



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

OBTENCIÓN DE LADRILLO BASE ARCILLA DE BAJA DENSIDAD Y ALTA RESISTENCIA MEDIANTE EL USO DE ADITIVOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

PRESENTA

ITM. JOSÉ AGUSTÍN PALMAS LEÓN

DIRECTOR: DR. JAIME GUERRERO PAZ

CO-DIRECTOR: DR. VÍCTOR GUILLERMO JIMÉNEZ QUERO

Pachuca de Soto, Hidalgo, enero de 2020.



Mineral de la Reforma, Hgo., a 5 de diciembre de 2019

Número de control: ICBI-D/1429/2019
Asunto: Autorización de impresión de tesis.

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado al C. José Agustín Palmas León, alumno de la Maestría en Ciencias de los Materiales con número de cuenta 373337, se le autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "Obtención de ladrillo base arcilla de baja densidad y alta resistencia mediante el uso de aditivos" en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación, se registran las firmas de conformidad de los integrantes del comité revisor.

PRESIDENTE	Dr. Fidel Pérez Moreno
SECRETARIO	Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero
VOCAL	Dr. Jaime Guerrero Paz
SUPLENTE	Dr. Edgar Cardoso Legorreta

Sin otro particular reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
 "Amor, Orden y Progreso"

 Dr. Oscar Roldán Suárez Castillo
 Director del ICBI

ORSC/IBO

Ciudad del Conocimiento
 Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia Carbonera
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
 Teléfono: +52 (771) 71 720 00 ext. 2231 Fax 2109
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx



www.uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres

Que me han conducido por la vida, con amor y paciencia, hoy ven forjado un anhelo, una ilusión, un deseo. Gracias por enseñarme lo que han recogido a su paso por la vida, por compartir mis horas grises, mis momentos felices, ambiciones, sueños e inquietudes. Gracias por ayudarme a salir adelante en la adversidad, por hacer de mi lo que hoy soy. No los defraudare los haré sentir orgullosos y verán que todos sus sacrificios y tragos amargos hoy son suave miel. Para ustedes, queridos mamá y papá.

A mis hermanos

Una meta más en mi vida se ha cumplido. Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo y su comprensión en los momentos difíciles. Gracias por haber fomentado en mí, el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida, por compartir mis penas y mis alegrías, mis pequeñas victorias y dolorosos fracasos, siempre recibiendo de ustedes la palabra de aliento que me dio la fuerza para seguir luchando. Hoy que me he convertido en profesionalista, me dispongo a conquistar nuevas metas y a lograr mi realización personal. A ustedes debo este logro y con ustedes lo comparto con todo mi cariño.

Los docentes son un pilar fundamental en el camino del aprendizaje, le agradezco a todos los profesores que han colaborado con mi formación académica, particularmente al comité revisor de esta tesis, Dr. Jaime Guerrero Paz, Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero, Dr. Fidel Pérez Moreno y al Dr. Edgar Cardoso Legorreta. Gracias por su tiempo, empeño, trabajo y observaciones realizadas a este trabajo. En especial quiero agradecer al Dr. Jaime Guerrero Paz y al Dr. Jesús García Serrano por enseñarme las bases de las ciencias de los materiales y su fantástico mundo.

Gracias a Sergio, Delin, Rubén, Ángeles, Jesús y Omar, y demás compañeros y amigos que me acompañaron a recorrer este camino en busca de alcanzar esta nueva meta.

Agradezco a mi universidad, Universidad Autónoma de Estado de Hidalgo y a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí quienes prestaron parte de la infraestructura ocupada en este trabajo. Al programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP), por el apoyo a esta investigación como parte del proyecto “Impulso al desarrollo tecnológico de la fabricación de ladrillo” en desarrollo de la red temática “Tecnología sustentable del ladrillo”.

Agradezco finalmente a todas las personas que colaboraron en esta investigación, brindándome su tiempo y trabajo, cada aportación fue muy importante:

Dr. Miguel Pérez Labra (AACTyM- UAEH), por su apoyo con el recubrimiento de muestras para MEB.

Dra. Lis Tamayo Rivera, (ESAp- UAEH), por su colaboración con el Microscopio Electrónico de Barrido.

Dr. Pedro Vera Serna (UPTecámac), por su apoyo con los análisis de Difracción de Rayos X.

Dr. José de Jesús Cruz Rivera y M.M.I.M. Rosa Lina Tovar Tovar (IM-UASLP), por su apoyo con los análisis de Difracción de Rayos X.

I.Q. María Aurora Méndez Marzo (AACTyM- UAEH), por su apoyo con el Análisis de Tamaño de Partícula.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por su apoyo al otorgarme una beca para poder realizar este estudio de posgrado en el periodo 2017-2019. Son este tipo de apoyos a la ciencia y tecnología, los que nos permiten y facilitan alcanzar el sueño de seguir el camino de la investigación en la busca de la superación personal y el avance tecnológico y científico.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	10
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 ARCILLAS	14
2.1.1 Clasificación	15
2.2 MINERALES ARCILLOSOS	18
2.2.1. Clasificación	18
2.2.2. Efecto de la temperatura en los minerales arcillosos	19
2.3. MINERALES NO ARCILLOSOS	28
2.3.1. Efecto de la temperatura en los minerales no arcillosos	28
2.4. RESIDUOS INDUSTRIALES Y URBANOS COMO ADITIVOS EN LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS.	37
2.5. MOLIENDA, TAMAÑO DE PARTÍCULA Y REACTIVIDAD	40
2.6. SINTERIZACIÓN	42
3. ANTECEDENTES	45
4. JUSTIFICACIÓN	50
5. OBJETIVOS	52
5.1. Objetivo general	52
5.2. Objetivos específicos	52
6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	53
6.1. MATERIALES	53
6.1.1. Materia prima	53
6.1.2. Aditivos	53
6.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	54
6.2.1. Diseño de experimentos	56
6.2.2. Conformado	58
6.2.3. Secado	58
6.2.4. Sinterizado	58
6.3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	59
6.3.1. Límites Atterberg	59
6.3.2. Análisis de tamaño de partícula	61
6.3.3. Microscopía Óptica de Polarización	62
6.3.4. Análisis y semicuantificación de fases por Difracción de Rayos X	63
6.3.5. Análisis mineralógico y microestructural por Microscopía Electronica de Barrido (MEB-EDS)	65

6.4. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DEL LADRILLO SINTERIZADO	67
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
7.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA	70
7.1.1. Determinación de los límites de consistencia	70
7.1.2. Análisis de tamaño de partícula	71
7.1.3. Identificación mineralógica por medio de Microscopía Óptica de Polarización	72
7.1.4. Determinación y semicuantificación de fases por DRX-RIR	75
7.1.5. Análisis mineralógico por MEB-EDS	81
7.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS LADRILLOS ELABORADOS CON ASERRÍN	83
7.2.1. Análisis de la evolución microestructural del ladrillo por microscopía óptica	83
7.2.2. Análisis DRX-RIR para las muestras sinterizadas a diferentes temperaturas	85
7.2.3. Análisis microestructural por MEB	90
7.2.4. Efecto de la temperatura de sinterización en las propiedades mecánicas y físicas del ladrillo	93
7.3. EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE ASERRIN-VIDRIO Y ASERRIN-PUMICITA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS LADRILLOS	101
7.3.1. Análisis microestructural por microscopía óptica	101
7.3.2. Análisis DRX-RIR para las muestras con la incorporación de vidrio y pumicita	103
7.3.3. Efecto en las propiedades mecánicas y físicas del ladrillo en función del porcentaje de incorporación de vidrio y pumicita.	106
7.4. EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE ASERRÍN Y ASERRÍN-VIDRIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LADRILLOS ELABORADOS CON MATERIAS PRIMAS CON DISTINTA MINERALOGÍA A LA IDENTIFICADA EN LA REGIÓN DE TULANCINGO-SANTIAGO TULANTEPEC, HIDALGO.	111
7.4.1. Comparativa de las características mineralógicas de la materia prima y propiedades mecánicas y físicas de ladrillos de las regiones Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec	112
7.4.2. Efecto de la incorporación de aserrín en las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos de la región de Actopan-El Arenal; comparativa con ladrillos de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec	116
7.4.3. Efecto de la incorporación de aserrín-vidrio en las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos de la región de Actopan-El Arenal, comparativa con ladrillos de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec	118
8. CONCLUSIONES GENERALES	122
9. REFERENCIAS	124
ANEXOS	133
GLOSARIO	154

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.- Capa tetraédrica de [SiO₄]⁻⁴ y octaédrica de gibbsita y su influencia en la forma laminar de las arcillas.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.- "Calculadora" de textura del suelo (Natural Resources Conservation Service).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.- Sílice, sus formas, temperaturas de inversión y porcentajes de expansión volumétrica (Singer & Singer, 1979.).</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.- Diagrama ternario para clasificar los minerales de feldespato en función de su composición química (http://waterproofpaper.com).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 5.- Cambios que se producen durante la etapa inicial de sinterización. (a) partículas de partida, (b) reorganización, y (c) formación de cuello. (Cortesía de ASTM International, Materials Park, OH.) (Richerson, 2018).</i>	<i>43</i>
<i>Figura 6.- Cambios que se producen durante la segunda etapa de sinterización. (Cortesía de ASTM International, Materials Park, OH.) (Richerson, 2018).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 7.- Cambios que se producen durante la etapa final de sinterización. (a) Crecimiento de grano con fase de poro discontinuo, (b) crecimiento de grano con reducción de la porosidad, y (c) crecimiento de grano con eliminación de la porosidad. (Cortesía de ASTM International, Materials Park, OH.) (Richerson, 2018).</i>	<i>44</i>
<i>Figura 8.- Metodología experimental propuesta.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 9.- Mezcladora Blazer Modelo B10.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 10.- Carta de plasticidad o Casagrande para los suelos cohesivos, además de una clasificación general de algunos materiales conocidos (simbología explicada en la Tabla 11) (Bañón Blázquez 2008).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 11.- Equipo utilizado para el análisis de tamaño de partícula, marca Beckman & Coulter LS13320.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 12.- Difractometro de Rayos X Brucker Modelo D8 Advance Diseño DAVINCI.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 13.- Microscopio Electrónico de Barrido JEOL modelo JSM-IT300.</i>	<i>66</i>

