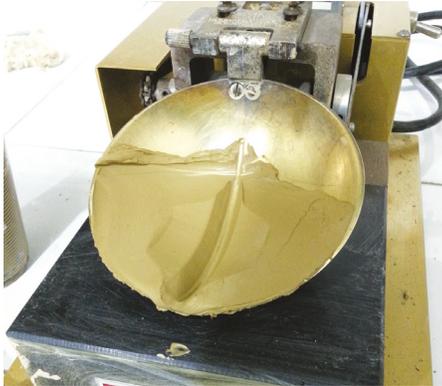


Fig. A2.- Ranura en la arcilla .
Fuente: Toma propia.



Fig. A3.- Ranura cerrada en 13 mm.
Fuente: Toma propia.

Con esa muestra de arcilla se determinó el porcentaje de humedad siguiendo los pasos siguientes: se colocó una porción de la muestra en un vidrio de reloj y se registró su peso húmedo, posteriormente se sometió a un secado de 24 horas en un horno (marca BOEKEL) a una temperatura constante de 105 ± 5 °C (Fig. A4), y en seguida se determinó su peso seco. Para esto se utilizó una balanza de precisión marca CONTROLS (Fig. A5).



Fig. A4.- Secado de muestras.
Fuente propia.

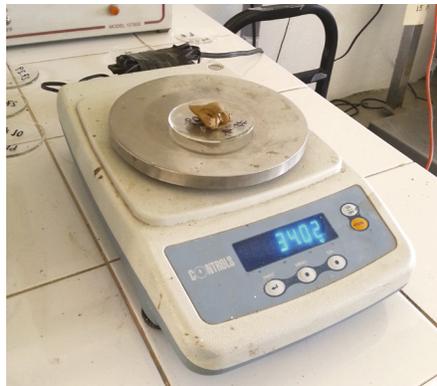


Fig. A5.- Peso de muestras.
Fuente propia.

El porcentaje de humedad se determinó con la siguiente fórmula:

$$\%w = (Mh - Ms) / (Ms - Mr) \times 100$$

en donde:

Mh= peso del vidrio de reloj más suelo húmedo (grs.)

Ms= peso del vidrio de reloj más suelo seco (grs.)

Mr= peso del vidrio de reloj (grs.)

Para las pruebas del proyecto, se utilizó el método multipunto, en donde se modifica el contenido de agua de cada muestra de ARN y ARN-CBC para obtener un contacto de trece milímetros en cuatro diferentes números de golpes comprendidos entre 10 y 35 (dos valores arriba y dos abajo de 25 golpes) para después colocar cada porción de muestra en un vidrio de reloj y determinar el contenido de humedad de cada una (Fig. A6).



Fig. A6.- Muestras para determinar LL

Fuente propia.

El límite líquido se determinó gráficamente, localizando el porcentaje de humedad en el golpe #25 mediante una curva de fluidez, en una gráfica semilogarítmica cuyas abscisas representan en escala logarítmica el número de golpes y las ordenadas en escala aritmética los respectivos contenidos de agua (% de humedad).

Determinación del límite plástico (LP).

La prueba se desarrolló de la forma siguiente:

Para cada muestra de ARN y ARN-CBC, se tomó una porción de las pruebas restantes de límite líquido (LL) y se elaboraron tres pequeñas esferas de aproximadamente 12 milímetros de diámetro (Fig. A7), que se moldearon con los dedos para que perdieran humedad y para formar un cilindro sobre la palma de la mano.



Fig. A7.- Preparación de las esferas. Fuente propia.

Cada cilindro se roló con los dedos sobre una placa de vidrio alternando el movimiento con el rolado sobre las manos, poco a poco se aplicó la presión necesaria para reducir su diámetro hasta que éste fuera uniforme en toda su longitud y ligeramente mayor a tres mm. La velocidad de rolado fue de 60 a 80 ciclos por minuto, cada ciclo comprendió un movimiento completo de la mano hacia adelante y hacia atrás, hasta volver a la posición de partida (SAHOP, 1981), para la medición de los tres mm de diámetro se utilizó como apoyo un vidrio con cilindros metálicos de 3mm de diámetro (Fig. A8).

