



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL, UNIDAD OAXACA

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de
Recursos Naturales

INGENIERÍA

*Efecto de la incorporación de residuos industriales en la
resistencia y durabilidad de ladrillos de arcilla*

Tesis que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias

Presenta:

Olivia Teresa Maza Ignacio

Directores de tesis:

Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero

Dr. Jaime Guerrero Paz



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca siendo las 9:00 horas del día 23 del mes de noviembre del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR OAXACA para examinar la tesis titulada:
Efecto de la incorporación de residuos industriales en la resistencia y durabilidad de ladrillos de arcilla.

Presentada por el alumno:

Maza Ignacio
Apellido paterno Apellido materno
Nombre(s) Olivia Teresa

Con registro:

B	1	5	0	5	0	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

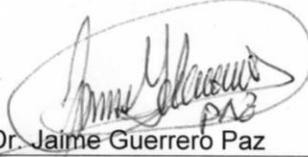
Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

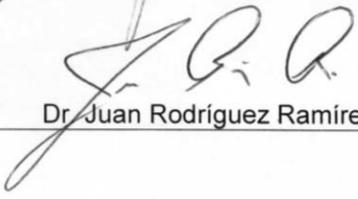
LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis


Dr. Víctor Guillermo Jiménez
Quero

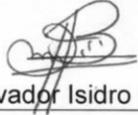

Dr. Jaime Guerrero Paz


Dra. Delia Soto Castro


Dr. Juan Rodríguez Ramírez


Dr. Pedro Montes García

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 1 del mes de diciembre del año 2017, el (la) que suscribe MAZA IGNACIO OLIVIA TERESA alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES, con número de registro B150506, adscrito(a) al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca**, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) **Dres. Víctor Guillermo Jiménez Quero y Jaime Guerrero Paz** y cede los derechos del trabajo titulado **“Efecto de la incorporación de residuos industriales en la resistencia y durabilidad de ladrillos de arcilla”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones posgradoox@hotmail.com ó olimaza24@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

MAZA IGNACIO OLIVIA TERESA
Nombre y firma del alumno(a)



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

RESUMEN

Se evaluó el efecto de la sustitución parcial de arcilla (AR) por ceniza de bagazo de caña (CBC), ceniza volante (CV) y humo de sílice (HS) en la resistencia mecánica y durabilidad de ladrillos. Se elaboraron mezclas binarias sustituyendo AR por 20 y 40% de CBC, CV y HS. Además, se elaboraron mezclas ternarias y en ellas la sustitución de AR fue de 20 y 40% por CBC y de 10% por CV y HS. Se evaluó la plasticidad de las mezclas por medio de los límites de Atterberg. Con las mezclas binarias se elaboraron ladrillos y se cocieron a 900 y 1000°C; los ladrillos elaborados con las mezclas ternarias fueron cocidos a 900, 1000 y 1100°C. La resistencia mecánica de los ladrillos fue evaluada por medio de pruebas de resistencia a flexión y a compresión; para evaluar su durabilidad se realizaron pruebas de densidad aparente, porosidad aparente y de absorción de agua. Se estudió la microestructura de los ladrillos y se cuantificó la fase amorfa mediante DRX; también se obtuvieron micrografías con MEB. Los resultados mostraron que la CBC influyó negativamente en el índice plástico de las mezclas; sin embargo, con la adición de CV y HS se obtuvieron índices plásticos similares al de la mezcla control. En los ladrillos cocidos, la adición de CBC redujo su resistencia mecánica e incrementó su porosidad aparente, sin embargo, estos efectos negativos se eliminaron con la adición de CV y HS. El incremento de la temperatura de cocción a 1000°C incrementó la resistencia mecánica de los ladrillos y redujo su porosidad aparente. Los estudios de DRX mostraron que en los ladrillos el incremento de la temperatura de cocción propició un aumento en el porcentaje de fase amorfa, lo cual indica una mayor cantidad de fase líquida de sinterización durante la cocción. El incremento en el porcentaje de fase amorfa se relacionó con un aumento en la densidad aparente de los ladrillos. Sin embargo, la densidad de los ladrillos elaborados con las mezclas evaluadas fue menor que la densidad del control. Con MEB fue posible confirmar que el incremento de la temperatura redujo la interconectividad entre poros. De esta manera, los ladrillos elaborados con 70% de AR, 20% de CBC y 10% de HS, cocidos a 1000°C, fueron 19.76% más ligeros y 19.22% más resistentes a esfuerzos de compresión.

ABSTRACT

The effect of partial substitution of clay by sugarcane bagasse ash (SBA), fly ash (FA) and silica fume (SF) in the mechanical strength and durability of bricks was evaluated. Binary mixtures of clay with additions of 20% or 40% of CBC, CV and HS were prepared. Besides, ternary mixtures of clay with additions of 20% or 40% of SBA and 10% of CV or HS were prepared. The plasticity of the mixtures was evaluated through the Atterberg limits. The bricks made with the binary mixtures were fired at 900 and 1000°C; the bricks made with the ternary mixtures were fired at 900, 1000 and 1100°C. The mechanical strength of the bricks was evaluated by means of flexural and compressive strength tests; to evaluate their durability, tests of bulk density, apparent porosity and water absorption were carried out. The bricks microstructure was studied and the amorphous phase was quantified by XRD; micrographs with SEM were also obtained. The results showed that the SBA had negative effects on the plastic index of the mixtures; however, with the addition of CV and HS, plasticity indices similar to the control mixture were obtained. In the fired bricks, the addition of SBA reduced their mechanical strength and increased their apparent porosity; however, these negative effects were eliminated with the addition of CV and HS. The increase in the firing temperature at 1000°C increased the mechanical strength of the bricks and reduced their apparent porosity. The XRD studies showed that in the bricks, the increase in the firing temperature led to a rise in the percentage of amorphous phase, which indicates a higher amount of liquid sintering phase during firing. The increase in the percentage of amorphous phase was related to a rise in the bulk density of the bricks. However, the bulk density of the bricks made with the mixtures evaluated was lower than the density of the control. With SEM it was possible to confirm that the increase in temperature reduced interconnectivity between pores. In this way, bricks made with 70% clay, 20% SBA and 10% SF, fired at 1000 ° C, were 19.76% lighter and 19.22% more resistant to compressive strength.

DEDICATORIA

*A mi padre:
Andrés Guillermo Maza Palacios †*

*Cuántas veces dije “Mi papá hace ladrillos, los ocupan para aparente”,
y al mismo tiempo pensaba: los ladrillos de mi papá son los mejores...*

Porque sin lugar a dudas, este trabajo habla de ti.

*A mi madre y hermanos:
Teresa Ignacio Cruz
Alberto, Nubia, Araceli, Tere, Memo*

Porque tratándose o no de ladrillos, siempre hemos estado juntos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar los estudios de Maestría durante el periodo Septiembre 2015 a Julio 2017.

A la Coordinación de Cooperación Académica y a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional por otorgarme la beca de movilidad nacional y la beca tesis respectivamente.

A la Secretaría de Investigación y Posgrado, por la Beca Institucional para la Formación de Investigadores (BEIFI) otorgada durante el periodo Septiembre 2015 a Diciembre 2017.

A la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas (COFFA) del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo económico para participar en congresos nacionales.

Al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo económico otorgado mediante los proyectos de investigación SIP 20151128: Adición de desechos Industriales a una matriz arcillosa para la elaboración de ladrillos sinterizados, 20161629: Ceniza de bagazo de caña como constituyente de materiales cerámicos artesanales, 20171389: Efecto del tiempo de curado en la resistencia a compresión y durabilidad de morteros ecológicos.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca por las facilidades que me brindaron para la elaboración del presente trabajo y durante la maestría.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) por abrirme sus puertas para realizar mi estancia de Investigación en el Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales (AACTyM) del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI).

Al Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por las facilidades que me otorgaron para la realización de estudios de MEB y DRX.

Al Instituto de Capacitación y Productividad para el Trabajo del Estado de Oaxaca (ICAPET) Plantel 085, por facilitarme sus instalaciones para la elaboración y cocción de los ladrillos de arcilla.

A mis directores de tesis: Al Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero y al Dr. Jaime Guerrero Paz, por darme la oportunidad de colaborar en este proyecto, por compartirme sus conocimientos y por todo el apoyo brindado.

A la comisión revisora y jurado de examen de grado: Dr. Pedro Montes García, Dr. Juan Rodríguez Ramírez y Dra. Delia Soto Castro, por todas sus recomendaciones que sin duda contribuyeron a mejorar la calidad de esta investigación.

Al Dr. Pedro Montes García por su apoyo y orientación durante la realización de este trabajo, sin duda sus consejos fueron de gran importancia.

Al M. en C. Margarito Ortiz Guzmán por su apoyo en el laboratorio de materiales, gracias por compartirme sus conocimientos y brindarme su amistad.

Al Dr. Fidel Pérez Moreno por su apoyo durante el análisis de TGA. Al Dr. Jaime Guerrero Paz, a la Ing. Delin Hernández y la Ing. Jacqueline Reyes por su apoyo durante la experimentación, pero sobre todo por brindarme su amistad y por hacerme sentir como en casa durante mi estancia en la UAEH.

Al Lic. Fernando Melu Guzmán por la gestión para la vinculación entre el ICAPET y el CIIDIR, así como al C. Juan Ruiz Zárate, responsable del taller de Cerámica del CAPET Oaxaca, por su apoyo en el proceso de elaboración y cocción de los ladrillos.

A mi familia, por apoyarme y darme ánimos en los momentos difíciles. Gracias por creer en mí.

A mis compañeros Irene, Dani, Bety, Yhonathan, Floriberto, Marco, David y Andy, por brindarme su amistad y por ser mis compañeros en esta travesía.

Gracias Araceli y Jeanett por impulsarme a estudiar la maestría.

ÍNDICE

Lista de tablas.....	5
Lista de figuras.....	5
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.1 Introducción.....	8
1.2 Planteamiento del problema.....	9
1.3 Antecedentes	10
1.4 Justificación.....	14
1.5 Objetivo general	17
1.6 Objetivos específicos	17
1.7 Hipótesis	17
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	18
2.1 Las arcillas y su uso en la elaboración de materiales de construcción a través del tiempo	18
2.2 Fenómenos físicos y químicos presentes durante la cocción de materiales base arcilla.....	20
2.3 Uso de residuos industriales en la producción de materiales base arcilla ...	22
2.3.1 Ceniza de bagazo de caña	23
2.3.2 Ceniza volante	23
2.3.3 Humo de sílice	24
2.4 Técnicas para la caracterización física y química de arcillas y residuos industriales.....	25
2.4.1 Análisis químico.....	25
2.4.2 Difracción de rayos X (DRX).....	25
2.4.3 DRX: Cuantificación de fases	27
2.4.4 Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	29
2.5 Plasticidad de las arcillas	31
2.6 Resistencia mecánica de ladrillos	32
2.6.1 Resistencia a la flexión	32
2.6.2 Resistencia a la compresión	33
2.7 Factores que influyen en la durabilidad de los ladrillos	34
2.7.1 Porosidad.....	34
2.7.2 Absorción de agua.....	35
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	38
3.1 Diseño experimental	38
3.2 Materiales y su caracterización	42
3.2.1 Tratamiento de materiales	42
3.2.2 Análisis químico.....	44
3.2.3 DRX en AR, CBC, CV y HS	44
3.2.4 Cuantificación de fases cristalinas y fase amorfa en CBC, CV y HS	44
3.2.5 Morfología de partículas de AR, CBC, CV y HS	46
3.2.6 TGA en AR, CBC, CV y HS	46
3.2.7 Clasificación de la arcilla en el SUCS.....	46
3.3 Diseño de mezclas binarias y ternarias.....	48
3.4 Caracterización de mezclas en estado plástico	49
3.5 Elaboración de ladrillos	53

3.6	Determinación del Índice de calentamiento	59
3.7	Contracción Lineal de ladrillos por secado y cocción	59
3.8	Ensayo de resistencia a la flexión	60
3.9	Ensayo de resistencia a compresión.....	61
3.9.1	Ensayo de resistencia a compresión para mezclas binarias.....	61
3.9.2	Ensayo de resistencia a compresión para mezclas ternarias	62
3.10	Prueba de velocidad inicial de absorción de agua	64
3.11	Densidad aparente y porosidad aparente	64
3.12	Absorción de agua por inmersión durante 24 horas.....	65
3.13	Absorción de agua por hervido durante 5 horas	67
3.14	DRX en ladrillos: cuantificación de fase amorfa y mineralogía	67
3.15	MEB en ladrillos	69
	CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1	Caracterización de los materiales	71
4.1.1	Análisis químico	71
4.1.2	DRX en AR, CBC, CV y HS	72
4.1.3	Cuantificación de fases cristalinas y fase amorfa en CBC, CV y HS	75
4.1.4	Morfología de partículas de AR, CBC, CV y HS	77
4.1.5	TGA en AR, CBC, CV y HS	78
4.1.6	Clasificación de la arcilla en el SUCS.....	80
4.2	Caracterización de mezclas binarias en estado plástico.....	80
4.3	Caracterización de ladrillos elaborados con mezclas binarias	82
4.3.1	Resistencia a la flexión	83
4.3.2	Resistencia a compresión.....	84
4.3.3	Velocidad inicial de absorción de agua.....	85
4.4	Caracterización de mezclas ternarias en estado plástico	86
4.5	Caracterización de ladrillos elaborados con mezclas ternarias.....	88
4.5.1	Determinación del Índice de calentamiento	88
4.5.2	Contracción Lineal de ladrillos por secado y cocción	90
4.5.3	Resistencia a la flexión	92
4.5.4	Resistencia a compresión.....	93
4.5.5	Densidad y porosidad aparente	96
4.5.6	Absorción de agua por inmersión durante 24 horas	98
4.5.7	Absorción de agua por hervido durante 5 horas	99
4.5.8	DRX en ladrillos: cuantificación de fase amorfa y mineralogía	100
4.5.9	MEB en ladrillos	103
	CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	111
	BIBLIOGRAFÍA	112

Lista de tablas

Tabla 1. Composición química de diferentes arcillas (% en peso). (X. Lingling et. al, 2004; L. Barbieri et al, 2013; L. Pérez, et al 2012)	18
Tabla 2. Abundancia de los principales elementos en la corteza terrestre. (E. Mari, 1998)	19
Tabla 3. Tipos de sinterizado (E. Mari, 1998).....	22
Tabla 4. Diseño experimental para la investigación	39
Tabla 5. Composición de mezclas binarias (% de sustitución en peso).	48
Tabla 6. Composición de mezclas ternarias (% de sustitución en peso).....	49
Tabla 7. Composición química de la arcilla y residuos industriales.....	71
Tabla 8. Contenido de fase amorfa en residuos industriales.....	76
Tabla 9. Velocidad inicial de absorción de agua de ladrillos elaborados con mezclas binarias.....	85
Tabla 10. Fases minerales identificadas en ladrillos ternarios	102

Lista de figuras

Fig. 1 Diagrama de bloques de un difractor de Rayos X (Alavéz, 2012)	26
Fig. 2 Disgregado y secado de la arcilla al sol y en horno eléctrico.	42
Fig. 3 Molienda de la arcilla.....	43
Fig. 4 Preparación de muestra de CBC con alúmina A13 para determinación del contenido de fase amorfa a partir de patrones de DRX.	45
Fig. 5 Equipo TGA Mettler Toledo modelo SDTA8551e	46
Fig. 6 Equipo empleado en la determinación de los límites de Atterberg.....	47
Fig. 7 Mezclado de materiales en seco. a) Mezclado mecánico, b) Material mezclado.....	50
Fig. 8 Determinación del límite líquido. a) Colocación de la muestra en la Copa de Casagrande b) Medición de la unión del material en la copa de Casagrande.	50
Fig. 9 Determinación del Límite Plástico. a) Formación y fragmentación de los cilindros, b) Pesaje de la muestra seca.....	52
Fig. 10 Determinación de la contracción lineal. a) Enrasado del molde, b) Medición de la longitud de la barra seca.....	52
Fig. 11 Proceso de mezclado a) de materiales en seco y b) adición de agua	54
Fig. 12 Ladrillos verdes elaborados con mezclas binarias.	55
Fig. 13 Cocción de ladrillos. a) Ladrillos dentro del horno encendido, b) Ladrillos cocidos.....	56
Fig. 14 Elaboración de ladrillos a partir de mezclas ternarias. a) Apisonamiento de la primera capa de material, b) Acabado de la superficie del ladrillo.....	56
Fig. 15 Ladrillos verdes elaborados con la mezcla control y mezclas ternarias. ...	57
Fig. 16 Proceso de secado de ladrillos elaborados con mezclas ternarias.	57
Fig. 17 Acomodo aleatorio de los ladrillos verdes al interior del horno.....	58

Fig. 18 Ladrillos cocidos elaborados con mezclas ternarias.	59
Fig. 19 Prueba de flexión. a) Colocación del anillo de carga, c) Ladrillo con falla por flexión.	61
Fig. 20 Prueba de resistencia a compresión. a) Aplicación de carga, b) Falla por compresión.....	62
Fig. 21 Proceso de cabeceo de ladrillos para ensayo de resistencia a compresión.	63
Fig. 22 Desarrollo de ensayo de resistencia a compresión. a) Ladrillos cabeceados, b) Colocación del espécimen en la máquina Instron, c) Ladrillo colapsado.	63
Fig. 23 Prueba de velocidad inicial de absorción de agua. a) Especimen absorbiendo agua, b) Registro de pesos.	64
Fig. 24 Hervido y pesaje de especímenes para determinar porosidad y densidad	65
Fig. 25 Pesaje de ladrillos secos para la pruebas de absorción.....	66
Fig. 26 Ensayo de absorción por inmersión durante 24 horas	66
Fig. 27 Ensayo de absorción por <i>hervido</i> durante 5 horas	67
Fig. 28 Proceso de molienda de ladrillos para DRX, a) Molienda a mano con mortero, b) Colocación de polvos en molino de bolas, c) Molino de bolas en operación, d) Recuperación de los polvos.	68
Fig. 29 Preparación de muestra de polvo de ladrillo cocido para análisis de DRX. a) Materiales, b) mezcla homogénea.	69
Fig. 30 Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL modelo JSM-6610LV equipado con analizador EDS marca OXFORD, modelo X-MAX.....	70
Fig. 31 Patrón de DRX de AR	73
Fig. 32 Patrón de DRX de CBC.....	73
Fig. 33 Patrón de DRX de CV	74
Fig. 34 Patrón de DRX de HS	75
Fig. 35 Micrografías de materiales en polvo a) AR, b) CBC, c) CV, d) HS.....	77
Fig. 36 Curvas TGA de las materias primas.....	78
Fig. 37 Apariencia de las muestras de AR, CBC, CV y HS después de su análisis por TGA.....	79
Fig. 38 Límites de Atterberg de mezclas binarias.....	81
Fig. 39 Contracción lineal de mezclas binarias.	82
Fig. 40 Modulo de ruptura de ladrillos elaborados con mezclas binarias	83
Fig. 41 Resistencia a compresión de ladrillos elaborados con mezclas binarias ..	84
Fig. 42 Límites de Atterberg de mezclas ternarias	86
Fig. 43 Contracción lineal de mezclas ternarias.....	87
Fig. 44 Perfiles de temperatura durante la cocción	88
Fig. 45 Índice de calentamiento.....	89
Fig. 46 Contracción lineal de ladrillos verdes elaborados con mezclas ternarias..	90
Fig. 47 Contracción lineal acumulada después de la cocción de ladrillos elaborados con mezclas ternarias.	91
Fig. 48 Contracción lineal de ladrillos cocidos elaborados con mezclas ternarias	91
Fig. 49 Módulo de ruptura de ladrillos elaborados con mezclas ternarias	92
Fig. 50 Resistencia a compresión de ladrillos elaborados con mezclas ternarias .	94
Fig. 51 Densidad aparente de ladrillos elaborados con mezclas ternarias.....	96
Fig. 52 Porosidad aparente de ladrillos elaborados con mezclas ternarias.....	97

Fig. 53 Absorción de agua por inmersión durante 24 de ladrillos elaborados con mezclas ternarias	98
Fig. 54 Absorción de agua por hervido durante 5 horas de ladrillos elaborados con mezclas ternarias	99
Fig. 55 Contenido de fase amorfa en ladrillos cocidos elaborados con mezclas ternarias	100
Fig. 56 Micrografías de MEB de la mezcla 100AR	105
Fig. 57 Micrografías de MEB de la mezcla 20CBC-CV,	106
Fig. 58 Micrografías de MEB de la mezcla 40CBC-CV,	107
Fig. 59 Evolución en la densificación de la matriz arcillosa. Mezcla 40CBC-CV.	108
Fig. 60 Micrografías de MEB de la mezcla 20CBC-HS,	109
Fig. 61 Micrografías de MEB de la mezcla 40CBC-HS,	110

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

El presente capítulo contiene una breve introducción que plantea aspectos sobre la producción actual de los ladrillos elaborados a base de arcilla cocida. También contiene el planteamiento del problema, antecedentes y justificación de esta investigación. Así como el objetivo general, los objetivos específicos y las hipótesis.

1.1 Introducción

Uno de los materiales de construcción más empleados son los ladrillos de arcilla roja, así lo menciona Muñoz et al. (2016). En su artículo señala que por cada 1,500 millones de ladrillos producidos más de 4,000 millones de toneladas de arcilla son extraídas y procesadas en más de 100, 000 hornos de gran escala. Menciona también que por cada mil ladrillos producidos, los hornos emiten en promedio entre 6.35 y 12.3 Kg de CO y entre 0.52 y 5.9 kg de SO₂.

El impacto al ambiente generado por la producción de ladrillos debe reducirse con el objetivo de promover un desarrollo de la construcción más sostenible. Este objetivo podría alcanzarse implementando tratamientos en las emisiones de gases y con la optimización del proceso de fabricación.

Actualmente algunas investigaciones han planteado otros tipos de medidas para reducir el impacto ambiental producido por la fabricación de ladrillos. Investigadores como Kazmi et al. (2016), Souza et al. (2011) y Dana et al. (2004) plantean el reemplazo de porcentajes de arcilla por residuos generados en diferentes procesos de producción. De esta forma sería posible por un lado, la reducción del impacto ambiental a través de la eliminación de residuos y, por otro, la reducción del impacto por la extracción de los recursos naturales (Muñoz et al., 2016).

Con la finalidad de contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías para reducir los efectos negativos de la industria ladrillera, esta investigación planteó la elaboración de ladrillos sustituyendo parcialmente la arcilla por tres residuos industriales: ceniza de bagazo de caña, ceniza volante y humo de sílice. En este proyecto se evaluaron los efectos de la sustitución de la arcilla por residuos en las propiedades plásticas de mezclas binarias y ternarias. También se evaluó la influencia de los residuos

industriales y del incremento de la temperatura de cocción en las propiedades de resistencia y durabilidad de los ladrillos elaborados con las mezclas binarias y ternarias.

1.2 Planteamiento del problema

El incremento de la demanda de vivienda, y por lo tanto de materiales para su construcción es un problema actual que tiene implicaciones graves en el medio ambiente, tales como el alto consumo de recursos naturales, la demanda de energía y la generación de residuos contaminantes.

Los ladrillos cocidos elaborados con arcilla son materiales de construcción ampliamente usados. Esto se debe principalmente a su proceso simple de fabricación, la disponibilidad y bajo costo de sus materias primas. Las propiedades de refractariedad y resistencia mecánica que adquieren después de su cocción hacen de los ladrillos un material adecuado (Viruthagiri et al., 2015).

La durabilidad de los ladrillos es una propiedad que puede mermar su eficiencia como material de construcción. Esta propiedad se relaciona directamente con su resistencia mecánica y frecuentemente se ve comprometida por el ataque de agentes agresivos provenientes de su entorno. Altos valores de poros interconectados permiten el ingreso de sustancias agresivas como el agua que pueden causar esfuerzos al interior del material y afectar su resistencia.

Otro efecto que reduce la viabilidad del uso de los ladrillos es la gran cantidad de arcilla empleada en su elaboración, la cual forma parte de importantes extensiones de tierra para cultivo (Lingling et. al, 2004). El empleo de residuos industriales como materiales alternativos en la elaboración de ladrillos es una opción para contrarrestar el problema de la explotación de bancos de arcilla y también la contaminación que estos residuos ocasionan.

Algunos residuos generados por la industria generalmente no tienen una disposición adecuada, tal es el caso de la ceniza de bagazo de caña. Para reducir los efectos negativos de estos residuos en el ambiente es necesario implementar la ciencia y la tecnología como herramientas para recuperar los residuos en productos nuevos.

Por lo anterior, es importante desarrollar nuevas tecnologías y caracterizar materias primas alternativas que mejoren las propiedades de los ladrillos, tales como su resistencia mecánica y durabilidad; al mismo tiempo que los hagan amigables con el medio ambiente.

1.3 Antecedentes

El ladrillo es un material de construcción usado desde épocas antiguas. En la región de Mesopotamia se utilizó desde el tercer milenio a.C. (Cultrone y Sebastián, 2009). Surgió en aquellos países donde faltaba la piedra y abundaba la arcilla. Los primeros ladrillos se elaboraban con pasta de arcilla secada al sol, podían contener arena y paja. Posteriormente también se obtuvieron ladrillos a base de pasta cocida al fuego.

Los egipcios elaboraron ladrillos con variadas formas y aspectos para decorar muros y pisos. Los asirios, babilonios y griegos crearon una técnica propia, pero los romanos fueron quienes establecieron la producción de ladrillos como una actividad industrial debido a la necesidad de abastecer la construcción en sus grandes ciudades (Reverté, 1979).

La arcilla ha sido la principal materia prima en la elaboración de los ladrillos, sin embargo, recientemente algunos investigadores en diferentes países se han dedicado al estudio de los efectos y consecuencias de la incorporación de residuos industriales, agrícolas y urbanos en la elaboración de este material de construcción. Su objetivo ha sido evaluar las características de los residuos y determinar si pueden reemplazar la materia prima usada en la fabricación de los ladrillos. De esta manera pretenden contribuir a reducir la explotación de bancos de materiales cerámicos tradicionales, resolver problemas de almacenamiento de algunos residuos industriales, así como crear materiales de construcción ligeros y amigables con el ambiente (Karamanova et al., 2011; Raut et al., 2011).

El desarrollo de este tipo de investigaciones en la producción de ladrillos se debe a que las altas temperatura de cocción permiten transformar los residuos y

recuperarlos en nuevos productos (Muñoz et al., 2014). De esta forma puede darse a estos residuos una disposición final adecuada.

La incorporación de residuos también ha permitido ahorrar energía en el proceso de fabricación debido a que la auto-combustión dentro de la matriz de arcilla reduce la energía necesaria para la cocción de ladrillos (Barbieri et al., 2013). En algunos casos por su composición mineralógica han participado en la formación de nuevos compuestos que incrementan la resistencia mecánica y durabilidad de los ladrillos.

A continuación se mencionan algunos resultados de investigaciones recientes referentes al objeto de estudio de este trabajo.

En el año 2011 Souza y sus colaboradores estudiaron la elaboración de ladrillos con mezclas de arcilla y ceniza de bagazo de caña. La ceniza que emplearon fue tamizada para obtener un tamaño menor a $88\mu\text{m}$. Elaboraron mezclas de arcilla y 0, 20, 40 y 60% en peso de ceniza de bagazo de caña (CBC). Las probetas elaboradas fueron cocidas a 500, 800, 900, 1000, 1100 y 1200°C en un horno eléctrico.

Determinaron que el incremento en el uso de esta ceniza redujo la resistencia a la flexión de las probetas. Recomendaron el uso de 20% de CBC para que los ladrillos cumplan con las normas brasileñas. Observaron que con este contenido de CBC las probetas cocidas a 1100°C tuvieron una resistencia a la flexión alrededor de los 18 MPa, mientras que las que se cocieron a 1200°C alcanzaron una resistencia por encima de 30 MPa. Las probetas control tuvieron una resistencia de aproximadamente 30 y 45 MPa respectivamente.

La ceniza de bagazo de caña de azúcar en la elaboración de cerámica roja fue estudiada por Faria y Holanda (2013). Los investigadores elaboraron muestras que contenían 0, 5, 10, 15 y 20% en peso de ceniza de bagazo de caña. Las temperaturas de cocción empleadas fueron 700, 800, 900, 1000 y 1100°C.

Observaron que la resistencia a tensión de los especímenes se vio afectada con la adición de la ceniza. El mejor desempeño lo mostraron los especímenes elaborados

con 10% de ceniza y cocidos a 1100°C. Con respecto al control resistieron aproximadamente 3MPa menos y fueron aproximadamente 13% más porosos.

Kazmi et al. (2016), estudiaron la mezcla de arcilla con 5% de ceniza de bagazo de caña y 5% de ceniza de cáscara de arroz en una mezcla ternaria. Los especímenes fueron moldeados manualmente y cocidos en un horno tradicional, la temperatura de cocción no fue especificada. Después de la cocción los ladrillos fueron 39% menos resistentes a esfuerzos de compresión, sin embargo cumplían con la resistencia mínima requerida en las normas de construcción de Pakistán (5 MPa). Este resultado fue relacionado con el incremento en la porosidad después de incorporar las cenizas.

Dana et al. (2004) realizaron estudios para reemplazar cuarzo por ceniza volante en un sistema ternario de caolín-cuarzo-feldespato empleado para fabricar productos cerámicos. Prepararon muestras de 60x14x5 mm y las cocieron a 1150, 1200, 1250 y 1300 °C. Determinaron que la ceniza volante contenía 23.8% de cuarzo y 18% de mullita. El cuarzo aportó resistencia ante la aparición de fisuras y a la deformación durante el secado y la cocción mientras que la mullita ayudó a incrementar la resistencia de los especímenes cocidos.

Con una temperatura de cocción de 1150°C obtuvieron los siguientes resultados: la mezcla control mostró una resistencia a la flexión de 25 MPa, una densidad de 2.02 g/cm³ y porosidad aparente de 22%. Con 15% de ceniza volante obtuvieron una resistencia a la flexión de 42.5 MPa, una densidad de 2.14 g/cm³ y porosidad aparente de 16%. Observaron que estas propiedades mejoraron a mayores temperaturas de cocción.

En España, Pérez et al. (2012) analizaron la ceniza volante generadas en un incinerador de biomásas. Fabricaron ladrillos sustituyendo arcilla por ceniza en 10, 20, 30, 40 y 50% en volumen. Determinaron que el empleo del 20% de ceniza era viable pues afectó en un bajo porcentaje las propiedades de la mezcla control cumpliendo aún con las normas locales UNE.

La mezcla con 20% de ceniza aportó las siguientes propiedades: 14.5% de pérdida de peso por ignición, 1.46% de contracción lineal, 0.33 g/cm² min de absorción de

agua y 1.65 g/cm^3 de densidad aparente. De la mezcla control reportaron los siguientes valores: 16.9% de pérdida de peso por ignición, 0.33% de contracción lineal, $0.27 \text{ g/cm}^2 \text{ min}$ de absorción de agua y 1.73 g/cm^3 de densidad aparente.