<i>Figura 14.- a) Maquina de fatiga marca Instron 8802 con platos de compresión acoplados para realizar las pruebas de resistencia a la compresión; b) probetas recubiertas con yeso para el ensayo.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 15.- Análisis de tamaño de partícula por difracción láser de las materias primas y la mezcla de las mismas utilizada en el presente estudio. a) frecuencia acumulativa en volumen y b) Curvas de frecuencia en volumen.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 16.- Material ROM1; a) fotomicrografía obtenida mediante nicoles cruzados observadas a 20X con luz transmitida; b) fotomicrografía obtenida mediante nicoles paralelos. Campo horizontal de la fotografía 0.45 mm.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 17.- Material ROM1; a) fotomicrografía obtenida mediante nicoles cruzados observadas a 10X con luz transmitida; b) fotomicrografía obtenida mediante nicoles paralelos. Campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 18.- Material ROM1; a) fotomicrografía obtenida mediante nicoles cruzados observadas a 10X con luz transmitida; b) fotomicrografía obtenida mediante nicoles paralelos. Campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 19.- Material SANTUL1; a) fotomicrografía obtenida mediante nicoles cruzados observadas a 10X con luz transmitida; b) fotomicrografía obtenida mediante nicoles paralelos. Campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 20.- Material SANTUL1; a) fotomicrografía obtenida mediante nicoles cruzados observadas a 10X con luz transmitida; b) fotomicrografía obtenida mediante nicoles paralelos. Campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 21.- Difractogramas de las materias primas utilizadas: a) ROM1. b) SANTUL1. Simbología (Whitney & Evans, 2010) Cuarzo (Qz), Albita (Ab), Anortita (An), Caolinita (Kln), Magnesioriebeckita (Mrbk), Magnesiochloritoide (Mbcl), Hematita (Hm), Cristobalita (Crs), Montmorillonita (Mnt), Tridimita (Trd).....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 22.- Patrones de difracción de la pumicita y del vidrio a incorporar en la elaboración de probetas.</i>	<i>80</i>

<i>Figura 23.- Fotomicrografías de MEB con electrones secundarios del material ROM1; a) partícula atribuida a cuarzo; b) partícula atribuida a una anortita; c) partícula atribuida a caolinita; d) partícula atribuida a albita.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 24.- Fotomicrografías de MEB con electrones secundarios del material SANTUL1; a) partícula atribuida a cuarzo; b) partícula atribuida a anortoclasa; c) partícula atribuida a plagioclasa; d) partícula atribuida a montmorillonita.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 25.- Efecto de la temperatura en el color del ladrillo resultante de las mezclas T. Iniciando en 900 °C (primera de izquierda a derecha) y terminando en 1100 °C (primera de derecha a izquierda).</i>	<i>84</i>
<i>Figura 26.- Fotografías de ladrillos incorporando 20 % vol. de aserrín sinterizados a diferente temperatura.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 27.- Difractogramas de ladrillos sinterizados a diferentes temperaturas. Simbología (Whitney & Evans, 2010): Cuarzo (Qz), Albita (Ab), Hematita (Hem), Anortita (An), Mulita (Mull), Cristobalita (Cr), Magnesiocloritoide (Mgcl), Magnesioriebeckita (Mrbk) y Corindón (Crn).....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 28.- Fotomicrografías obtenidas mediante electrones secundarios tomadas a 55X. a) probeta sinterizada a 900 °C; b) probeta sinterizada a 1100 °C.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 29.- Fotomicrografías obtenidas mediante electrones secundarios. a) probeta sinterizada a 950 °C; b) probeta sinterizada a 1000 °C.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 30.- Fotomicrografías tomadas mediante electrones secundarios a 55X. a) probeta sinterizada a 900 °C; b) probeta sinterizada a 1050 °C.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 31.- Fotomicrografía tomadas mediante electrones secundarios a 1900X de la probeta sinterizada a 1100 °C.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 32.- Fotomicrografía tomadas mediante electrones secundarios a 850X de la probeta sinterizada a 900 °C.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 33.- Resistencia a la compresión obtenida para los lotes sinterizados a diferentes temperaturas (grados según la norma ASTM C62, severe weathering (SW), moderate wearing (MW) y norma weathering (NW)), agregando 20 % vol. de aserrín.</i>	<i>94</i>

<i>Figura 34.- Posible efecto de la magnesioriebeckita en el poro del ladrillo al aplicar una carga.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 35.- Efecto de la temperatura en la densidad aparente de los ladrillos de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec, agregando 20 % vol. de aserrín.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 36.- Efecto de la temperatura de sinterización en los porcentajes de porosidad de los ladrillos de Tulancingo-Santiago Tulantepec, agregando 20 % vol. de aserrín.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 37.- Efecto de la temperatura de sinterización en la absorción de agua en los ladrillos de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec, agregando 20 % vol. de aserrín. (grados según la norma ASTM C62, severing weathering (SW) y moderating weathering (MW))....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 38.- Efecto de la temperatura de sinterización en la contracción de los ladrillos de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec, agregando 20 % vol. de aserrín.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 39.- Efecto en la microestructura al incorporar aserrín-pumicita (fotomicrografías del lado izquierdo) y aserrín-vidrio (fotomicrografías del lado derecho). En orden de arriba hacia abajo de la ilustración están los lotes de 2 % de incorporación, 3 % de incorporación y 5 % de incorporación.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 40.- Difractogramas de ladrillos elaborados con 20 % de aserrín, incorporando vidrio en 2, 3 y 5 %, sinterizados a 900 °C, agregando 20 % de aserrín. Simbología (Whitney & Evans, 2010): Cuarzo (Qz), Albita (Ab), Hematita (Hem), Anortita (An), Mulita (Mull), Cristobalita (Crb), Corindón (Crn) y Magnesioriebeckita (Mrbk).</i>	<i>103</i>
<i>Figura 41.- Difractogramas de ladrillos elaborados con 20 % vol. de aserrín, incorporando pumicita en 2, 3 y 5 %. Simbología (Whitney & Evans, 2010): Cuarzo (Qz), Albita (Ab), Hematita (Hem), Anortita (An), Cristobalita (Crb), Corindón (Crn) y Magnesioriebeckita (Mrbk).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 42.- Comparativa de la resistencia a la compresión obtenida por porcentajes de incorporación de aditivo más 20 % vol. de aserrín, con respecto a los valores mínimos requeridos según la norma ASTM C62 y de igual manera con respecto a los blancos.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 43.- Fotografía tomada a probeta elaborada incorporando vidrio en 5 % peso, dónde se aprecian grietas alrededor de una protuberancia de vidrio.</i>	<i>108</i>

<i>Figura 44.- Valores de densidad del ladrillo sinterizado a 900 °C agregando 20 % vol. de aserrín en función del porcentaje de sustitución de vidrio/pumicita.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 45.- Valores de porosidad resultantes del ladrillo sinterizado a 900 °C agregando 20 % vol. de aserrín en función del porcentaje de sustitución de vidrio/pumicita.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 46.- Valores de absorción de agua del ladrillo sinterizado a 900 °C agregando 20 % vol. de aserrín en función del porcentaje de sustitución de vidrio/pumicita.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 47.- Comparativa de la resistencia a la compresión de los ladrillos de la región de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec, sinterizados a 900 °C, agregando un 20 % vol. de aserrín.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 48.- Comparativa de la porosidad y absorción de agua de los ladrillos de las regiones de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec, sinterizados a 900 °C, incorporando un 20 % en vol. de aserrín.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 49.- Efecto de la adición de vidrio reactivo en la resistencia mecánicas del ladrillo de Actopan-El Arenal sinterizado a 900 °C.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 50.- Comparativa del efecto de incorporación de 3 % de vidrio y 20 % vol. de aserrín, en la resistencia mecánica de los ladrillos de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec, sinterizados a 900 °C.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 51.- Comparativa del efecto de la incorporación de 3 % peso de vidrio y 20 % vol. de aserrín en la porosidad y la absorción de agua en los ladrillos de la región de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec, sinterizados a 900 °C.</i>	<i>121</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.- Comportamiento de los minerales arcillosos durante la cocción (Linares, Huertas, & Capel, 1983).</i>	<i>22</i>
--	------------------

<i>Tabla 2.- Principales características de los 5 grupos principales de minerales arcillosos ((Wilson, Wilson, & Patey, 2014),(www.sciencephoto.com/media/1003519/view/chlorite-sem)).</i>	<i>26</i>
---	------------------

Tabla 3.- Propiedades físicas generales de los feldespatos (https://geology.com/minerals/feldspar.)	32
Tabla 4.- Características principales de los feldespatos (Hernández, Bastias, Matus, & Mahaney, 2018).	33
Tabla 5.- Algunas características de los inosilicatos y los nesosilicatos ((Della Ventura, Redhammer, Iezzi, Hawthorne, & Papin., 2005) (https://www.ugr.es/~velilla/imagenes/Atlas_Nesosilicatos/chloritoid.JPG).	35
Tabla 6.- Resumen de antecedentes estudiados con las principales características de los ladrillos a manera de comparación.	49
Tabla 7.- Algunas propiedades de los vidrios.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 8.- Diseño de mezclas para cumplimiento del objetivo específico 1, manteniendo constantes los porcentajes de incorporación de 20 % vol. de aserrín, 30 % en peso del material "ROM-1", 70 % "SAN-TUL-1" y una humedad del 35 %.	56
Tabla 9.- Diseño de mezclas para cumplimiento del objetivo específico 2, manteniendo constantes los porcentajes de incorporación de 20 % vol. de aserrín, 30 % en peso del material "ROM-1", 70 % "SAN-TUL-1", una humedad del 35 % y una temperatura de sinterización de 900 °C.	57
Tabla 10.- Diseño de mezclas para cumplimiento de objetivo específico 3, manteniendo constantes los porcentajes de incorporación de 40 % en peso del material "ACT-9", 60 % en peso del material "ACT-10", una humedad del 30 % y una temperatura de sinterización de 900 °C.	57
Tabla 11.- Símbolos de grupo según el SUCS.	59
Tabla 12.- Tipología de suelos según la SUCS.	60
Tabla 13.- Ejemplificación del cálculo de fórmula estructural del cuarzo, a partir de los resultados de porcentaje en peso determinado por EDS.	67

Tabla 14.- Comparativa de los límites de consistencia de las materias primas y mezclas a utilizar para el conformado del ladrillo.	70
Tabla 15.- Resumen de resultados del análisis por microscopía óptica de polarización de la materia prima.	75
Tabla 16.- Fases minerales identificadas por DRX y semi-cuantificadas por RIR del material ROM1.	78
Tabla 17.- Fases minerales identificadas por DRX y semi-cuantificadas por RIR del material SANTUL1 empleada en la elaboración del ladrillo.	78
Tabla 18.- Fases minerales identificadas por DRX en muestras sinterizadas a diferentes temperaturas, las fases fueron semi-cuantificadas por RIR con el método de estándar interno (10 % Corindón).	88
Tabla 19.- Posibles causas de la resistencia obtenida en el ladrillo elaborado con 20 % vol. de aserrín sinterizado a 900 °C.	94
Tabla 20.- Fases minerales identificadas por DRX en muestras incorporando 2, 3 y 5 % de pumicita y vidrio, las fases fueron semi-cuantificadas por RIR con el método de estándar interno (10 % Corindón).	105
Tabla 21.- Análisis por el método RIR-DRX, de las fases minerales presentes en las materias primas de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec.	113
Tabla 22.- Análisis semicuantitativos por el método RIR-DRX de los ladrillos sinterizados a 900 °C de las regiones de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec.	115
Tabla 23.- Posibles causas de las resistencias a la compresión de los ladrillos de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec.	120

1. INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre dejó su vida nómada y se convirtió en sedentario se vio en la necesidad de construir refugios que pudiesen protegerlo de las condiciones climáticas y del entorno de la naturaleza. Esto lo condujo al desarrollo y construcción de viviendas (Fernandes, 2019).