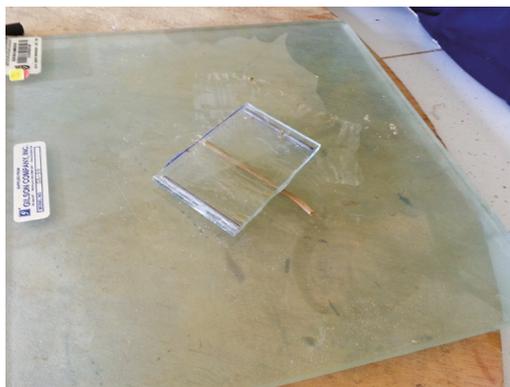


Fig. A8.- Vidrio de apoyo. Fuente: Toma propia.

Cuando el cilindro presentaba el tamaño indicado y no se rompía en varias secciones simultáneamente, su humedad en ese momento era superior a la del límite plástico, por lo tanto se juntaba para formar nuevamente una esfera manipulándola con los dedos para facilitar la pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma.

Hasta que cada cilindro se rompió en varios segmentos precisamente en el momento de alcanzar un diámetro aproximado de tres milímetros (Fig. A9), se juntaron sus segmentos en un pequeño contenedor y se pesaron, ese porcentaje de humedad corresponde al LP (Fig. A10). Para calcularlo, las muestras en el contenedor se sometieron a un secado en un horno durante 24 horas y se determinó así su peso seco para poder utilizar la fórmula de % de humedad tal como se realizó en las pruebas de LL. Las muestras que imposibilitaron la formación de un cilindro de tres milímetros se consideraron no plásticas.



Fig. A9.- Rolado de muestras.
Fuente: Toma propia.



Fig. A10.- Peso de muestras.
Fuente: Toma propia.

Se reportó como límite plástico el promedio de los porcentajes de humedad que más se aproximaron entre sí, dicho promedio se redondeó al número entero más cercano.

Determinación del índice plástico (IP).

El índice plástico de un suelo mide el intervalo de variación de la humedad dentro del cual el suelo presenta una consistencia plástica. Los límites líquido y plástico corresponden a las fronteras superior e inferior de dicha consistencia, respectivamente.

Es la diferencia aritmética entre los límites líquido y plástico, y se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$IP = LL - LP$$

En donde:

IP es el índice plástico (%)

LL es el límite líquido (%)

LP es el límite plástico (%)

Determinación de la contracción lineal (CL).

La contracción lineal de un suelo se define como la reducción en la mayor dimensión de un espécimen de forma prismática rectangular, cuando su humedad disminuye desde la correspondiente al límite líquido hasta la del límite de contracción, expresada como un porcentaje de la longitud inicial del espécimen.

Para esta prueba se utilizó el material húmedo de las pruebas del límite líquido lo más aproximado al golpe 25, lo cual se verificó empleando la copa de casa grande y cumpliendo con la condición de que la ranura cerrara en una longitud de 13 milímetros.

Con este material, se llenó un molde de prueba por cada muestra de ARN y/o ARN-CBC (Fig. A11), al cual se le aplicó previamente una capa delgada de grasa (aceite) en su interior para evitar que el material se adhiriera a sus paredes.

El llenado del molde se efectuó en tres capas, se utilizó la espátula y se tomó el molde por sus extremos golpeándolo contra una superficie dura después de la colocación de cada capa, procurando que el impacto lo recibiera siempre en toda su base para lograr la expulsión del aire contenido en la muestra colocada, se siguió golpeando hasta que ya no aparecieron burbujas en su superficie.



Fig. A11.- Relleno de moldes.
Fuente: Toma propia.

Luego se enrasó la muestra en el molde utilizando la espátula y se dejó secar en el horno BOEKEL durante 24 horas aproximadamente a una temperatura de 110°C.

Después de sacar los moldes del horno, se dejaron enfriar a temperatura ambiente (Fig. A12) y se desmoldaron.



Fig. A12.- Contracción Lineal de ARN y ARN-CBC.
Fuente: Toma propia.