Baspinar et al. (2010) estudiaron la potencial utilización del Humo de sílice en ladrillos cocidos. Mencionan que dependiendo de su origen el humo de sílice puede contener de 84 a 98% de SiO_2 . Los autores estudiaron el efecto de la adición del humo de sílice como sustituto del cuarzo en las propiedades mecánicas y microestructurales de ladrillos. Elaboraron mezclas de arcilla con 0, 2.5, 5 y 10% de humo de sílice. Con una temperatura de cocción de 1000°C observaron que las probetas con 10% de este residuo aumentaron su porosidad en un 10% y su resistencia a la compresión en un 20%.

Por otra parte, también se han realizado investigaciones sobre la influencia del tiempo y la temperatura de cocción en ladrillos elaborados solo con arcilla. En sus estudios Karaman et al. (2006) determinaron que el incremento en el tiempo de cocción (120-480 min) resulta en un pequeño incremento en la resistencia a compresión (7%) de los ladrillos evaluados. Concluyeron que el tiempo de cocción no influye de manera significativa en las propiedades de los ladrillos; pero si aumenta el consumo de combustible, lo cual repercute en el costo de producción.

Karaman et al. (2006) también observaron que con el incremento de temperatura, la resistencia a compresión de los ladrillos aumentó como sigue: con respecto a los ladrillos cocidos a 700°C , los ladrillos cocidos a 800°C y 1000°C fueron 31.1% y 253.3% más resistentes respectivamente. De esta forma estos investigadores determinaron que la temperatura de cocción es un factor que influye de forma importante en las propiedades de los ladrillos.

Con base en los antecedentes, en esta investigación se estudió el efecto de la sustitución de AR por residuos industriales y de la temperatura de cocción en los ladrillos evaluados. Es importante resaltar que en la bibliografía revisada solo Kazmi et al. (2016), han reportado el estudio de mezclas ternarias a base de arcilla y residuos para la elaboración de ladrillos, por lo tanto es importante realizar más investigaciones sobre esa misma línea.

1.4 Justificación

El aumento tanto en la demanda de vivienda como en los materiales para su construcción está asociada directamente al constante crecimiento de la población. Por ello es necesario generar materiales alternativos para la construcción que sean resistentes, durables y amigables con el ambiente.

En México, uno de los materiales endógenos empleados en la construcción de casa habitación es el ladrillo. Sus aplicaciones se encuentran en muros y elementos ornamentales. Debido a la existencia de bancos de arcilla en gran parte del país, actualmente su producción sigue vigente.

Weyant y sus colaboradores (2014) reportaron que para el año 2014 en el mundo se produjeron alrededor de 1.5 trillones de ladrillos de arcilla cocida, de los cuales el 87% se produjo en Asia. Sin embargo en América Latina existe un número importante de productores. En el año 2013 la Red Ladrilleras registró un total de 40,642 productores, de los cuales 16,953 eran Mexicanos (Red Ladrilleras, EELA, 2016).

En México la producción tradicional de ladrillos es una actividad importante de tipo familiar que para el año 2011 generaba 35,483 empleos (Ordoñez et al., 2016). Por su importancia social en la generación de empleos y su uso en la construcción de vivienda, es necesario desarrollar nuevas tecnologías que permitan poner a la vanguardia la industria ladrillera.

Para ello es importante mejorar las propiedades de los ladrillos, evaluar y caracterizar materias primas alternativas, así como innovar su proceso de elaboración y cocción. De esta forma se podrían obtener ladrillos ligeros con mayor resistencia mecánica y durabilidad que aquellos elaborados con arcilla pura. Estas propiedades son importantes considerando que en la actualidad, los ladrillos fabricados tradicionalmente se encuentran rezagados debido a su mayor peso, bajo desempeño térmico y baja durabilidad (Bories et al., 2015).

En esta investigación, el uso de la ceniza de bagazo de caña como reemplazo parcial de la arcilla en la elaboración de ladrillos, obedeció a su alta producción a nivel nacional. De acuerdo con Akram et al. (2009), México ocupa el quinto lugar en

la producción mundial de caña de azúcar, generando alrededor de 11.7 millones de toneladas de bagazo de caña por año, equivalente a 0.58-0.29 millones de toneladas de ceniza.

La CBC generalmente es dispuesta en tiraderos a cielo abierto representando una fuente de contaminación en aire y agua. Por otra parte, su empleo en la elaboración de ladrillos tiende a mermar la resistencia mecánica, por lo que es necesario estudiar el uso de otras materias primas o residuos para mejorar sus características.

Con ese propósito, la CV y el HS fueron elegidos como materiales suplementarios debido a que en otras investigaciones (Dana et al., 2004; Baspinar et al., 2010) han contribuido a mejorar la resistencia mecánica de materiales cerámicos. Con el uso de la CBC, la CV y el HS podría reducirse el uso de la arcilla hasta en un 50% y producir ladrillos más ligeros que cumplan con la resistencia mínima requerida en México.

Otro de los objetivos de sustituir la AR por residuos industriales en la elaboración de ladrillos, es aumentar el porcentaje de materiales fundentes o feldespatos, así como de sílice amorfo que propician la formación de la fase líquida de sinterización durante la cocción. Un incremento en la fase líquida de sinterización puede favorecer la resistencia y durabilidad de los ladrillos.

La cuantificación de fases cristalinas y del porcentaje de fase amorfa presente en las materias primas permite conocer la cantidad de material reactivo disponible para el proceso de sinterización. En los ladrillos cocidos, el grado de sinterización puede determinarse a través de la cuantificación de su porcentaje de fase amorfa. Por lo tanto la cuantificación de las fases cristalinas y la fase amorfa de las materias primas y en los ladrillos cocidos son de gran utilidad.

Por otra parte, ya que en la literatura revisada solo un autor ha reportado resultados del uso de mezclas ternarias (a base de arcilla y residuos) en la elaboración de ladrillos, es necesario evaluar mezclas ternarias diferentes a la ya estudiada para determinar si al mezclar residuos es posible optimizar las ventajas que ofrecen por separado o mejorar las deficiencias que presenten en forma individual. De esta forma se tiene la oportunidad de aportar nueva información que complemente la

existente y genere nuevas líneas de investigación sobre este tema que ha sido poco estudiado en México.

1.5 Objetivo general

Evaluar los efectos de la sustitución parcial de arcilla por residuos industriales (ceniza de bagazo de caña, ceniza volante y humo de sílice) en las propiedades de resistencia y durabilidad de ladrillos cocidos a 900, 1000°C y 1100°C para determinar su factibilidad de uso en la industria de la construcción.

1.6 Objetivos específicos

1. Determinar el efecto de la incorporación de residuos industriales en mezclas binarias y ternarias para la elaboración de ladrillos mediante pruebas de plasticidad en estado húmedo y de resistencia mecánica y durabilidad en ladrillos cocidos.
2. Determinar la influencia de la temperatura de cocción en las propiedades de ladrillos elaborados con las mezclas binarias y ternarias mediante pruebas de resistencia mecánica y de durabilidad.
3. Estudiar la evolución de la composición mineralógica y la microestructura de los ladrillos para determinar su relación con sus propiedades de resistencia y durabilidad.

1.7 Hipótesis

La sustitución de arcilla por la combinación de 20% de CBC + 10% de CV o 10% de HS en la elaboración de ladrillos, incrementa la resistencia flexión y a compresión cuando son cocidos en un intervalo de temperatura de 900°C a 1100°C.

La sustitución de arcilla por la combinación de 20% de CBC + 10% de CV o 10% de HS en la elaboración de ladrillos, disminuye su porosidad con el incremento de la temperatura de cocción en un intervalo de 900°C a 1100°C.

El incremento en la temperatura de cocción de ladrillos elaborados con mezclas de arcilla con 20% de CBC + 10% de CV o 10% de HS, propicia la formación de una mayor cantidad de fase líquida de sinterización.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

En el presente capítulo se describe brevemente el origen y composición de la arcilla, así como su uso en la elaboración de ladrillos a través del tiempo. Posteriormente se describen algunos fenómenos físicos y químicos que tienen lugar durante la cocción de materiales base arcilla, así como algunos aspectos generales de los residuos industriales empleados en esta investigación (CBC, CV y HS). También se describen los principios básicos para comprender las técnicas empleadas para la caracterización de los materiales empleados, así como los métodos de prueba para la evaluación de la resistencia mecánica y durabilidad de los ladrillos estudiados.

2.1 Las arcillas y su uso en la elaboración de materiales de construcción a través del tiempo

Las arcillas son el producto de la disgregación parcial o total de las rocas ígneas por acción del agua, la temperatura y la presión a través de las eras geológicas durante millones de años (E. Mari, 1998).

Las arcillas no tienen una composición química o mineralógica definida, son una mezcla de diversas especies minerales dependientes de la roca de procedencia y el proceso de meteorización sufrido, como se muestra en la Tabla 1 sus composiciones químicas varían de un lugar a otro. Entre sus principales compuestos se destacan los óxidos de Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na y K.

Tabla 1. Composición química de diferentes arcillas (% en peso). (X. Lingling et. al, 2004; Barbieri et al, 2013; L. Pérez, et al 2012)

Compuesto	País de origen		
	China	España	Italia
SiO ₂	65.04	55.82	44.30
Al ₂ O ₃	12.95	12.13	21.00
Fe ₂ O ₃	5.06	4.83	12.09
CaO	4.12	9.21	8.04
MgO	1.96	1.49	1.30

Las arcillas al igual que los caolines son materias primas abundantes debido a que la mayoría de las rocas de la corteza terrestre se compone principalmente de silicatos o aluminosilicatos alcalinos y alcalinotérreos, como lo muestra la Tabla 2.

En la industria cerámica, el término "arcilla" se refiere a un material natural integrado principalmente de minerales de grano fino, que es generalmente plástico con contenidos apropiados de agua y se endurece cuando se seca o es cocida (Mukherjee, 2013).

Tabla 2. Abundancia de los principales elementos en la corteza terrestre. (E. Mari, 1998)

<i>Orden</i>	<i>Elemento</i>	<i>% m/m</i>	<i>% átomos</i>	<i>% volumen</i>
1°	O	46.60	62.55	91.97
2°	Si	27.72	21.22	0.80
3°	Al	8.13	6.47	0.77
4°	Fe	5.00	1.92	0.68
5°	Ca	3.63	1.94	1.48
6°	Na	2.83	2.64	1.60
7°	K	2.59	1.42	2.14
8°	Mg	2.09	1.84	0.56
9°	Ti	0.44	0.20	0.02
10°	H	0.14	3.00	<0.01
Resto (80 elementos): 0.83%				
Nota: los porcentajes en masa/masa son el promedio de composiciones y distribución en las rocas de la litósfera (no se incluyen atmósfera e hidrósfera, pero influyen poco en los valores). Se concluye que la mayor parte de las rocas son silicatos y silicoaluminatos de Fe, Mg, Ca, Na y K.				

Las arcillas han constituido y constituyen la base de la industria cerámica. El uso de la arcilla tiene origen en las culturas primitivas, elaboraban mezclas de tierras arcillosas, las moldeaban y la consolidaban por acción del fuego.

Las diferencias de una cultura a otra en la industria cerámica radican en la materia prima y técnicas de cocción empleadas. Se sabe que inicialmente la cocción tenía lugar en fuego abierto, en pozos o en hornos primitivos.

Las piezas más antiguas de cerámica conocidas hasta ahora datan del año 8000 a.C. Se encontraron en lo que hoy es Siria en la Mesopotamia inferior y en el norte de Nigeria. Los primeros objetos fabricados fueron recipientes de uso cotidiano. Lo

más probable es que estos artículos se cocieran a fuego directo; los primeros hornos se hallaron en Mesopotamia aproximadamente en el año 4,500 a.C.

Alrededor del año 4,000 a.C. aparecen los ladrillos de barro. Inicialmente en Egipto y Asiria solo eran secados al sol. Posteriormente comenzaron a cocerse en grandes hornos excavados en la tierra o en roca, éste era un procedimiento muy costoso por lo cual solo se empleaba para fabricar ladrillos destinados a las murallas exteriores de las ciudades y para los templos y palacios más importantes. Para las viviendas se empleaba el tradicional (y aún vigente) adobe, mezcla de barro y paja, que constituye uno de los primeros materiales compuestos fabricados por el hombre.

Las tejas aparecieron más tarde en Grecia, aproximadamente en el año 800 a.C., fueron los Romanos quienes perfeccionaron el arte del trabajo con cerámica y le dieron su nombre: la palabra cerámica deriva del griego “keramos”, tierra para alfarería, término cuya etimología parece encontrarse en el sánscrito “crémos”, quemar o cremar algo. Los romanos difundieron por todo su imperio el arte y la técnica de la cerámica para una variedad de usos como ladrillos, tejas, vajillas, sanitarios, decoración, arte, etc.

Hoy en día las arcillas siguen constituyendo una de las principales materias primas en la fabricación de materiales para la construcción como tejas, bloques, pisos, azulejos, cemento Portland, ladrillos, entre otros.

En la fabricación de un buen ladrillo la arcilla empleada juega un papel importante. Esta arcilla debe estar exenta de mezclas granulosas y poseer la plasticidad necesaria para modelar ladrillos de cantos agudos, que no se agrieten ni se deformen en un secado gradual; después de cocido, el ladrillo debe conservar los cantos agudos, ser sonoro al golpe y no mostrar una porosidad excesiva. (Reverté, 1979).

2.2 Fenómenos físicos y químicos presentes durante la cocción de materiales base arcilla

En los procesos de fabricación de materiales cerámicos se distinguen tres etapas: 1) formulación y mezclado de las materias primas, 2) conformado o moldeado y 3)

cocción. El moldeado se realiza por deformación plástica, cuando se efectúa antes del sinterizado, la pieza debe mantener su forma hasta que se produzca el sinterizado, por lo cual a veces es necesario someter la pieza a un proceso de secado para disminuir el contenido de agua (Ariza, 2015).

Durante el proceso de cocción, en los ladrillos ocurren los siguientes fenómenos: deshidratación, deshidroxilación, descomposición estructural y re- cristalización.

El agua contenida entre capas es expulsada entre los 350 y 400°C, continúa la deshidroxilación o pérdida del agua químicamente combinada entre los 450 y 700°C, un cambio estructural se da alrededor de los 900°C. Por arriba de los 1000°C comienza la formación de otras fases por reacción de los óxidos, surge por ejemplo la hematita, corindón o mullita, dependiendo de la composición química de la arcilla.

El comportamiento de la arcilla al calor depende de su contenido de fundentes. Los feldespatos son algunos de los fundentes más comunes; éstos son un grupo de aluminosilicatos que contienen iones K^+ , Na^+ y Ca^{2+} (Callister, 2000). Las arcillas pobres en fundentes requieren más calor para su cocción. De la mayor o menor cantidad de estos componentes depende la cantidad de fase líquida vítrea de sinterización producida durante la cocción.

La sinterización es un proceso térmico a través del cual se obtienen piezas cerámicas con formas y propiedades predefinidas, a partir de un polvo que al ser compactado se somete a temperaturas inferiores a la temperatura de fusión del total de sus componentes para crear enlaces fuertes entre sus partículas.

El primer material sinterizado por el hombre fue el barro cocido. El término sinterizado, en sentido estricto se aplica al sinterizado en estado sólido. Sin embargo, también puede aplicarse al uso de fases líquidas ligantes que luego se solidifican, como sucede en el caso de materiales cerámicos. Los distintos tipos de sinterizado según E. Mari (1998) se muestran en la Tabla 3.

Durante el proceso de cocción de ladrillos ocurre el sinterizado en fase líquida por liga vítrea. En este tipo de sinterizado mediante un tratamiento térmico se funde únicamente la materia con un punto de fusión más bajo. Al encontrarse esta materia en estado líquido, penetra en los espacios vacíos entre las partículas sólidas,

cuando se enfría regresa a su estado sólido formando fases amorfas que atrapan y unen al resto de las partículas.

Tabla 3. Tipos de sinterizado (E. Mari, 1998)

<i>Tipo</i>	<i>Liga</i>	<i>Ejemplos</i>
Sinterizado con fases líquidas	Química	Cementos, yesos, cales (liga hidráulica). Refractarios especiales (liga fosfática) Abrasivos (resina orgánica)
	Metálica	Placas de corte
	Vítrea	Porcelanas, productos de loza, cerámica blanca y roja, gres, etc. Refractarios electrofundidos
Sinterizado en fase sólida	Cerámica	Alúmina pura (99.5%) Cerámicas no óxidas (carburos, siliciuros, boruros, nitruros, etc.) Grafito

2.3 Uso de residuos industriales en la producción de materiales base arcilla

Investigadores de muchos países actualmente están buscando la forma de utilizar residuos industriales o agrícolas como fuente de materias primas para la industria. Han encontrado que dependiendo del origen y tratamiento que reciban, estos desechos son capaces de ofrecer múltiples beneficios por ejemplo, mejorar las propiedades de los productos, controlar la contaminación ambiental, reducir la cantidad de materia prima y reducir costos.

El uso de residuos en la industria cerámica y particularmente en la fabricación de ladrillos ha demostrado ser un medio óptimo para la incorporación de estos desechos en cantidades importantes debido a las altas temperaturas de cocción. Esta industria también es viable para el reciclaje de residuos debido a que su adición puede mejorar las propiedades de los productos y no modifica de manera importante su apariencia (Muñoz et al., 2014).

A continuación, se describirá los tres residuos industriales que fueron empleados en esta investigación.

2.3.1 Ceniza de bagazo de caña

La ceniza del bagazo de caña de azúcar es un residuo que resulta de la quema del bagazo en las calderas de las industrias de azúcar y etanol. El bagazo de caña se quema para producir vapor, que es utilizado en los procesos de la fábrica y para la producción de energía eléctrica.

La ceniza de bagazo de caña de azúcar tiene una concentración muy alta de sílice y en menor cantidad contiene aluminio, hierro, álcalis y óxidos alcalinotérreos. La composición química de esta ceniza depende de las propiedades del suelo donde haya sido cultivada la caña de azúcar (Souza et al., 2011).

La CBC se puede aprovechar porque el proceso térmico al que son sometidos los productos cerámicos favorece que los óxidos de sílice, aluminio y fierro experimenten cambios en su estructura o interactúen entre sí para formar nuevas faces que integran la estructura de los productos cerámicos. Por ejemplo, el contenido de óxido de sílice participa en la formación de mullita, esta fase mejora las propiedades de dureza y resistencia del material cerámico. Su uso en la elaboración de ladrillos sinterizados ha dado buenos resultados cuando se emplea en un porcentaje no mayor al 20% en peso

2.3.2 Ceniza volante

La ceniza volante es generada durante la combustión de carbón para la producción de energía, Ahmaruzzaman (2010) señala que en el año 2010 la producción anual de ceniza de carbón en todo el mundo se estimaba en 600 millones de toneladas, de los cuales la ceniza volante constituía alrededor de 500 millones de toneladas, es decir entre el 75-80% de la ceniza total producida. Este subproducto industrial se reconoce como un contaminante ambiental y actualmente no tiene un tratamiento adecuado para su disposición final, generalmente se almacena en vertederos al aire libre.

Debido a los problemas ambientales presentados por la ceniza volante, se han desarrollado considerables investigaciones sobre el tema en todo el mundo, encontrando que tiene un buen potencial para su uso en la industria de la construcción. Puesto que posee propiedades puzolánicas, es decir, que es rica en sílice y alúmina, cuando posee un tamaño de partícula adecuado y está en presencia de agua puede reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio formando compuestos con propiedades cementantes.

La norma ASTM C 618, clasifica a las cenizas volantes en dos grupos: la clase F con bajo contenido de calcio y más de 70 % en peso de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 ; y la clase C que contiene más del 10% de calcio, por lo cual además de tener propiedades puzolánicas posee propiedades cementantes, su contenido en peso de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 tiene un valor entre el 50 y 70%.

La ceniza volante es un producto que contiene cuarzo y fases de mullita que es un mineral de alta dureza, por lo cual puede ayudar a mejorar las propiedades mecánicas de los productos cerámicos. Algunos investigadores recomiendan su uso en una cantidad no mayor al 20% en peso para la fabricación de ladrillos cocidos.

2.3.3 Humo de sílice

Es un material puzolánico que resulta de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferrosilicio. El humo de sílice sube como un vapor oxidado de los hornos a 2000°C. Cuando se enfría, el humo se condensa y se colecta en enormes bolsas de tela, luego se procesa para removerle las impurezas y para controlar el tamaño de las partículas.

Se compone básicamente de dióxido de silicio amorfo (normalmente más del 85%). Por ser un material transportado por el aire presenta una forma esférica irregular. Es un material extremadamente fino con partículas con un diámetro promedio de 0.1 μm . (Kosmatka et al., 2004)

2.4 Técnicas para la caracterización física y química de arcillas y residuos industriales

La caracterización de los materiales es importante ya que proporciona información de las propiedades físicas y químicas que permiten decidir si un material es apto para la elaboración de algún producto. Esta información es una herramienta que hace posible explicar y mejorar el desempeño del producto terminado.

2.4.1 Análisis químico

Un análisis químico consiste en identificar qué sustancias y en qué cantidad componen un material determinado. Para tal fin, el análisis químico puede dividirse en análisis cualitativo que trata del reconocimiento de las especies (compuestos, moléculas, iones o átomos) contenidos en una muestra y el análisis químico cuantitativo que determina numéricamente la cantidad en que se presentan dichas especies en la muestra (Christian, 2009).

Los métodos para el análisis pueden ser de dos tipos: Métodos químicos y métodos instrumentales. A su vez, los métodos químicos se clasifican en métodos gravimétricos y volumétricos. En los métodos gravimétricos se determina el peso del analito (especie química objeto del análisis) o de algún compuesto relacionado químicamente con él. En los métodos volumétricos se mide el volumen de una disolución de concentración conocida que contiene la cantidad de reactivo necesaria para reaccionar completamente con el analito.

Los métodos instrumentales pueden ser de tipo electroquímico, de separación u ópticos. El método de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP) es un método óptico que emplea técnicas instrumentales para medir las intensidades de señales características emitidas por los analitos. Este método es útil en la determinación de los elementos químicos inorgánicos presentes en las arcillas.

2.4.2 Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X es una técnica no destructiva empleada para la investigación de la estructura cristalina de los materiales. Esta técnica también

llamada cristalografía de rayos X es una técnica consistente en hacer pasar un haz de rayos X a través de un cristal de la sustancia sujeta a estudio. El haz se extiende en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos y por difracción, da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal aplicando la ley de Bragg (Alavéz, 2012).

En 1913 William Lawrence Bragg expuso la difracción de rayos X en sólidos. Estableció que para un haz monocromático de rayos X de longitud de onda λ , habrá sólo ciertos valores del ángulo de incidencia θ , determinados por la distancia d entre los planos del cristal, a los cuales ocurrirá difracción, de acuerdo a la relación:

$$\lambda = 2 d \text{ sen } \theta \quad \dots(1)$$

En la Fig. 1 se muestra el principio de funcionamiento de un difractómetro de rayos X que consiste en analizar una muestra plana del material colocada sobre un porta muestras que rota sobre su propio eje y se encuentra colocado en el centro de una platina circular llamada círculo del difractómetro. Sobre la periferia del círculo en los lados opuestos, se localiza el tubo de rayos X y un detector.

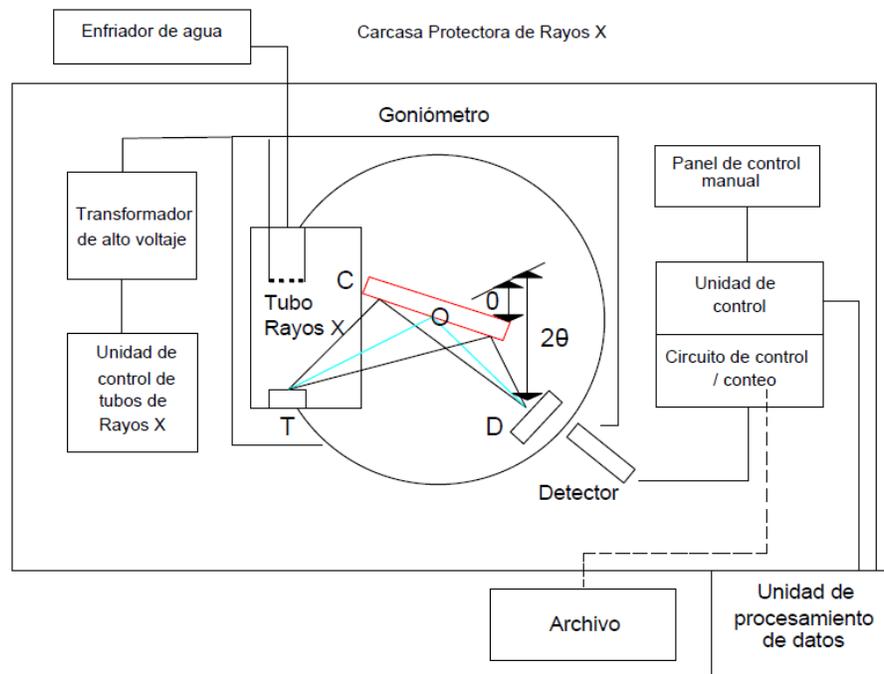


Fig. 1 Diagrama de bloques de un difractómetro de Rayos X (Alavéz, 2012)

Durante el análisis, la fuente de rayos X permanece fija, mientras el porta-muestras rota de manera continua en contra de las manecillas del reloj en un ángulo, de esta manera el ángulo de incidencia del haz de rayos X varía sobre la superficie de la muestra.

Simultáneamente, el detector rota sobre la periferia del círculo del difractómetro siguiendo de una forma sincronizada al porta-muestras. De esta manera el detector recibe el haz difractado para todos los ángulos. El detector manda las señales recibidas a la unidad de control y de ahí a una unidad de procesamiento, donde se obtiene una gráfica (difractograma o patrón de difracción).

La posición y número de picos son característicos del material que se esté analizando. Al comparar la posición y número de picos con las bases de datos PDF (Powder Diffraction File) existentes, se hace posible la identificación de fases cristalinas presentes en una muestra comparando. Las fases cristalinas identificadas pueden ser elementos puros, soluciones sólidas o compuestos. Por otro lado, la altura de los picos, o intensidad, está directamente relacionada con la concentración de la fase cristalina considerada en la muestra. Esta característica de los patrones de difracción se utiliza para realizar análisis cuantitativos o cualitativos, esto hace posible la detección de fases amorfas en muestras parcialmente cristalinas.

2.4.3 DRX: Cuantificación de fases

En el análisis cuantitativo, el objetivo es llegar a determinar las proporciones de las fases con una precisión numérica confiable a partir de los datos experimentales (Pinilla, 2005).

Todos los análisis cuantitativos requieren de una precisa determinación del patrón de difracción de la muestra en términos de las posiciones e intensidades de los picos. Para obtener exitosos patrones de difracción es necesario una cuidadosa preparación de la muestra, tener una buena calidad de los datos, una completa información del material de trabajo y de las posibles fuentes de error en los experimentos.

Como es sabido, en el patrón de difracción las intensidades de los picos están estrechamente relacionadas con la estructura y la composición de la fase. Las fracciones de peso de una fase dada pueden determinarse por medio de la ecuación de intensidad. La ecuación de intensidad para una reflexión hkl de una fase a está dada por:

$$I_{(hkl)a} = \frac{K_{(hkl)a} X_a}{r_a (m/r)_m} \dots (2)$$

Donde

X_a : Fracción de peso de la fase a

r_a : Densidad de la fase a

$(m/r)_m$: Coeficiente de absorción másico de la muestra

$K_{(hkl)a}$: Constante para cada reflexión hkl de una dada estructura cristalina a en una mezcla y una serie de condiciones experimentales.

El problema fundamental en la aplicación de la ecuación de intensidad se encuentra en la medida del coeficiente de absorción másico de la muestra. Si esta cantidad es conocida los cálculos son sencillos. En caso contrario el análisis se dificulta, ya que este valor en muchos experimentos es una función de las cantidades de las fases constituyentes. Para resolver este inconveniente, los métodos de análisis cuantitativo han recurrido al uso de expresiones que relacionan las intensidades de los picos, ya sea entre dos fases o contra un estándar.

Entre los métodos de análisis cuantitativo que utilizan la relación de intensidades se encuentran el método de estándar interno y el método RIR.

El método del estándar interno se basa en la eliminación del factor de absorción másico de la muestra mediante la relación de dos expresiones del mismo tipo de la ecuación anterior, de la cual se obtiene otra expresión de la forma:

$$\frac{I_{(hkl)a}}{I_{(hkl)b}} = k \frac{X_a}{X_b} \dots (3)$$

Esta ecuación representa la base para el análisis cuantitativo por el método del estándar interno, es una línea recta en función de la fracción de peso de la fase a,

y cuya pendiente k de la curva de calibración es obtenida a partir de una gráfica de $I_{(hkl)a}/I_{(hkl)b}$ vs X_a/X_b . De esta forma para cuantificar cada uno de los componentes de la mezcla, primero deben establecerse los valores de k para cada una de las fases a partir de los estándares de concentración conocida, y posteriormente añadir una cantidad conocida, X_b , de un mineral estándar a la mezcla de fases (la cual puede incluir material amorfo).

La adición de una nueva fase a la mezcla de análisis incrementará la complejidad del patrón de difracción, causando problemas en la medición de las intensidades de los picos. Por ello el estándar interno seleccionado no debe tener reflexiones que se solapen con alguna reflexión de las fases de interés y además deben estar libres del efecto de la microabsorción.

Estas restricciones pueden evitarse al complementar el método del estándar interno con el método RIR (Relación de Intensidades de Referencia) en un sistema de ecuaciones que tienen en cuenta el uso de reflexiones solapadas y análisis de restricciones químicas.

A partir de la ecuación del estándar interno puede obtenerse la gráfica de la siguiente ecuación:

$$X_b \left(\frac{I_{(hkl)a}}{I_{(hkl)b}} \right) \text{ vs. } X_a \dots (4)$$

La cual es una línea recta con pendiente k , y k es una medida de las intensidades difractadas de las dos fases. El valor de k es conocido como I_a/I_b o RIR. Chung en 1974, encontró que si todas las fases en una mezcla junto con los valores RIR son conocidos para todas ellas, entonces la suma de todas las fracciones de peso de todas las fases sería igual a 1. Esto permite conocer fracciones de peso desconocidas en la mezcla a partir del peso conocido del estándar interno.

2.4.4 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La Microscopía Electrónica de Barrido es una técnica que emplea un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar imágenes ampliadas y con gran

resolución de la superficie de un objeto. Ya que también es capaz de generar información de la composición química de la muestra, se considera una herramienta útil en la observación y caracterización superficial de muestras orgánicas e inorgánicas.

Como lo describe Nieto (2010), el microscopio electrónico de barrido posee un cañón de electrones en el cual se produce un haz de electrones al calentarse un filamento metálico. Este instrumento cuenta también con lentes electromagnéticas a través de las cuales los electrones son acelerados y alineados para formar un haz muy fino que incide sobre la superficie de la muestra. Debido a que la longitud de onda de los electrones es tan corta, se puede conseguir una gran profundidad de campo (por lo tanto mucho más información de la muestra) comparado con la imagen que se obtendría con un microscopio óptico si se usa el mismo aumento.

Al final de su trayectoria, los electrones atraviesan por una última lente condensadora, denominada lente objetivo, esta es la que sintoniza el haz de electrones para formar un punto o mancha muy fina. Ésta contiene dos juegos de bobinas deflectoras conectadas a un generador de rastreo para recorrer la superficie de la muestra sobre ejes x y y de forma ordenada. Entonces, de manera sincronizada, esta bobina deposita la señal en el tubo de rayos catódicos (TRC) del microscopio.