La vivienda es una de las necesidades básicas del ser humano. Sin embargo, a pesar de su importancia, una gran parte de la población de México no tiene acceso a una vivienda digna (INEGI, 2010).

Los ladrillos son uno de los materiales más antiguos conocidos para la construcción de viviendas que datan de los comienzos de la civilización (Drysdale & Hamid, 2007). Presentan buenas propiedades físicas y mecánicas debido al proceso de cocción por el cual son sometidos. Actualmente, debido a su elaboración principalmente artesanal, requieren una gran cantidad de materia prima, lo cual lleva a la sobre explotación de las fuentes o bancos de materias primas (Muñoz, Morales, Letelier, & Mendivil, 2016).

La producción anual mundial de ladrillos es de alrededor de 1391 billones de piezas, y continúa aumentando anualmente (Zhang, 2013). De acuerdo con la Red de Ladrilleras, en México se tienen registradas 10251 unidades económicas de fabricación de ladrillos (Agencia Suiza para el desarrollo y la cooperación, 2013). El problema radica en que la mayoría de estos establecimientos no cumplen con los requerimientos necesarios para un adecuado control del proceso, y por ende una mejor calidad del ladrillo. En 2017 el Estado de Hidalgo acreditó un total de 245 licencias a productores de ladrillo (INEGI 2017). Sin embargo, el número de establecimientos conocidos en este estado es mayor a dicha cifra, pero al no tener un control de proceso y calidad de su producto optan por no tramitar dicha licencia.

Se han diagnosticado propiedades físicas y mecánicas de ladrillos artesanales del Estado de Hidalgo, encontrando valores promedio de porosidad de 36 %, así como

de resistencia a la compresión menores a 6 MPa (norma ASTM C62 establece valor mínimo para ladrillo estructural de 10.3 MPa) (Guerrero Paz y colaboradores, 2017).

Los productos de arcilla forman un grupo de cerámicos tradicionales que se utilizan para la elaboración de tubos, ladrillos, etc. (Richerson, 2018). La arcilla, la arena y el agua se mezclan y se les da forma. Se pueden comprimir en formas “en verde”, es decir, que no pasaron por un proceso de cocimiento. Esta forma en verde cuenta con suficiente resistencia para su manejo. Durante el secado del producto la humedad excesiva se elimina y ocurren cambios dimensionales en la pieza. Para conseguir un secado uniforme se debe controlar de manera cuidadosa la temperatura y la humedad, minimizando así los riesgos de agrietamiento (Dalkilic & Nabikoglu, 2017). Una vez que se realiza el proceso de sinterización del producto en verde, este aumenta su resistencia mecánica y cambian algunas de sus propiedades físicas, como la porosidad o la densidad.

La búsqueda del mejoramiento de las propiedades de los ladrillos ha sido objeto de estudio entre los diferentes investigadores (Abbas, Saleem, Kazmi, & Munir, 2017), (Cusidó, Soriano, & Devant, 2015), (Muñoz, Morales, Letelier, & Mendivil, 2016). Constantemente se realizan pruebas mediante la combinación de los materiales base y aditivos. Para mejorar su resistencia mecánica y además reducir el impacto ecológico de la industria ladrillera al incorporar a las mezclas tradicionales materiales de desecho o reutilizables (Vieira, Pinheiro, Sanchez Rodriguez, Candido, & Monteiro, 2016).

Como se comentó, el estudio de los materiales de construcción alternativos ha aumentado de manera significativa en la última década (Zhu, Wang, Liu, Ji, & X., 2017). Una de las principales razones es la reducción de contaminantes generados principalmente durante su proceso de elaboración. Alrededor de un tercio del consumo mundial de energía lo absorbe la industria de la construcción. Dicha industria requiere un porcentaje estimado de un 30 % de los minerales del planeta, además de generar un 25 % de los desperdicios sólidos totales del mundo, haciendo uso de un 12 % de la superficie terrestre total. Todo esto de acuerdo con el programa ambiental de Naciones Unidas (European-Statistics, 2010).

Un intento por minimizar el problema de contaminación que engloba muchos procesos de la industria de la construcción, es la incorporación de materiales reciclables a manera de sustitución de los materiales de origen o base (Monteiro & Vieira, 2014). Se debe evaluar la factibilidad económica del reciclado, pues puede haber gastos de recolección, separación y limpieza del material y gastos inherentes al procesamiento del mismo. Naturalmente el reciclado es más atractivo cuanto mayor sea el precio del material virgen a sustituir (Gaggino, 2009).

Un material que tiene la facilidad de ser reciclado es el vidrio. En la manufactura de nuevas piezas de vidrio se puede incorporar un porcentaje de 15 % a 30 % de desecho de vidrio. Cabe señalar que, en la literatura, existen resultados de trabajos sobre la incorporación de vidrio en la elaboración de ladrillos de acuerdo a referencias (Ponce Peña y colaboradores, 2016), (Chidiac & Federico, 2017). Este material se ha convertido en un desecho habitual, ya sea por desecho industrial o doméstico. El vidrio comercial que más se elabora es vidrio a base de Na_2O y CaO . En general presenta un punto de ablandamiento alrededor de los 800 a 900 °C, característica que ayuda a que el aditivo actúe de manera óptima al momento de la sinterización del ladrillo.

Otro material que ha sido objeto de estudio para su incorporación en la producción de ladrillos es el aserrín (Okunade, 2008), (Elinwa, 2007). El uso de material orgánico puede ayudar a disminuir las cantidades de combustible necesarios para la fabricación de ladrillos (Goel & Kalamdhad, 2017). Esto es consecuencia de la combustión interna, que ayuda a una distribución de la temperatura en el cuerpo del ladrillo. Un aspecto importante y difícil de conseguir en los productores artesanales.

En el estudio del arte se ha encontrado que otro aditivo utilizado como sustituto de arcilla en la elaboración de ladrillos que ha presentado resultados interesantes es la pumicita (Gencel, 2015). Trabajos como el realizado por Karaman y colaboradores (Karaman, Gunal, & Ersahin, 2008) concluyeron que la pumicita es un aditivo que propicia la disminución de la densidad del ladrillo, debido a la naturaleza porosa de este aditivo. Dicho cambio está relacionado al alto porcentaje de porosidad abierta del ladrillo.

Por lo anteriormente mencionado, el presente trabajo tuvo como objetivo el obtener un ladrillo de baja densidad con una resistencia a la compresión que cumpla con normas internacionales. Se realizó una evaluación del comportamiento físico-mecánico del ladrillo elaborado a base de una mezcla tradicional de las materias primas de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec incorporando los aditivos seleccionados: aserrín (comúnmente utilizado en esta zona ladrillera) cribado por malla #20, aserrín + vidrio reactivo y aserrín + pumicita reactiva. Se implementó el uso del término “material reactivo” o “material con alta reactividad” para describir a aquellos polvos con altos porcentajes de partículas con tamaños menores a 1 μm . Se analizaron las variables que pudiesen contribuir a un cambio en las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos. Las variables consideradas fueron: la temperatura de sinterización, el tamaño de partícula del aserrín, vidrio y pumicita, además del porcentaje de sustitución en masa del vidrio/pumicita al ser incorporados a la mezcla para la elaboración del ladrillo.

Para el análisis y discusión del porqué se ven modificadas las propiedades físicas y mecánicas del ladrillo al incorporar los aditivos, se utilizaron diferentes técnicas de caracterización. Para el análisis de la composición de fases se empleó la Difracción de Rayos X, con el método de Relación de Intensidad de Referencia (DRX-RIR). Para el estudio microestructural se utilizaron técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Microscopia Óptica de Polarización (MOP). Así mismo, al obtener el producto sinterizado, además de estas técnicas de caracterización, se llevaron a cabo una serie de pruebas establecidas por las normas ASTM, (ASTM, C62, 2017), (ASTM, C373, 2017) para evaluar sus propiedades tanto físicas como mecánicas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ARCILLAS

Se entiende por arcilla a una asociación de silicatos complejos, hidratados de aluminio de fino tamaño de partícula. Las propiedades de las arcillas dependen de su mineralogía y estado físico, sin embargo, pueden modificarse con relativa facilidad (de Liberto, 1964).

Presenta cierta complejidad definir el término arcilla debido a los múltiples enfoques que esta puede tener (Hernandez Yañez, 2015). Para aclarar un poco la definición de arcilla enfocada a la ciencia de los materiales, se hará uso de dos conceptos establecidos por la Asociación Internacional Para el Estudio de las Arcillas (AIPEA) y por la Sociedad de Minerales de la Arcilla (CMS por sus siglas en ingles). Los conceptos han propuesto una definición tanto para referirse a una “arcilla” y otro para un “mineral arcilloso”, estos términos son:

“Arcilla”: Material natural compuesto principalmente por minerales de granulometría fina, que presenta generalmente un comportamiento plástico con contenidos idóneos de agua y que tras el secado o cocción se endurece. Este material puede presentar fases asociadas que no proporcionen plasticidad, además de materia orgánica.

“Mineral de la arcilla”: Minerales del grupo de los filosilicatos, que imparten plasticidad y que al momento del secado o cocción endurecen.

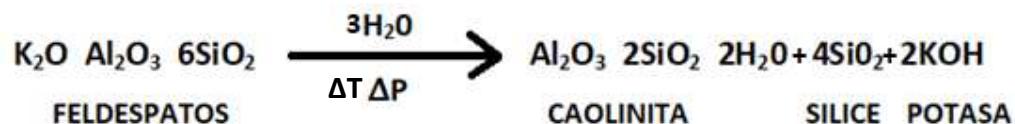
La fracción “arcilla” de un material cerámico está constituida fundamentalmente por minerales arcillosos denominados filosilicatos de la arcilla (Ivanić, Vdović, de Brito Barreto, Bermanec, & Sondi, 2015). Se trata de filosilicatos hidratados que poseen una estructura cristalina formada por una red de oxígenos organizada en capas tetra y octaédricas. Si se unen una capa tetraédrica y una octaédrica se forma un mineral 1:1, y si se unen dos capas tetraédricas alternando con una octaédrica se da lugar a la formación de un mineral 2:1 (Zhou & Keeling, 2013). En estas capas los iones de silicio y aluminio presentan una coordinación tetraédrica en relación con el

oxígeno, mientras que los iones de aluminio, hierro, magnesio, cromo, litio o manganeso poseen una coordinación octaédrica frente al oxígeno o a hidroxilos. Estas estructuras laminares se completan con la presencia de cationes de cambio cuya aparición está en función del déficit de carga existente dentro de las capas octaédrica y tetraédrica por sustituciones isomórficas (Brindley & Brown, 1981).

2.1.1 Clasificación

Un factor diferenciador que establece los grupos distintos dentro de los minerales de la arcilla es la estructura cristalina de los mismos (Al-Ani & Sarapää, 2008). Así, es posible distinguir los grupos de la caolinita, montmorillonita (también conocido como esmectitas), vermiculita, illita (también conocido como hidrómica) y clorita. Existen, además, minerales que presentan una estructura mixta integrada por **interestratificaciones** regulares o irregulares en las que están presentes, normalmente, dos o más de los componentes típicos.