Finalmente se midieron las longitudes del interior del molde y de la barra del material seco con una aproximación de 0.01 centímetros con un vernier electrónico marca ELVEC (Fig. A13).



Fig. A13.- Vernier electrónico. Fuente: Toma propia.

La Contracción lineal se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$CL = ((L_i - L_f) / L_i) \times 100$$

En donde:

CL es la Contracción Lineal aproximada al décimo más cercano (%)

L_i es la longitud inicial de la barra (longitud interior del molde) en centímetros.

L_f es la longitud media de la barra de arcilla seca, en centímetros.

APÉNDICE B

RESULTADOS DE PRUEBAS DE PLASTICIDAD (LÍMITES DE ATTERBERG) DE MEZCLAS ARN-CBC

Los resultados reportados de los límites líquidos, límites plásticos, índices de plasticidad y contracción lineal de las mezclas ARN (triturada y tamizada por la malla #200) sustituida por CBC (tamizada por la malla #200) en diferentes porcentajes (0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50%) combinadas con la mezcladora eléctrica se muestran en las Fig. B1 a B7.

LIMITES DE ATTERBERG

0% !!!

100ARN-0CBC

LIMITE LÍQUIDO

Núm. Golpes	16	26	29	36	23
Núm. Cápsula	2	2rojo	100	10	80
Peso h+cap. gr	39.42	34.01	18.3	35.96	6.96
Peso s+cap. gr	37.29	31.8	15.81	33.29	6.06
Peso cápsula gr	32.9	27.05	10.46	27.22	4.1
Agua	2.13	2.21	2.49	2.67	0.9
Peso s. seco gr	4.39	4.75	5.35	6.07	1.96
%w	48.519	46.526	46.542	43.987	45.918

L.L. 46.32 L.P. 24.79

INDICE DE PLASTICIDAD 21.53
CONTRACCION LINEAL 11.15%

LÍMITE PLÁSTICO

Núm. Cápsula	83	49	63	54
Peso h+cap. gr	11.72	24.14	23.9	18.36
Peso s+cap. gr	10.2	22.39	22.4	16.87
Peso cápsula gr	4.09	15.68	16.5	10.68
Agua	1.52	1.75	1.5	1.49
Peso s. seco gr	6.11	6.71	5.9	6.19
%w	24.877	26.080	25.424	24.071

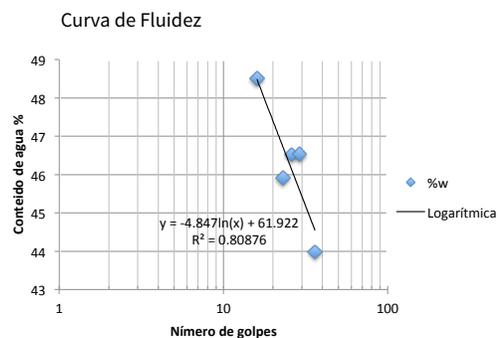


Fig. B1.- Límites de Atterberg de la mezcla control. Fuente: Propia.

5%

95ARN-5CBC

LIMITE LÍQUIDO

Núm. Golpes	20	25	30	35
Núm. Cápsula	1	6	8	7
Peso h+cap. gr	31.98	30.83	34.65	32.65
Peso s+cap. gr	30.46	29.34	32.53	31.18
Peso cápsula gr	27.29	26.26	28.06	28
Agua	1.52	1.49	2.12	1.47
Peso s. seco gr	3.17	3.08	4.47	3.18
%w	47.950	48.377	47.427	46.226

L.L. 47.72 L.P. 25.84

INDICE DE PLASTICIDAD 21.88
CONTRACCION LINEAL 10.38%

LÍMITE PLÁSTICO

Núm. Cápsula	70	72	74	75
Peso h+cap. gr	11.13	11.51	10.09	10.26
Peso s+cap. gr	9.7	9.2	8.82	9.01
Peso cápsula gr	4.08	4.1	4.08	4.07
Agua	1.43	2.31	1.27	1.25
Peso s. seco gr	5.62	5.1	4.74	4.94
%w	25.445	45.294	26.793	25.304