Cuando el haz de electrones (primarios) incide sobre la superficie de la muestra, provoca que otros electrones (retrodispersados y secundarios) sean proyectados de la misma. Los detectores recolectan electrones secundarios o retrodispersados y los convierten en una señal que es enviada a una pantalla fosforescente, similar a la de una televisión, con esta señal se produce una imagen.

El haz primario también puede desprender electrones de las capas internas de las moléculas de la muestra, los cuales al regresar a su estado nativo emiten energía en forma de rayos X. Estas energías pueden ser recolectadas, identificadas y analizadas para determinar la composición química de las muestras.

Los electrones secundarios son producidos por choques inelásticos de los electrones primarios con los átomos de la muestra. Estos electrones poseen baja

energía, del rango de 0 a 50 eV; por su baja energía se asume que estos electrones son generados por las moléculas más superficiales de la muestra y al ser recolectados mediante un detector para electrones secundarios son utilizados para generar imágenes tridimensionales que permiten observar la textura y profundidad en los materiales.

2.5 Plasticidad de las arcillas

La plasticidad es una propiedad circunstancial de las arcillas que depende de su contenido de agua. Puede tener la consistencia de un ladrillo con plasticidad nula, y esa misma con gran contenido de agua puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido. Entre ambos extremos existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente (Badillo, 2009).

La arcilla se conforma de minerales con estructuras cristalinas relativamente complejas; sin embargo una característica común es una estructura en capas. Cuando se añade agua, las moléculas de agua encajan entre las capas y forman una película delgada alrededor de las partículas de arcilla. De esta forma las partículas son libres de moverse unas con respecto a otras, lo cual explica la plasticidad resultante de la mezcla de arcilla y agua (Callister, 2000).

Los estados de consistencia en los que puede estar un suelo susceptible de ser plástico, según Atterberg, dependen de su contenido de agua en orden decreciente, y pueden ser los siguientes: 1) Estado líquido, con propiedades y apariencia de una suspensión; 2) Estado semilíquido, con las propiedades de un flujo viscoso; 3) Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente; 4) Estado semisólido, en que el suelo tiene la apariencia de sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado; y 5) Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

Para distinguir las fronteras entre estos estados, Atterberg estableció las primeras convenciones bajo el nombre de límites de consistencia. La frontera entre el estado semilíquido y plástico recibió el nombre de límite líquido (LL), la frontera entre el estado plástico y semisólido fue llamado límite plástico (LP), mientras que la frontera entre el semisólido y sólido recibió el nombre de límite de contracción (LC).

2.6 Resistencia mecánica de ladrillos

La resistencia mecánica puede definirse como la capacidad que tiene un cuerpo para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse. Estas fuerzas pueden ser de tensión, compresión o cizalla.

La resistencia mecánica de los ladrillos se ve afectada por aspectos como su porosidad y defectos en su estructura molecular. La porosidad entendida como espacios vacíos tiene efectos negativos en la resistencia mecánica de los materiales cerámicos, ya que tiende a disminuir el área neta con la que el material soporta las cargas.

Por otra parte, en los materiales cerámicos existen microfisuras causadas por defectos en sus arreglos moleculares, las cuales producen la amplificación de los esfuerzos de tensión aplicados, disminuyendo la resistencia a la fractura. Con cargas a compresión esta amplificación de esfuerzos no se presenta, por lo tanto, este tipo de materiales tiene una mayor resistencia a fuerzas de compresión que a fuerzas de flexión (Callister, 2000).

Las propiedades mecánicas de los materiales se determinan mediante ensayos de laboratorio donde se considera la naturaleza de la carga aplicada, su duración y las condiciones del medio.

2.6.1 Resistencia a la flexión

Durante este ensayo se aplica una carga a la mitad de la longitud total del espécimen. En el punto de aplicación de la carga, la superficie superior del espécimen está sometida a compresión, mientras que la superficie inferior está en tensión.

El esfuerzo de tensión en una viga a la cual se le aplica una carga a la mitad de su longitud puede determinarse con la ecuación de Navier:

$$\sigma_t = \frac{M_{m\acute{a}x}}{I_x} y \dots (5)$$

Donde:

σ_t : Tensión normal en el punto medio de la longitud de la viga (MPa)

$M_{m\acute{a}x}$: Momento flector máximo (kgf.m)

I_x : Momento de inercia dependiente de la sección transversal (m⁴)

y : ½ del espesor de la viga (m).

De esta ecuación se deduce el esfuerzo de tensión normal o Módulo de Ruptura (MR) para un cuerpo de sección transversal rectangular:

$$MR = \frac{3Pl}{2bd^2} \dots (6)$$

Dónde:

MR : Módulo de ruptura (MPa)

P : Carga máxima indicada en la máquina de prueba (kgf)

l : Distancia que hay entre los apoyos del espécimen (m)

b : Ancho promedio del espécimen (m)

d : Espesor o peralte promedio total del espécimen (m)

2.6.2 Resistencia a la compresión

La Ley de Hooke establece que todo cuerpo deformado ejerce un esfuerzo mientras persiste la deformación, siendo el esfuerzo proporcional a ésta. En un material elástico dicha deformación o alargamiento unitario ε , será directamente proporcional a la fuerza aplicada F . Por lo tanto, la resistencia a compresión se define como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots (7)$$

Donde:

σ : Resistencia a compresión (MPa)

F : Fuerza aplicada (kg)

A : Área de la sección transversal antes de aplicar la fuerza (m²).

La norma ASTM C67 establece que las muestras a utilizarse en el ensayo de ladrillos de arcilla cocida consisten en mitades de piezas con caras planas y paralelas, obtenidas de cinco ladrillos cocidos, secados, enteros y sin defectos apreciables, cortados mediante herramientas adecuadas para evitar que se deterioren las aristas. Para lograr una adecuada distribución de la carga, las caras paralelas del espécimen que estarán en contacto con la prensa se cabecean, es decir, se recubren con una capa de azufre.

Este ensayo consiste en aplicar una fuerza normal a la probeta hasta la falla y registrar la carga máxima aplicada en el área de contacto. El esfuerzo de compresión máximo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia a la compresión} = \frac{P}{A} \dots(8)$$

Donde:

P: Carga máxima en la máquina de prueba (MPa)

A: Promedio de las áreas netas de las superficies superior e inferior del espécimen que son normales a la carga aplicada (m²).

2.7 Factores que influyen en la durabilidad de los ladrillos

La durabilidad de los materiales hace referencia a la resistencia que estos oponen al deterioro causado por su interacción con el medio que los rodea. La absorción de agua a través de poros interconectados, es un factor importante en la durabilidad de los ladrillos (Baspinar et al., 2010). A continuación, se describen algunos de los efectos que la porosidad y la absorción de agua pueden causar en la durabilidad de los ladrillos.

2.7.1 Porosidad

La porosidad de los materiales a base de arcilla tiene su origen durante el mezclado de la arcilla con agua. La evaporación del agua empleada durante el mezclado deja

espacios vacíos entre las partículas de la arcilla. Durante el proceso de cocción, parte de estos espacios vacíos son ocupados por la fase líquida de sinterización.

La porosidad no eliminada tiende a mejorar las propiedades aislantes de los ladrillos; sin embargo, tiene efectos negativos en sus propiedades de resistencia. Los poros reducen el área de la sección a través de la cual se aplica la carga y también actúan como concentradores de tensión: en el caso de un poro esférico la tensión es amplificada en un factor 2. Un 10% de porosidad podría disminuir el módulo de ruptura en un 50% del valor medido para el material no poroso (Callister, 2000).

La interconectividad entre los poros se relaciona directamente con la absorción de agua de los materiales, pues funciona como ductos para conducir al líquido. El mayor o menor grado de absorción de agua dependerá de la interconexión que los poros tengan entre sí.

2.7.2 Absorción de agua

La absorción de agua es una propiedad importante en la evaluación de la durabilidad de los ladrillos. Altos valores de absorción podrían causar grietas en el cuerpo cerámico debido a presiones hidrostáticas, y por lo tanto reducir su durabilidad. Sin embargo, tampoco se desean valores bajos ya que entonces el agua de la lluvia correría por las juntas de mortero hasta penetrar en las edificaciones en lugar de ser absorbida parcialmente por los ladrillos y evaporarse después. Por lo tanto, la absorción del ladrillo debe encontrarse entre 5% y 20% (Ukwatta et al., 2016).

El tamaño de las moléculas del agua es muy pequeño por lo que puede ingresar en sistemas de poros extremadamente finos. Es capaz de disolver un mayor número de sustancias que cualquier otro líquido, a esto se debe que sea portador de sustancias dañinas para los materiales sólidos. Por ejemplo, puede transportar sulfatos provenientes del suelo que al ingresar al cuerpo arcilloso y cristalizarse genera presiones dentro de los poros, creando microfisuras que reducen la resistencia a compresión (Kazmi et al., 2016).

El movimiento del agua a través de un cuerpo poroso obedece a la denominada “Ley general de transporte” que establece que el flujo de materia o energía a través de un medio dado es directamente proporcional al gradiente de energía entre dos puntos en estudio, que en el caso del agua se trata de un potencial hídrico (Narro, 1994).

En un cuerpo poroso en el que los poros no son rectos ni lisos, sino irregulares, interconectados o limitados por espacio cerrados, el flujo del agua es descrito por la Ley de Darcy:

$$q = -K \frac{dh}{dl} \dots(9)$$

Donde:

q : Q/sección (es decir: caudal que circula por m² de sección)

K : Conductividad Hidráulica (m/s)

dh/dl :gradiente hidráulico (m)

Para el cálculo de absorción de agua en ladrillos, la norma ASTM C 67 proporciona dos métodos: por inmersión durante 24 horas y por hervido durante 5 horas. La misma norma proporciona la siguiente ecuación para el cálculo del porcentaje de absorción de agua después de los ensayos:

$$\text{Absorción} = \frac{W_{\omega} - W_s}{W_s} \times 100 \dots(10)$$

Donde:

Absorción : Absorción de agua (%)

W_{ω} : Peso del espécimen saturado (kg)

W_s : Peso del espécimen seco (kg)

Otro método para determinar la cantidad de agua absorbida por ladrillos consiste en el ensayo de velocidad inicial de absorción. Con este ensayo se determina la cantidad de agua en kilogramos que un ladrillo absorbe por unidad de área durante un minuto. La velocidad inicial de absorción se calcula como sigue:

$$X = \frac{W_{\omega} - W_s}{LB} \dots (11)$$

Donde:

X : Velocidad inicial de absorción (kg/m^2 por min)

W_s : Peso del espécimen seco (kg)

W_{ω} : Peso del espécimen húmedo (kg)

L : Largo del espécimen (m)

B : Ancho del espécimen (m)

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El presente capítulo describe la metodología empleada en el desarrollo de la investigación. Se presenta el diseño experimental y las técnicas empleadas en la caracterización de la arcilla y los residuos industriales evaluados. También se describen los métodos para la caracterización plástica de las mezclas evaluadas, así como los procedimientos para la elaboración de los ladrillos. En este capítulo también se describen los métodos para la determinación de la resistencia mecánica, la durabilidad y la microestructura de los ladrillos evaluados.

3.1 Diseño experimental

El diseño experimental para el desarrollo de la investigación se describe en la Tabla 4. Los factores o variables independientes son el tipo de mezclas (binarias y ternarias) y las temperaturas de cocción de los ladrillos.

Los residuos industriales empleados para la elaboración de las mezclas arcillosas fueron elegidos debido a que poseen una composición química semejante a la arcilla y porque los minerales que los constituyen pueden participar en la formación de fases líquidas a altas temperatura durante la cocción y de esta manera producir una mezcla arcillosa más densa.

La CBC fue elegida ya que es un residuo producido en grandes cantidades por la industria azucarera Mexicana. Este residuo es desechado al aire libre contaminando el suelo, agua y aire. Por lo tanto, es necesario identificar métodos adecuados para su reciclaje o disposición final.

Se empleó Ceniza volante clase F. Se eligió este tipo de CV ya que de acuerdo con la clasificación de la norma ASTM C 618, a diferencia de la clase C tiene un bajo contenido de calcio, por lo tanto, su reacción química con el agua de mezclado es poco significativa, lo cual reduce al mínimo los efectos negativos en la trabajabilidad de la mezcla causados por fraguado. También fue elegida con el objetivo de que la forma esférica de sus partículas ayude a mejorar la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco al reducir los efectos de fricción entre partículas.

Otro punto importante es que esta clase de ceniza contiene más del 70 % en peso de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 que son los compuestos químicos que durante el proceso de sinterización forman nuevas fases minerales para cerrar poros y dar mayor resistencia a los ladrillos (Souza et al., 2011).

Tabla 4. Diseño experimental para la investigación

FACTORES	NIVELES	VARIABLES RESPUESTA
MEZCLAS BINARIAS		
Mezclas	AR100% AR60% CV40% AR60% HS40% AR60% CBC40%	Plasticidad (% de humedad) Resistencia a la compresión (MPa) Resistencia a la flexión (MPa) Absorción de agua (Kg/m ² por min)
Temperatura de cocción	900 y 1000°C	
MEZCLAS TERNARIAS		
Mezclas	AR100% AR 70% CBC 20% CV10% AR 50% CBC 40% CV10% AR 70% CBC 20% HS10% AR 50% CBC 40% HS10%	Plasticidad (% humedad) Resistencia a la compresión (MPa) Resistencia a la flexión (MPa) Porosidad abierta (%) Absorción de agua (%)
Temperatura de cocción	900, 1000 y 1100°C	Composición mineralógica Microestructura

Se decidió emplear Humo de Sílice ya que por su contenido de SiO_2 amorfo ha mostrado mejorar el proceso de sinterización e incrementar la resistencia de materiales cerámicos (Prasad et al., 2003).

Los porcentajes de sustitución en peso de AR por CBC, CV y HS (30, 40 y 50%) se eligieron con el fin de maximizar el aprovechamiento de los residuos industriales y reducir de forma importante el uso de la arcilla como materia prima.

Se establecieron diferentes temperaturas de cocción para evaluar cómo influye el aumento de este parámetro en el comportamiento de las adiciones minerales. En el intervalo de 900°C a 1100°C la literatura reporta mejoras importantes en las propiedades de los materiales cerámicos tradicionales. En la etapa 3 las temperaturas de cocción fueron 900 y 1000°C debido a que 1000°C fue la temperatura máxima alcanzada por el horno empleado. Para la 4ª etapa se empleó un horno diferente con el cual se pudieron evaluar tres temperaturas: 900, 1000 y 1100°C.

Las variables respuesta correspondieron a ensayos que proporcionaron información sobre el desempeño de los ladrillos obtenidos. Se evaluó la plasticidad de las mezclas arcillosas, así como la resistencia mecánica con ensayos de resistencia a flexión y a compresión. Este último ensayo es muy importante debido a que los ladrillos trabajan principalmente bajo esfuerzos de compresión.

Además de la densidad de los ladrillos, se determinó su porosidad aparente y su porcentaje de absorción de agua. La porosidad aparente se relaciona con la porosidad interconectada de los ladrillos, la cual puede ser un medio para el ingreso de agentes agresivos como lo son algunas sales. Por otro lado, el agua es un líquido que puede generar presiones al interior de los poros y causar microfisuras, por lo cual fue importante determinar el porcentaje de absorción de agua.

El análisis de la composición mineralógica y microestructura de los ladrillos cocidos permitió determinar cuál es la contribución de cada material a las propiedades de las mezclas durante la evolución de la temperatura de cocción.

La experimentación se realizó en cuatro etapas. En la etapa 1 se obtuvieron y caracterizaron los materiales: arcilla (AR) y residuos industriales: ceniza de bagazo de caña (CBC), ceniza volante (CV) y humo de sílice (HS); se determinaron su composición química elemental, su composición mineralógica y porcentaje de fase amorfa a partir de DRX. La determinación del porcentaje de fase amorfa fue de gran

relevancia ya que representa la cantidad de material reactivo disponible en la formación de nuevos compuestos capaces de mejorar las propiedades de los ladrillos. Para la CBC es difícil encontrar esta cuantificación en la literatura. La morfología de sus partículas se estudió a través de MEB. Por medio de TGA se determinó la variación de su masa con respecto al incremento de la temperatura.

En la etapa 2 se caracterizó la plasticidad de mezclas binarias y ternarias compuestas de arcilla y residuos industriales. De cada mezcla se determinó su límite líquido, límite plástico y % de contracción lineal.

La etapa 3 consistió en la elaboración y caracterización de ladrillos con mezclas binarias, utilizando 60% de arcilla y 40% de CBC, CV o HS. Se elaboraron 20 ladrillos por cada mezcla y se cocieron a 900 y 1000°C. Se emplearon dos temperaturas de cocción para observar el desempeño de los materiales con respecto al incremento de la temperatura. Los ladrillos cocidos se evaluaron con ensayos de resistencia a flexión, resistencia a compresión y velocidad inicial de absorción. La mezcla de AR y CBC presentó las propiedades mecánicas y de absorción menos favorables. Sin embargo, por la disponibilidad de este residuo y con la finalidad de mejorar las propiedades de ladrillos elaborados con AR y CBC se decidió incluir en la mezcla arcillosa otro residuo industrial, teniendo así mezclas ternarias.

En la etapa 4 se elaboraron y caracterizaron ladrillos con mezclas ternarias compuestas de AR y CBC más CV o HS. Se elaboraron 45 ladrillos de cada mezcla y se cocieron a 900, 1000 y 1100°C para evaluar su comportamiento con respecto al incremento de la temperatura. Los ladrillos elaborados con las mezclas ternarias fueron evaluados por medio de pruebas de resistencia a flexión, resistencia a compresión, contracción lineal, densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua. En esta etapa también se estudió la evolución de la microestructura y mineralogía de los ladrillos con el objetivo de relacionarlas con los resultados de las pruebas mecánicas y de durabilidad. Este estudio se realizó a través de MEB y DRX.

3.2 Materiales y su caracterización

Para este proyecto se emplearon los siguientes materiales: *Arcilla (AR)* obtenida de un banco ubicado en la zona conocida como “Cañada Corazón”, en la 3ª sección de San Pablo Huitzo, Oaxaca. *Ceniza de bagazo de caña (CBC)* obtenida de un tiradero a cielo abierto propiedad del ingenio azucarero Constancia ubicado en Tezonapa, Veracruz. También se empleó *Ceniza volante (CV)* clase F de la marca Admix Tech® y *Humo de Sílice (HS)* de la empresa Euclid Chemical Company®, así como *Agua bidestilada* para la elaboración de las mezclas binarias y ternarias.

En las siguientes secciones se describen los tratamientos que recibieron la AR y la CBC antes de su uso en la elaboración de mezclas binarias y ternarias, así como los métodos empleados para la caracterización de los materiales.

3.2.1 Tratamiento de materiales

A continuación, se describen los métodos empleados para la obtención de materiales.

Tratamiento de la arcilla: La arcilla procedente del banco fue disgregada y secada al sol para eliminar el exceso de humedad. Posteriormente, para eliminar un mayor porcentaje de humedad, la arcilla fue secada en horno eléctrico durante 24h a 105°C (Fig. 2)



Fig. 2 Disgregado y secado de la arcilla al sol y en horno eléctrico.

Como lo señalan Lingling y colaboradores (2004), el tamaño de partícula influye en las propiedades de los ladrillos pues la fuerza de sinterización es inversamente proporcional al radio de las partículas. Con base en los resultados positivos reportados por Pérez y colaboradores (2012) con un tamaño máximo de partícula

de 149 μm , se decidió emplear arcilla cribada por la malla No. 100 para obtener aproximadamente ese tamaño de partícula. Para incrementar su rendimiento la arcilla fue molida en molino de bolas.

Para la molienda de la arcilla se empleó un molino de bolas de 17 lt de capacidad, ubicado en el Instituto de Capacitación y Productividad para el Trabajo del estado de Oaxaca (ICAPET) plantel 085. En cada molienda se colocó una cantidad constante de 5kg de arcilla y 4.48 kg de bolas de porcelana.

La arcilla se molió durante 40 minutos y posteriormente se cribó por la malla No 100 (149 μm), el procedimiento se ilustra en la Fig. 3. El rendimiento del material con este tratamiento fue del 10% y se empleó para la elaboración de mezclas binarias.

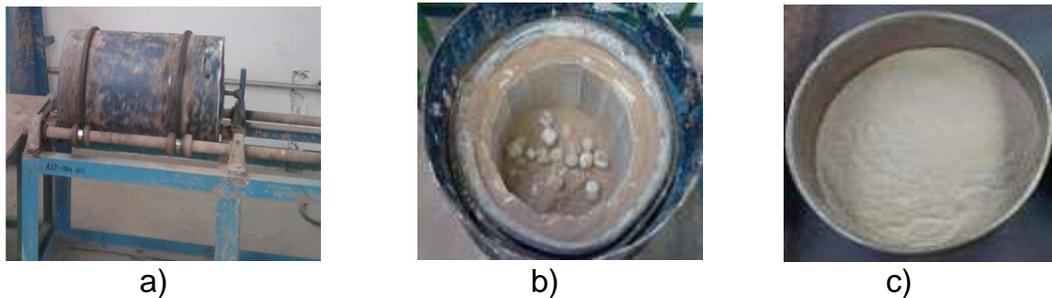


Fig. 3 Molienda de la arcilla

a) Molino de bolas operando, b) Arcilla molida, c) Arcilla cribada.

Para la elaboración de mezclas ternarias las partículas de arcilla retenidas en la malla No. 100 se molieron en el molino de bolas ahora durante 2 horas. Con este tratamiento fue posible incrementar el rendimiento hasta un 90%. El material empleado en estas mezclas se conformó del 15% de arcilla cribada y el 85% de arcilla molida y cribada.

Tratamiento de la Ceniza de bagazo de caña (CBC): Algunos investigadores que han trabajado con CBC la han sometido a procesos de molienda para reducir su tamaño de partícula. Souza et al. (2011) molieron esta ceniza con agua durante ocho horas en un molino de bolas, la secaron en horno a 110°C, y tamizaron a un tamaño menor a 88 μm . Este pretratamiento involucró el consumo de una cantidad

importante de energía. Por su parte Teixeira et al. (2008) realizaron moliendas durante 6 horas con el mismo tipo de molino.

Con el fin de minimizar el gasto de energía para el pretratamiento de esta ceniza, en este proyecto la CBC no fue molida, solo se cribó por la malla No 200 (74 μm) durante cuatro minutos, con una tamizadora de laboratorio marca RO-TAP

3.2.2 Análisis químico

Este análisis se realizó con el objetivo de identificar la composición química de los materiales y las cantidades en que se encuentran presentes. El análisis de la arcilla y los residuos industriales se realizó en el Servicio Geológico Mexicano Estación Oaxaca. Se emplearon los métodos: gravimétrico, digestión total/lecturas de I.C.P. óptico y volumétrico.

3.2.3 DRX en AR, CBC, CV y HS

La arcilla y la CBC, CV y HS fueron caracterizados con DRX para conocer las fases minerales presentes en cada uno de ellos e identificar su evolución como resultado del proceso de cocción. El análisis se realizó con un Difractómetro de rayos X marca Bruker, D8 con radiación Cu $K\alpha_1$ ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Para el análisis la AR fue cribada por la malla No. 60 (250 μm), la CBC, la CV y HS no recibieron ningún tratamiento para este análisis.

3.2.4 Cuantificación de fases cristalinas y fase amorfa en CBC, CV y HS

En los primeros difractogramas obtenidos de la CBC, CV y HS, en el rango 15-40 grados 2-theta de la línea base, se observaron halos amorfos de diferentes intensidades dependiendo de cada material. Por lo anterior se decidió determinar el contenido de fase amorfa a partir de patrones de DRX usando el método de estándar interno y cuantificando por el método RIR.

La cuantificación de fase amorfa es de gran relevancia ya que representa el porcentaje de material reactivo disponible en la formación de nuevos compuestos durante el proceso de sinterización. A pesar de su importancia, en la literatura no

es común encontrar el reporte de la cuantificación de fase amorfa para estos residuos industriales.

Con este objetivo se preparó una muestra de cada residuo compuesta por 90% de residuo y 10% de alúmina calcinada Alcoa A13. La alúmina fue tratada térmicamente a 1400°C durante 1 hora para asegurar la presencia solo de la fase alfa. El peso total de la muestra fue de 1g. Los materiales se mezclaron manualmente en un mortero con pistilo de porcelana, como lo muestra la Fig. 4. Los polvos se mezclaron hasta homogeneizar el color de la mezcla.



Fig. 4 Preparación de muestra de CBC con alúmina A13 para determinación del contenido de fase amorfa a partir de patrones de DRX.

La fracción de peso de cada fase cristalina (X_{ic}) determinada con DRX fue recalculada con respecto a la fracción de peso conocida del estándar añadido (X_s) para obtener la fracción real de peso de la fase cristalina (X_i). Este cálculo se realizó con la siguiente ecuación (Lassinantti et al., 2010):

$$X_i = \frac{1}{1-X_s} \left[\left(\frac{X_s}{X_{sc}} \right) X_{ic} \right] \dots (12)$$

En la cual X_{sc} es la fracción del peso refinado del estándar interno. Después de calcular la fracción de peso real de las fases cristalinas, el contenido de fase amorfa se calculó con la siguiente ecuación:

$$X_a = 1 - \sum_i X_i \dots (13)$$

3.2.5 Morfología de partículas de AR, CBC, CV y HS

Para conocer la forma y las características superficiales de sus partículas, los materiales (arcilla y residuos industriales) fueron analizados empleando la técnica de MEB en el Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido, perteneciente a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. El equipo empleado fue un Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL modelo JSM-6610LV.

3.2.6 TGA en AR, CBC, CV y HS

Se realizó un análisis Termogravimétrico de las materias primas para determinar los cambios en su masa respecto al incremento de la temperatura. Este análisis posteriormente permitió encontrar una relación entre el comportamiento individual de los materiales y el observado en las mezclas estudiadas. Para el análisis se empleó un equipo TGA Mettler Toledo modelo SDTA8551^e (Fig. 5). Se empleó un intervalo de temperatura de 50 a 1200°C, con una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera de aire.



Fig. 5 Equipo TGA Mettler Toledo modelo SDTA8551e

3.2.7 Clasificación de la arcilla en el SUCS.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) divide a los suelos según su tamaño de partícula en fracción gruesa y fracción fina. La fracción fina es aquella formada por partículas que pasan la malla #200 (0.074 mm). Esta a su vez se subdivide en grupos tomando en cuenta sus características de plasticidad. La

clasificación de los suelos en el SUCS permite conocer en forma cualitativa las características de un suelo al colocarlo en alguno de los grupos definidos en dicho sistema.

Para conocer las características de plasticidad de la arcilla empleada en este trabajo (antes de mezclarla con algún residuo industrial), se determinaron los límites de consistencia de Atterberg: Límite Líquido, Límite Plástico y Contracción Lineal. Los ensayos se realizaron con base en los procedimientos descritos en la norma ASTM D 4318-10.

Con la determinación de los límites de consistencia fue posible caracterizar la arcilla cualitativamente y determinar los porcentajes de humedad óptimos para la elaboración de ladrillos. De esta forma se evitaron la aparición de fisuras y altos porcentajes de contracción durante su secado y cocción.

El equipo empleado se muestra en la Fig. 6, consiste en una placa de vidrio para límite plástico, espátula, ranurador curvo, vernier, molde de lámina para contracción lineal, vidrio de reloj, copa de Casagrande para límite líquido y cápsula de porcelana.



Fig. 6 Equipo empleado en la determinación de los límites de Atterberg.

3.3 Diseño de mezclas binarias y ternarias

A continuación, se describen los diseños de mezclas binarias y ternarias.

Mezclas binarias

Los porcentajes de sustitución en peso de AR por CBC, CV o HS se definieron con base en resultados obtenidos por otros investigadores (Souza et al., 2011; Pérez et al., 2012)

Conociendo estos resultados, y considerando que las propiedades de las materias primas influyen en las propiedades de los ladrillos, para el estudio de mezclas binarias se decidió evaluar la plasticidad de mezclas de arcilla con 20 y 40 % de residuos (sustitución en peso). La Tabla 5 muestra la composición de las mezclas para las cuales se evaluaron sus propiedades plásticas.

Tabla 5. Composición de mezclas binarias (% de sustitución en peso).

Mezcla	AR	CBC	CV	HS
AR100	100	0	0	0
CBC20	80	20	0	0
CV20	80	0	20	0
HS20	80	0	0	20
CBC40	60	40	0	0
CV40	60	0	40	0
HS40	60	0	0	40

AR: Arcilla, CBC: Ceniza de Bagazo de Caña, CV: Ceniza Volante, HS: Humo de Sílice.

Mezclas ternarias

Para todas las mezclas ternarias se realizaron sustituciones de arcilla por CBC en 20 y 40%. El objetivo de utilizar estos porcentajes fue reducir de forma significativa el uso de arcilla como materia prima y emplear la mayor cantidad posible de CBC para su reciclaje. El % empleado de CV o HS fue del 10%. La Tabla 6 muestra la composición de las mezclas ternarias evaluadas.

Tabla 6. Composición de mezclas ternarias (% de sustitución en peso).

<i>Mezcla</i>	<i>AR</i>	<i>CBC</i>	<i>CV</i>	<i>HS</i>
100AR	100	0	0	0
20CBC-CV	70	20	10	0
40CBC-CV	50	40	10	0
20CBC-HS	70	20	0	10
40CBC-HS	50	40	0	10

AR: Arcilla, CBC: Ceniza de Bagazo de Caña, CV: Ceniza Volante, HS: Humo de Sílice

3.4 Caracterización de mezclas en estado plástico

Las propiedades plásticas de las mezclas influyen en su trabajabilidad, en la estabilidad volumétrica del ladrillo verde (ladrillo crudo) durante su secado y durante la cocción. Por la importancia que tienen la plasticidad de las mezclas durante el proceso de elaboración de los ladrillos, se determinaron los límites de Atterberg (LL, LP, IP, CL) para cada una de ellas bajo los procedimientos descritos en la norma ASTM D 4318-10.

Para el ensayo de cada mezcla se preparó una muestra de 300 gr que fue saturada con una cantidad de agua bidestilada igual al 25% de su peso, durante 24 horas antes de la prueba.

Para el mezclado de los materiales en seco (arcilla-residuo industrial) se empleó una mezcladora marca Hamilton Beach. El mezclado se realizó durante siete minutos. La primera etapa del mezclado fue de tres minutos a una velocidad de 14.66 ± 0.52 rad/s, al término de este tiempo de detuvo la mezcladora por un minuto para despegar el material que pudo adherirse al tazón. Posteriormente, se reinició el mezclado a la misma velocidad por un tiempo de tres minutos más (Fig. 7).



a)



b)

Fig. 7 Mezclado de materiales en seco. a) Mezclado mecánico, b) Material mezclado.