Como se mencionó anteriormente, una arcilla es una asociación de minerales (silicatos complejos hidratados de aluminio), con un fino tamaño de partícula. Esto es originado por la alteración hidrotermal de **rocas ígneas** (granito, dioritas, basalto, entre las más comunes) (Singer & Singer, 1979.). Además de ser sometidas a condiciones de presión, temperatura, etc., dichas rocas **desilifican** en minerales arcillosos, sílice libre y álcalis que se lixivian mediante el siguiente equilibrio:



La alteración de la naturaleza de la roca, fija las características de los minerales que se forman, definiendo así su estructura y composición química en su estado natural. Además de sus minerales arcillosos, cuenta también con otros minerales, como por ejemplo el cuarzo, feldespatos, plagioclasas, piroxenas, rutilo, limonita y algunas cantidades de materia orgánica (Barton & Karathanasis, 2002).

La clasificación aceptada por la industria y los institutos de geología de minerales no metálicos establece los siguientes tipos de arcilla (de Liberto, 1964):

➤ Caolín

Son arcillas residuales que son originadas por alteración hidrotermal, **hipogénica** o **epigénica**, de rocas ígneas ácidas (granitos, dioritas, riolitas). En su proceso de alteración, los feldspatos son atacados por soluciones líquidas o vapores ácidos, a presiones y temperaturas relativamente elevadas. Esta alteración da lugar a la caolinita, sílice libre y alcalies solubles. Por la naturaleza mineralógica de la roca, los productos pueden ser de hasta 70 a 100 % de caolinita, alrededor de 30 % cuarzo y menos de 10 % de mica.

La caolinita presenta buena cristalización en placas hexagonales y tamaño fino de partícula. Un análisis químico próximo al teórico de caolinita es de: 46.5 %SiO₂ y 39.6 % Al₂O₃. Una contracción al quemado del 8 al 12 % y una absorción al quemado del 10 al 20 %.

➤ Arcillas Plásticas

Este tipo de arcilla tiene un origen similar al del caolín. La diferencia es que esta arcilla fue trasladada a lugares distintos al de su formación, teniendo como consecuencia que su tamaño de partícula sea más fino. Este tamaño fino provoca que su propiedad plástica aumente.

Su mineralogía resultante es de mayor impureza, debido también a su proceso de traslado, arrojando caolinita (30-80 %), illita y/o montmorillonita (0-40 %), cuarzo (0-50 %), materia orgánica (0-8 %) y escasos contenidos de feldspatos, mica, rutilo y limonita. Este tipo de arcilla presenta más contenido de sílice que los caolines, teniendo desde 50 % hasta 65 % de SiO₂ y del 20 al 35 % de Al₂O₃, con pequeños contenidos de alcalies, Fe₂O₃ o TiO₂.

➤ Arcillas refractarias

Están compuestas de caolinita con pequeñas cantidades de cuarzo, mica, anatasa, rutilo y óxido de hierro. Sus proporciones van desde el 40 hasta el 60 % de SiO₂,

del 25 al 40 % de Al_2O_3 , de 1 hasta 5 % de Fe_2O_3 , menos de 4 % de MgO o CaO y menos del 3 % de alcalies.

➤ Arcillas de alta alúmina

Son arcillas con contenidos de alúmina superiores al 39.6 % del total de la composición elemental y su mineralogía incluye hidratos de aluminio (gibbsite o bohemita). Su uso se da principalmente en la industria de refractarios y cerámicos avanzados.

➤ Arcillas de liga

Presentan buena plasticidad debido a su fino tamaño de partícula. Es común combinarlas con arcillas refractarias, proporcionando así uniones entre las partículas, dando como resultado cuerpos más resistentes y densos. Su composición es variable, sin embargo, en su mineralogía se presenta caolinita desordenada o normal, montmorillonita e illita, todas ellas de un tamaño fino de partícula.

➤ Arcillas montmorilloníticas

En este tipo de arcilla, la montmorillonita es el componente principal, su composición química está dada por un 50 % a 65 % de SiO_2 , de 10 hasta 25 % de Al_2O_3 , hasta 4 % de alcalies y 6 % de alcalinotérreos. Este tipo de arcilla se genera por alteraciones de condiciones alcalinas en rocas volcánicas y algunas montmorillonitas sódicas generadas por precipitación química de aguas marinas.

➤ Arcillas Halosíticas

El principal componente es la halloysita. Presenta una composición química similar a la del caolín, sin embargo, muestra más plasticidad, mayor contracción y una diferente cristalización.

➤ Atapulgita

Son arcillas, que como su nombre lo indica, están constituidas principalmente por atapulgita, también llamada paligorsquita. Muestran una textura fibrosa y son originadas por alteraciones de origen hidrotermal o sedimentario en piroxenas o anfíboles. Su análisis químico arroja una presencia de 50 hasta 65 % de SiO₂, de 7 hasta 15 % de Al₂O₃, de 5 hasta 15 % de MgO y muy poca presencia de FeO, Fe₂O₃ y CaO.

➤ Arcilla para ladrillos

Presentan impurezas, además de una mediana plasticidad. Presentan una composición y mineralogía variable. Usualmente no presentan el color blanco como el del caolín. Contienen hasta 5 % de alcalies, 12 % de alcalinotérreos y 8 % de FeO.

2.2 MINERALES ARCILLOSOS

2.2.1. Clasificación

La clasificación de minerales arcillosos está fundamentada en 3 principales criterios:

- El espesor de la unidad estructural.
- La composición química y el contenido iónico.
- Su orden y simetría.

Dichos criterios son el resultado de los procesos de alteración a los que fueron sometidos los tipos de arcilla. La unidad estructural está constituida por tetraedros de [SiO₄]⁻⁴ que, en un mismo plano, unen tres de sus vértices para formar hexágonos, y dejan el cuarto vértice apuntando en una misma dirección.

A esta capa se asocia otra formada por dos planos de OH⁻⁴ arriba y debajo de un plano de Al⁺³, con solamente 2/3 de las posibles posiciones ocupadas (capa dioctohédrica de gibbsita) o, en su lugar, una capa similar por Mg⁺² (trioctahédrica de brucita) con todas las posiciones satisfechas.

Las capas tetraédricas de Si y octaédricas de Al o Mg son fundamentales para los criterios, ya que su espesor, así como su composición química y simetría, rigen la clasificación de los minerales arcillosos.

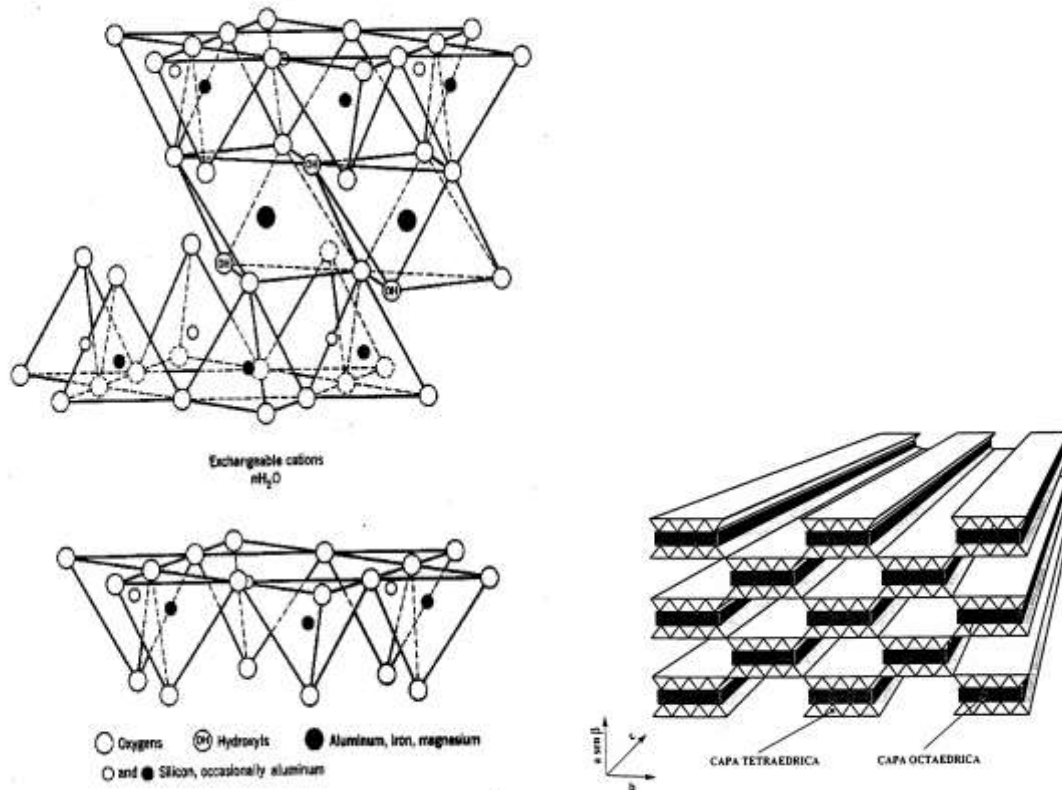


Figura 1.- Capa tetraédrica de $[\text{SiO}_4]^{-4}$ y octaédrica de gibbsita y su influencia en la forma laminar de las arcillas.

El estudio de las arcillas requiere, como primer paso fundamental, el conocimiento de los minerales arcillosos y de sus relaciones y características estructurales.

2.2.2. Efecto de la temperatura en los minerales arcillosos

Los minerales de la arcilla, al ser sometidos a un proceso de calentamiento, sufren una serie de transformaciones que van desde la deshidratación, hasta la aparición de una fase vítrea que constituye el fin del proceso. Desde que se produce la pérdida

de agua existente en la estructura, hasta la aparición de la fase vítrea, se desarrollan cambios intermedios tales como: deshidroxilación, la pérdida de la estructura cristalina y formación de nuevas fases cristalinas (Monteiro & Vieira, 2014). Todas estas alteraciones presentan un carácter estrictamente evolutivo. Ambos procesos, de amorfización el primero y de formación el segundo, traen consigo la aparición de un nuevo material con estructura de un sólido policristalino y una matriz amorfa y vítrea (Watchman Jr., 1967).

❖ Caolinita

Este mineral pierde su agua estructural a una temperatura de 500 °C, transformándose en metacaolinita mediante la deshidroxilación, volviéndose amorfo. Si el aumento térmico continúa hasta 1000 °C se produce una reacción exotérmica que da lugar a la formación de dos nuevas fases: alúmina y mullita (Souza, Teixeira, Santos, & Longo, 2013). La primera es producto de la destrucción de la capa con estructura de gibsita, mientras que la mullita, surge durante la transformación de metacaolinita. La metacaolinita sometida a una temperatura de 950 °C favorece la formación de una estructura de espinela con liberación de SiO₂, transformándose la espinela en mullita y la sílice en cristobalita. La presencia de potasio reduce su formación mientras que la de calcita, flúor y magnesio la favorecen; el sodio también reduce su formación, aunque en menor grado que el potasio. (Brindley G. W., 1959).