Curva de Fluidiez

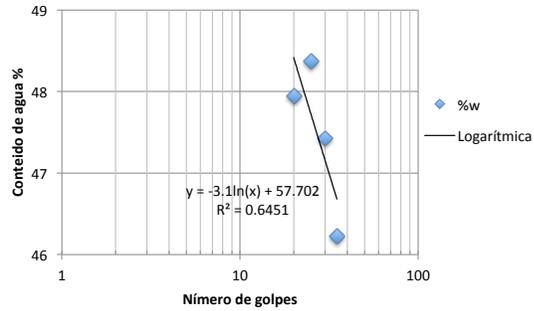


Fig. B2.- Límites de Atterberg de la mezcla 95%ARN-5%CBC. Fuente: Propia.

10% !"

90ARN-10CBC

LIMITE LÍQUIDO

Núm. Golpes	11	23	28	31
Núm. Cápsula	6	7	8	9
Peso h+cap. gr	34.19	37.42	37.72	34.65
Peso s+cap. gr	31.38	34.21	34.45	32.42
Peso cápsula gr	26.26	28	28.06	27.96
Agua	2.81	3.21	3.27	2.23
Peso s. seco gr	5.12	6.21	6.39	4.46
%w	54.883	51.691	51.174	50.000

L.L. 51.3 L.P. 26.53

INDICE DE PLASTICIDAD 24.77
CONTRACCION LINEAL 9.60%

LÍMITE PLÁSTICO

Núm. Cápsula	68	87	74	83
Peso h+cap. gr	10.7	11.61	12.07	12.72
Peso s+cap. gr	9.3	10.05	10.42	10.88
Peso cápsula gr	4.08	4.09	4.08	4.09
Agua	1.4	1.56	1.65	1.84
Peso s. seco gr	5.22	5.96	6.34	6.79
%w	26.820	26.174	26.025	27.099

Curva de Fluidiez

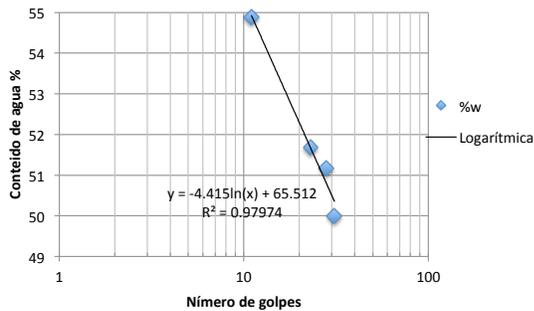


Fig. B3.- Límites de Atterberg de la mezcla 90%ARN-10%CBC. Fuente: Propia.

20% !!!
80ARN-20CBC

LÍMITE LÍQUIDO

Núm. Golpes	12	25	27	35
Núm. Cápsula	2roja(15)	3roja	4	5
Peso h+cap. gr	36.04	35.8	33.19	32.45
Peso s+cap. gr	32.71	33.03	31.03	30.78
Peso cápsula gr	27.05	27.99	27.09	27.59
Agua	3.33	2.77	2.16	1.67
Peso s. seco gr	5.66	5.04	3.94	3.19
%w	58.834	54.960	54.822	52.351

L.L. 54.78 L.P. 30.46

INDICE DE PLASTICIDAD 24.32
CONTRACCION LINEAL 8.96%

LÍMITE PLÁSTICO

Núm. Cápsula	70	71	75	80
Peso h+cap. gr	11.63	12.37	12.55	12.88
Peso s+cap. gr	9.85	10.43	10.55	10.88
Peso cápsula gr	4.08	4.1	4.07	4.1
Agua	1.78	1.94	2	2
Peso s. seco gr	5.77	6.33	6.48	6.78
%w	30.849	30.648	30.864	29.499

Curva de Fluidez

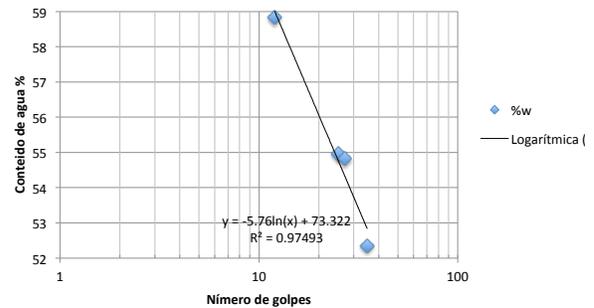


Fig. B4.- Límites de Atterberg de la mezcla 80%ARN-20%CBC. Fuente: Propia.