Límite Líquido (LL)

Una porción de la muestra saturada se colocó en una cápsula de porcelana para mezclarla y hacerla más fluida. Posteriormente la mezcla se colocó en la copa de Casagrande previamente calibrada para formar una capa de aproximadamente 1 cm de profundidad. Con un ranurador curvo se hizo un corte trapezoidal por la mitad y se activó el mecanismo de la copa para hacerla caer de una altura de 1 cm a razón de 2 golpes por segundo. El mecanismo se detuvo hasta que las dos fracciones del suelo se unieron a lo largo de 13 mm, inmediatamente después se tomó una muestra de aproximadamente 10 gr para pesarla y secarla en horno a una temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Pasado este tiempo, la muestra se extrajo del horno y se dejó enfriar para obtener su peso seco (Fig. 8).



a)



b)

Fig. 8 Determinación del límite líquido. a) Colocación de la muestra en la Copa de Casagrande b) Medición de la unión del material en la copa de Casagrande.

El contenido de agua de la muestra se determinó con la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \dots (14)$$

Donde:

ω : Humedad (%)

W_w : Peso de la muestra húmeda (g)

W_s : Peso de la muestra seca (g)

Límite Plástico (LP)

Esta prueba se realizó con una fracción de la muestra con la que se determinó el límite líquido. Con una porción de la muestra se formó una pequeña esfera de aproximadamente 12mm, manipulándola sobre la palma de la mano se le hizo perder humedad y se giró sobre una placa de vidrio hasta formar un cilindro de aproximadamente 32mm en toda su longitud.

Cuando al alcanzar dicho diámetro el cilindro no se rompía en varias secciones simultáneamente, su humedad era superior a la del límite plástico. Entonces todo el material se juntaba nuevamente para formar una pequeña esfera y repetir el procedimiento hasta que el cilindro se rompiera en varios segmentos precisamente en el momento de alcanzar el diámetro de 32 mm. En seguida se colocaron en un vidrio de reloj los fragmentos del cilindro y se repitió el procedimiento hasta tener en el vidrio de reloj aproximadamente 6gr de suelo (Fig. 9).

Se obtuvo el peso de la muestra húmeda y posteriormente se secó en horno a una temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas para determinar su peso seco. El contenido de agua de la muestra se determinó empleando la fórmula (12).

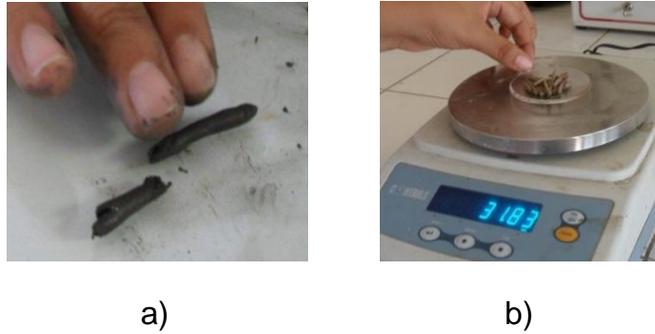


Fig. 9 Determinación del Límite Plástico. a) Formación y fragmentación de los cilindros, b) Pesaje de la muestra seca.

Contracción Lineal (CL)

Para determinar el porcentaje de contracción lineal se llenó el molde de lámina galvanizada con la fracción de la muestra con la que se determinó el límite líquido. El llenado se hizo en tres capas, golpeando el molde sobre una superficie dura para eliminar el aire contenido en la muestra. Después de colocar la última capa, se enrasó el molde con ayuda de la espátula y se secó en horno por un periodo de 24 horas a una temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$. El molde se extrajo del horno y se dejó enfriar a temperatura ambiente para posteriormente determinar la longitud media de la barra del material seco con un calibrador con vernier (Fig. 10).

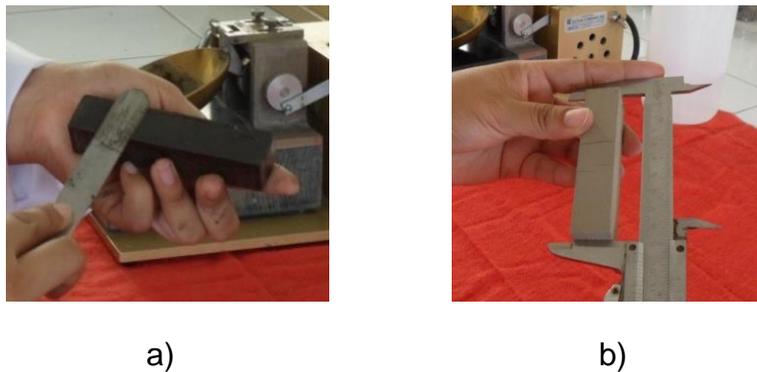


Fig. 10 Determinación de la contracción lineal. a) Enrasado del molde, b) Medición de la longitud de la barra seca.

La contracción lineal se calculó con la siguiente ecuación:

$$CL = \frac{L_{\omega} - L_s}{L_{\omega}} \times 100 \dots (15)$$

Donde:

CL : Contracción lineal (%)

L_w : Longitud de la barra de suelo húmedo (cm)

L_s : Longitud de la barra de suelo seco (cm)

3.5 Elaboración de ladrillos

Las dimensiones de los especímenes fueron 140x70x25 mm, las cuales corresponden a una escala 1:2 de un ladrillo artesanal común empleado en la industria de la construcción.

Los cálculos realizados para determinar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los ladrillos se realizaron con base en fórmulas matemáticas descritas en el Capítulo 2. Dichas fórmulas incluyen variables tales como la masa, largo, ancho y espesor de cada espécimen en particular, por lo tanto, las dimensiones de los ladrillos no afectan los resultados. Durante la revisión bibliográfica se observó que en diferentes investigaciones realizadas por otros autores las dimensiones de los especímenes también son variables (Raut et al., 2011, Muñoz et al., 2014).

Las piezas se moldearon manualmente utilizando moldes de aluminio. El número de probetas elaboradas se determinó con base en el número de piezas solicitadas por las normas aplicables para cada ensayo.

Mezclado: Para el proceso de mezclado de los materiales se empleó una revolvedora con capacidad de 15 litros (marca ELVEC). En primer lugar, se realizó el mezclado de los materiales en seco durante 5 minutos.

Posteriormente se realizó el mezclado de los materiales en polvo con agua durante 12 minutos para obtener una consistencia uniforme y trabajable. Al inicio del mezclado se agregó el 90% del agua requerida, después de 4 minutos de mezclado el equipo se detuvo durante un minuto para despegar el material del recipiente, agregar el 10% de agua restante y continuar con el mezclado (Fig. 11).

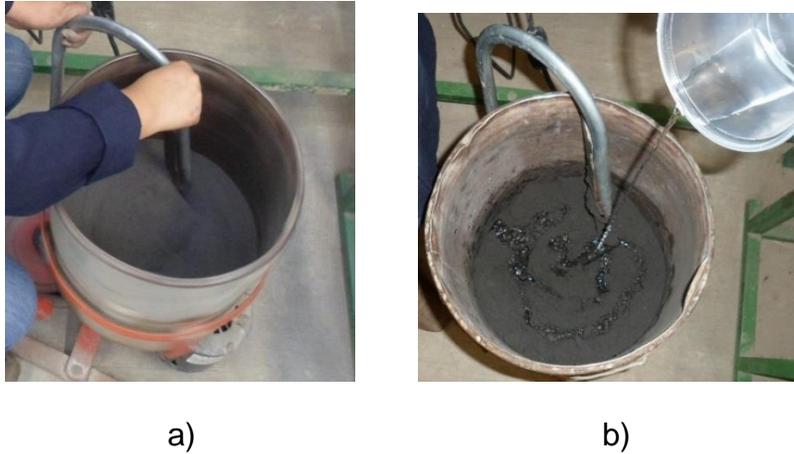


Fig. 11 Proceso de mezclado a) de materiales en seco y b) adición de agua

El proceso de mezclado de materiales descrito en los párrafos anteriores fue aplicado para la elaboración de mezclas binarias y ternarias. Después del mezclado el proceso de elaboración de ladrillos elaborados con mezclas binarias fue diferente al empleado en la elaboración de ladrillos con mezclas ternarias.

A continuación, se describen el proceso de elaboración de los ladrillos a partir de mezclas binarias.

Moldeado: El material ya mezclado se colocó en el interior de cada molde, la colocación y enrase de las probetas se realizó con ayuda de una espátula de acero. Previamente, a los moldes de aluminio se les aplicó una capa delgada de aceite para evitar que una vez elaboradas las probetas, se adhirieran a ellos.

Secado: Después de haber transcurrido 48 horas se retiraron los moldes y los ladrillos verdes permanecieron en su lugar a temperatura ambiente durante cuatro días para perder humedad lentamente y evitar fisuras. Como se observa en la Fig. 12, los ladrillos verdes elaborados con las mezclas binarias mostraron tonalidades grises debido a su contenido de CBC, CV o HS.



Fig. 12 Ladrillos verdes elaborados con mezclas binarias.

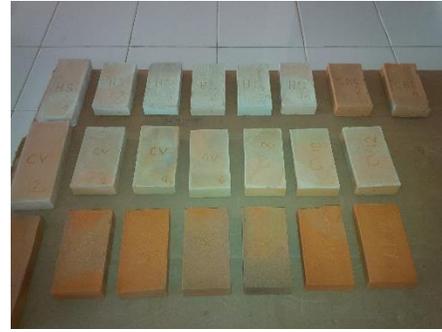
Cocción: Para observar la influencia de la temperatura en el desempeño de los residuos industriales mezclados en la mezcla arcillosa, los especímenes fueron cocidos a 900°C y 1000°C. Solo se evaluaron dos temperaturas de cocción debido a que la temperatura máxima alcanzada por el horno empleado fue de 1000°C. Investigadores como Fernández y colaboradores (2011) recomiendan temperaturas mayores que 900°C para optimizar las propiedades de los ladrillos.

Los ladrillos verdes fueron transportados cuidadosamente hasta el lugar de la cocción. Para la cocción se empleó un horno de tiro directo alimentado por gas L.P. El horno se precalentó durante 30 minutos y después de este tiempo se colocaron en su interior los ladrillos verdes. El horno se cerró y se inició el proceso de cocción, este proceso duró 3.5 horas. Para corroborar la temperatura máxima de cocción se emplearon conos pirométricos utilizados comúnmente en la cocción de piezas de cerámica. Se emplearon los conos pirométricos No 08 y No 09 para determinar el momento en que el horno alcanzó las temperaturas de 900°C y 1000°C respectivamente.

Pasadas las 3.5 horas, el horno fue apagado y se dejó enfriar a temperatura ambiente para después extraer los ladrillos (Fig. 13).



a)



b)

Fig. 13 Cocción de ladrillos. a) Ladrillos dentro del horno encendido, b) Ladrillos cocidos.

El proceso de elaboración de ladrillos con mezclas ternarias se describe a continuación.

Mezclado: El mezclado de los materiales se realizó con el mismo procedimiento descrito en la sección anterior.

Moldeado: Los ladrillos se elaboraron en las instalaciones del taller de cerámica del ICAPET-Oaxaca. El molde se relleno en dos capas, cada capa fue apisonada con un bloque de madera de 120x30x30 mm como se muestra en la Fig. 14. El proceso de apisonado se realizó con el propósito de compactar mejor la mezcla y para que la mezcla se distribuyera uniformemente incluso en las esquinas del molde.



a)



b)

Fig. 14 Elaboración de ladrillos a partir de mezclas ternarias. a) Apisonamiento de la primera capa de material, b) Acabado de la superficie del ladrillo.

La Fig. 15 muestra los ladrillos verdes obtenidos con la mezcla control y las mezclas ternarias. Estas últimas adquirieron un color obscuro por la presencia de la CBC, la CV y el HS.

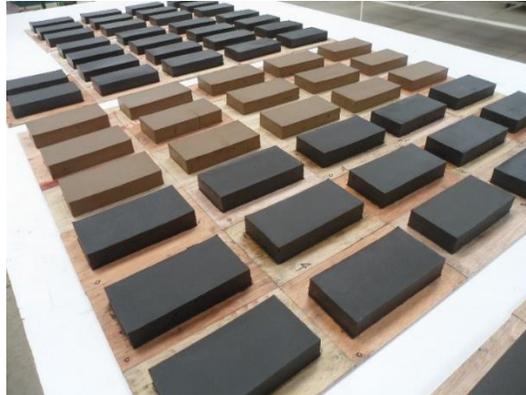


Fig. 15 Ladrillos verdes elaborados con la mezcla control y mezclas ternarias.

Secado: Con el fin de propiciar el ahorro de energía, la etapa de secado tuvo lugar en una habitación a temperatura ambiente durante 7 días para reducir lentamente el contenido de humedad antes de la cocción y evitar fisuras. A los dos días de edad, los ladrillos fueron colocados sobre una de sus caras laterales con el fin de prevenir alabeos, ver Fig. 16.



Fig. 16 Proceso de secado de ladrillos elaborados con mezclas ternarias.

Colocación de ladrillos verdes en el interior del horno: Para el proceso de cocción, se decidió hacer un acomodo aleatorio de los ladrillos verdes en el interior del horno. Esta distribución se realizó con el objetivo de que todas las mezclas recibieran un proceso de cocción similar (Fig. 17).



Fig. 17 Acomodo aleatorio de los ladrillos verdes al interior del horno

Cocción: La cocción de los ladrillos se realizó en las instalaciones del ICAPET-Oaxaca. El equipo empleado fue un horno de tiro invertido alimentado con gas LP. Durante el proceso de cocción la temperatura del horno fue monitoreada con termopares tipo K (con registro de hasta 1250°C) localizados uno en el frente del horno y otro en la parte trasera. Ambos conectados a un pirómetro marca Autonics modelo TZN4S-14R.

La operación del horno fue de forma manual, abriendo o cerrando en mayor o menor medida las válvulas del combustible para controlar la temperatura del horno. Por lo tanto, la rampa de calentamiento en las tres quemas no fue completamente similar; sin embargo, tuvieron la misma tendencia en su velocidad de calentamiento y se obtuvieron los siguientes promedios: durante la primera hora 8.5°C/minuto, de la segunda a la cuarta hora 2.19°C/minuto, durante la quinta y sexta hora 1.79°C/minuto.

De esta forma para la temperatura de cocción de 900°C el tiempo requerido fue de 4 horas 30 minutos, para la de 1000°C fue de 5 horas 30 minutos y para la temperatura de 1100°C el tiempo requerido fue de 6 horas 25 minutos.

Para evitar un choque térmico que pudiera afectar la estabilidad de los ladrillos, el enfriamiento se desarrolló a la velocidad normal del horno. La descarga del horno se realizó a las 48 h posteriores al inicio de cada quema para garantizar que los ladrillos se encontraran a temperatura ambiente (entre 18 y 25°C). Los ladrillos

cocidos (Fig. 18) fueron resguardados en una habitación seca a temperatura ambiente.



Fig. 18 Ladrillos cocidos elaborados con mezclas ternarias.

3.6 Determinación del Índice de calentamiento

Durante la cocción de los ladrillos elaborados con mezclas ternarias se llevó un registro del incremento de la temperatura con respecto al tiempo. Los datos obtenidos se graficaron y se determinó el Índice de calentamiento (López, 2016) con la finalidad de cuantificar el calor total registrado por los dos termopares colocados en el horno.

El índice de calentamiento (IC) consiste en calcular las áreas bajo las curvas de temperatura contra tiempo de cocción. La ecuación empleada fue la siguiente:

$$IC = (T_{i-1})(t_i - t_{i-1}) + \frac{(T_i - T_{i-1})(t_i - t_{i-1})}{2} \dots (16)$$

Donde:

T_i y T_{i-1} : Temperaturas inicial y final en cada intervalo de medición (°C)

t_i y t_{i-1} : Tiempo inicial y final en cada intervalo de medición (h)

IC: Índice de calentamiento en (°C*h).

3.7 Contracción Lineal de ladrillos por secado y cocción

Este parámetro se evaluó en ladrillos elaborados a partir de mezclas ternarias. Para determinar el porcentaje de contracción lineal se determinó la longitud de los ladrillos antes y después de su cocción. Se realizaron 15 mediciones por tipo de mezcla. Para las mediciones se utilizó un calibrador electrónico marca Elvec.

La contracción lineal se calculó con la siguiente ecuación:

$$CL_c = \frac{L_v - L_c}{L_v} \times 100 \dots (17)$$

Donde:

CL_c : Contracción lineal de los ladrillos por cocción (%)

L_v : Longitud del ladrillo verde (cm)

L_c : Longitud del ladrillo cocido (cm)

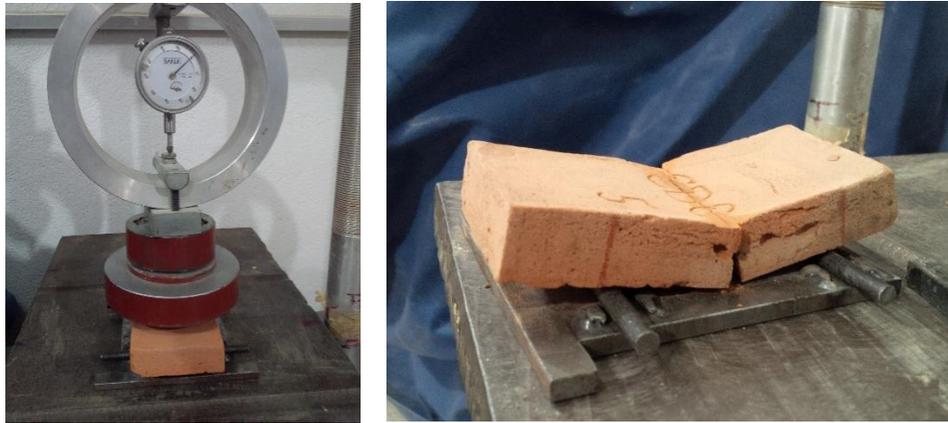
3.8 Ensayo de resistencia a la flexión

Para realizar este ensayo en los ladrillos elaborados con las mezclas binarias y ternarias el procedimiento y el equipo empleado fue el mismo. La resistencia a la flexión expresada como el Módulo de Ruptura (MR) se determinó con base en los procedimientos descritos en la norma ASTM C 67-14. Se empleó una Prensa multicarga con capacidad para 5 ton., marca Gotest Instrument Corp. Modelo S5830 y anillo de carga con indicador de cuadrante con capacidad de 2 ton.

Se fabricó un dispositivo metálico (placa y pernos metálicos) para apoyar en dos puntos inferiores los ladrillos a ensayar. La separación de los apoyos fue de 80 mm. Cada pieza de ladrillos fue marcado en su centro y a partir de este se marcaron líneas en los costados para hacerlos coincidir con los apoyos.

El procedimiento de la prueba fue el siguiente:

Para iniciar, el dispositivo de apoyo se colocó en la base de la prensa y sobre el dispositivo se colocó el ladrillo a ensayar. Posteriormente, sobre el ladrillo se colocó una barra de acero de 1/4" pulgada para la distribución de la carga y el pistón del equipo se ajustó hasta que hiciera contacto con el ladrillo. Entonces el indicador se colocó en ceros y se inició la aplicación de la carga de manera constante, (deformación de 1mm en 60 segundos) hasta que ocurrió la fractura de la probeta. Se registró la deformación a la cual sucedió el momento exacto de la fractura. El MR se calculó con la ecuación (6). La Fig. 19 muestra aspectos de la prueba a flexión.



a)

b)

Fig. 19 Prueba de flexión. a) Colocación del anillo de carga, c) Ladrillo con falla por flexión.

3.9 Ensayo de resistencia a compresión

Para evaluar la resistencia a compresión de los ladrillos elaborados con las mezclas binarias, se realizaron ensayos en el laboratorio de Materiales de construcción del CIIDIR-Oaxaca. La evaluación de la resistencia a compresión de ladrillos elaborados con las mezclas ternarias se realizó en el laboratorio de Cerámicos y pruebas Mecánicas de la UAEH.

Para ambos casos se emplearon los procedimientos especificados en la norma ASTM C 67-14. Por la diferencia en el equipo empleado para la aplicación de la carga y el proceso de “cabeceado”, a continuación, se describe cada caso.

3.9.1 Ensayo de resistencia a compresión para mezclas binarias

La carga a compresión se aplicó con una Prensa hidráulica marca ELVEC 271103 de 120 ton de capacidad. Para generar una superficie de contacto lisa en los planos de los ladrillos perpendiculares a la aplicación de la carga, los ladrillos fueron primeramente “cabeceados” con azufre. Para esto, se derritió azufre colocándolo al fuego en un recipiente. El azufre en estado líquido se vació en un molde rectangular e inmediatamente el ladrillo se colocó sobre el azufre para que este al solidificarse quedara adherido a la superficie del ladrillo.

Después de haber sido cabeceados los ladrillos fueron ensayados bajo el procedimiento siguiente:

El ladrillo a ensayar se colocó en la base de la prensa y se centró. Se aplicó carga hasta llevar a la falla a la probeta, la carga a la cual falló la probeta fue registrada. La resistencia compresión de los ladrillos se calculó con la ecuación (8). A continuación, se presentan los aspectos más importantes de la prueba (Fig. 20).

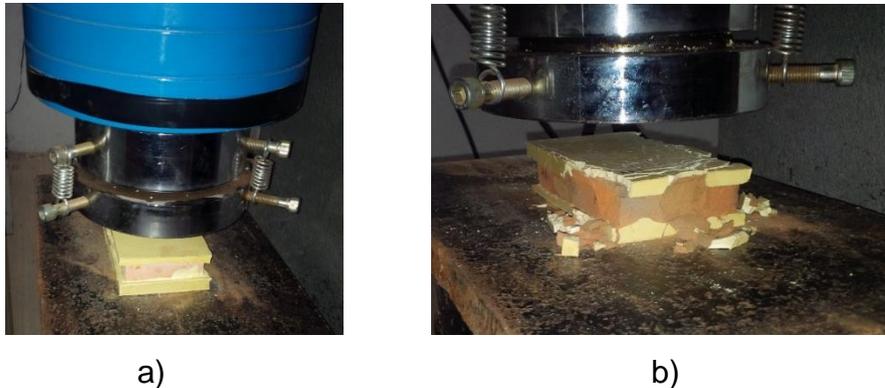


Fig. 20 Prueba de resistencia a compresión. a) Aplicación de carga, b) Falla por compresión.

3.9.2 Ensayo de resistencia a compresión para mezclas ternarias

Se ensayaron cinco ladrillos por cada mezcla y temperatura de cocción, 75 en total. Los ladrillos se cabecearon con yeso para obtener superficies planas y paralelas en las cuales aplicar la carga uniformemente.

En un recipiente se preparó manualmente una mezcla con 150 g de yeso y 110 ml de agua potable para cabecear 2 ladrillos. Cada mitad de la mezcla se vació sobre un fragmento de periódico previamente mojado con agua, éste estaba colocado sobre un cristal de 6 mm de espesor que aseguraba una superficie plana y nivelada. Sobre la capa de yeso se colocó rápidamente el ladrillo nivelándolo con un nivel de burbuja. Antes de que el yeso endureciera se eliminaron los excesos del perímetro del espécimen, este se levantó y se le retiró el periódico para comprobar que la superficie fuera lisa. El mismo proceso se repitió para cabecear la segunda superficie del espécimen. Este proceso se muestra en la Fig. 21. Los especímenes cabeceados permanecieron tres días a temperatura ambiente para secarse, posteriormente se realizó el ensayo.



Fig. 21 Proceso de cabeceo de ladrillos para ensayo de resistencia a compresión.

Para aplicar la carga se empleó una máquina Instron, 8802 con capacidad máxima de 250 kN y velocidad de carga de 35 kN/min. La resistencia a compresión de los ladrillos se determinó con la ecuación (8). Durante el ensayo los especímenes se colocaron dentro de una bolsa plástica para retener los fragmentos del ladrillo colapsado y mantener limpia el área de trabajo, Fig. 22.

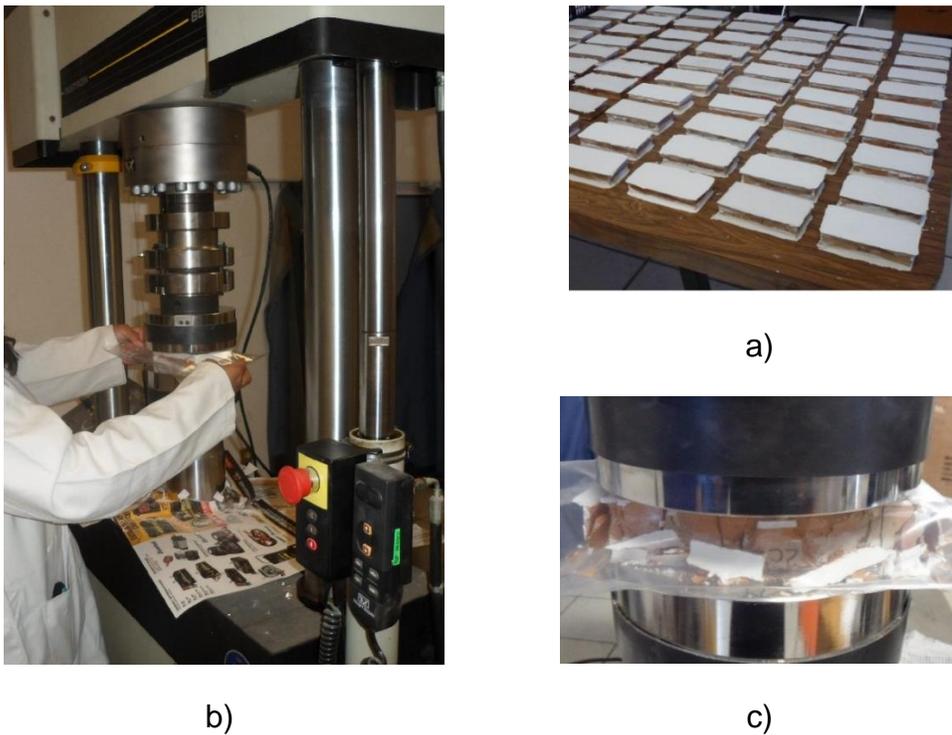


Fig. 22 Desarrollo de ensayo de resistencia a compresión. a) Ladrillos cabeceados, b) Colocación del espécimen en la máquina Instron, c) Ladrillo colapsado.

3.10 Prueba de velocidad inicial de absorción de agua

Esta prueba solo se realizó en los ladrillos elaborados con mezclas binarias. Se realizó con base en los lineamientos de la Norma ASTM 67 – 14.

El ensayo consistió en colocar el ladrillo sobre soportes de material inoxidable dentro de un recipiente con agua limpia a temperatura ambiente, de tal forma que el espejo de agua no rebasara la parte superior de los soportes en 3.18 ± 0.25 mm cuando el nivel fue ajustado con un ladrillo de referencia previamente saturado.

Con un cronómetro se midió el tiempo, este empezó a correr desde el instante en que la superficie inferior del espécimen hizo contacto con el espejo del agua. Pasado el minuto, el ladrillo se retiró del agua tratando de escurrir el exceso de agua por una esquina, posteriormente se secó el exceso de humedad con un paño húmedo para pesar el espécimen (Fig.23). La velocidad inicial de absorción se determinó con la ecuación (11).



a)



b)

Fig. 23 Prueba de velocidad inicial de absorción de agua.
a) Especimen absorbiendo agua, b) Registro de pesos.

3.11 Densidad aparente y porosidad aparente

La densidad aparente y la porosidad aparente se determinaron en los ladrillos elaborados con mezclas ternarias, con base en los procedimientos descritos en la norma ASTM C373-88. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Cerámicos de la UAEH.

Por cada tipo de mezcla y temperatura de cocción se obtuvieron cinco fragmentos de ladrillos sanos cuyos bordes afilados fueron limados con fragmentos del mismo

ladrillo del que provenían. Los fragmentos se secaron durante 24 horas a 113°C en un horno eléctrico de laboratorio para determinar su peso seco con una balanza analítica Ohaus Pioneer. A continuación los especímenes se colocaron en agua hirviendo durante 5 horas, después se mantuvieron saturados en agua durante 24 horas más. Posteriormente de cada espécimen se determinó su masa saturada y su masa suspendida en agua (Fig. 24).



Fig. 24 Hervido y pesaje de especímenes para determinar porosidad y densidad

Con los datos obtenidos se determinó el volumen de cada muestra con la siguiente ecuación:

$$V = M - S \dots (18)$$

Donde V es el volumen en cm^3 , M es la masa saturada en gramos y S es la masa suspendida también en gramos. Posteriormente se determinó la porosidad aparente con la ecuación (19) y la densidad aparente con la ecuación (20):

$$B = \frac{D}{V} \dots (19) \qquad P = \frac{M-D}{V} \dots (20)$$

Donde B es la densidad aparente en g/cm^3 , D es la masa seca en gramos y P es la porosidad aparente expresada como %.

3.12 Absorción de agua por inmersión durante 24 horas

Este ensayo se realizó a los ladrillos elaborados con las mezclas ternarias. El procedimiento se desarrolló en las instalaciones del Laboratorio de Cerámicos de la

UAEH, siguiendo los procedimientos establecidos por la norma ASTM C67-14. Se ensayaron cinco especímenes por cada mezcla y temperatura de cocción. Los especímenes se secaron en horno eléctrico durante 24 horas a 113°C y después se pesaron (Fig. 25).



Fig. 25 Pesaje de ladrillos secos para la pruebas de absorción

Los ladrillos secos se sumergieron en agua desionizada durante 24 horas, posteriormente se extrajeron del agua y se secaron con una franela húmeda para eliminar el exceso de agua, inmediatamente se pesaron para determinar el % de agua absorbida (Fig. 26). El porcentaje de absorción de agua se determinó con la ecuación (10).



a)



b)

Fig. 26 Ensayo de absorción por inmersión durante 24 horas

a) Ladrillos inmersos durante 24 horas, b) Pesaje de los ladrillos saturados

3.13 Absorción de agua por hervido durante 5 horas

Para desarrollar este ensayo que se aplicó a los ladrillos elaborados con las mezclas ternarias, se siguió el procedimiento establecido por la norma ASTM C67-14. Tuvo lugar en las instalaciones del Laboratorio de Cerámicos de la UAEH. Se ensayaron cinco especímenes por cada mezcla y temperatura de cocción, 75 en total. Los especímenes se colocaron en un recipiente con agua hirviendo durante 5 horas, después el agua se dejó enfriar hasta alcanzar los 27°C. Entonces los ladrillos se extrajeron del agua y se secaron con una franela húmeda para eliminar el exceso de agua y pesarlos. El porcentaje de absorción de agua se determinó con la ecuación (10), el proceso del ensayo se muestra en la Fig. 27.



a)



b)

Fig. 27 Ensayo de absorción por *hervido* durante 5 horas

3.14 DRX en ladrillos: cuantificación de fase amorfa y mineralogía

La técnica de DRX se empleó con el objetivo de determinar el porcentaje de fase amorfa y las fases minerales presentes en los ladrillos elaborados con las mezclas ternarias cuando fueron cocidos a 900, 1000 y 1100°C. Los difractogramas se obtuvieron con el mismo equipo empleado para el análisis de las materias primas en polvo.

Estos análisis fueron de suma importancia ya que el porcentaje de fase amorfa en los ladrillos se relaciona con la cantidad de fase líquida de sinterización, la cual durante la cocción contribuyó al cierre de poros, influyendo en el grado de densificación de los ladrillos y por lo tanto en su resistencia mecánica y durabilidad. Por otra parte, las fases minerales identificadas en los ladrillos describen la

interacción entre los compuestos de los materiales precursores y los cambios que sufrieron durante las tres diferentes temperaturas de cocción.