❖ Illita

El fenómeno de deshidroxilación se produce, en general, entre los 600 y 700 °C. Las illitas alumínico-férricas lo hacen entre 450 y 550 °C, mientras que las magnésico-ferrosas tienen un proceso más lento. Esta pérdida de agua no afecta a la estructura, manteniéndose la illita en su forma anhidra hasta los 850-1000 °C. Las fases que aparecen al destruirse la illita son espinela y mullita, que aparecen a partir de la formación de fase vítrea. La espinela aparece alrededor de los 1000 °C, estando en relación con el grado de cristalinidad de la illita. Así mismo, la mullita aparece a partir de los 1200 °C. Junto a estas fases aparecen también forsterita,

cuarzo, corindón y kalsilita. La gran cantidad de hierro y alcalinos que contienen las illitas favorece la formación de fase vítrea (Grim, 1957,).

❖ Clorita

Su comportamiento térmico presenta dos momentos de deshidroxilación, uno entre 400 y 650 °C realizado en las capas brucíticas, y otro, con temperaturas de 800-850 °C, que afecta a las capas con estructura de mica. Durante su amorfización permite la formación de olivino, que se presenta con una estructura orientada. Alrededor de los 1100 °C pueden aparecer espinela y enstatita. Las temperaturas estimadas para la formación de nuevas fases a partir de las cloritas son muy variadas, dependiendo sobre todo del grado de cristalinidad de las mismas y de su composición química (Brindley & Ali, 1950).

❖ Esmectitas-Montmorillonitas

Su deshidroxilación se produce entre los 500 y 700 °C, estableciéndose una distinción entre las montmorillonitas férrico-alumínicas y montmorillonitas magnésicas. Las primeras reaccionan a temperaturas bajas, mientras que las segundas necesitan altas temperaturas. Mantienen la estructura anhidra hasta los 800-900 °C, después de estas temperaturas se da su amorfización. Las fases cristalinas que se forman al ser sometidas a altas temperaturas están en función de su composición mineralógica y de la variedad estructural. Las transformaciones sufridas originan la formación de espinela, anortita, enstatita, cristobalita, cuarzo y cordierita. Estas fases persisten hasta los 1300 °C o más (Linares, Huertas, & Capel, 1983).

Tabla 1.- Comportamiento de los minerales arcillosos durante la cocción (Linares, Huertas, & Capel, 1983).

Comportamiento de algunos minerales arcillosos por efecto de la temperatura (°C)				
	Caolinita	Illita	Esméctita	Clorita
Perdida de H ₂ O absorbida	100-200	100-200	110-200	100-200
Deshidroxilación	400°-525	600-700	500-800	500-800
Destrucción de la red cristalina	550	850	850	850
Formación de Espinelas	950	900	1100	1200
Formación de Mulita	1000	1100	1000	No especificado
Formación de Enstatita	No especificado	No especificado	1000	1200
Formación de Cristobalita	1300	No especificado	900	No especificado

Como se mencionó anteriormente, al someter a los materiales a elevadas temperaturas se ha demostrado que altera la composición mineralógica del sólido. Algunos de los efectos más notorios son el cambio de color, en la mayoría de los casos se da un cambio de color marrón amarillento a marrón rojizo. La descomposición de las partículas del **suelo**, especialmente los minerales arcillosos, comienza a temperaturas superiores a los 550°C (Zihms, Switzer, Karstunen, & Tarantino, 2013).

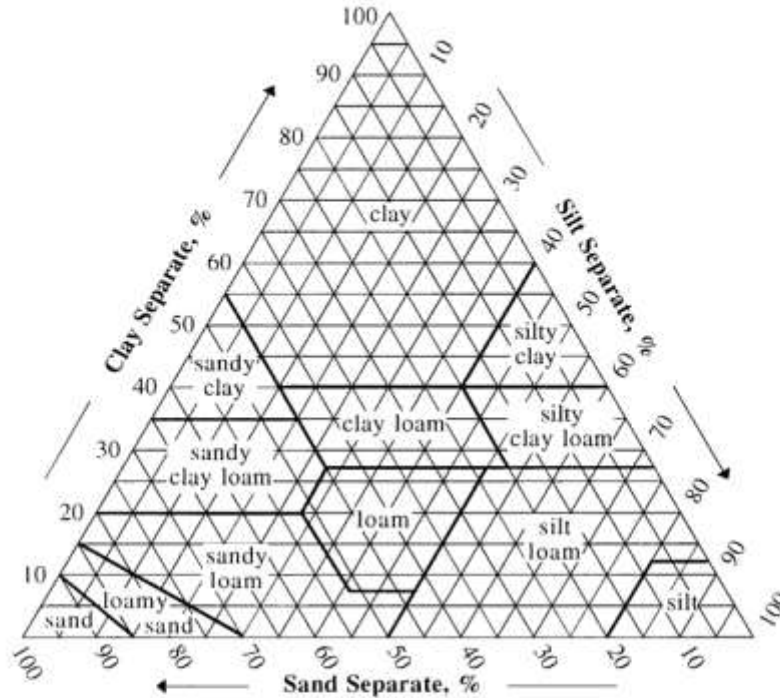
La influencia de la temperatura puede causar cambios adicionales en la mineralogía que pueden ser más difícil de detectar únicamente de manera visual (Goforth, 2005). Un ejemplo de esto es la transformación del dióxido de sílice (SiO₂), el cual al ser sometido a altas temperaturas tiene un comportamiento inestable, lo que genera la aparición de sus formas polimorfas, la tridimita y la cristobalita (Wenk, 2004).

Otro factor a tener en cuenta es la presencia de elementos como titanio o hierro; dichos elementos pueden facilitar la aparición de determinadas fases como limonita (FeO (OH)·nH₂O) o hematita (Wahl, 1965). De igual modo las fracciones gruesas de la mezcla, (arenas y/o **limos**), pueden tener una influencia importante en

determinados casos, al ser capaces de liberar elementos fundentes. La presencia de vapor de agua y CO₂ en el horno contribuye a facilitar la aparición de mullita a baja temperatura, mientras que la de CO la inhibe a alta temperatura (Linares, Huertas, & Capel, 1983).

En general, según los estudios experimentales estudiados, los minerales arcillosos tienen una temperatura de fusión entre los 1000 y 1500 °C. Correspondiendo las temperaturas de fusión más bajas a aquellos materiales ricos en hierro, alcalinos y alcalinotérreos. Las más altas están en relación con los minerales que carecen de estos elementos, ejemplo típico son las arcillas caoliníticas (Linares, Huertas, & Capel, 1983). El grado de vitrificación se encuentra, por tanto, modificado por la composición mineralógica y la distribución de tamaño de partícula existente. Las caolinitas presentan una alta distribución de tamaños, mientras que en las illitas y cloritas es menor. Así mismo, la presencia de calcio en la mezcla de preparación del cerámico provocará una reducción en el grado de vitrificación y un efecto brusco debido a la formación en buena manera de fase vítrea (Everhart, 1957).

El definir un concepto en específico para llamar a un material “arcilla” o “arena” es algo complicado ya que en un concepto establecido su pueden englobar muchos aspectos en los que encajarían ya sea la “arcilla” o la “arena”. Un ejemplo de esto es el tamaño de partícula del material. Teniendo en cuenta que la clasificación utilizada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) define el material con base en el tamaño de partícula del mismo, para definirlo en la categoría de arena, limo o arcilla. Sin embargo muchas veces en el trabajo de campo la materia prima empleada presenta mezclas de tamaños, por lo que definir categóricamente un material como arena (p. ej.) no sería correcto. Por otra parte la USDA también otorga una diagrama (ver Figura 2) dónde presenta una categorización con base en porcentajes presentes en la mezcla de diversos suelos.



COMPARISON OF PARTICLE SIZE SCALES

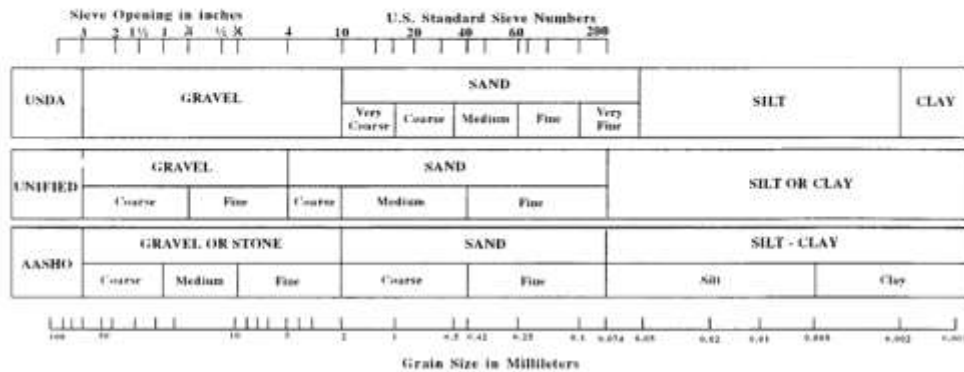


Figura 2.- "Calculadora" de textura del suelo (Natural Resources Conservation Service).

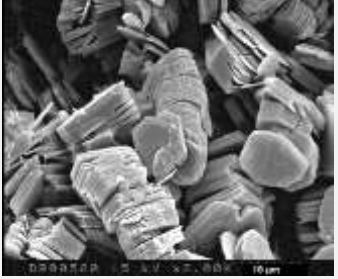
A pesar de que esta clasificación es de gran ayuda para definir un material y que con el rango de tamaño de partícula de la clasificación se puede empezar a definir características que tendría la mezcla, como por ejemplo la plasticidad, no incluye otros aspectos importantes como la composición elemental de los materiales. Cabe recordar que una arcilla químicamente está compuesta básicamente de aluminosilicatos hidratados, además de otros minerales como feldespatos, cuarzo y porcentajes de materia orgánica. Entonces, si se analiza el material que los productores llaman "arena o lama" se encontraría que también presenta en mayor

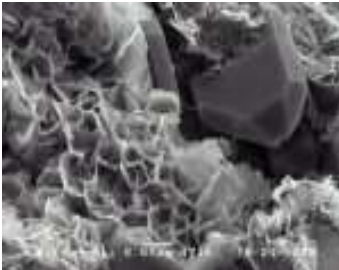
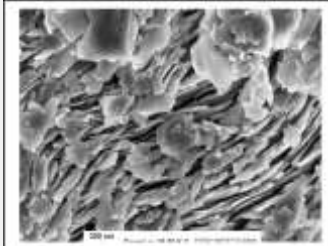

o menor medida porcentajes de estas fases, por lo que supone un error definir el material bajo un solo concepto.

Debido a los puntos anteriores expuestos, a partir de la muestra de resultados y su discusión, el material “arcilla” obtenido de la región de Romeros será identificado como el material **ROM1** y el material “arena” obtenido de la región de Santiago Tulantepec será identificado como el material **SANTUL1** para que el lector de esta investigación no tenga confusión en cuanto a los materiales empleados.

En la Tabla 2 se muestran algunas de las características más importantes para relacionar, conocer y entender de manera más óptima la naturaleza de los minerales arcillosos.