30% !!!
70ARN-30CBC

LÍMITE LÍQUIDO

Núm. Golpes	18	24	31	36
Núm. Cápsula	8	9	4 3Roja	
Peso h+cap. gr	36.34	36.59	33.05	35.6
Peso s+cap. gr	33.32	33.47	30.97	32.98
Peso cápsula gr	28.06	27.96	27.09	27.99
Agua	3.02	3.12	2.08	2.62
Peso s. seco gr	5.26	5.51	3.88	4.99
%w	57.414	56.624	53.608	52.505

L.L. 55.43 L.P. 40.84

INDICE DE PLASTICIDAD 14.59
CONTRACCION LINEAL 6.84%

LÍMITE PLÁSTICO

Núm. Cápsula	75	68	87	74
Peso h+cap. gr	11.24	10.73	9.93	10.06
Peso s+cap. gr	7.62	8.85	8.23	8.29
Peso cápsula gr	4.07	4.08	4.09	4.08
Agua	3.62	1.88	1.7	1.77
Peso s. seco gr	3.55	4.77	4.14	4.21
%w	101.972	39.413	41.063	42.043

Curva de Fluidez

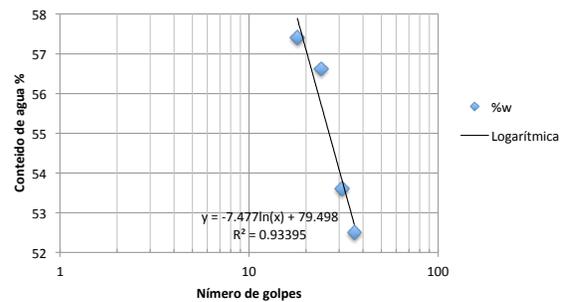


Fig. B5.- Límites de Atterberg de la mezcla 70%ARN-30%CBC. Fuente: Propia.

40% !"

60ARN-40CBC

LÍMITE LÍQUIDO

Núm. Golpes	12	25	30	35
Núm. Cápsula	5	4	3roja	9
Peso h+cap. gr	34.31	34.69	36.09	36.35
Peso s+cap. gr	31.69	31.9	33.18	33.36
Peso cápsula gr	27.59	27.09	27.99	27.96
Agua	2.62	2.79	2.91	2.99
Peso s. seco gr	4.1	4.81	5.19	5.4
%w	63.902	58.004	56.069	55.370

L.L.	57.89	L.P.	44.73
INDICE DE PLASTICIDAD	13.16		
CONTRACCION LINEAL	4.62%		

LÍMITE PLÁSTICO

Núm. Cápsula	71	84	87	68
Peso h+cap. gr	10.04	10.01	10.14	11.11
Peso s+cap. gr	8.16	8.2	8.25	8.85
Peso cápsula gr	4.1	4.09	4.09	4.08
Agua	1.88	1.81	1.89	2.26
Peso s. seco gr	4.06	4.11	4.16	4.77
%w	46.305	44.039	45.433	47.379

Curva de Fluidez

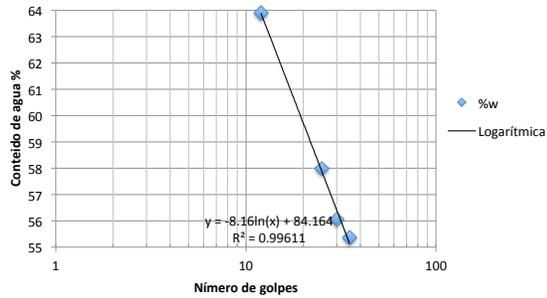


Fig. B6.- Límites de Atterberg de la mezcla 60%ARN-40%CBC. Fuente: Propia.

50% !"