Para obtener los polvos los ladrillos se molieron a mano en mortero con pistilo de porcelana para obtener un tamaño de partícula inferior a 1mm. Posteriormente 50 g del polvo obtenido se molieron durante 16h en un molino de bolas ubicado en el Laboratorio de Cerámicos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Se empleó un molino de acero inoxidable de 12.5 cm de diámetro y 12.5 cm de altura con 2460 g de esferas metálicas que ocupaban el 40% del volumen del molino (Fig. 28).

El contenido de fase amorfa en los ladrillos cocidos se determinó a partir de patrones de DRX usando el método de estándar interno y cuantificando por el método RIR. Los cálculos se realizaron con las ecuaciones (12) y (13).

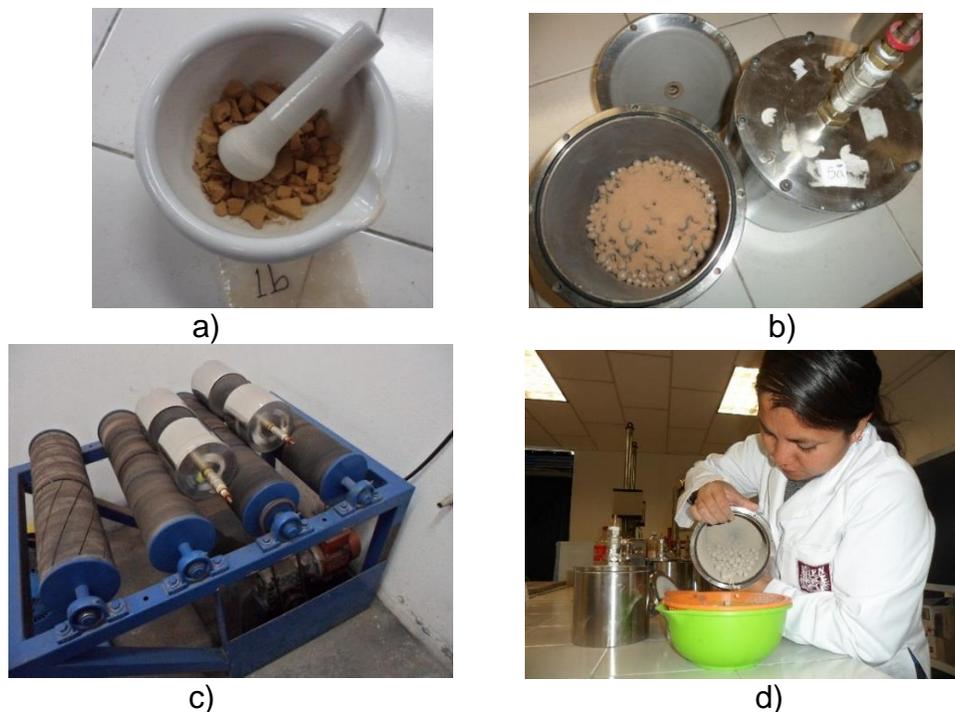


Fig. 28 Proceso de molienda de ladrillos para DRX, a) Molienda a mano con mortero, b) Colocación de polvos en molino de bolas, c) Molino de bolas en operación, d) Recuperación de los polvos.

Los polvos obtenidos de la molienda se mezclaron con alúmina calcina Alcoa A13 tratada térmicamente a 1400C durante 1 h para asegurar la presencia de solo la

fase alfa. El proceso empleado fue el mismo descrito para la cuantificación de fase amorfa de los residuos industriales en polvo (Fig. 29).

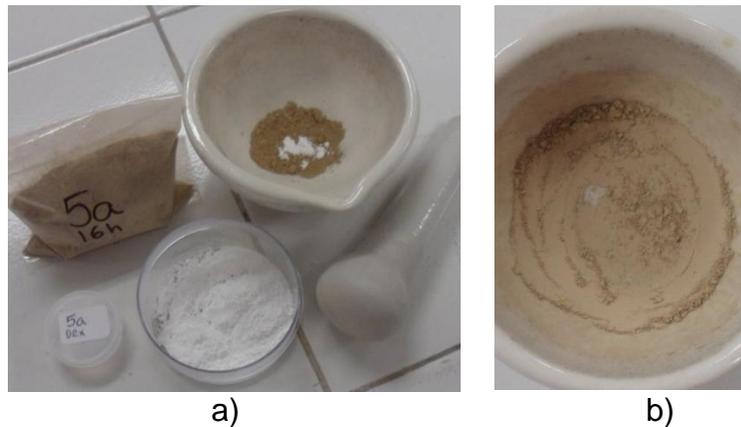


Fig. 29 Preparación de muestra de polvo de ladrillo cocido para análisis de DRX.
a) Materiales, b) mezcla homogénea.

3.15 MEB en ladrillos

El análisis de MEB se realizó en ladrillos elaborados con las mezclas ternarias. El objetivo de este análisis fue observar físicamente la microestructura de los ladrillos cocidos. De esta forma, la evolución en la microestructura de los ladrillos debido al incremento en la temperatura de cocción pudo relacionarse con los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia mecánica y durabilidad.

Las micrografías se obtuvieron con un Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL modelo JSM-6610LV (Fig. 30) ubicado en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Se preparó una muestra por cada mezcla y temperatura de cocción, 15 muestras en total. Las muestras se prepararon con un desbaste en pulidora eléctrica hasta darle un acabado espejo o acercarse lo más posible a este tipo de acabado. Los ladrillos elaborados con las mezclas que contenían 40% de CBC no llegaron a brillar como espejo debido a que no presentaban la dureza suficiente y se desintegraban fácilmente con las lijas de desbaste.



Fig. 30 Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL modelo JSM-6610LV equipado con analizador EDS marca OXFORD, modelo X-MAX.

Las muestras recibieron un recubrimiento de Oro-Paladio antes de ingresar a la cámara de observación del microscopio. El voltaje de aceleración empleado fue de 20 kV.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los apartados siguientes se presentan los resultados obtenidos y la discusión de los mismos.

4.1 Caracterización de los materiales

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización química y morfológica de los materiales.

4.1.1 Análisis químico

La Tabla 7 muestra la composición química de la arcilla y los tres residuos estudiados. Los resultados son similares a los reportados por otros investigadores. Se puede observar que los principales compuestos presentes en los materiales son SiO_2 , Al_2O_3 , CaO y Fe_2O_3 .

Lo anterior es importante porque durante la sinterización de productos cerámicos estos compuestos participan llenando poros por fase líquida. Los óxidos de aluminio y silicio presentes en los residuos incrementan la disponibilidad de estos en la mezcla arcillosa y durante la cocción podrían participar en la formación de mulita que es una fase mineral de alta dureza (Dana et al., 2004). La presencia de SiO_2 sugiere la presencia de cuarzo que es un material que reduce la plasticidad de las arcillas, pero al mismo tiempo otorga estabilidad volumétrica a los cuerpos cerámicos (Teixeira et al., 2008).

Tabla 7. Composición química de la arcilla y residuos industriales

Compuesto	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	SiO_2	TiO_2	PI
AR	18.25	3.89	2.94	1.95	1.10	0.06	3.42	0.40	61.19	0.94	4.67
CBC	14.61	2.36	5.04	3.29	1.43	0.18	1.57	0.85	56.37	0.96	10.53
CV	20.01	4.00	5.42	0.96	0.63	0.10	0.19	0.38	64.12	1.12	2.60
HS	0.18	0.72	0.05	0.87	0.36	0.01	0.12	0.13	92.74	--	3.84

PI: Pérdidas por Ignición a 1000°C

La AR y CBC tienen las mayores cantidades de fundentes (CaO , K_2O y Na_2O). Los iones (Ca^{2+} , K^+ y Na^+) son modificadores que al entrar a la red vítrea debilitan los enlaces químicos, reduciendo las temperaturas de fusión. Durante la sinterización el óxido de hierro puede contribuir a iniciar la formación de fase líquida a temperaturas menores, mejorando el desempeño de los fundentes (Souza et al., 2011). Estos óxidos pueden complementar a los óxidos de Si y Al de la CV y HS para incrementar la fase líquida durante la sinterización, produciendo ladrillos más densos y resistentes.

Las pérdidas por ignición de la AR, CV y HS son inferiores al 5%, mientras que el mayor porcentaje (10.53%) lo presenta la CBC. Algunos investigadores (Jiménez et al. 2013, Torres et al. 2014) han relacionado el alto contenido de pérdidas por ignición de la CBC (mayor al 10%) con la presencia de altos niveles de carbón.

4.1.2 DRX en AR, CBC, CV y HS

Los resultados obtenidos con el análisis de DRX fueron congruentes con los resultados de la composición química, se observó que la arcilla y los residuos industriales contienen minerales del grupo de los aluminosilicatos y otros. En todos los materiales se detectó cuarzo.

Las fases minerales comúnmente presentes en las arcillas son: minerales arcillosos, cuarzo y feldespatos (Callister, 2000). En la elaboración de productos cerámicos tradicionales, los minerales arcillosos aportan plasticidad a las mezclas haciéndolas moldeables, el cuarzo contribuye dando estabilidad volumétrica durante el secado y la cocción, mientras que los feldespatos actúan reduciendo la temperatura de sinterización y promoviendo la formación de la fase líquida vítrea para reducir la porosidad.

El patrón de DRX de la AR se muestra en la Fig. 31. Se identificaron las siguientes fases: montmorillonita-clorita que es un mineral arcilloso, cuarzo, y del grupo de los feldespatos se detectaron albita, albita cálcica ordenada y ortoclasa; otros silicatos encontrados fueron el cloritoide y la cordierita.

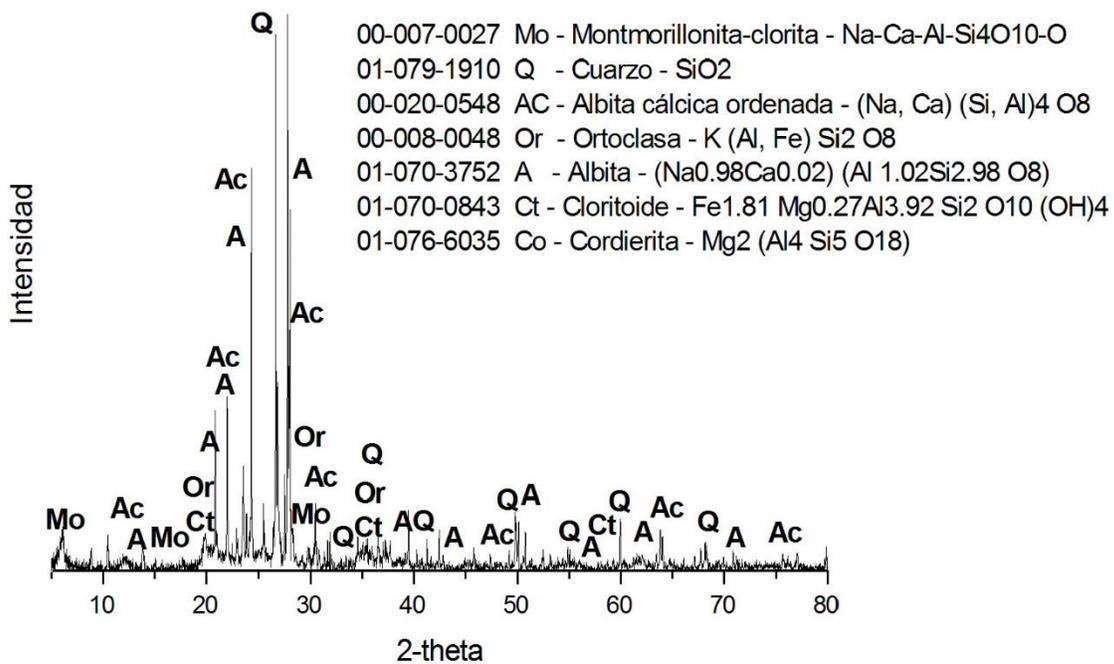


Fig. 31 Patrón de DRX de AR

Para la CBC, en el patrón de DRX (Fig. 32) se identificaron cuarzo y en mayor proporción anorthita sódica desordenada perteneciente al grupo de los feldespatos.

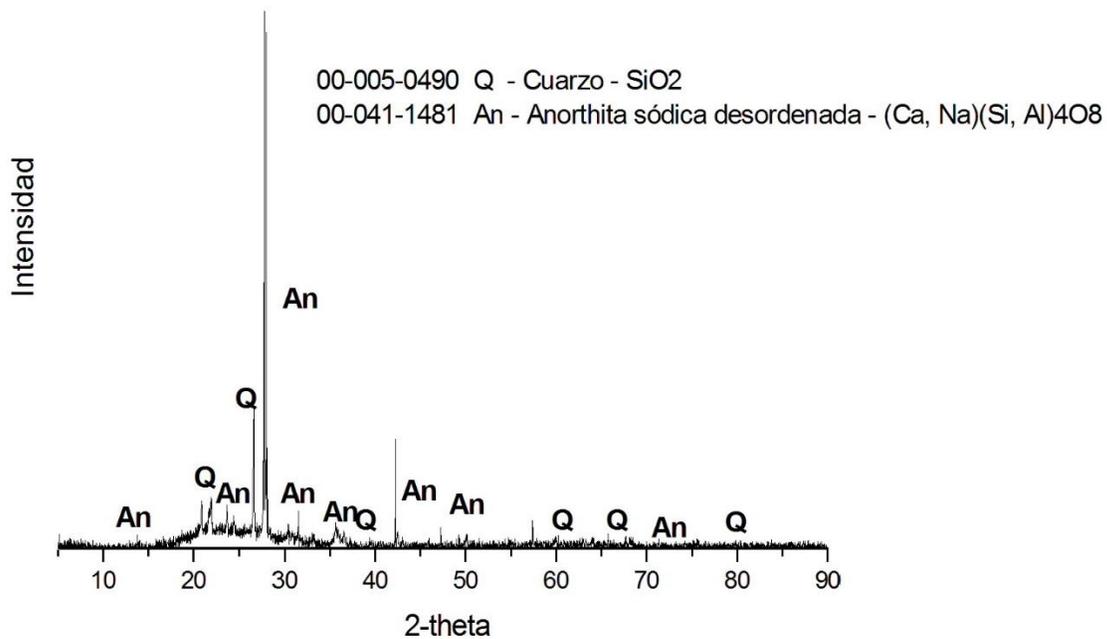


Fig. 32 Patrón de DRX de CBC

El patrón de DRX de la CV de la Fig. 33, muestra que contiene cuarzo y mullita, este último es un mineral de alta dureza que contribuye a aumentar la resistencia mecánica de los cuerpos cerámicos (Dana et al., 2004).

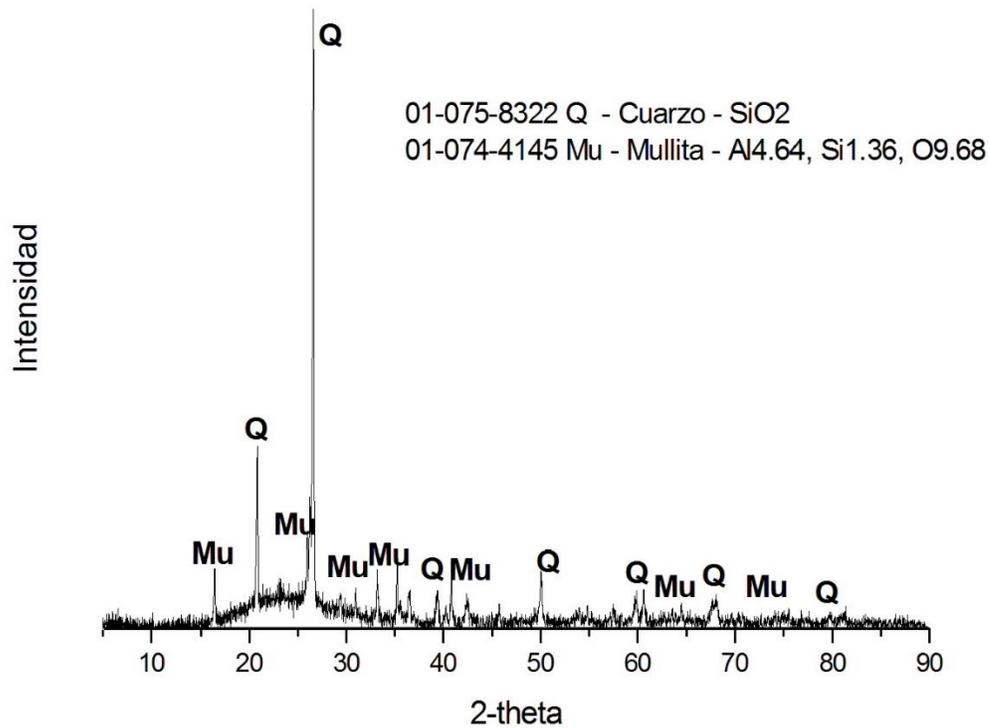


Fig. 33 Patrón de DRX de CV

El patrón de DRX del HS se muestra en la Fig. 34. Las fases minerales detectadas fueron cuarzo y maghemita.

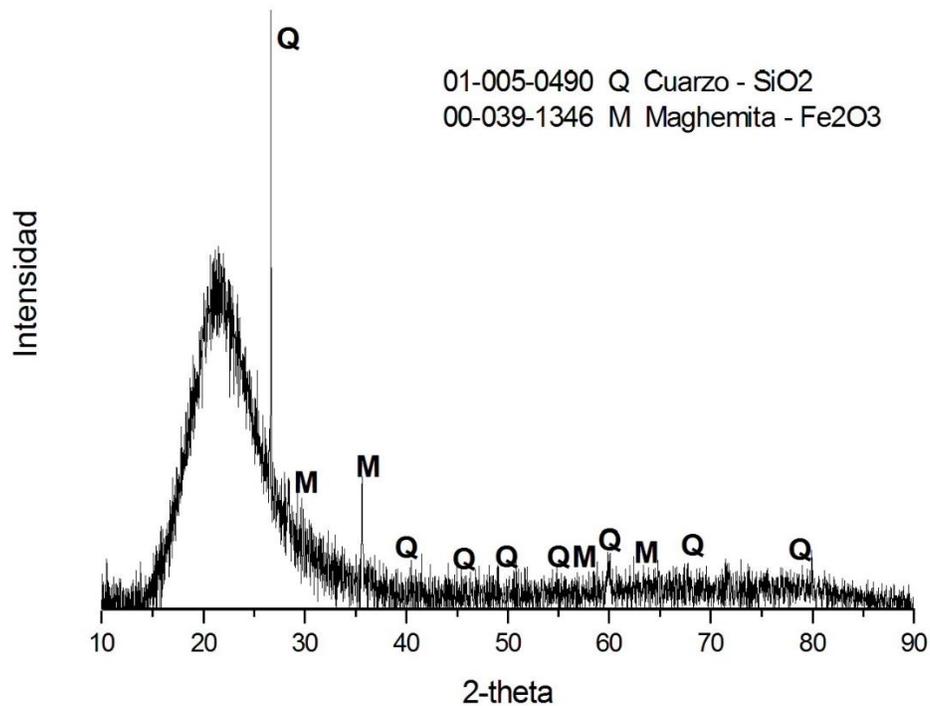


Fig. 34 Patrón de DRX de HS

4.1.3 Cuantificación de fases cristalinas y fase amorfa en CBC, CV y HS

Los resultados del análisis de cuantificación de fases a partir del método RIR se presentan en la Tabla 8. La determinación del porcentaje de fase amorfa en cada residuo fue de gran importancia ya que es un indicativo de la cantidad de material reactivo disponible en el proceso de sinterización.

En la CBC las fases más abundantes cuantificadas fueron el cuarzo y feldespatos. Estos minerales podrían aportar estabilidad volumétrica y fundentes durante la sinterización, respectivamente.

La CV mostró el mayor contenido de cuarzo (11.28%), pero también fue el único residuo en el que se detectó mullita, que es un mineral de alta dureza.

Tabla 8. Contenido de fase amorfa en residuos industriales

Grupo	Fase identificada	Residuo		
		CBC	CV	HS
		(% en peso)		
Cuarzo	01-075-8322 Cuarzo - SiO ₂	4.80	11.28	
	01-079-1910 Cuarzo - SiO ₂			1.56
Feldespatos	00-020-0548 Albita, cálcica, ordenada - (Na,Ca) Al(Si,Al) ₄ O ₈	7.80		
	01-075-1634 Anorthoclasea - (Na _{0.85} K _{0.14}) (Al Si ₃ O ₈)	7.16		
Anfíboles	00-043-0665 Ferrotschermakita - Ca ₂ Fe ₃ Al ₂ (Si ₆ Al ₂) O ₂₂ (OH) ₂	2.08		
Otros	00-039-1346 Maghemita-C - Fe ₂ O ₃			1.82
	00-005-0586 Calcita - Ca C O ₃ ,		0.88	
	00-036-0426 Dolomita - Ca Mg (CO ₃) ₂		2.58	
	01-071-6336 Magnetita - Fe ₃ O ₄	0.61		
	01-076-2578 Mullita - (Al _{2.41} Si _{0.59}) O _{4.793}		10.03	
Fase amorfa		77.55	75.23	96.62

La cuantificación mostró que el HS contiene un bajo porcentaje de cuarzo (1.56%), lo cual es congruente con su naturaleza amorfa reportada por la literatura. Su porcentaje de fase amorfa fue de 96.62%, superando a la CBC con 77.55% y a la CV con 75.23%. Los altos porcentajes de fase amorfa podrían ser favorables para la formación de mayores cantidades de fase vítrea de sinterización durante la cocción de los ladrillos.

El principal componente del HS es el óxido de silicio amorfo que también resulta benéfico para incrementar la resistencia mecánica de los materiales. A diferencia del óxido de silicio amorfo, cuando el cuarzo es sometido a altas temperaturas, tienen una reversión de estructura de α a β a los 573°C durante el proceso de enfriamiento. Este cambio en su estructura implica cambios en su volumen y densidad, lo cual puede dar origen a la formación de poros entre partículas o generar tensiones que podrían reducir la resistencia mecánica de los materiales cerámicos (Souza et al., 2011).

4.1.4 Morfología de partículas de AR, CBC, CV y HS

En la Fig. 35 se muestran las micrografías obtenidas por MEB. La arcilla mostró partículas sólidas de diferentes tamaños con forma irregular. En la CBC se identificaron partículas de diferentes tamaños y con formas irregulares, algunas densas y otras porosas.

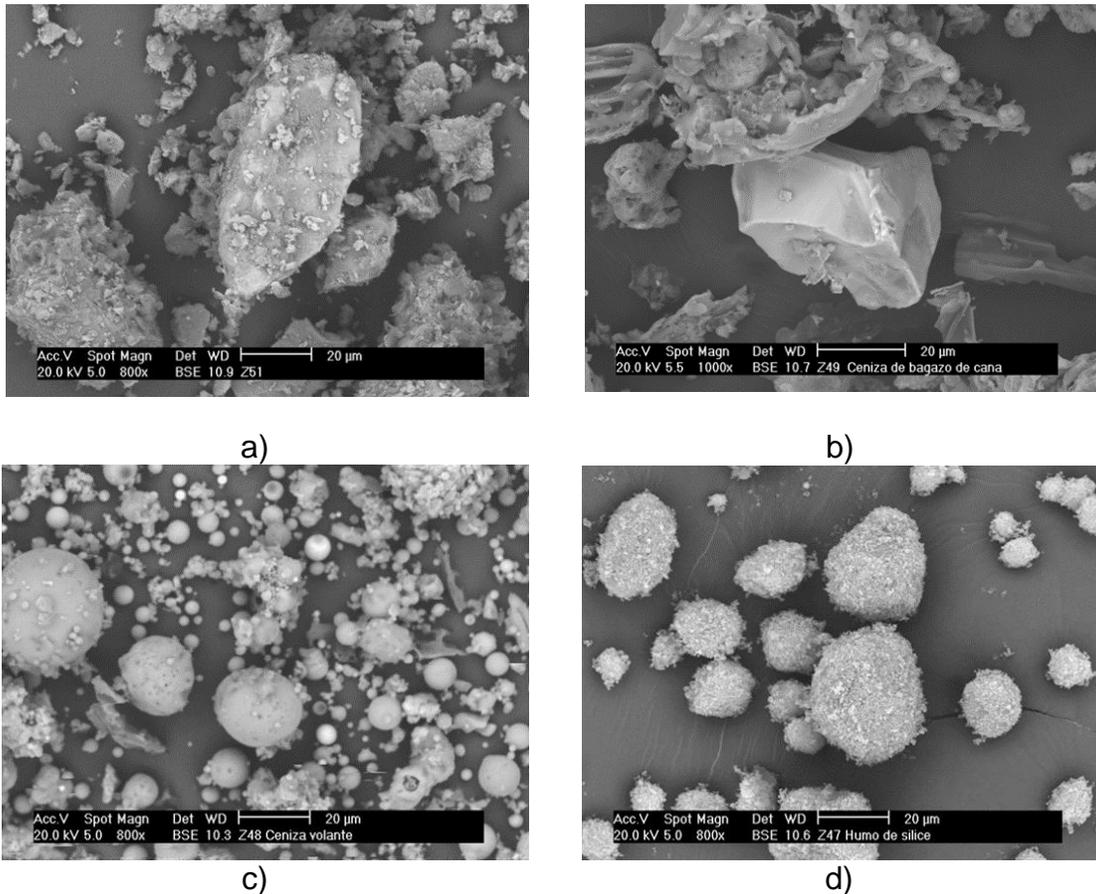


Fig. 35 Micrografías de materiales en polvo a) AR, b) CBC, c) CV, d) HS.

Como lo reporta la literatura, la forma esférica irregular de las partículas de CV y HS se debe a que en su origen fueron transportadas por el aire (Kosmatka et al., 2004). Las partículas del HS se observan aglomeradas, su diámetro promedio reportado en la bibliografía es de 0.1 μm .

Se ha observado que la forma y el tamaño de las partículas han tenido efectos significativos en la trabajabilidad de mezclas de materiales basados en cemento Portland (Choo 2003), por lo cual fue importante realizar pruebas a las mezclas

arcillosas en estado fresco para determinar sus características con la presencia de los residuos industriales.

4.1.5 TGA en AR, CBC, CV y HS

El análisis térmico de las materias primas realizado en una atmósfera de aire se muestra en la Fig. 36. Entre 50 y 90°C la muestra de AR mostró una pequeña pérdida de masa, lo cual puede corresponder a la pérdida de agua físicamente adsorbida. Para la misma muestra el incremento de la temperatura en el intervalo de 90 a 390°C implicó una ganancia de masa, lo cual podría estar relacionado con una ganancia de oxígeno, posiblemente debido a los procesos de oxidación de los compuestos ferrosos (Nazer et al., 2016). Entre los 390°C y los 540°C la muestra presentó una pérdida de masa que puede ser asignada a la reacción de combustión de la materia orgánica y a la deshidroxilación de los minerales arcillosos (Pérez et al., 2012).

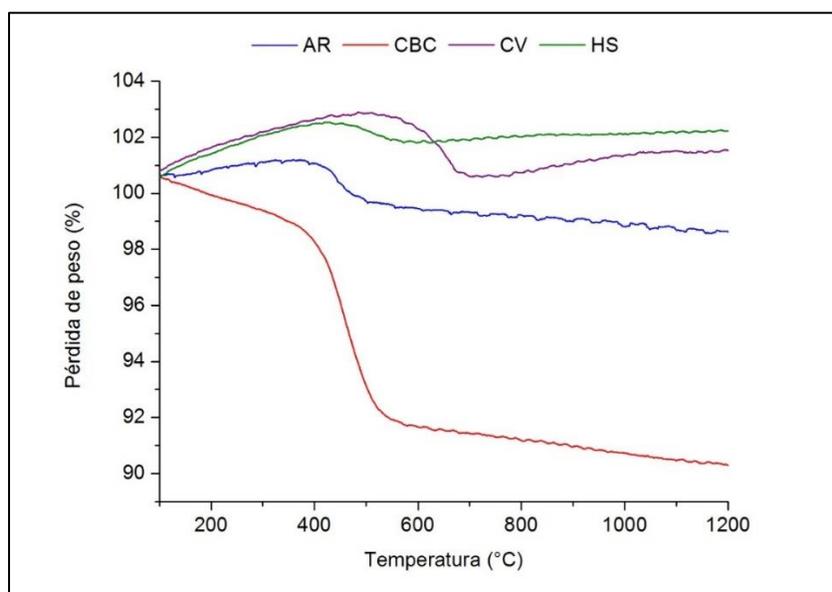


Fig. 36 Curvas TGA de las materias primas.

La CBC comenzó a perder masa desde el inicio del análisis, mostrando un descenso significativo entre los 390°C y los 540°C, el cual corresponde a la materia orgánica presente en la muestra, posiblemente carbón (Torres et al., 2014). Este resultado se relaciona con el 10.53% de pérdida por ignición obtenida en el análisis químico.

Para la muestra de CV el incremento en la temperatura en el intervalo de 50 a 80°C generó la pérdida de peso por la eliminación de humedad en la muestra. Alrededor de los 80°C la muestra comenzó a ganar peso, lo cual podría relacionarse con reacciones de oxidación semejantes a las observadas en la AR. En el intervalo de 570-720°C se observó una pérdida de masa importante, que podría atribuirse a la eliminación de dióxido de carbono procedente de algunos carbonatos (Pérez et al., 2012), principalmente de carbonatos de calcio que se identificaron en la cuantificación de fases minerales (López et al., 2015).

El HS mostró una ganancia de peso en el intervalo de 50 a 390°C, lo cual podría relacionarse con reacciones de oxidación. Entre los 390°C y los 540°C se observó en la muestra una pérdida de masa posiblemente por la combustión de materia orgánica.

En la Fig. 37 se puede apreciar la apariencia de las muestras después de haber sido sometidas al análisis termogravimétrico. Se observó que después de alcanzar 1200°C, y posteriormente enfriarse, la coloración que adoptó la muestra de AR fue un color marrón oxidado. La CBC tomó un color marrón rojizo pero no tan intenso como el de la arcilla. La CV tomó un color arena rojizo y el HS mostró un color gris.



Fig. 37 Apariencia de las muestras de AR, CBC, CV y HS después de su análisis por TGA.

El color marrón se debe al contenido de Fe_2O_3 en cada muestra que de acuerdo al análisis químico es de 2.94% para la AR, 5.04 en la CBC y 5.42% en la CV. Se observa que la CV tiene un porcentaje mayor de Fe_2O_3 que la AR pero su color es de menor intensidad, lo cual podría explicarse con su contenido de TiO_2 que hace las funciones de un pigmento blanco (www.feriadelasciencias.unam, 2107). El

contenido de este óxido en la en la AR es de 0.94%, en la CBC es de 0.96% y en la CV es de 1.12%.

4.1.6 Clasificación de la arcilla en el SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) clasifica a los suelos finos tomando en cuenta sus características de plasticidad. Los datos obtenidos en las pruebas de límites de Atterberg fueron los siguientes:

Límite líquido (LL)= 29%,

Límite plástico (LP)=21%,

Índice plástico (IP) = $LL-LP=8\%$.

Con estos valores graficados en la carta de plasticidad del SUCS se determinó que el material tiene las siguientes características:

Tipo de suelo: CL, arcilla de baja compresibilidad (Clay, Low compresibility).

Arcilla inorgánica de media a baja plasticidad.

Resistencia en estado seco (características al rompimiento): Media a alta.