Tabla 2.- Principales características de los 5 grupos principales de minerales arcillosos ((Wilson, Wilson, & Patey, 2014), (www.sciencephoto.com/media/1003519/view/chlorite-sem)).

Tipo	Tipo de capa	Fórmula química aproximada	Sistema cristalino	Minerales derivados del grupo	Imagen de microscopía electrónica de barrido
Caolinita	1:1	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Triclínico-Pedial	Dickita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$	
				Caolinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$	
				Nacrita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$	
				Halloysita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$	
				Endellita $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2(H_2O)$	
				Odinita $(Fe, Mg, Al, Fe, Ti, Mn)_{2.5} (Si, Al)_2O_5(OH)_4$	
Illita	2:1	$K_{0.6}(H_3O)_{0.4}Al_{1.3}Mg_{0.3}Fe^{2+}_{0.1}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2 \cdot (H_2O)$	Monoclínico-Prismático	Hydrobiotita $[K (Mg, Fe)_3(Al, Fe) Si_3O_{10}(OH, F)_2] \cdot [(Mg, Fe, Al)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4(H_2O)]$	
				Illita $(K, H_3O) (Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$	
				Vermiculita $(Mg, Fe, Al)_3(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4(H_2O)$	
				Brammallita $(Na, H_3O) (Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$	

Esméctita o Montmorillonita	2:1	$\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$	Monoclí co Prismá tico	Beidellita $\text{Na}_{0.5}\text{Al}_2(\text{Si}_{3.5}\text{Al}_{0.5})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	
				Montmorillonita $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	
				Nontronita $\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	
				Volkonskoita $\text{Ca}_{0.3}(\text{Cr}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	
				Swinefordita $(\text{Li}, \text{Ca}_{0.5}, \text{Na})_{0.72}(\text{Li}, \text{Al}, \text{Mg})_{2.66}(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	
Vermiculi ta	2:1	$\text{Mg}_{1.8}\text{Fe}^{2+}_{0.9}\text{Al}_{4.3}\text{SiO}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	Monoclí co	Hidrobiotita $[\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2] \cdot [(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})]$	
				Vermiculita $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	
				Brammallita * $(\text{Na}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$	
Clorita	2:1: 1	$(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_6$	Monoclí co	Baileycloro $(\text{Zn}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al}, \text{Mg})_6(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	
				Chamosita $(\text{Fe}, \text{Mg})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	
				Clinocloro $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	

2.3. MINERALES NO ARCILLOSOS

Es común el uso de materias primas no plásticas utilizadas en la elaboración de productos cerámicos. La incorporación de estos minerales produce cambios en propiedades muy importantes como la plasticidad, y características como el tiempo de secado y la contracción del producto cerámico final. Algunos de estos minerales no plásticos pueden aumentar la resistencia del producto en verde (adobe) y algunas veces también la resistencia tras la cocción.

2.3.1. Efecto de la temperatura en los minerales no arcillosos

Cuarzo

Dentro de la matriz arcillosa, el cuarzo se comporta como material de relleno y refuerzo. Su influencia en las transformaciones mineralógicas está directamente relacionada con el tamaño de grano que presente. Los cuarzos de tamaño grueso contribuyen a disminuir la contracción de la pasta cerámica durante el proceso de secado. La fracción fina favorecerá la formación de fase amorfa, por ser de más fácil fusión, además de la aparición de nuevas fases mineralógicas, como pueden ser: diópsido, wollastonita, feldespato potásico, gehlenita y anortita (Linares, Huertas, & Capel, 1983).

La forma estable de la sílice en temperatura ambiente es el cuarzo α . Cuando es calentada a una temperatura alrededor de los 573 °C se presenta una transformación rápida y reversiblemente en cuarzo β , con un aumento de volumen del 1 % (Baldo & dos Santos, 2002). Si se presenta un calentamiento rápido, se genera una fusión por debajo de los 1460 °C, pero si el calentamiento es lento, en el cuarzo β se espera una transformación en cristobalita β a 870 °C, con un aumento de volumen del 14 %. Todos estos cambios pueden ser reversibles en condiciones adecuadas (enfriamiento lento y/o presencia/ausencia de otras sustancias), pero bajo condiciones de enfriamiento diferentes la sílice puede cristalizar en una de las formas de temperatura superior, como puede ser cristobalita, o tridimita. Por

enfriamiento, las formas de alta temperatura (tridimita y cristobalita) se transforman rápidamente en las formas de temperatura inferior a los 163 °C y a 220-275 °C respectivamente, contrayéndose la cristobalita en un 5 %. De modo tal que, introduciendo la materia prima en la forma de cuarzo, el producto después de la cocción puede ser cuarzo α , tridimita α , cristobalita β o sílice vítrea (Singer & Singer, 1979.).

El efecto que se ha visto en los cuerpos cerámicos (más específicamente en los ladrillos) sobre esta transformación del cuarzo α a cuarzo β y cristobalita β , es en la disminución de la resistencia mecánica. Esto debido a cambios en la microestructura del ladrillo por efecto de los cambios en volumen o contracción comentados en los puntos anteriores.

En la Figura número 3 se muestra de manera visual las transformaciones polimórficas del cuarzo y las temperaturas a las cuales se presentan. La línea continua indica la forma que es estable a la temperatura dada, y la línea discontinua las formas metaestables.

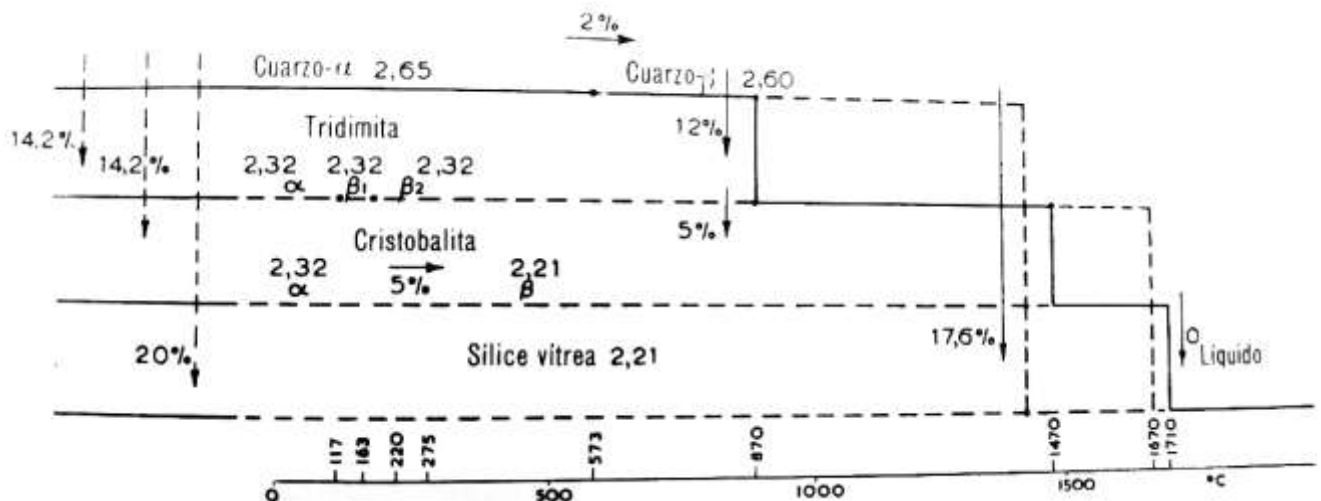


Figura 3.- Sílice, sus formas, temperaturas de inversión y porcentajes de expansión volumétrica (Singer & Singer, 1979.).

✚ Feldespatos

Los feldespatos son un grupo de minerales tecto y aluminosilicatos que corresponden en volumen aproximadamente al 60 % de la corteza terrestre (Feldspar. What is Feldspar? Industrial Minerals Association, 2007). La composición de feldespatos constituyentes de rocas corresponde a un sistema ternario compuesto de ortoclasa (KAlSi_3O_8), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), como se muestra en la Figura 4.

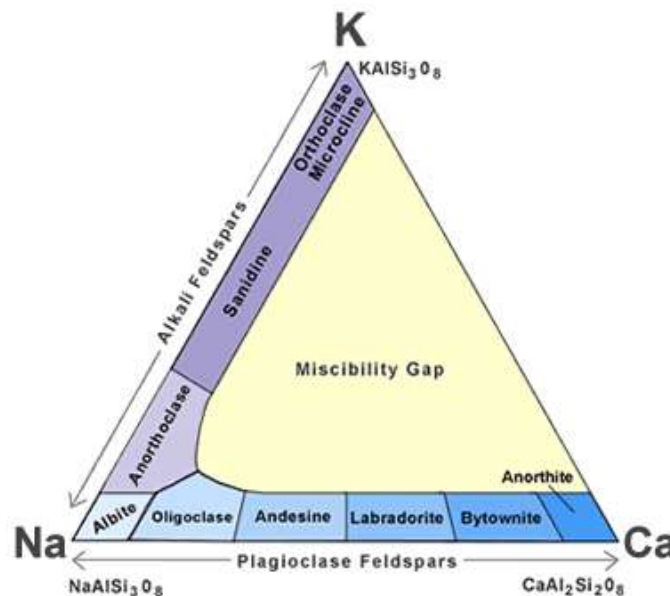


Figura 4.- Diagrama ternario para clasificar los minerales de feldespato en función de su composición química (<http://waterproofpaper.com>).

El diagrama ternario muestra cómo se clasifican los minerales de feldespato en función de su composición química. La secuencia de minerales a lo largo del lado izquierdo del diagrama representa la serie de soluciones sólidas de los feldespatos alcalinos, la secuencia a lo largo de la base es la serie de soluciones sólidas de los feldespatos plagioclasa y finalmente el lado derecho muestra la zona de miscibilidad.

Existen tres tipos principales de feldespato:

- Feldespato potásico (ortoclasa y microclina), $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
- Feldespato sódico (albita), $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
- Feldespato cálcico, mucho más pobre en sílice (anortita), $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$.

Los feldespatos, sobre todo los alcalinos, contribuyen a la formación de fase vítrea, desapareciendo a una temperatura de entre 1000 y 1100 °C. Por encima de estas temperaturas se forma anortita como consecuencia de la reacción producida al unirse óxido cálcico (procedente de la destrucción de la calcita) y aluminosilicatos (Cole & Segnit, 1963). Los iones alcalinos presentes en la estructura, además de favorecer la formación de fase vítrea, inhiben la aparición de fases de alta temperatura, no impidiendo la nucleación, pero sí el desarrollo de los cristales.