50ARN-50CBC

LÍMITE LÍQUIDO

Núm. Golpes	11	15
Núm. Cápsula	1	2
Peso h+cap. gr	34.89	38.58
Peso s+cap. gr	31.7	36.26
Peso cápsula gr	27.99	32.9
Agua	3.19	2.32
Peso s. seco gr	3.71	3.36
%w	85.984	69.048

L.L.	L.P.
INDICE DE PLASTICIDAD	0
CONTRACCION LINEAL	4.62%

LÍMITE PLÁSTICO

Núm. Cápsula	Arcilla no plástica se imposibilita la elaboración de los cilindros
Peso h+cap. gr	
Peso s+cap. gr	
Peso cápsula gr	
Agua	
Peso s. seco gr	
%w	

Curva de Fluidez

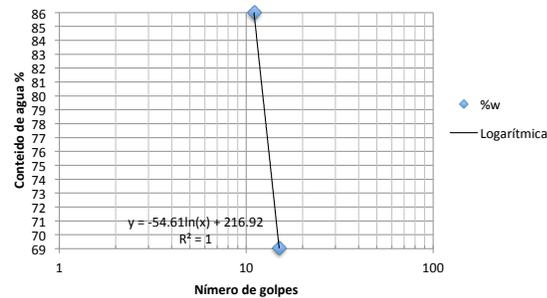


Fig. B7.- Límites de Atterberg de la mezcla 50%ARN-50%CBC. Fuente: Propia.

APÉNDICE C

ELABORACIÓN DE PIEZAS CERÁMICAS

Como primer paso se elaboró la pasta cerámica. Para la mezcla de polvos ARN-CBC en un 20-80%, respectivamente, se utilizó una mezcladora eléctrica, se saturó con el 42.62% de agua en peso durante 24 horas, y posteriormente se amasó.

Una vez obtenida la arcilla en estado plástico, se propuso una primer pieza cerámica y se procedió a su elaboración artesanal. Se realizaron bocetos del decorado de la baldosa: la idea surgió a partir de la espiral áurea, la cual una vez trazada funcionó como base para la colocación de los elementos geométricos para formar el relieve de la baldosa cerámica (Fig. C1), después de definir la forma final de la pieza, se realizó un modelo 3D en un software de diseño asistido por computadora y con ayuda de una máquina de control numérico se elaboró dicho modelo en madera, el cual se utilizó para crear un molde de yeso cerámico (Fig. C2).

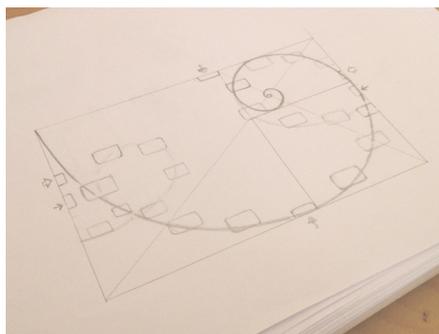


Fig. C1.- Idea inicial en boceto.
Fuente: Toma propia.

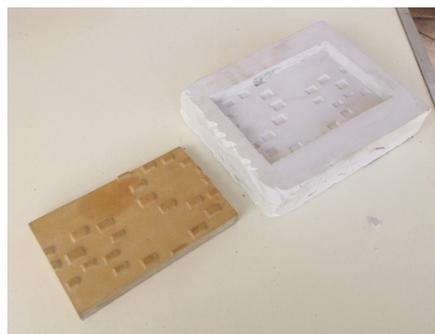


Fig. C2.- Modelo en madera y molde de yeso. Fuente: Toma propia.

Con el molde de yeso se obtuvieron tres piezas en estado plástico (Fig.C3) y después de asegurar un secado de forma gradual, se sinterizaron a 900°C debido a que esa temperatura le proporciona a la pieza un excelente control dimensional de acuerdo a los resultados, y fué el valor comparado con las normas establecidas.