Dilatancia (reacción al agitado): Nula o muy lenta.

Tenacidad (consistencia cerca del límite plástico): Media.

Estos resultados indican que por su plasticidad y resistencia en estado seco la arcilla es adecuada para emplearse en la elaboración de ladrillos. El IP determinado en esta sección fue tomado como referencia para evaluar el desempeño de las mezclas binarias y ternarias; puesto que si el IP de las mezclas es mayor, mayor es su trabajabilidad.

4.2 Caracterización de mezclas binarias en estado plástico

La gráfica de la Fig. 38 muestra los valores de los límites de Atterberg (también llamados límites de plasticidad) determinados para las mezclas binarias. Los resultados fueron comparados con el Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) e Índice Plástico (IP) de la mezcla control AR100.

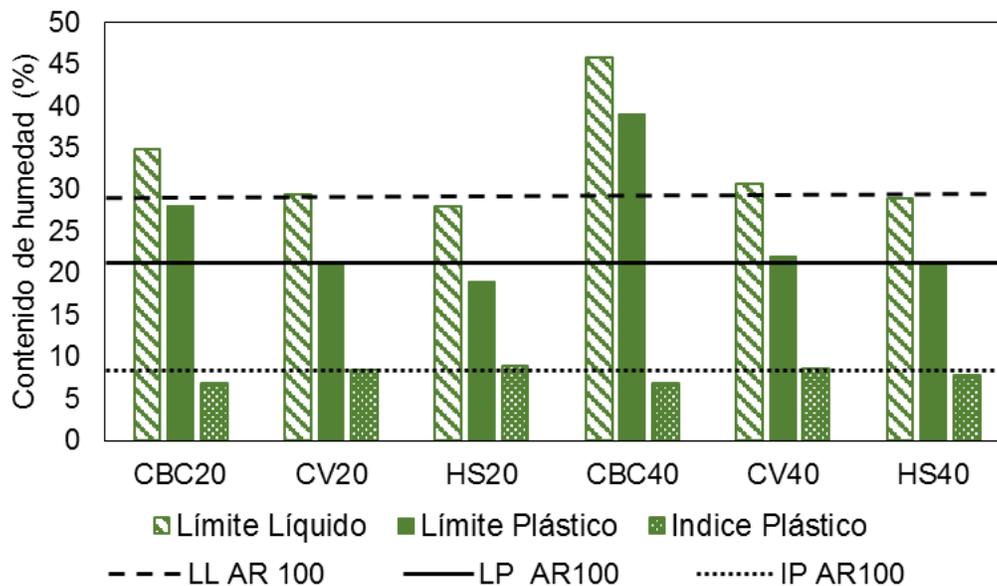


Fig. 38 Límites de Atterberg de mezclas binarias

El incremento en los valores del límite líquido y el límite plástico de las mezclas binarias con respecto a la mezcla control indican un incremento en la demanda de agua para el mezclado. Como se observa, las mezclas con CBC mostraron los valores más altos para estos límites, esto podría atribuirse a su alta pérdida por ignición que se relaciona con la presencia de carbón, el cual es un material absorbente con forma de partículas porosas, como las observadas con la técnica de MEB.

Chandara et al. (2010) observaron que altas cantidades de carbón sin quemar incrementaron los requerimientos de agua y la dosificación de superplastificante en pastas de cemento debido a que estos líquidos son absorbidos por las partículas porosas de carbón.

La mayor demanda de agua para el mezclado también podría relacionarse con la forma y el tamaño de las partículas de CBC que fue cribada por la malla No 200 (74 μm), sus aristas podrían ocasionar una mayor fricción, dificultando el mezclado. En cambio, la forma esférica y el menor tamaño de las partículas de la CV y el HS podrían reducir la fricción facilitando su desplazamiento en el mezclado. La literatura reporta tamaños de partícula promedio de 0.1 μm en el HS y de 20 μm en la CV (Kosmatka et al., 2004).

Las mezclas con CV y HS presentaron mayores índices de plasticidad que la mezcla control AR100. Esto indica que dichas mezclas presentan un mayor intervalo de humedad con el cual pueden ser moldeadas y secarse sin presentar fisuras o cambios de forma.

En la Fig. 39 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de contracción lineal.

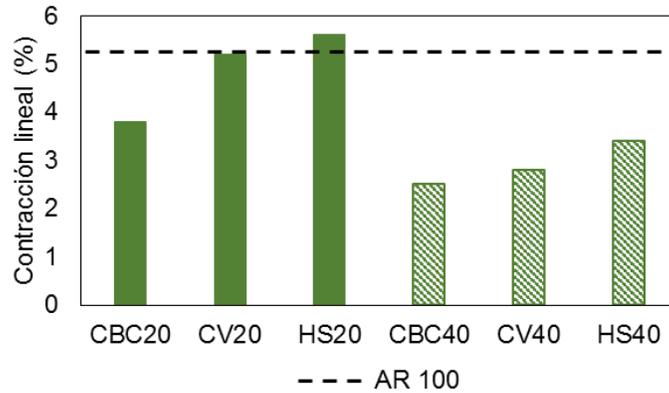


Fig. 39 Contracción lineal de mezclas binarias.

Como se observa, el aumento en el porcentaje de residuos reduce la contracción lineal de las mezclas, este resultado podría estar relacionado con un aumento en el contenido de cuarzo que da estabilidad volumétrica a las mezclas (Teixeira et al., 2008). Por los contenidos de cuarzo cuantificados en cada residuo (4.80% en la CBC, 11.28% en la CV y 1.56% en el HS), se hubiera esperado que las mezcla con CV hubieran presentado los menores porcentajes de contracción lineal, sin embargo se observó que la mayor estabilidad volumétrica la aportó la CBC, lo cual puede relacionarse con un menor acomodo entre sus partículas por su tamaño y forma irregular.

4.3 Caracterización de ladrillos elaborados con mezclas binarias

La caracterización de los ladrillos elaborados con las mezclas binarias se presenta a continuación. Es importante mencionar que estos ladrillos se evaluaron solo a dos temperaturas de cocción: 900 y 1000°C. La temperatura máxima corresponde a la temperatura máxima alcanzada por el horno empleado. Las mezclas evaluadas se elaboraron con 60% de AR y 40% de CBC, CV o HS.

4.3.1 Resistencia a la flexión

En la Fig. 40 se presentan los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la flexión en ladrillos elaborados con mezclas binarias, esta resistencia se expresa como el módulo de ruptura (MR).

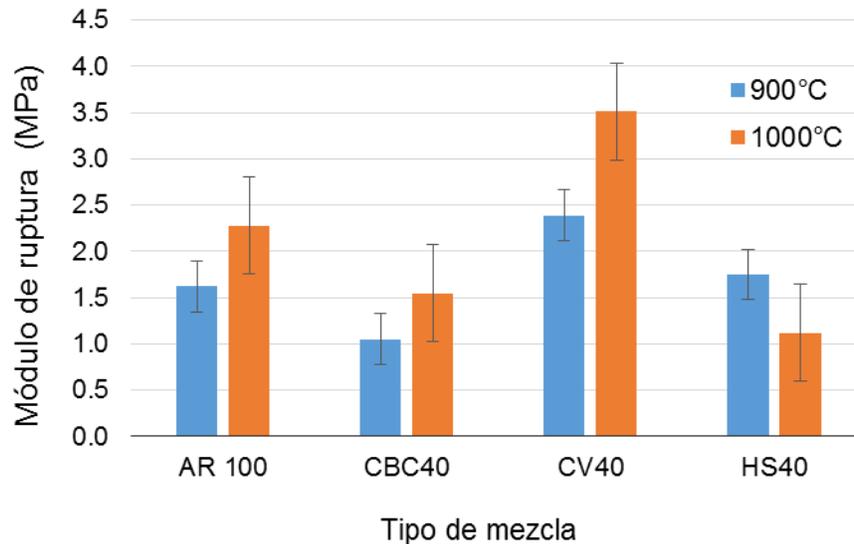


Fig. 40 Modulo de ruptura de ladrillos elaborados con mezclas binarias

La gráfica muestra que la CBC redujo la resistencia a flexión de los ladrillos. Por su parte la CV contribuyó a incrementar esta propiedad. Este resultado puede tener relación con el contenido de materia orgánica que fue de 10.53% en la CBC y 2.6% en la CV. La materia orgánica al quemarse pudo haber originado mayor porosidad en los ladrillos con CBC que en los ladrillos con CV, este resultado guarda relación con el comportamiento de los materiales en las gráficas de TGA.

La forma de las partículas también pudo influir en este resultado. La forma esférica de la CV propició un mejor empaquetamiento que las partículas irregulares de la CBC. Lo cual pudo generar mayor densidad en los ladrillos, haciéndolos más resistentes.

De esta forma, los ladrillos elaborados con la mezcla CV40 superaron el MR de la mezcla control en un 47% cuando la temperatura de cocción fue de 900°C, y en un 53% cuando la temperatura fue de 1000°C. Se determinó que el incremento en la temperatura aumentó la resistencia de las mezclas, posiblemente por una mayor

cantidad de la fase líquida vítrea que contribuyó al cierre de poros, excepto en la mezcla HS40.

Los ladrillos elaborados con la mezcla HS40 no mostraron mejorías en la resistencia. Este resultado se relaciona con el hallazgo de Baspinar et al. (2010), quien encontró que las partículas de HS se comportan casi de manera inerte y guardan sus formas a bajas temperaturas de cocción se comportan casi de manera inerte y guardan sus formas a bajas temperaturas de cocción.

4.3.2 Resistencia a compresión

Los valores de resistencia a compresión de los ladrillos elaborados con mezclas binarias se muestran en la Fig. 41.

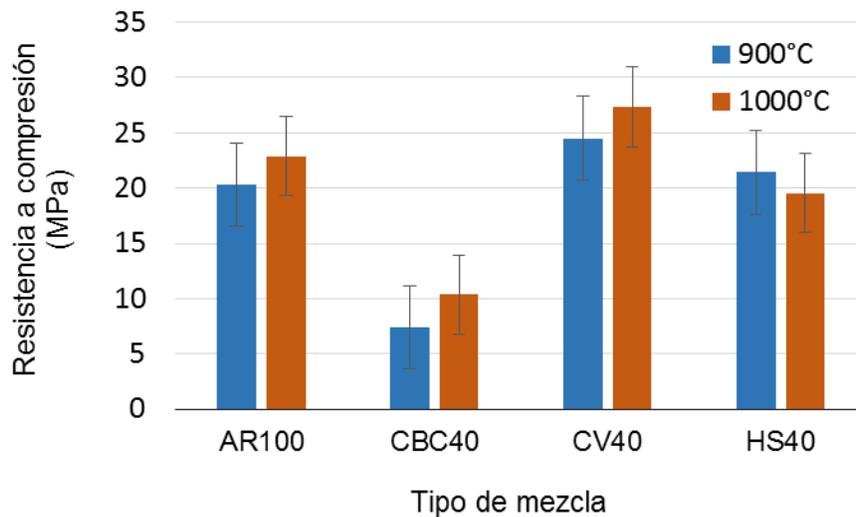


Fig. 41 Resistencia a compresión de ladrillos elaborados con mezclas binarias

En la gráfica puede observarse que los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a compresión siguieron la misma tendencia que los obtenidos en el ensayo de resistencia a la flexión.

Por lo tanto, las bajas resistencias a la compresión obtenidas con la mezcla CBC40 posiblemente también estén relacionada con un alto porcentaje de porosidad en la mezcla. Este porcentaje de porosidad podría deberse al alto contenido de materia orgánica y a la forma irregular de las partículas de la CBC que generó un menor empaquetamiento que las partículas esféricas de la CV y el HS.

La mezcla CV40 presentó una mayor resistencia que la mezcla control. Este incremento puede tener su origen en el contenido de mullita de la CV que fue del 10.03%. Dana et al. (2004) describió la mullita como un mineral de alta dureza que contribuye a aumentar la resistencia mecánica de los cuerpos cerámicos. También se observó que la resistencia incrementó con el aumento en la temperatura de cocción, atribuyendo este fenómeno al incremento en la formación de fase líquida de sinterización que contribuyó al cierre de poros y a densificar los ladrillos.

Con base en los resultados de resistencia a flexión y a compresión, se concluyó de manera parcial que la sustitución en un 40% de la ARC por CBC no resultó benéfica en estas mezclas binarias desde el punto de vista mecánico. En cambio, la CV y el HS aportaron mayor resistencia a la matriz arcillosa.

4.3.3 Velocidad inicial de absorción de agua

En la Tabla 9 se muestran los valores obtenidos en el ensayo de velocidad inicial de absorción de agua realizado en ladrillos elaborados con mezclas binarias.

Tabla 9. Velocidad inicial de absorción de agua de ladrillos elaborados con mezclas binarias.

MEZCLA	TEMPERATURA	
	900°C	1000°C
	Vel. inicial de absorción Kg/m ² por min	
AR100	2.16	3.49
CBC40	10.13	9.84
CV40	5.02	6.05
HS40	2.35	1.84

Los especímenes elaborados con la mezcla CBC40 presentaron los mayores valores de absorción, por lo tanto, se puede inferir un mayor porcentaje de porosidad abierta en relación a las otras mezclas. Estos resultados guardan relación con el porcentaje de pérdida de peso por ignición confirmadas con las gráficas de TGA.

En relación con los datos obtenidos en este ensayo, se observa que la mezcla HS40 tuvo valores inferiores a las mezclas con CV. Relacionando este resultado con los datos obtenidos en las pruebas de resistencia mecánica puede suponerse que la mezcla HS40 tiene mayor porosidad que la mezcla CV40, y que el mayor porcentaje de su porosidad sea cerrada.

Los valores de absorción más bajos los presentó la mezcla HS40, se observa que disminuyen con el aumento de temperatura. Esto podría estar relacionado con la formación de una mayor cantidad de fase líquida durante la sinterización que contribuyó a reducir la conectividad entre poros.

4.4 Caracterización de mezclas ternarias en estado plástico

La Fig. 42 muestra el límite líquido (LL), límite plástico (LP) e Índice plástico (IP) determinados para cada mezcla ternaria. Los resultados obtenidos fueron comparados con los Límites de Atterberg obtenidos para la mezcla control 100AR.

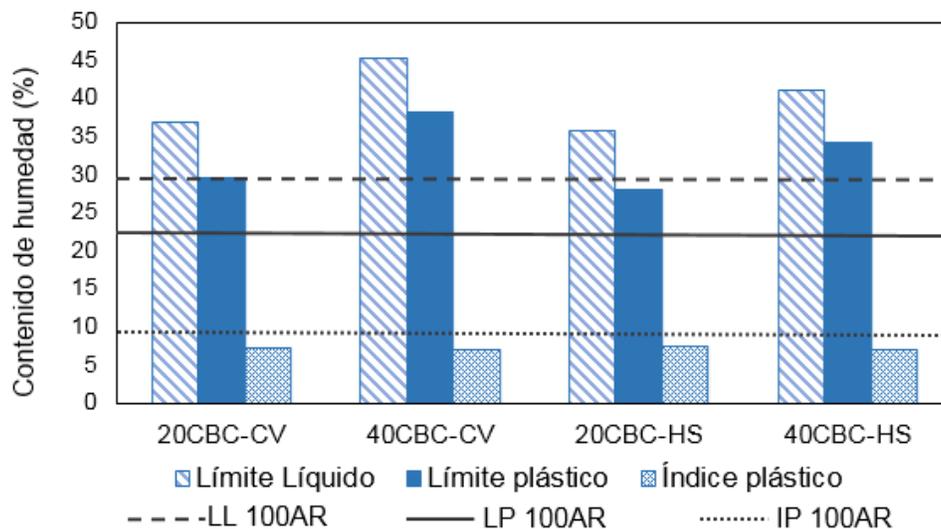


Fig. 42 Límites de Atterberg de mezclas ternarias

Al igual que en las mezclas binarias, para las mezclas ternarias la cantidad de agua necesaria para alcanzar el LL y LP fue mayor con respecto a la mezcla control. Con base en los resultados de las mezclas binarias, puede observarse que en las mezclas ternarias el material que mayor influencia tuvo en su plasticidad fue la CBC debido a que su concentración (20 y 40%) fue mayor que la de CV y HS (10%).

Como se aprecia en la gráfica anterior, las mezclas con HS solicitaron menores cantidades de humedad que las mezclas con CV, tal como sucedió en las mezclas binarias. Posiblemente por su tamaño y forma de partícula que facilitó el mezclado.

En las mezclas binarias con CV y HS su IP fue igual o mayor al de la mezcla control, que tuvo un IP igual a 8.33. Las mezclas binarias con CBC tuvieron un IP menor a 7. Por su parte, en las mezclas ternarias solo aquellas con 20% de CBC alcanzaron un valor mayor a 7. De esta forma se determinó que en las mezclas con 20% de CBC la CV y el HS contribuyeron a mejorar el desempeño de la CBC mejorando su trabajabilidad.

Como se observa en la Fig. 43 las mezclas ternarias evaluadas presentaron una menor CL que la mezcla control.

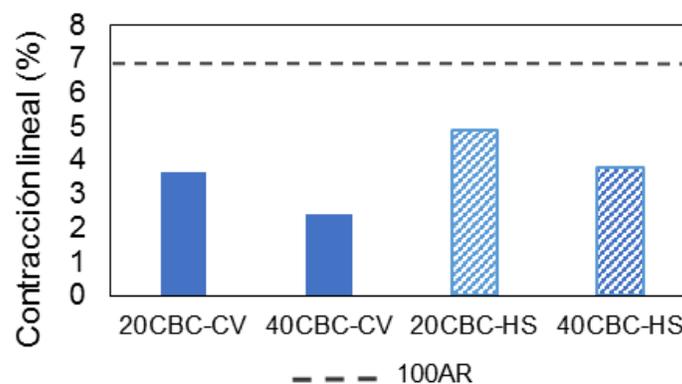


Fig. 43 Contracción lineal de mezclas ternarias

El aumento en la cantidad de CBC disminuyó la CL de las mezclas. La CBC actúa como un material no plástico para dar soporte estructural, previniendo deformaciones durante el secado y la cocción (Faria et al., 2013). Este soporte estructural podría relacionarse con la forma irregular de sus partículas que no generan un buen empaquetamiento y mantienen su posición durante la evaporación del agua, así como con su contenido de cuarzo y carbón sin quemar que no sufren contracciones durante el proceso de secado.

Las mezclas con CV presentaron contracciones menores que las mezclas con HS, lo cual puede atribuirse a que la CV aportó una mayor cantidad de cuarzo a la mezcla y un menor empaquetamiento de partículas por su mayor tamaño.

4.5 Caracterización de ladrillos elaborados con mezclas ternarias

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados para la caracterización de los ladrillos elaborados con mezclas ternarias.

4.5.1 Determinación del Índice de calentamiento

El Índice de calentamiento se determinó durante la cocción de ladrillos elaborados con las mezclas ternarias. Para la cocción de los ladrillos elaborados con las mezclas binarias no se determinó debido a que la cocción se realizó en un horno pequeño en el cual la colocación de los termopares no fue posible.

Los perfiles del incremento de la temperatura con respecto al tiempo para los tres procesos de cocción (a 900, 1000 y 1100°C) se muestran en la Fig. 44. La variación en la rampa de calentamiento entre los tres procesos de cocción se debe a que la temperatura fue regulada manualmente, abriendo y cerrando en menor o mayor medida las válvulas de gas LP.

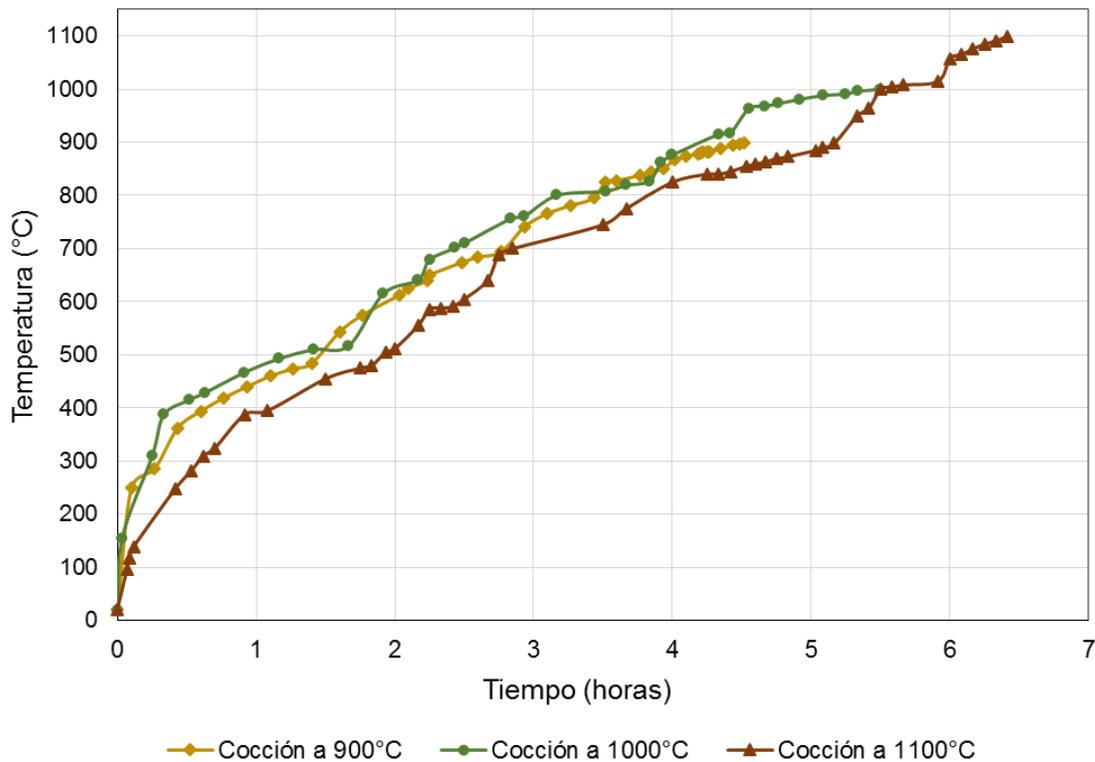


Fig. 44 Perfiles de temperatura durante la cocción

La Fig. 45 corresponde al índice de calentamiento estimado con las áreas bajo las curvas de temperatura. Los índices representan el calor suministrado por el horno durante la cocción. La gráfica muestra los índices para las tres temperaturas máximas (900, 1000 y 1100°C) y valores parciales antes de llegar a las temperaturas máximas como comparativos entre los tres procesos de cocción.

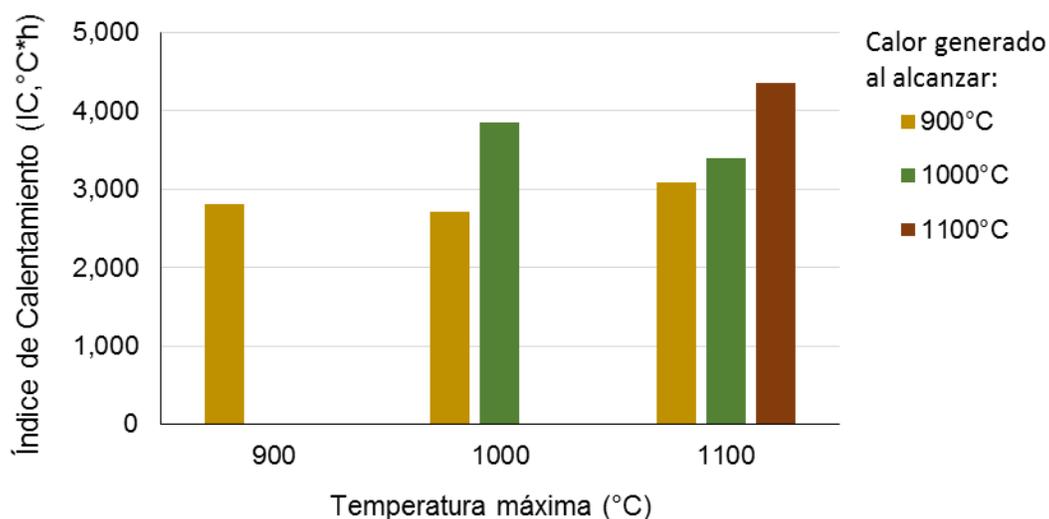


Fig. 45 Índice de calentamiento

Durante los procesos de cocción con temperaturas máximas de 900 y 1000°C, se observó que para llegar a los 900°C se tuvieron rampas de calentamiento e índices de calentamiento semejantes. Para la cocción a 1100°C los incrementos de temperatura sucedieron más lentamente y por lo tanto, respecto a las otras dos temperaturas máximas de cocción, hubo variaciones en los índices de calentamiento para alcanzar las temperaturas de 900 y 1000°C.

Debido a que solo se realizó un proceso de cocción para cada temperatura máxima y no se pudieron realizar comparaciones entre dos o más de ellos, las gráficas obtenidas solo se emplearon como guía para que durante la operación manual del horno se procurara reproducir las mismas rampas de calentamiento.

4.5.2 Contracción Lineal de ladrillos por secado y cocción

La contracción lineal se evaluó en los ladrillos verdes y cocidos elaborados con las mezclas ternarias. La Fig. 46 muestra la contracción lineal por secado de los ladrillos. Se observó que estos resultados siguieron la misma tendencia que los resultados obtenidos en los ensayos de Límites de Atterberg.

Se comprobó que la CBC y la CV dieron mayor estabilidad volumétrica a las mezclas durante el secado que el HS, lo cual se relaciona con la forma irregular de las partículas de CBC y con una mayor concentración de cuarzo aportado por estos residuos (Faria et al., 2013, Dana et al., 2004).

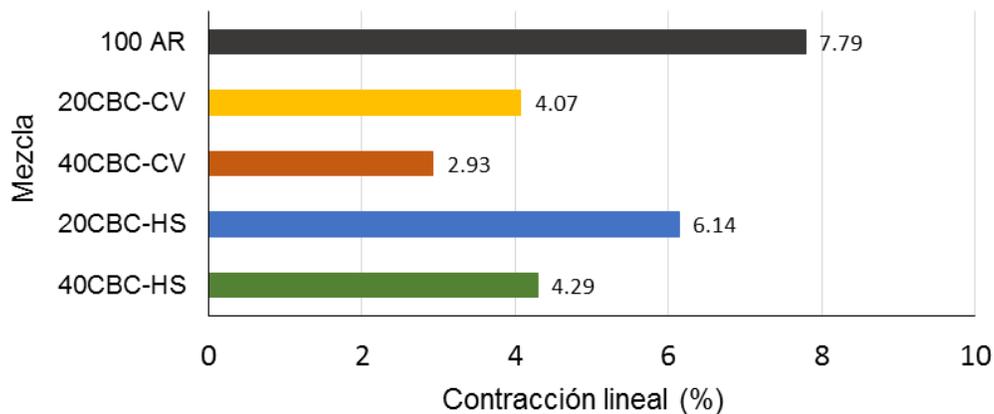


Fig. 46 Contracción lineal de ladrillos verdes elaborados con mezclas ternarias

Los porcentajes de contracción que presentaron los ladrillos después de la cocción se muestran en la Fig. 47. Estos porcentajes corresponden a la contracción acumulada por el secado y la cocción.

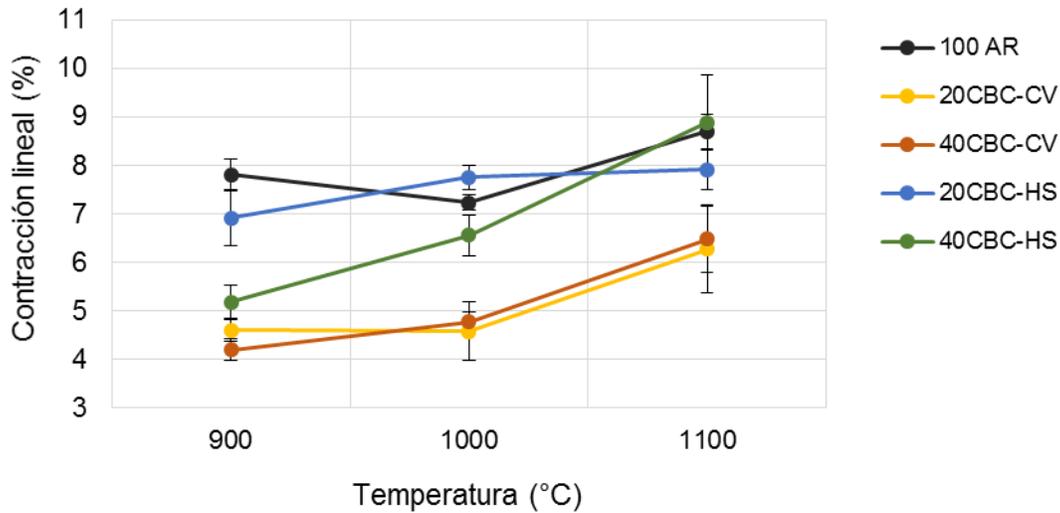


Fig. 47 Contracción lineal acumulada después de la cocción de ladrillos elaborados con mezclas ternarias.

De la gráfica se observa que los ladrillos elaborados con las mezclas 20CBC-CV y 40CBC-CV tuvieron los menores porcentajes de contracción. Desde el punto de vista de estabilidad volumétrica este resultado es de gran importancia ya que la combinación de residuos redujo la contracción lineal en un 46% respecto a la contracción presentada por ladrillos elaborados con la mezcla control.

La gráfica de la Fig. 48 corresponde a los porcentajes de contracción que las mezclas sufrieron solo durante el proceso de cocción.

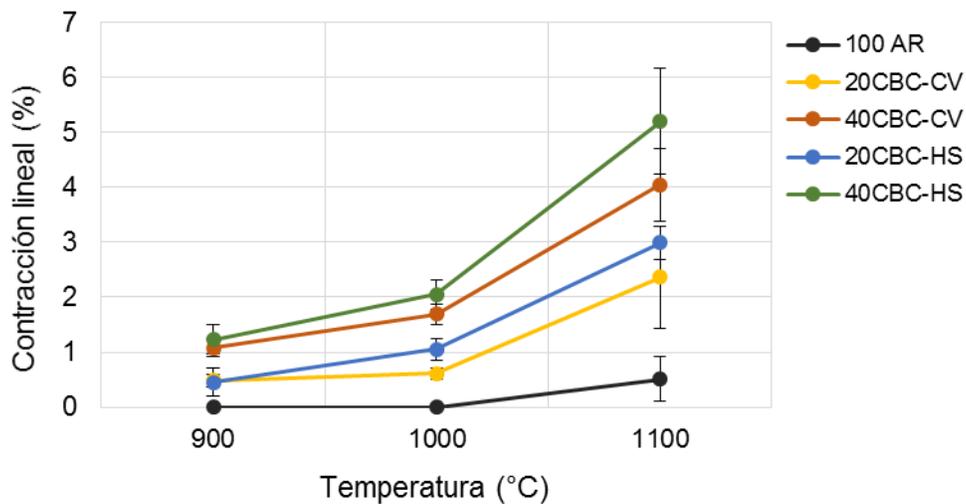


Fig. 48 Contracción lineal de ladrillos cocidos elaborados con mezclas ternarias

Los resultados indican que con el incremento en la temperatura el porcentaje de contracción aumentó en todas las mezclas arcillosas. La mezcla 100AR no sufrió contracciones a 900 y 1000°C, pero sí a 1100°C. El incremento en el contenido de CBC también causó mayores porcentajes de contracción por cocción.