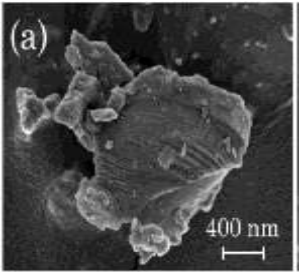
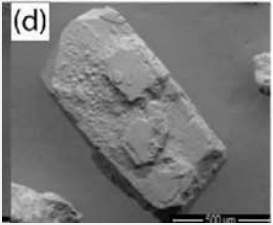
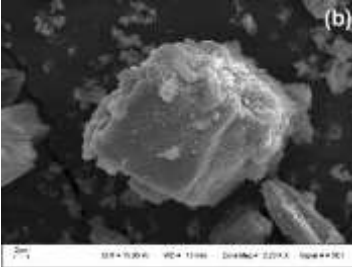
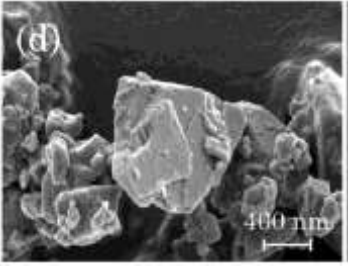
Los feldespatos son empleados como fundentes en la elaboración de productos cerámicos (principalmente productos sometidos a cocción). En la mezcla arcilla-feldespato-cuarzo, el feldespato se reblandece volviéndose vítreo, y dependiendo de la temperatura líquido. El feldespato fundido puede disolver una parte de los sólidos y reaccionar químicamente, con lo cual las fases diferentes del producto cocido resultante difieren muchas veces de las de las materias primas originales (Singer & Singer, 1979.).

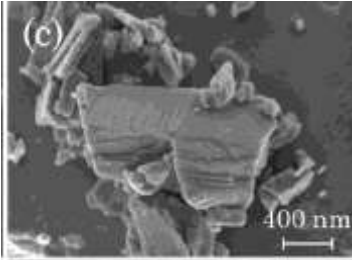
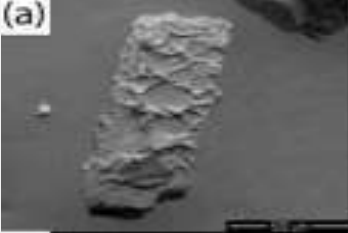
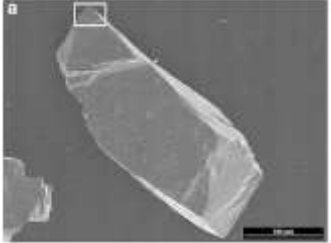
La pureza de los feldespatos y sus propiedades ejercen una influencia considerable en el producto final. Las propiedades y características generales de los feldespatos son mostradas en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3.- Propiedades físicas generales de los feldespatos
(<https://geology.com/minerals/feldspar.>).

PROPIEDADES FÍSICAS GENERALES DE LOS FELDESPATOS	
Clasificación Química	Tecto y Aluminosilicatos
Color	Usualmente blanco, rosado, gris o marrón. Y menos comunes como amarillo, naranja, rojo, azul, verde.
Diafanidad	Generalmente translúcido a opaco. Rara vez transparente.
Punto de fusión	1110 a 1532 °C.
Dureza Mohs	6 - 6.5
Gravedad Específica	2.5 g/cm ³ a 2.8 g/cm ³
Composición Química	Una composición química generalizada de X (Al, Si) ₄ O ₈ , donde X suele ser potasio, sodio o calcio, pero rara vez puede ser bario, rubidio o estroncio.
Sistemas cristalinos	Triclínico, monoclinico
Usos	El feldespato triturado y en polvo es una materia prima importante para la fabricación de vidrio para envases, productos cerámicos, pinturas, plásticos y muchos otros productos. Variedades de ortoclasa, labradorita, oligoclasa, microclina y otros minerales de feldespato se han cortado y se han utilizado como gemas talladas.

Tabla 4.- Características principales de los feldespatos (Hernández, Bastias, Matus, & Mahaney, 2018).

Tipo	Habito	Fórmula química aproximada	Sistema cristalino	Color	Imagen de microscopía electrónica de barrido
Ortoclase	Prismático: Cristales en forma de prisma delgado	$KAlSi_3O_8$	Monoclínico -Prismático	Incoloro, verdoso, amarillo grisáceo, blanco, rosa	
Albita	Granular: generalment e se presenta como cristales anédricos a subédricos en la matriz.	$NaAlSi_3O_8$	Triclínico	Blanco, gris, gris verdoso, verde azulado, gris.	
Anortita	Granular: generalment e se presenta como cristales anédricos a subédricos en la matriz.	$CaAl_2Si_2O_8$	Triclínico	Incoloro, gris, blanco, rojo, gris rojizo.	
Microclina	Prismático: Cristales en forma de prisma delgado	$KAlSi_3O_8$	Triclínico	Verde azulado, verde, gris, amarillo grisáceo, amarillento	

Sanidino	<i>Prismático: Cristales en forma de prisma delgado</i>	(K, Na) (Si, Al) $4O_8$	<i>Monoclínico</i>	<i>Incoloro, blanco, gris, blanco amarillento, blanco rojizo.</i>	
Anortoclasa	<i>Granular: Cristales anédricos a subédricos en matriz</i>	(Na, K) $AlSi_3O_8$	<i>Triclínico</i>	<i>Incoloro, verde, gris, gris rosado, amarillo</i>	
Oligoclasa	<i>Granular: Cristales anédricos a subédricos en matriz.</i>	(Na, Ca) (Si, Al) $4O_8$	<i>Triclínico</i>	<i>Marrón, Incoloro, Verdoso, Gris, Amarillento</i>	

🌈 Inosilicatos y Nesosilicatos

Los inosilicatos constituyen alrededor del 16 % del peso de la corteza terrestre y se caracterizan porque en ellos los tetraedros de silicio (SiO_4) se enlazan formando cadenas al compartir oxígenos con los tetraedros adyacentes. Los Nesosilicatos son un grupo de silicatos que presentan una estructura formada por tetraedros de Si^4 enlazados entre sí por enlaces iónicos unidos, a su vez por cationes intersticiales.

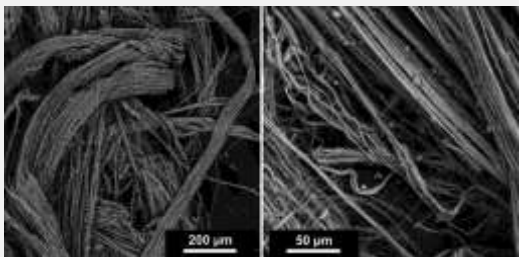

El asbesto es un nombre general que se aplica a un grupo de minerales de silicato que ocurren naturalmente en forma fibrosa. Hay seis minerales principales de asbesto que se dividen en dos grupos principales: serpentina y anfíboles (donde destaca la magnesioriebeckita). Los minerales de asbesto son silicatos hidratados de origen natural, por lo que se descomponen para liberar agua al calentarse a altas

temperaturas, esto provoca cambios en la estructura cristalina y la formación de nuevas fases.

Similar a los minerales de arcilla, la descomposición térmica de los minerales de asbesto generalmente se lleva a cabo de acuerdo con tres etapas. El primero está asociado con la pérdida de agua adsorbida. La siguiente etapa está relacionada con la eliminación de grupos OH estructurales de la estructura de los minerales de asbesto. La última etapa, que es responsable de la cristalización de los materiales amorfos y el crecimiento de las nuevas fases, ocurre después de la deshidroxilación (Kusiorowski, Zaremba, Piotrowski, & Adamek, 2012).

Los minerales de asbesto son flexibles, resistentes al calor y químicamente inertes. Estos minerales generalmente ocurren con un hábito alargado, prismático, acicular o fibroso, que se puede separar fácilmente en fibras delgadas (Laurita & Rizzo, 2019).

Tabla 5.- Algunas características de los inosilicatos y los nesosilicatos ((Della Ventura, Redhammer, Iezzi, Hawthorne, & Papin., 2005) (https://www.ugr.es/~velilla/imagenes/Atlas_Nesosilicatos/chloritoid.JPG)).

Nombre	Clase de Silicato-	Sistema Cristalino y Habito	Imagen de microscopio
Magnesioriebeckita	Inosilicatos> Anfiboles	Monoclínico; Acicular: aparece como cristales en forma de aguja.	
Magnesiocloritoide	Nesosilicatos	Monoclínico; (no especificado)	

✚ Carbonatos

Los carbonatos que aparecen asociados a los minerales arcillosos son calcita, dolomita y magnesita fundamentalmente (Galán-Arboledas, Cotes-Palomino, Bueno, & Martínez-García, 2017). Las temperaturas de descomposición dependen de su composición química, así, la magnesita (carbonato magnésico) se destruye a partir de los 650 °C, la dolomita (carbonato cálcico-magnésico) a partir de los 850 °C y la calcita (carbonato cálcico) a partir de los 950 °C.

El CaO y MgO, producidos durante la destrucción de los carbonatos, reaccionan con los filosilicatos o el cuarzo para formar minerales de alta temperatura, tales como gehlenita, diópsido, wollastonita, anortita, etc. La formación de estas fases se produce cuando el tamaño de partícula de los carbonatos es pequeño (Kostov, 1968.).

✚ Micas

Las transformaciones que puede sufrir la mica están muy determinadas por su tamaño de partícula. La existencia de fracciones gruesas impide la formación de fases cristalinas, al tiempo que favorecen la formación de fase vítrea a una temperatura que está en relación inversa a la cantidad de hierro contenida.

Además de la fase vítrea aparecen otras fases como pueden ser mullita, alúmina, espinela y leucita. El proceso de deshidroxilación de las micas tiene lugar entre los 820 y 1200 °C. Sus reflexiones en difracción de Rayos X son claramente visibles hasta los 950 °C, quedando picos residuales hasta los 1000-1050 °C (Sundius & Bystrom, 1953).

Se tienen diferentes clases de micas, siendo de las más importantes:

- Moscovita

Este tipo de mica se encuentra en peñascos ígneos o metamórficos, bien sea **gneis** o **esquistos**. También se le conoce como mica blanca o potásica. Tiene un contenido de potasio y aluminio elevado, destaca por su tonalidad entre amarillo,

plomizo, verde o carmín claro. Muestra una alta propiedad eléctrica, firmeza mecánica, dureza, flexibilidad y elasticidad.

- Lepidolita

Se identifica por no disolverse en ácidos, por su desgaste micáceo y un magnífico color que varía entre lila y rosa. Análogo a la moscovita, para reconocerla es necesario realizar un **ensayo de llama**. Por efecto del litio y aluminio que posee, la lepidolita crea una llama en tono rojo. Exhibe un brillo perlado y nítido.

- Biotita

Formado de potasio, aluminio, hierro y magnesio. Su color oscila entre verde oscuro, plomizo y negro, y en ocasiones puede presentarse en un tono amarillo opaco.

2.4. RESIDUOS INDUSTRIALES Y URBANOS COMO ADITIVOS EN LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS.

Los ladrillos pueden tolerar la presencia de diferentes tipos de materiales de desecho, incluso en porcentajes altos. La incorporación de tales desechos en los cuerpos de ladrillo siempre implica al menos dos ventajas ambientales: el reciclaje de los desechos, que a menudo son contaminantes y difíciles de eliminar, y el ahorro en materias primas de arcilla. Además, la adición de desechos industriales y urbanos a las materias primas de ladrillo a menudo tiene efectos positivos en las propiedades de los artículos semiacabados y los productos, incluso si reduce el rendimiento en varios casos.

Los aditivos se dividen en cuatro categorías principales en función de su efecto principal: desechos de combustible, cenizas volantes, aditivos fundentes y aditivos de plastificación y reducción de la plasticidad (Dondi, Marsigli, & Fabbri, 1997).