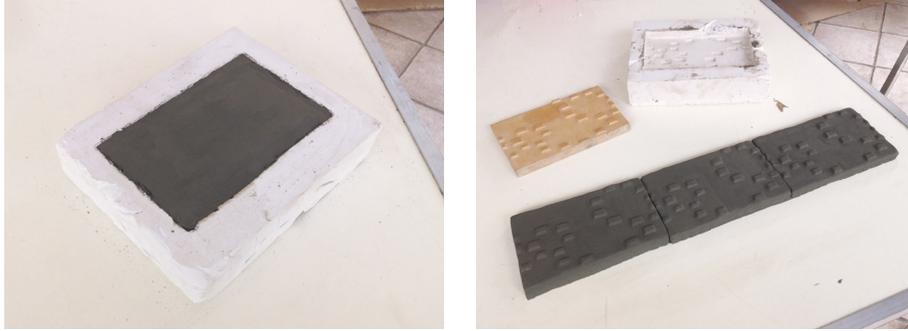


Fig. C3.- Uso del molde de yeso para fabricar baldosas. Fuente: Toma Propia.

Se presenta la oportunidad a futuro de vidriarla de acuerdo con Askeland (1998) quien menciona que cuando las piezas se sinterizan a temperaturas relativamente bajas, presentan poca vitrificación (la porosidad es muy alta e interconectada, y es posible la presencia de fugas) y en consecuencia los productos cerámicos deben recubrirse con un vidriado impermeable.

En la Fig. C4 se aprecia el color de las baldosas antes del secado y del sinterizado.



Fig. C4.- Baldosa antes del secado y del sinterizado. Fuente: Propia.

La segunda pieza, un elemento ornamental, en este caso una pantalla cerámica de lámpara fué elaborada artesanalmente con la técnica de modelado. La idea surgió de las grecas de las ruinas del estado de Oaxaca, a partir de formas básicas y repeticiones se hizo una trama de figuras que fueron parte de la decoración de la pieza. Algunos bocetos realizados se muestran en la Fig. C5. En la Fig. C6 se muestra una placa modelada formando una especie de cilindro vertical que corresponde al cuerpo de la pieza.

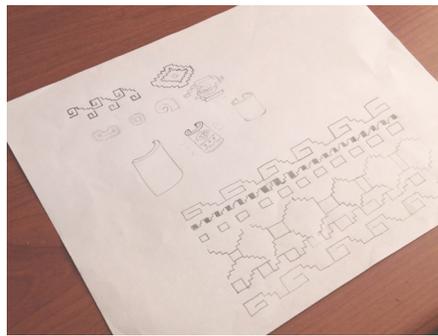


Fig. C5- Elaboración bocetos.
Fuente: Toma propia.



Fig. C6- Elaboración del cilindro.
Fuente: Toma propia.

Los detalles de la pieza fueron realizados con una técnica de decoración denominada excisión la cual consiste en retirar partes de la materia de un objeto de cerámica de pasta firme, arrancándola o recortándola, produciendo una decoración perforada. Se utilizaron herramientas básicas de cerámica (gubias y otros elementos cortantes, esponjas, etc.) (Fig. C7).



Fig. C7.- Excisión de la pantalla de lámpara.
Fuente: Toma propia.

Se aseguró que el secado inicial de la pieza se realizara de forma gradual durante 5 días a temperatura ambiente evitando el contacto con las corrientes de aire. La Fig. C8 muestra la pieza antes del sinterizado.



Fig. C8.- Pantalla cerámica antes del sinterizado. Fuente: Propia.

Posteriormente se sinterizó a 1080°C con la intención de obtener una mayor resistencia como la observada en la fase experimental.

APÉNDICE D

PRUEBA PRELIMINAR

Se realizaron una serie de pruebas preliminares para las sinterizaciones en diferentes hornos a temperaturas de 1000, 1020, 1080 y 1280°C, después del sinterizado la mayoría de las probetas obtuvieron un color rojizo característico, sin embargo las sinterizadas a 1280°C alcanzaron su fase líquida y obtuvieron un color negro brillante el cual después del enfriado, presentaron una textura lisa y pulimentada aunque también se presentaron rastros de burbujas (Fig. D1).



Fig. D1.- ARN-CBC en un recipiente de cerámica de alta temperatura sinterizadas a 1280°C. Fuente: Propia.