Este comportamiento puede atribuirse a la formación de una mayor fase líquida vítrea de sinterización debido a la acción de los agentes fundentes (Souza et al., 2011). De acuerdo a la composición química de los residuos, los iones (Ca^{2+} , K^+ y Na^+) se concentran en mayor proporción en la CBC, después en la CV y en menor proporción en el de HS.

4.5.3 Resistencia a la flexión

Los resultados de la prueba de resistencia a la flexión en ladrillos elaborados con mezclas ternarias se presentan en la gráfica de la Fig. 49. La gráfica muestra que el aumento en la temperatura de cocción contribuyó a incrementar la resistencia de los ladrillos, sobre todo al alcanzar 1100°C.

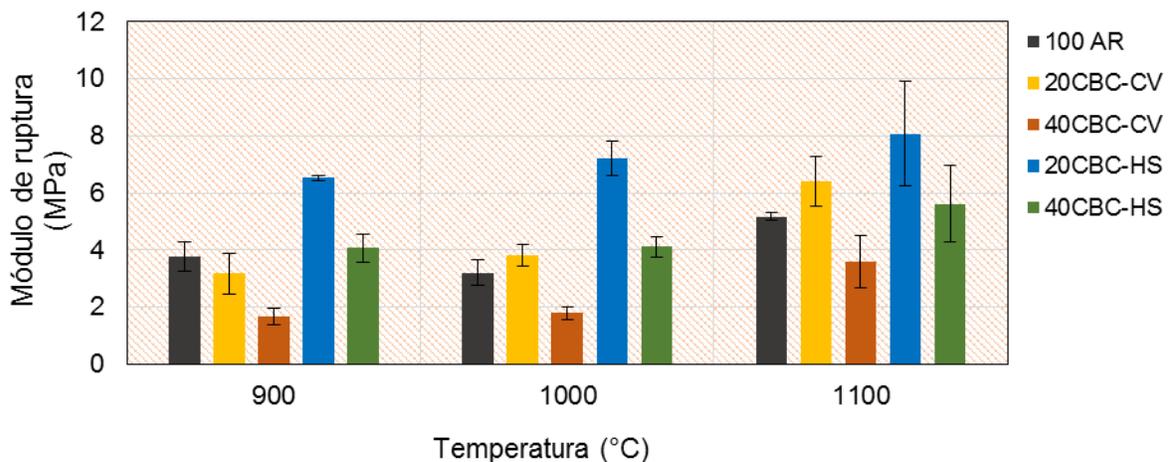


Fig. 49 Módulo de ruptura de ladrillos elaborados con mezclas ternarias

Por otra parte, el incremento del 20 al 40% en el uso de la CBC redujo la resistencia en los ladrillos. Este comportamiento guarda relación con el observado en las mezclas binarias, en la que el uso del 40% de CBC generó una reducción en la

resistencia de los ladrillos de más del 50% con respecto al control (para las dos temperaturas evaluadas, a 900 y 1000°C). Sin embargo, en las mezclas ternarias el desempeño de la CBC mostró mejoras con la adición de la CV y HS.

Estas mejoras se pudieron apreciar comparando la resistencia a la flexión máxima de los ladrillos elaborados con la mezcla binaria de AR y 40% de CBC con la resistencia mínima observada en las mezclas ternarias: 1.12MPa a 1000°C y 1.67MPa a 900°C respectivamente (la última obtenida con la mezcla de 50% de AR, 40% de CBC y 10% de CV).

La CV mostró el mejor desempeño en las mezclas binarias, superando la resistencia del control en más del 40%. En las mezclas ternarias, la combinación de CV con 20% de CBC logró superar la resistencia a flexión del control a 1000 y 1100°C. Los resultados indican que con 40% de CBC las partículas esféricas de la CV y la fase líquida producida no fueron suficientes para superar el efecto negativo de los vacíos generados por la calcinación de la materia orgánica y la forma irregular de las partículas de CBC.

La mezcla con 20 de CBC y 10% de HS desarrolló las mayores resistencias en las tres temperaturas de cocción, mostrando su mejor desempeño al duplicar la resistencia de la mezcla control cuando la temperatura de cocción fue de 1000°C.

4.5.4 Resistencia a compresión

Callister (2000) menciona que en los materiales cerámicos existen microfisuras causadas por defectos en sus arreglos moleculares. Estas microfisuras amplifican los esfuerzos de tensión aplicados, disminuyendo la resistencia a la fractura. Con cargas a compresión esta amplificación de esfuerzos no se presenta. Es por ello que este tipo de materiales tiene una mayor resistencia a fuerzas de compresión que a fuerzas de flexión.

Lo anterior se puede constatar con la gráfica de la Fig. 50, en la cual se muestra la resistencia a compresión de los ladrillos elaborados con mezclas ternarias. También

se observó que la resistencia de los ladrillos aumentó con el incremento en la temperatura de cocción.

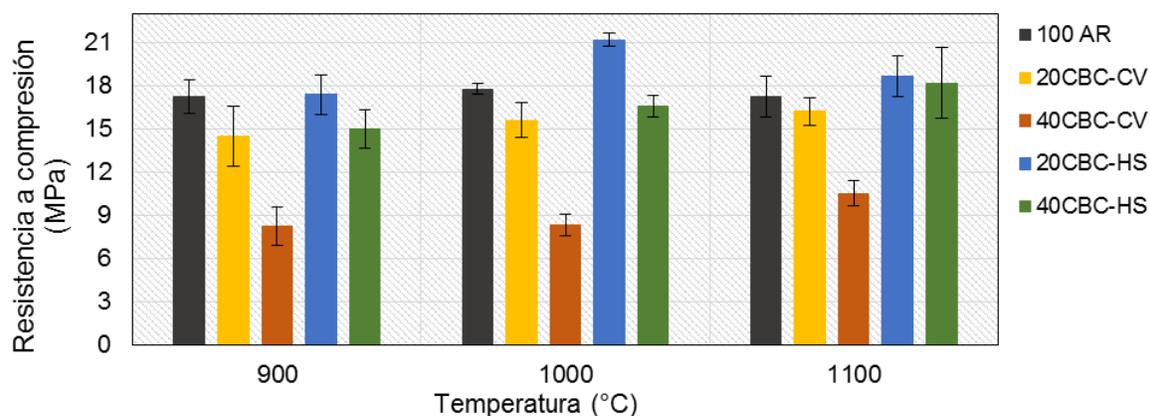


Fig. 50 Resistencia a compresión de ladrillos elaborados con mezclas ternarias

Karaman et al. (2006) menciona que la resistencia de los ladrillos mejora notablemente por la cocción a altas temperaturas. Esto se debe a que a partir de 1000°C la vitrificación de los materiales cerámicos mejora debido al proceso de sinterización.

Altas concentraciones de Al_2O_3 y SiO_2 amorfo ayudan a incrementar la fase líquida de sinterización (Dana et al., 2004). Esto es posible ya que a altas temperaturas la estructura de los óxidos de aluminio y silicio es modificada por la presencia de fundentes, principalmente óxidos de Fe, Ca, K y Na. El análisis químico de la CBC mostró que es el residuo con mayor concentración de estos fundentes.

En la gráfica se observa que el incremento en el contenido de CBC afectó la resistencia a compresión de las mezclas evaluadas. Puede asegurarse que este efecto se debe a una mayor porosidad causada por la pérdida de materia orgánica cuya concentración fue mayor al emplear 40% de CBC.

Otro factor que afecta el desempeño de la CBC lo menciona Souza et al. (2011). Este investigador encontró que en especímenes elaborados con mezclas de AR y CBC, la reducción de la resistencia mecánica puede atribuirse a las contracciones de diferentes fases formadas a temperaturas mayores que 900°C. También a las

altas concentraciones de cuarzo que durante el proceso de enfriamiento sufre un cambio de estructura a 573°C. Estos cambios de volumen y de estructura pueden generar poros entre partículas, o tensiones que producen microfisuras en el cuerpo cerámico, haciéndolo menos resistente.

La cuantificación de fases minerales con el método RIR realizada para los materiales de esta investigación, dio como resultado un contenido de cuarzo de 4.8% para la CBC, 11.28% para la CV y 1.56% para el HS. La alta concentración de cuarzo debido a la mezcla de CBC y CV con AR podría explicar el desempeño de esta mezcla cuya resistencia se quedó por debajo de la resistencia de la mezcla control.

Por otra parte, la suma del alto contenido de fundentes de la CBC y el contenido de sílice amorfo del HS posiblemente fue el factor que contribuyó a desarrollar mayores resistencias que la mezcla control.

El sílice amorfo del HS además de contribuir a la formación de mayores cantidades de fase líquida de sinterización, también contribuye a evitar microfisuras en los ladrillos causadas por cambios de estructura de α a β que ocurren en el cuarzo durante el proceso de enfriamiento (Faria et al, 2013; Souza et al., 2011).

El desempeño de la mezcla 20CBC-HS destacó por superar la resistencia a compresión de la mezcla control en las tres temperaturas evaluadas. A 1000°C esta mezcla alcanzó su mayor resistencia, superando a la mezcla control en 19.22%.

La resistencia a compresión máxima obtenida con mezclas binarias de AR y CBC fue de 7.39MPa a 900°C. En las mezclas ternarias, la resistencia mínima fue de 8.21MPa a 900°C con la mezcla 40CBC-CV. Estos resultados indican que, en la elaboración de ladrillos, es posible mejorar el desempeño de la CBC al mezclarse con CV o HS en mezclas ternarias.

4.5.5 Densidad y porosidad aparente

La gráfica de la Fig. 51 muestra el comportamiento de las mezclas ternarias a diferentes temperaturas en el ensayo de densidad aparente.

Se observó que la densidad aparente de las cuatro mezclas ternarias estuvo por debajo de la mezcla control. Este fenómeno podría explicarse por el porcentaje de pérdida de peso por ignición que es mayor en la CBC (10.53%) que en la AR (4.67%). Como se confirmó con las gráficas de TGA, durante el proceso de cocción la materia orgánica se volatiliza ocasionando mayores porcentajes de vacíos.

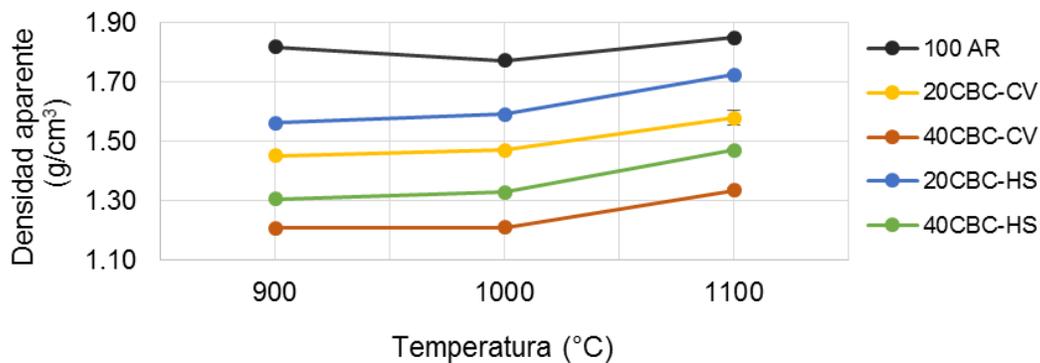


Fig. 51 Densidad aparente de ladrillos elaborados con mezclas ternarias

Otra propiedad evaluada en esta sección fue la porosidad aparente. La porosidad aparente se refiere a la porosidad abierta de los ladrillos.

En la gráfica de la Fig. 52 se aprecia que el aumento en la temperatura de cocción contribuyó a reducir la porosidad aparente o abierta de las cuatro mezclas ternarias. El porcentaje de CBC también influyó en la densidad y porosidad de los ladrillos. A mayor contenido de CBC, menor densidad y mayor porosidad.

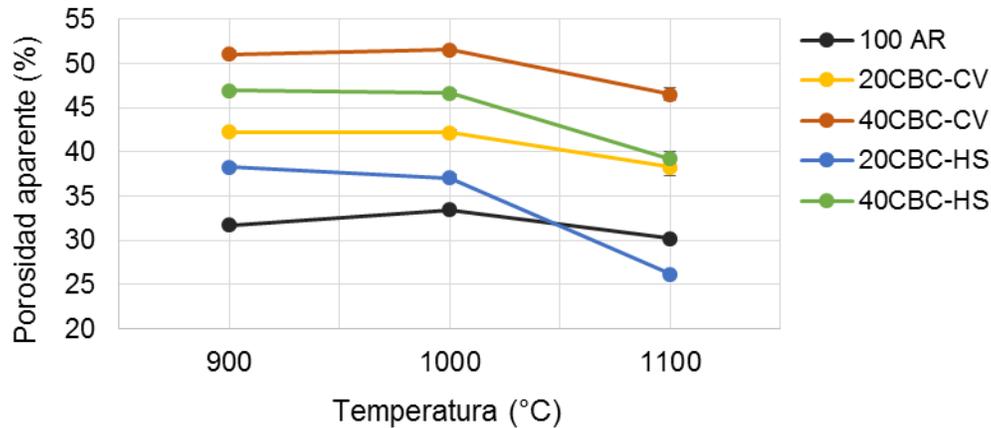


Fig. 52 Porosidad aparente de ladrillos elaborados con mezclas ternarias

Con el uso de la CV se obtuvieron mezclas con menor densidad y mayor porosidad abierta que usando HS. Posiblemente este comportamiento se deba a una menor cantidad de fase líquida de sinterización producida en las mezclas con CV. Por otra parte, las mezclas con HS fueron menos densas y más porosas que la mezcla control, pero desarrollaron mayor resistencia mecánica. Estos resultados se estudiarán más adelante conjuntamente con la microestructura de los ladrillos.

En la gráfica se observó que la porosidad aparente de la mezcla 20CBC-HS tuvo una reducción importante en el intervalo de 1000 a 1100°C, esta reducción fue del 11%. Este resultado coincide con los resultados de Baspinar et al. (2010). Este investigador evaluó mezclas de AR con 10% de HS obteniendo los siguientes porcentajes de porosidad: 13% a 900°C, 10% a 1000° y 1% a 1100°C. De 1000 a 1100°C obtuvo una reducción del 9% en la porosidad aparente.

Baspinar et al. (2010) menciona que las partículas de sílice del HS son inertes a bajas temperaturas de cocción. Lo cual reduce la acción de sinterización en el cuerpo arcilloso al impedir el contacto entre partículas de la arcilla durante el sinterizado. Con el aumento en la temperatura, la acción de la sinterización incrementa, reduciendo en mayores porcentajes la porosidad abierta y generando densidades más altas.

Por lo anterior, en forma parcial puede concluirse que la mejor temperatura para mejorar las propiedades de densidad, gravedad específica aparente y porosidad

aparente en ladrillos elaborados con las mezclas ternarias evaluadas en esta investigación fue 1100°C.

4.5.6 Absorción de agua por inmersión durante 24 horas

La absorción de agua es un factor importante en la durabilidad de los ladrillos (Ukwatta et al., 2016; Kazmi et al., 2016). Cuando el agua se infiltra en los ladrillos, reduce su durabilidad (Baspinar et al., 2010)

El agua puede ingresar a los materiales porosos por fuerzas capilares o por evaporación. En los muros construidos con ladrillos, el agua ascendente afecta las juntas de mortero al lixiviar los componentes solubles, haciéndolos más permeables. El agua puede arrastrar consigo componentes solubles del agua subterránea, tales como sales que pueden ocasionar daño por cristalización (Hall y Hoff, 2009).

Para reducir los efectos negativos del agua, la norma NMX-C-404-2005-ONNCCE establece que la absorción máxima de agua durante 24 h debe encontrarse en un rango de 13- 21%.

Los porcentajes de absorción de los ladrillos elaborados con las mezclas ternarias se muestran en la Fig. 53. Solo la mezcla control y la mezcla 20CBC-HS registraron un porcentaje de absorción menor al 21% en las tres temperaturas de cocción; la mezcla 20CBC-CV tuvo un porcentaje del 20% únicamente a 1100°C.

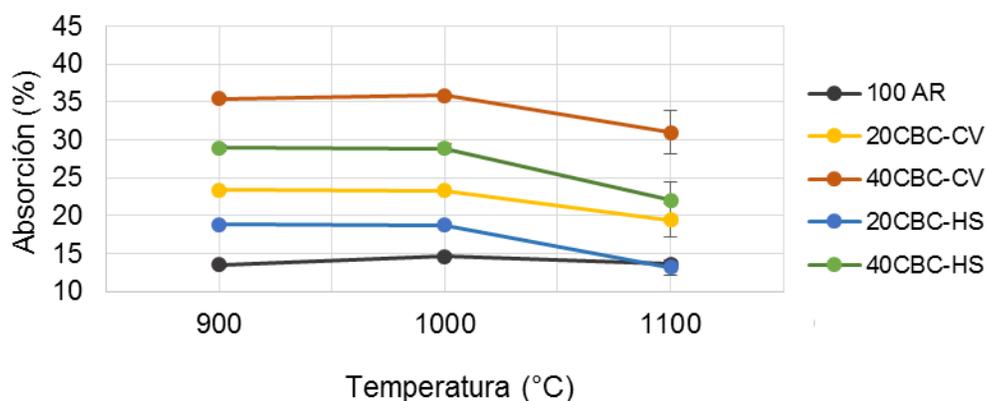


Fig. 53 Absorción de agua por inmersión durante 24 de ladrillos elaborados con mezclas ternarias

Se observó que el aumento en el contenido de la CBC incrementó la absorción. Por su parte las mezclas con HS absorbieron un menor porcentaje de agua que las elaboradas con CV. La mezcla control mostró los valores de absorción más bajos y solo a 1100°C una mezcla (20CBC-HS) igualó su desempeño. Los resultados guardan relación con los valores de la porosidad aparente, la cual es un indicador del porcentaje de porosidad abierta.

4.5.7 Absorción de agua por hervido durante 5 horas

Los resultados de absorción durante 5 horas siguieron la misma tendencia que los obtenidos en la prueba de absorción durante 24 horas, Fig. 54.

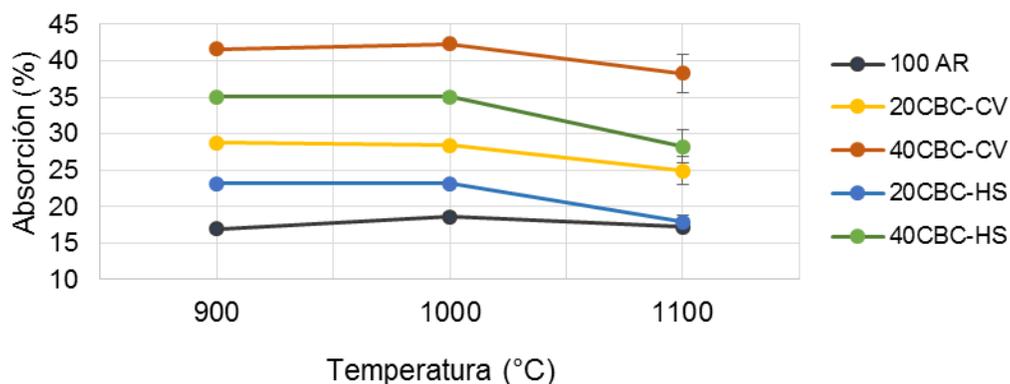


Fig. 54 Absorción de agua por hervido durante 5 horas de ladrillos elaborados con mezclas ternarias

Los porcentajes de absorción por hervido durante 5 horas como se esperaba fueron mayores a los resultados de absorción por inmersión durante 24 horas en agua a temperatura ambiente. Esto se debe a que, durante el calentamiento, el aire hirviente originalmente dentro de los poros se expande y se elimina del sistema de poros por el vapor de agua y el vapor generado dentro de la muestra. Al enfriar, no quedan gases permanentes dentro de la estructura del poro y el agua es atraída a la porosidad abierta por la acción combinada de las fuerzas capilares y la presión atmosférica externa (Hall and Hoff, 2009).

Como conclusión parcial puede establecerse que, en relación a las propiedades de absorción de agua, los ladrillos elaborados con mezclas ternarias mostraron un

mejor desempeño a 1100°C. Este resultado fue congruente con los porcentajes de densidad y porosidad aparente de las mezclas.

4.5.8 DRX en ladrillos: cuantificación de fase amorfa y mineralogía

Souza et al., (2011) determinó que en la elaboración de materiales cerámicos con AR y CBC, aproximadamente a los 1000°C existía un cambio importante en el proceso de sinterización. Esta diferencia la dedujo con base en los resultados obtenidos en la porosidad aparente y la contracción lineal de sus muestras. A partir de esta temperatura, sus especímenes mostraron mayor contracción y menor porosidad.

Este investigador atribuyó sus resultados a que, durante el proceso de sinterización, la formación de la fase líquida vítrea, es decir amorfa, redujo la porosidad e incrementó la contracción. En el presente trabajo fue posible determinar el porcentaje de fase amorfa en los especímenes evaluados teniendo la oportunidad de confirmar su relación con las propiedades finales de los ladrillos estudiados.

Los contenidos de fase amorfa en los ladrillos se determinados a partir de patrones de DRX usando el método de estándar interno y cuantificando por el método RIR. Los resultados de esta cuantificación se muestran en la Fig. 55.

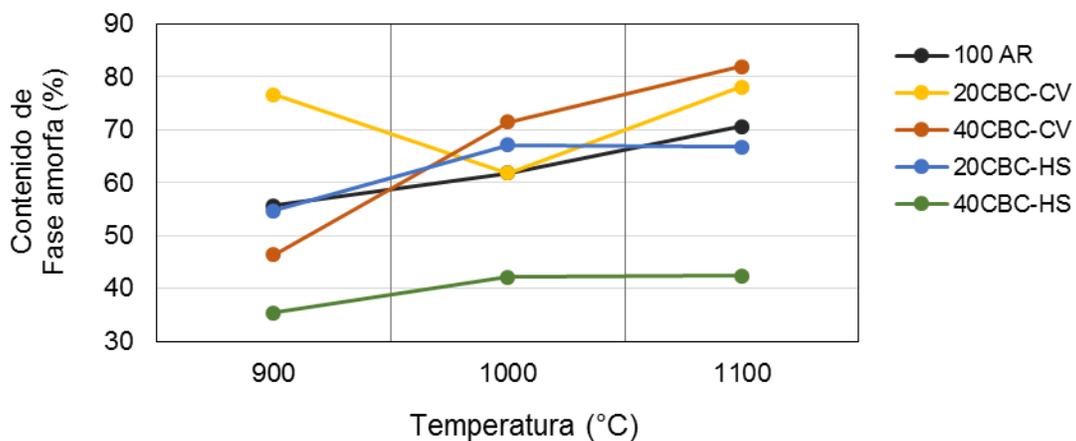


Fig. 55 Contenido de fase amorfa en ladrillos cocidos elaborados con mezclas ternarias. Se observó que el porcentaje de fase amorfa en los ladrillos aumentó al incrementar la temperatura de cocción. Los resultados son congruentes con las propiedades obtenidas en los ladrillos evaluados. A mayor temperatura, los ladrillos mostraron

mayor contracción lineal, mayor resistencia mecánica y mayor densidad; también mostraron una menor porosidad y menor absorción de agua.

En lo que respecta a la identificación de fases, los resultados se presentan en la Tabla 10. El cuarzo y la albita cálcica son las fases minerales que aparecen en todas las mezclas y en todas las temperaturas de cocción estudiadas. El cuarzo fue identificado en todos los materiales (AR, CBC, CV y HS); mientras que en la AR y la CBC, la albita cálcica fue identificada como uno de sus principales constituyentes.

Además de la albita cálcica otros minerales del grupo de los feldespatos también fueron identificados. Tal es el caso de la anortita sódica, la anortoclasa y la microclina intermedia. A 900 y 1000°C se observa la existencia de minerales hidratados pertenecientes al grupo de los anfíboles, por ejemplo, la magnesiohornblenda. El grupo OH en los anfíboles causa desestabilidad térmica, haciéndolos menos refractarios. Lo cual podría explicar por qué los minerales del grupo de los anfíboles ya no fueron detectados a 1100°C.

Tabla 10. Fases minerales identificadas en ladrillos ternarios

Grupo	Fase mineral identificada	Temperatura de cocción y tipo de mezcla*																
		900°C					1000°C					1100°C						
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
Cuarzo	01-075-8322 Cuarzo SiO2	X							X						X			
	00-046-1045 Cuarzo SiO2		X			X								X			X	
	01-070-7344 Cuarzo SiO2						X											
	01-079-1910 Cuarzo SiO2			X				X		X	X				X			
	00-005-0490 Cuarzo, bajo SiO2				X													X
Feldespatos	01-076-0833 Anortita sódica Ca0.86 Na0.15 Al1.94 Si2.06 O8					X		X										X
	01-085-1415 Anortita sódica Na0.45 Ca0.55)(Al1.55 Si2.45 O8			X									X					
	00-041-1480 Albita cálcica ordenada (Na,Ca) Al(Si,Al)3 O8			X	X	X					X	X						X
	00-020-0548 Albita cálcica ordenada (Na,Ca) Al(Si,Al)4 O8	X	X					X	X	X					X	X	X	
	01-076-0926 Albita cálcica (Na0.75 Ca0.25)(Al1.26Si2.74 O8)														X			
	01-075-1630 Anorthoclase (Na0.667 K0.333)(Al Si3 O8)			X		X								X				
	00-010-0361 Anorthoclase Na0.71 K0.29 Al Si3 O8				X													X
	00-022-0687 Microclina ordenada K Al Si3 O8	X																
	00-019-0932 Microclina intermedia K Al Si3 O8							X		X								
Anfiboles	00-020-0481 Magnesiohorblenda (Ca,Na)2.26(Mg,Fe,Al)5.15(Si,Al)8O22(OH)2	X																
	01-076-5975 Proto-antofilita Fe4.7 Mg2.3(Si8 O22 (OH) 2)							X	X									
	00-060-0343 Riebeckita Na2 Fe5 Si8 O22 (OH)2		X															
	00-029-1237 Magnesioriebeckita Na2 Mg3 Fe2 Si8 O22 (OH)2				X	X												
	01-077-0187 Magnesioriebeckita Na1.38 K0.13 Ca0.17 Mg0.25 Mg2.81 Fe1.66 Fe0.48 Al0.04 Si7.94 O22 (OH)2											X						
	00-043-0665 Ferrotschermakita Ca2 Fe3 Al2 (Si6 Al2) O22 (OH)2													X				
Otros	01-077-4102 Hematita Fe2 O3															X		
	01-076-8400 Hematita Fe2 O3			X														
	00-024-0072 Hematita Fe2 O3								X									

*Identificación del tipo de mezcla

1 - 100 AR; 2 - 20CBC-CV; 3 - 40CBC-CV; 4 - 20CBC-HS; 5 - 40CBC-HS

4.5.9 MEB en ladrillos

Las micrografías presentadas en las siguientes páginas corresponden a ladrillos elaborados con mezclas ternarias. Las imágenes del margen izquierdo fueron obtenidas con electrones secundarios que describen la topografía de la superficie de las muestras. Las imágenes del margen derecho se obtuvieron con electrones retrodispersados.

La Fig. 56 muestra las micrografías de ladrillos elaborados con la mezcla control (100AR). Se observa que la textura de la superficie se hace más densa con el aumento de la temperatura. Este fenómeno hace evidente la vitrificación parcial de la arcilla que favorece el cierre de poros.

Las micrografías de la mezcla 20CBC-CV se muestran en la Fig. 57. La superficie de la muestra cocida a 1100°C se aprecia como una fase continua por la unión de las partículas a través de la fase vítrea formada a altas temperaturas.

Las micrografías de la Fig. 58 corresponden a la mezcla 40CBC-CV. Las superficies de las muestras son porosas, esta porosidad disminuye cuando la temperatura de cocción aumenta a 1100°C. El alto volumen de porosidad se atribuye al efecto que provoca el aumento de CBC en la mezcla debido a su alto contenido de materia orgánica que se volatiliza durante la cocción. En la muestra cocida a 900°C aún puede apreciarse la morfología de cada uno de los materiales que integran la mezcla: arcilla, ceniza de bagazo de caña y ceniza volante (ver Fig. 35 correspondiente a la morfología de los materiales mencionados).

Las micrografías de la Fig. 59 muestran el proceso de densificación de la mezcla arcillosa. Con el aumento de la temperatura la cantidad de fase líquida vítrea es mayor y recubre las partículas de mayor tamaño para confinarlas en una matriz uniforme.

Las micrografías de la mezcla 20CBC-HS se muestran en la Fig. 60. El efecto de la temperatura es el mismo que en las mezclas anteriores. Su apariencia se relaciona con el resultado obtenido en la prueba de densidad, con el incremento en la temperatura las muestras fueron más densas y la porosidad interconectada

disminuyó. Los ladrillos elaborados con esta mezcla presentaron las mayores resistencias a esfuerzos de tensión y compresión.

La Fig. 61 corresponde a la mezcla 40CBC-HS. Se pudo observar que su porosidad fue mayor en comparación con la mezcla 20CBC-HS. El incremento de la temperatura redujo esta porosidad. Por lo tanto, las micrografías respaldan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia mecánica, densidad, porosidad y absorción.

Las imágenes obtenidas con MEB permitieron observar físicamente la microestructura de los ladrillos elaborados con las mezclas ternarias evaluadas. Estas imágenes fueron importantes ya que permitieron establecer relaciones entre la microestructura física de los ladrillos y los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia mecánica, densidad, porosidad y absorción. En forma general se observó que el incremento en la temperatura de cocción favoreció el cierre de la porosidad interconectada de los ladrillos y contribuyó a incrementar su densificación.

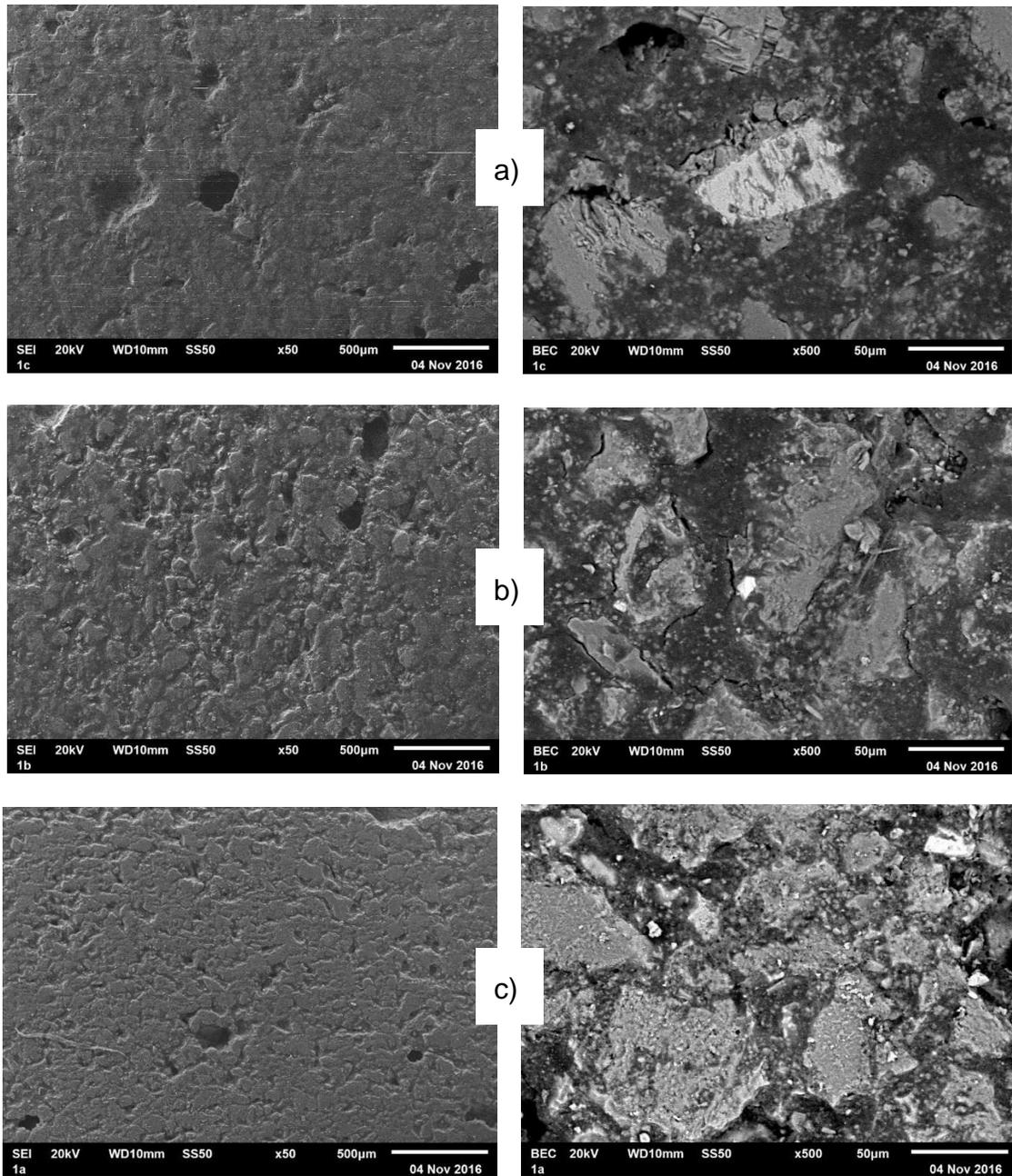


Fig. 56 Micrografías de MEB de la mezcla 100AR cocida a: a) 900°C, b) 1000°C y c) 1100°C.

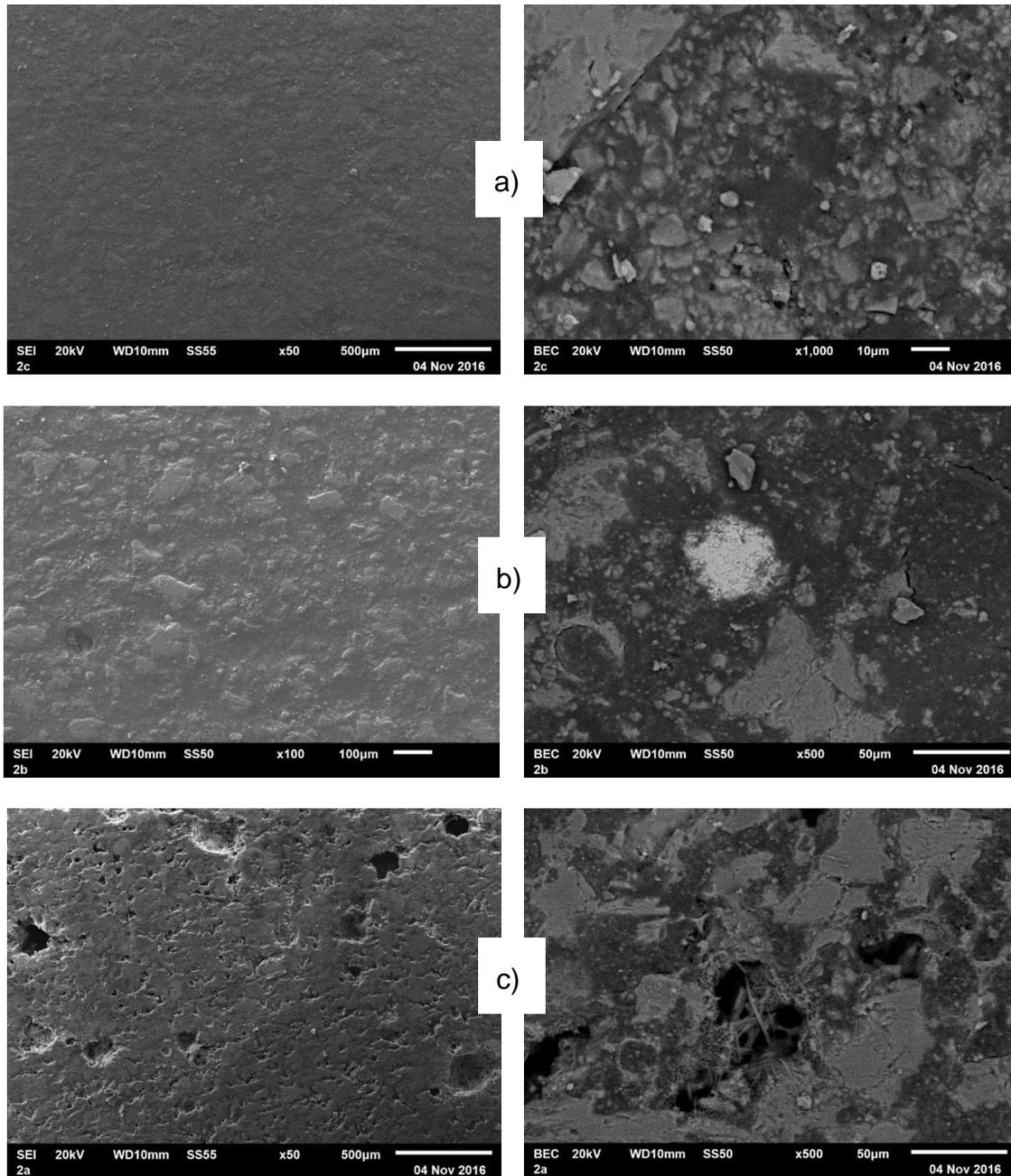


Fig. 57 Micrografías de MEB de la mezcla 20CBC-CV, cocida a: a) 900°C, b) 1000°C y c) 1100°C.

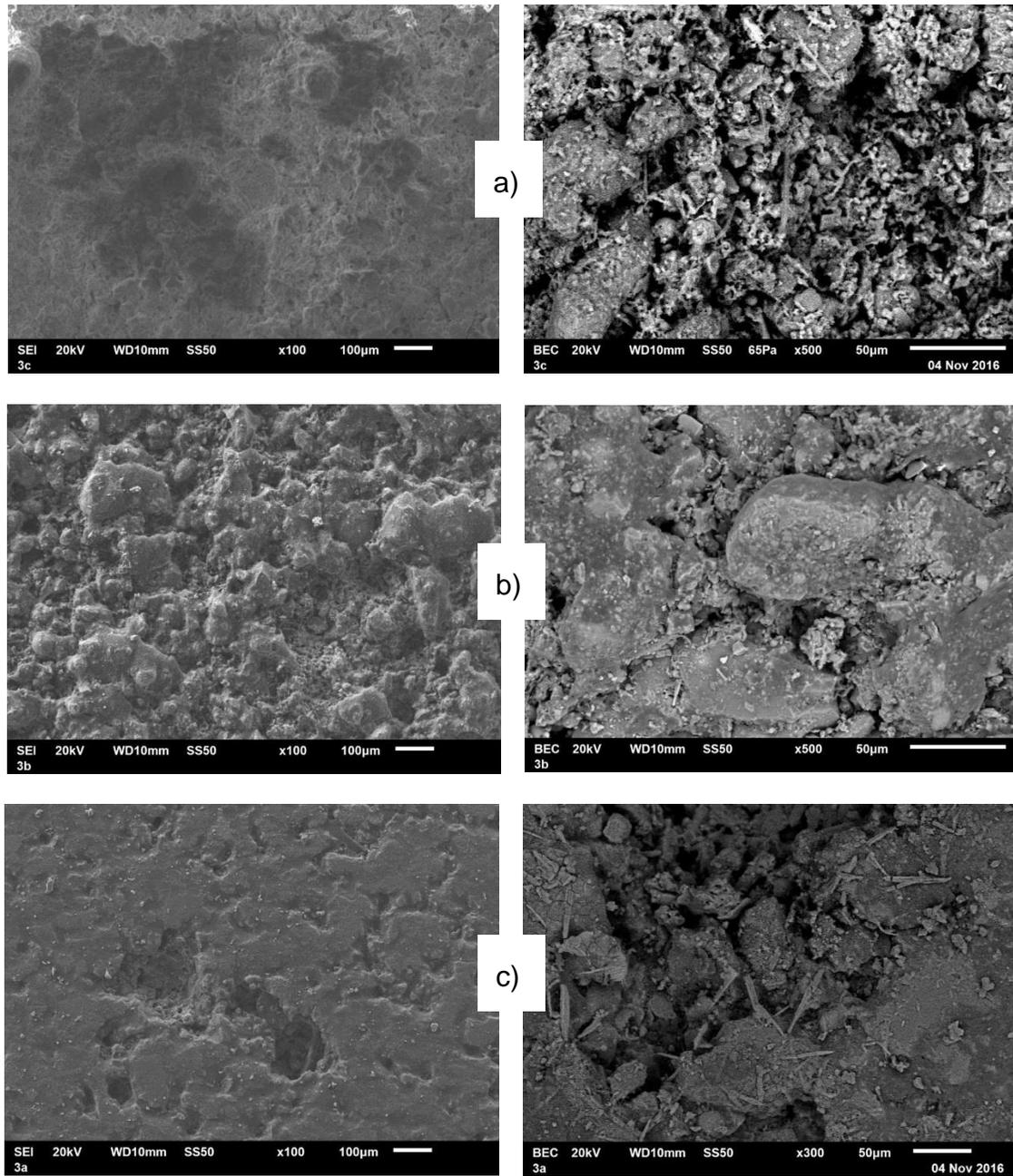
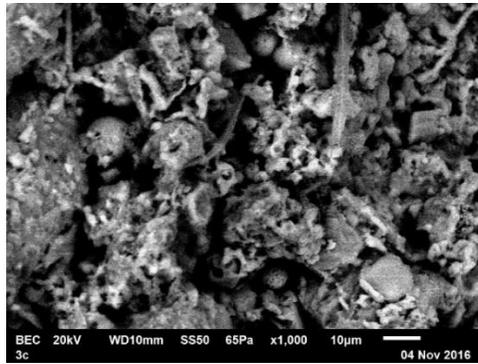
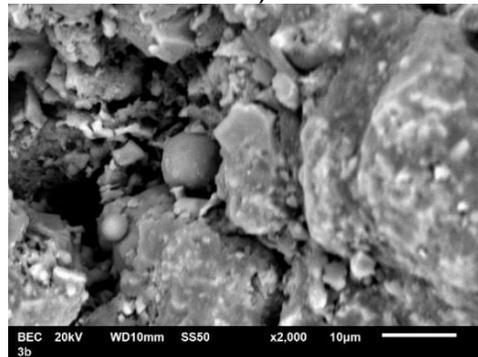


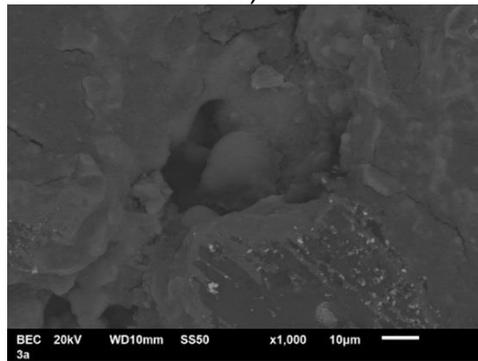
Fig. 58 Micrografías de MEB de la mezcla 40CBC-CV, cocida a: a) 900°C, b) 1000°C y c) 1100°C.



a)



b)



c)

Fig. 59 Evolución en la densificación de la matriz arcillosa. Mezcla 40CBC-CV. Muestras cocidas a: a)900°C, b)1000°C y c)1100°C.

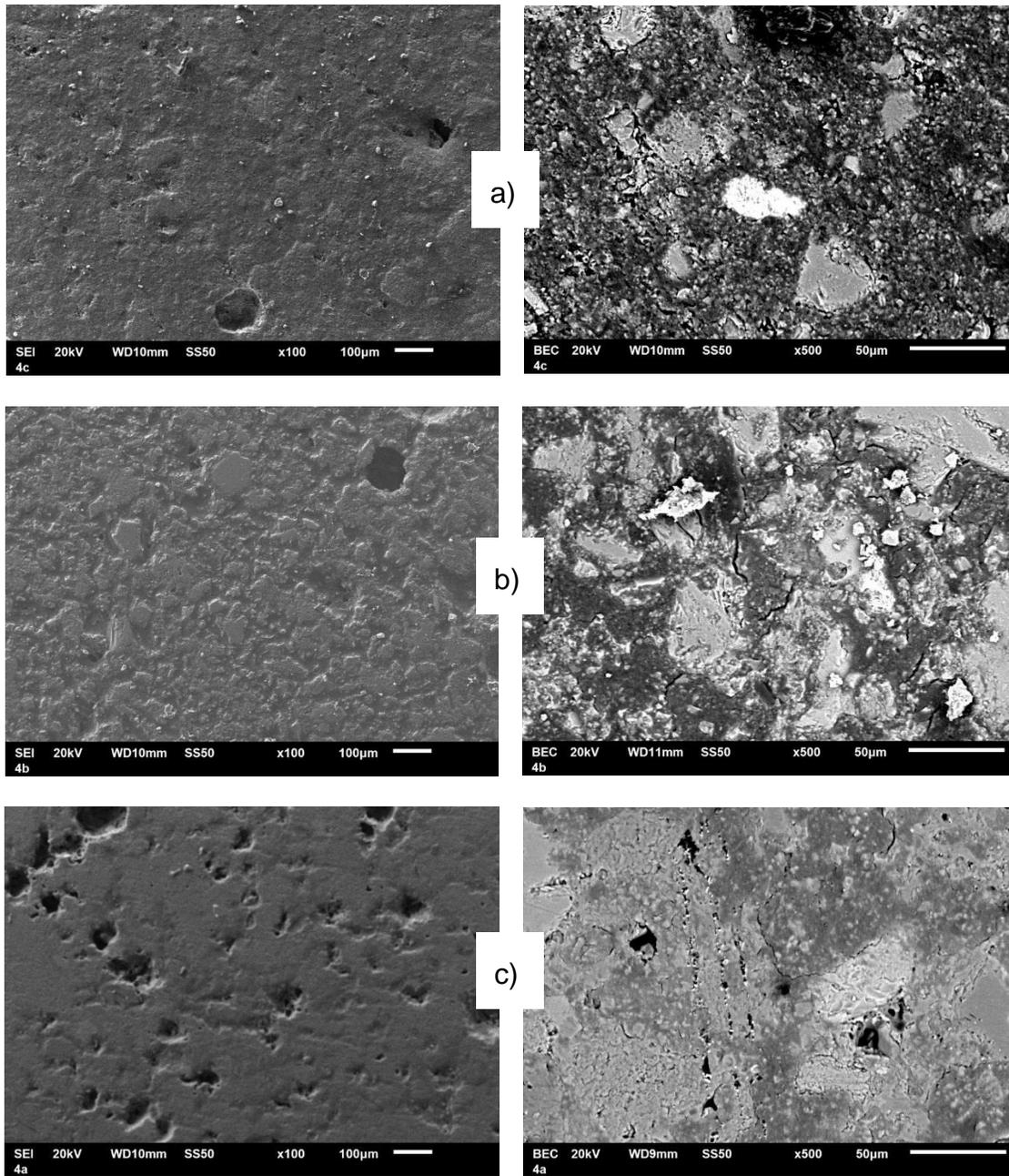


Fig. 60 Micrografías de MEB de la mezcla 20CBC-HS, cocida a: a) 900°C, b) 1000°C y c) 1100°C

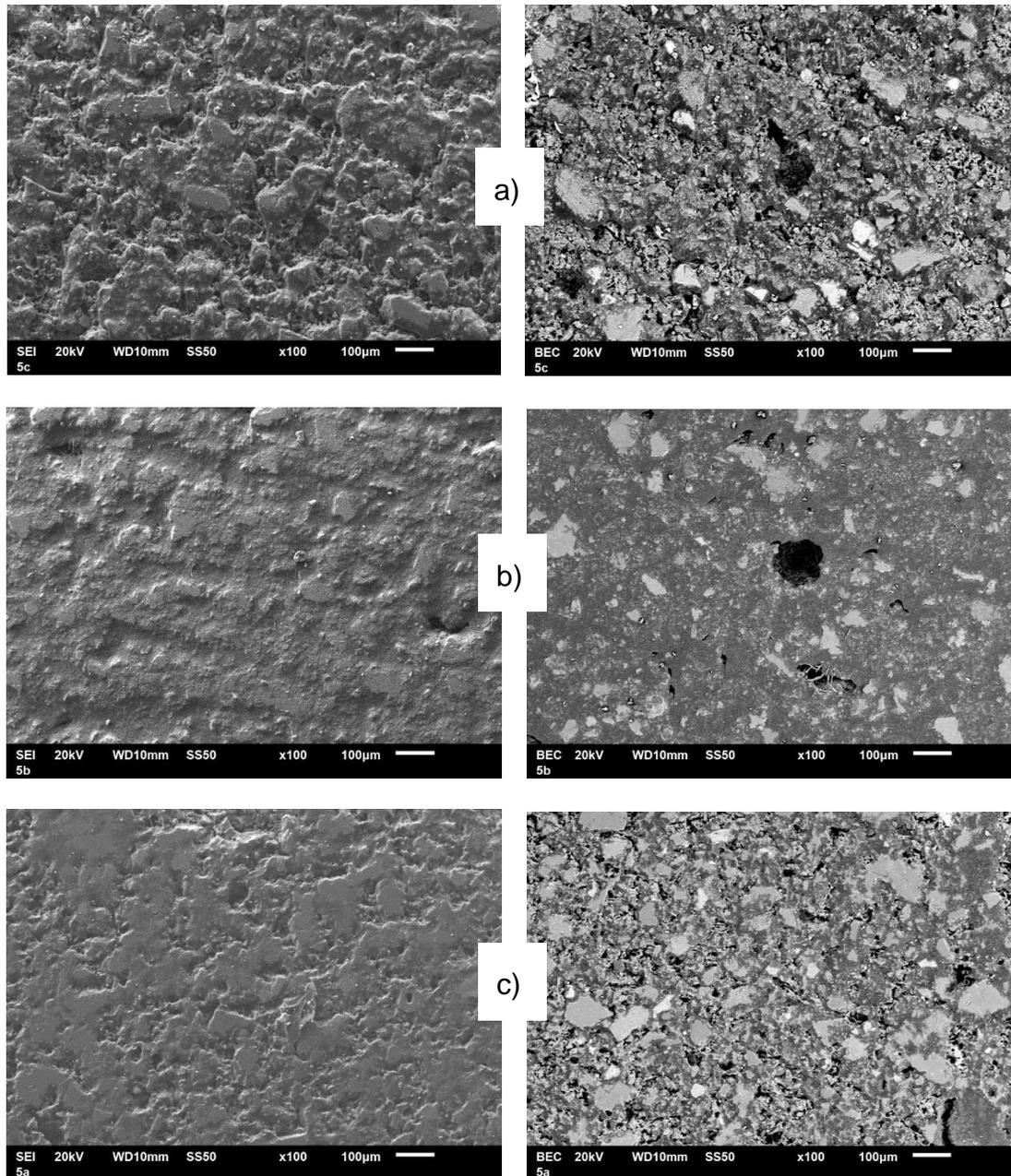


Fig. 61 Micrografías de MEB de la mezcla 40CBC-HS, cocida a: a) 900°C, b) 1000°C y c) 1100°C

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que en la elaboración de ladrillos es factible el uso de mezclas binarias compuestas por 60%AR-40%CV y de mezclas ternarias compuestas por 50%AR-20%CBC-10%HS. Al emplear las mezclas mencionadas para elaborar ladrillos cocidos a 1000°C, es posible obtener ladrillos 19.44% y 19.22% más resistentes a esfuerzos de compresión, así como con 73% y 26% mayor absorción de agua respectivamente. Por el incremento en su porcentaje de absorción, su uso en la construcción podría restringirse a lugares cerrados.

Los ladrillos elaborados con la mezcla compuesta por 50%AR-20%CBC-10%HS cocidos a 1000°C, además de ser 19.22% más resistente a esfuerzos de compresión, duplicó la resistencia a flexión y fue 19.76% más ligero, en comparación con la mezcla control. Este resultado es importante considerando que se obtuvo un ladrillo más ligero con 21.2MPa de resistencia a compresión, lo cual cumple con la resistencia a compresión mínima requerida por las normas ASTM C62 (17.2 MPa) y NMX-C-404-ONNCCE-2005 (6MPa).

La fase líquida de sinterización se incrementó con el aumento de la temperatura de cocción. El aumento de esta fase líquida contribuyó a cerrar poros e incrementó la densidad aparente de los ladrillos, incrementando su resistencia a compresión.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos científicos

Torres Agredo J., R. Mejía de Gutiérrez, C. E. Escandón Giraldo, L. O. González Salcedo (2014). Characterization of sugar cane bagasse ash as supplementary material for Portland cement. *Ingeniería e Investigación* 34-1 (2014) 5-10.

Ahmaruzzaman M., (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science* 36 (2010) 327–363.

Akram T, Memon SA, Obaid H. (2009). Production of low cost selfcompacting concrete using bagasse ash. *Construction and Build Materials* 23 (2009) 703-12.

Araceli E. Lavat, Monica A. Trezza, Mónica Poggi, (2009). Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Management* 29 (2009) 1666–1674.

Bories Cecile, Laila Aouba, Emeline Vedrenne, Gerard Vilarem, (2015). Fired clay bricks using agricultural biomass wastes: Study and characterization. *Construction and Building Materials* 91 (2015) 158–163.

Chandara C, Sakai E, Azizli KAM, Ahmad ZA, Hashim SFS (2010). The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer. *Constr Build Mater* 24 (2010) 1590–3.

Cultrone Giuseppe, Eduardo Sebastián, (2009). Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1178–1184.

Dana Kausik, Sukhen Das, Swapan Kumar Das (2004). Effect of substitution of fly ash for quartz in triaxial kaolin–quartz–feldspar system. *Journal of the European Ceramic Society* 24 (2004) 3169–3175.

Faria K.C.P., J.N.F. Holanda, (2013). Incorporation of sugarcane bagasse ash waste as an alternative raw material for red ceramic. *Cerámica* 59 (2013) 473-480.

Fernández-Pereira C., J.A. de la Casa, A. Gómez-Barea, F. Arroyo, C. Leiva, Y. Luna, (2011). Application of biomass gasification fly ash for brick manufacturing. *Fuel* 90 (2011) 220–232.

Jimenez-Quero V.G., F.M. Leon-Martinez, P. Montes-Garcia, C. Gaona-Tiburcio, J.G. Chacon-Nava. (2013). Influence of sugarcane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*. 40 (Mar. 2013) p691.

Karamanova Emilia, Georgi Avdeev, Alexander Karamanov. (2011). Ceramics from blast furnace slag, kaolin and quartz. *Journal of the European Ceramic Society* 31 (2011) 989–998.

Kazmi, Syed M.S., Safeer Abbas, Muhammad A. Saleem, Muhammad J. Munir, Anwar Khitab (2016). Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. *Construction and Building Materials* 120 (2016) 29–41.

López-Zaldívar O., P.L. Mayor-Lobo, F. Fernández-Martínez, F. Hernández-Olivares (2015). Improved cement mortars by addition of carbonated fly ash from solid waste incinerators. *Materiales de Construcción* 65-319 (2015) 1-18.

Barbieri Luisa, Fernanda Andreola, Isabella Lancellotti, Rosa Taurino, (2013). Management of agricultural biomass wastes: Preliminary study on characterization and valorisation in clay matrix bricks. *Waste Management* 33 (2013) 2307–2315.

Lingling, Guo Xu Wei, Wang Tao, Yang Nanru, (2005). Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Construction and Building Materials* 19 (2005) 243–247.

Lassinantti Gualtieri Magdalena, Alessandro F. Gualtieri, Silvio Gagliardi, Petra Ruffini, Roberto Ferrari, Miriam Hanuskova, (2010). Thermal conductivity of fired clays: Effects of mineralogical and physical properties of the raw materials. *Applied Clay Science* 49 (2010) 269–275.

Muñoz Velasco P., M.P. Morales Ortiz, M.A. Mendívil Giró, L. Muñoz Velasco, (2014). Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review. *Construction and Building Materials* 63 (2014) 97–107.

Muñoz Velasco P., M.P. Morales Ortiz, M. A. Mendívil Giro, M. C. Juárez Castelló, L. Muñoz Velasco, (2014). Development of better insulation bricks by adding mushroom compost wastes. *Energy and Buildings* 80 (2014) 17–22.

Naganathan Sivakumar, Almamon Yousef Omer Mohamed, Kamal Nasharuddin Mustapha, (2015). Performance of bricks made using fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials* 96 (2015) 576–580.

Nazer Amin Jordi Payá, María Victoria Borrachero, José Monzó (2016). Caracterización de escorias de cobre de fundiciones chilenas del Siglo XIX. *Revista de Metalurgia*, 52-4 (2016) 1-11.

Ordoñez Hernández D., J. Guerrero Paz, R. Moreno Tovar, F. Pérez Moreno, J.J.Cruz Rivera (2016). Influencia de la mineralogía en las propiedades de ladrillos fabricados en El Arenal-Actopan Hidalgo, México. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. VII Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería en Materiales (2016). México.

Pérez-Villarejo L., D. Eliche-Quesada, Fco. J. Iglesias-Godino, C. Martínez-García, Fco. A. Corpas-Iglesias, (2012). Recycling of ash from biomass incinerator in clay matrix to produce ceramic bricks. *Journal of Environmental Management* 95 (2012) S349-S354.

Raut S.P., R.V. Ralegaonkar, S.A. Mandavgane, (2011). Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 4037–4042.

Souza A. E., S.R. Teixeira, G.T.A. Santos, F.B. Costa, E. Longo (2011). Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. *Journal of Environmental Management* 92 (2011) 2774-2780.

Sutasa J, A. Mana, L. Pitak, (2012). Effect of Rice Husk and Rice Husk Ash to Properties of Bricks. *Procedia Engineering* 32 (2012) 1061 – 1067.

Teixeira Rainho Silvio, Agda Eunice de Souza, Gleyson Tadeu de Almeida Santos, Angel Fidel Vilche Peña (2008). Sugarcane Bagasse Ash as a Potential Quartz Replacement in Red Ceramic. *Journal of the American Ceramic Society* 91-6 (2008) 1883-1887.

Torres, J., Mejía, R., Escandón, C. E., González, L. O., (2014). Characterization of sugar cane bagasse ash as supplementary material for Portland cement., *Ingeniería e Investigación*, 34 -1 (2014) 5 – 10.

Ukwatta Aruna, Abbas Mohajerani, Nicky Eshtiaghi, Sujeeva Setunge (2016). Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids. *Journal of Cleaner Production* 119 (2016) 76-85.

Viruthagiri G., S. Sathiya priya, N. Shanmugam, A. Balaji, K. Balamurugan, E. Gopinathan (2015). Spectroscopic investigation on the production of clay brick with Weyant Cheryl, Vasudev Athalye, Santhosh Ragavan, Uma Rajarathnam, Dheeraj Lalchandani, (2014). Emissions from South Asian Brick Production. *Environmental Science & Technology*, 48 (2014) 6477-6483.

Libros y Tesis

Alavéz Ramírez, Rafael, (2012). Desarrollo de un material compuesto a base de suelo compactado estabilizado con puzolanas. Tesis de Doctorado en Ciencias en Desarrollo Regional y Tecnológico. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Instituto Tecnológico de Oaxaca, México.

Christian Gary D. (2009). Química analítica. Sexta edición, Editorial Mc Graw Hill, México, D.F.

Eduardo A. Mari (1998). Los materiales cerámicos. Editorial Alsina, Argentina.

Eduardo Narro Farías (1994). Física de suelos: con enfoque agrícola. Editorial Trillas, México, D.F.

Hall Christopher, William D. Hoff (2009). Water Transport in Brick, Stone and Concrete, Second Edition, Editorial CRC Press, New York, E.U.

Heribert Insam, Brigitte A. Knapp, (2011). Recycling of Biomass Ashes. Editorial Springer, New York, E.U.

Kosmatka Steven H., Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, Jussara Tanesi (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Portland Cement Association, E.U.

Juárez Badillo E., Alfonso Rico Rodríguez, (2009). Mecánica de suelos I: Fundamentos de la mecánica de Suelos. Editorial Limusa. México.

López Martell, Olga Fátima (2016). Evaluación térmica y de parámetros de calidad del proceso de cocción en un horno ladrillero MK-2. Tesis de Maestría en Ciencias en Conservación y aprovechamiento de recursos naturales. Instituto Politécnico Nacional, México.

Pinilla Arismendy, Jesús Andelfo (2005). Implementación de los métodos RIR y Rietveld para análisis cuantitativo de fases cristalinas con y sin presencia de material amorfo por difracción de rayos X de muestras policristalinas. Tesis de Maestría en Química. Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, España.

Reverté Pedro, (1979). La industria ladrillera. Editorial Reverté S.A. Argentina.

Swapna Mukherjee (2013). The Science of Clays Applications in Industry, Engineering and Environment. Editorial Springer, New Delhi, India.

V.M. Malhotra and N.J. Carino, (2004). Handbook on nondestructive testing of concrete. CRC Press, U.S.A.

William D. Callister, (2000). Fundamentals of Materials, Science and Engineering. Ed. John Wiley & Sons, E.U.

Manuales y normas

Nieto López, María Guadalupe, (2010). Manual de Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido: Fundamentos en la preparación de muestras para microscopía electrónica de barrido. El Colegio de la Frontera Sur, Chiapas, México.

ASTM C 62-13a Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale).

ASTM C 67-14 Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile.

ASTM C 373-88 Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products.

ASTM C 618 Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

ASTM D 4318-10 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. American Society for Testing and Materials.

NMX-C-404-ONNCCE-2005 “industria de la construcción - bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural - especificaciones y métodos de prueba”.

Páginas de internet

Característica de las viviendas, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Página de internet consultada el 05 de noviembre de 2015, en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=17484>

María Jesús Ariza. Materiales Industriales, Ingeniería Técnica Industrial – Mecánica, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Almería, España. Página de internet consultada el 13 de diciembre de 2015 en: <http://www.ual.es/~mjariza/>

Red Ladrilleras. Programa de Eficiencia Energética en ladrilleras y yeseras Artesanales de América Latina para mitigar el cambio climático. Página de internet consultada el 25 de mayo de 2016 en: <http://www.redladrilleras.net/website/web/stats.php>

“Los colores de la cerámica”, documento PDF consultado el 20 de enero de 2017 en: http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria22/feria390_01_los_colores_de_la_ceramica.pdf

Informe 2017, CONADESUCA/SAGARPA con datos de los Ingenios. Página de internet consultada el 22 de noviembre de 2017 en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/230563/Estimaci_n_de_cierre_de_producci_n_zafra_2016-17.pdf