- Desechos de combustible

Se tratan de aditivos que actúan como portadores de energía en la fase de cocción de ladrillos, como resultado de la combustión de los altos porcentajes de sustancias orgánicas y / o carbonosas contenidas en dichos desechos. Esta categoría incluye los residuos de las plantas que tratan los desechos urbanos, los desechos de procesamiento de carbón, los desechos de la industria textil y de curtido, así como los desechos de los procesos de petróleo, papel y madera.

Uno de estos aditivos es el aserrín. El aserrín es el conjunto de partículas que se desprende de la madera cuando ésta es aserrada. La función principal del aserrín es la creación de poros en el producto final, esto debido a que al tener compuestos orgánicos y someterlos a una temperatura mayor a los 500° C se producirá la combustión del aserrín y produciendo los poros deseados (Serret Guasch & Giralt Ortega, 2013). Primero el aserrín se convierte en carbono, y a temperaturas mayores a 800 °C se transforma en gas CO₂ (Böhler, Görtler, Krail, & Kozek, 2019).

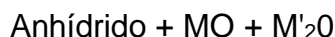
- Cenizas volantes

El uso del carbón como combustible en las centrales térmicas genera residuos sólidos inertes llamados "cenizas" que también contienen pequeñas cantidades de partículas carbonosas no quemadas. La distribución del tamaño de partícula de la ceniza volante varía generalmente de 5 a 200 µm, como consecuencia, el uso de la ceniza volante generalmente no requiere molienda.

- Aditivos fundentes

Estos desechos tienen básicamente una composición de sílice-alúmina (sílice + alúmina > 50% en masa) para la cual hay un contenido extremadamente variable de metales pesados y elementos alcalinos y alcalinotérreos. Las adiciones de residuos "fundentes" tienen efectos positivos en los cuerpos. Para productos cocidos hay un aumento de las propiedades mecánicas. Además, hay una ligera disminución en la absorción de agua con un aumento en el contenido de aditivos. Algunos de estos aditivos son el vidrio y la pumicita. El vidrio comercial puede llegar a contener en su

composición química una mezcla de hasta 12 elementos diferentes, sin embargo, lo más común es que contenga de 4 a 6. La constitución química de los vidrios puede representarse por la siguiente fórmula general:



El anhídrido es el SiO_2 , los metales monovalentes (M') son generalmente el Na y K, y los divalentes (M) Ca, Ba, Mg, Pb, Zn, Cu o Zr.

El vidrio no puede expresarse correctamente por medio de fórmulas, por variar sus componentes entre límites más o menos amplios, el vidrio ordinario puede responder a una fórmula aproximada: $2.5\text{SiO}_2 \cdot 0.5\text{CaO} \cdot 5\text{Na}_2\text{O}$. En la Tabla 7 se muestran algunas propiedades generales de los vidrios.

Tabla 6.- Algunas propiedades de los vidrios.

Densidad (kg/m^3)	2480
Módulo Young (GPa)	74
Resistencia a compresión (MPa)	1000
Módulo de ruptura (MPa)	50
Resistencia a fractura ($\text{MPa/m}^{3/2}$)	0.7
Temperatura de fusión (K)	1000
Conductividad térmica (W/mK)	1
Coefficiente de expansión térmica (MK^{-1})	8.5

Por su parte la pumicita es una materia prima mineral de origen volcánico, en cuya composición intervienen mayoritariamente la sílice y la alúmina, con porcentajes aproximados del orden de: 70 % de SiO_2 y 13 % de Al_2O_3 (Gencel, 2015). Este tipo de mineral es una roca con alta porosidad, ligera (densidades entre 0.4 a 0.9 g/cm^3), **friable**, eficaz aislante térmico y con propiedades puzolánicas.

- Aditivos de plastificación y reducción de la plasticidad

Durante el proceso de trabajo con arcilla, los materiales de desecho de las industrias minera y metalúrgica pueden tener un efecto reductor en la plasticidad o caso

contrario, aumentarla. En cualquier caso, es difícil hacer una distinción clara, ya que uno de los dos efectos a menudo ocurre en relación con la distribución del tamaño de grano de los desechos y/o las características de la arcilla. Cuando los aditivos tienen una distribución de tamaño de grano grueso, algunos de estos materiales se utilizan para atenuar la plasticidad. Caso contrario, cuando presentan una distribución de tamaño fino la plasticidad se incrementa.

2.5. MOLIENDA, TAMAÑO DE PARTÍCULA Y REACTIVIDAD

La molienda de polvos es utilizada para el refinamiento del tamaño de partícula de materiales cerámicos y metálicos, existen diferentes técnicas para el procesamiento de polvos entre los cuales están el cribado, calcinación, elutriación, horno rotatorio, clasificación por aire, síntesis por combustión, molienda de bolas, molienda de desgaste, molienda vibratoria, molienda de turbina, molienda de energía fluida, molienda de martillos y trituración por rodillos, principalmente (Richerson, 2018).

Un esquema del proceso de molienda se muestra en la figura 5. La molienda consiste en someter polvos a un golpeteo continuo entre bolas de acero y la pared del molino durante un movimiento circular del mismo. A una velocidad de giro adecuada, las bolas en el interior del molino alcanzarán un movimiento de cascada, que es el adecuado para una molienda correcta. Los polvos llegan a deformarse plásticamente (solo para el caso de polvos metálicos), a fracturarse y a soldarse en frío. Al final de la molienda, se producirá un refinamiento en el tamaño de partícula, solo si se logran condiciones adecuadas de procesamiento (Guerrero Sauce 2019).

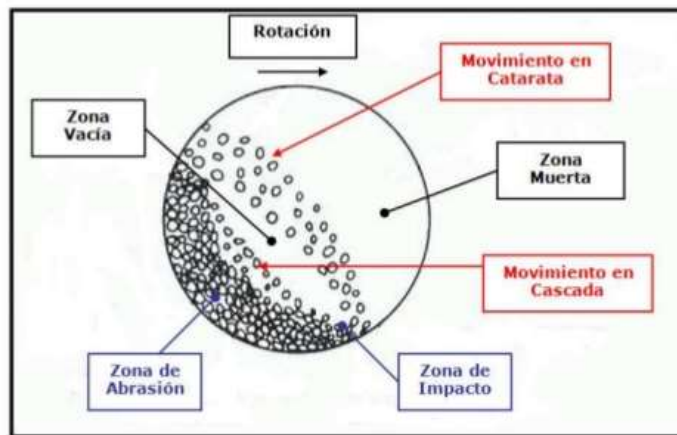


Figura 5.- Movimiento de la carga en un molino de bolas horizontal.

La distribución del tamaño de partícula tiene un papel muy importante en la compactación de polvos cerámicos, dependiendo de qué técnica de consolidación o conformación sea utilizada. En la mayoría de los casos el objetivo es lograr el máximo empaquetamiento de partículas logrando una uniformidad idónea, obteniendo así una contracción mínima y una porosidad cerrada durante la densificación (Richerson, 2018).

Un solo tamaño de partícula no produce un buen empaquetamiento, por ejemplo, un empaquetamiento mediante partículas todas del mismo tamaño resulta en más del 30 % de espacio vacío (porosidad o volumen de poro), sin embargo, añadiendo partículas de un tamaño equivalente a los espacios entre las partículas grandes, se puede reducir el espacio vacío al 26 %, agregar además un tercer tamaño de partícula, aún más pequeño, puede reducir el volumen de poro al 23 %, por lo tanto, para lograr el máximo empaquetamiento de partículas, un rango de tamaños de partículas es fundamental.

Otro aspecto importante de nuestros polvos de partida es la reactividad. La fuerza motriz primaria para la densificación de un polvo compactado a alta temperatura es el cambio en la energía libre de superficie (Rahaman, 2013). Partículas finas poseen una alta área superficial, por lo cual presentan una alta energía libre de superficie y,

por lo tanto, una fuerza impulsora termodinámica grande. Partículas muy pequeñas, aproximadamente $1\ \mu\text{m}$ o menos (tamaño para considerar que un polvo es reactivo), se pueden compactar en una forma porosa y sinterizar a una temperatura alta para lograr una densidad cercana a la teórica.

2.6. SINTERIZACIÓN

La densificación de un cuerpo cerámico se conoce técnicamente como sinterización. La sinterización es esencialmente una eliminación de los poros presentes entre las partículas de los materiales iniciales, acompañado por una contracción del componente, combinado además con un crecimiento de grano y una unión fuerte entre las partículas adyacentes (Richerson, 2018). Se deben cumplir las siguientes condiciones para generar la sinterización de la pieza cerámica:

1. Debe estar presente un mecanismo de transporte de material.
2. Debe estar presente una fuente de energía para actuar y mantener este transporte de material.

Los principales mecanismos de transporte son la difusión y el flujo viscoso. El calor es la fuente primaria de energía, en conjunción con gradientes de energía debido al contacto partícula-partícula y la tensión superficial (Richerson, 2018) (Rahaman, 2013).

La sinterización suele darse en etapas de acuerdo a la secuencia en la que los cambios físicos se producen en la pieza cuando las partículas se unen y la porosidad desaparece, se tiene por lo tanto 3 etapas principalmente, las cuales son:

1. La fase inicial.

Se da el reordenamiento de las partículas y la formación inicial de “cuellos” en el punto de contacto entre partículas. La adhesión se produce en los puntos de contacto donde el transporte de material puede ocurrir y donde la energía superficial es más alta (ver fig. 6).

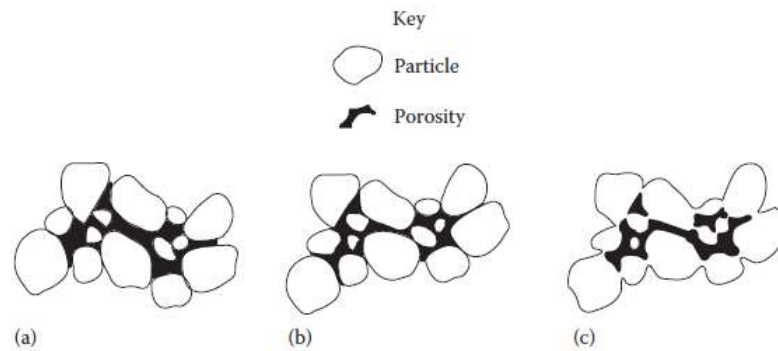


Figura 6.- Cambios que se producen durante la etapa inicial de sinterización. (a) partículas de partida, (b) reorganización, y (c) formación de cuello. (Cortesía de ASTM International, Materials Park, OH.) (Richerson, 2018).

2. La segunda etapa, denominada sinterización intermedia.

La porosidad disminuye en gran porcentaje y los centros de las partículas originales se acercan entre sí, dando como resultado una contracción equivalente al porcentaje de disminución de la porosidad. Los límites de grano comienzan a moverse de modo que una partícula (ahora grano) comienza a crecer, mientras que el grano adyacente es consumido (ver fig. 7). El sinterizado intermedio continúa mientras los canales de poro estén interconectados y termina cuando los poros se aíslan.

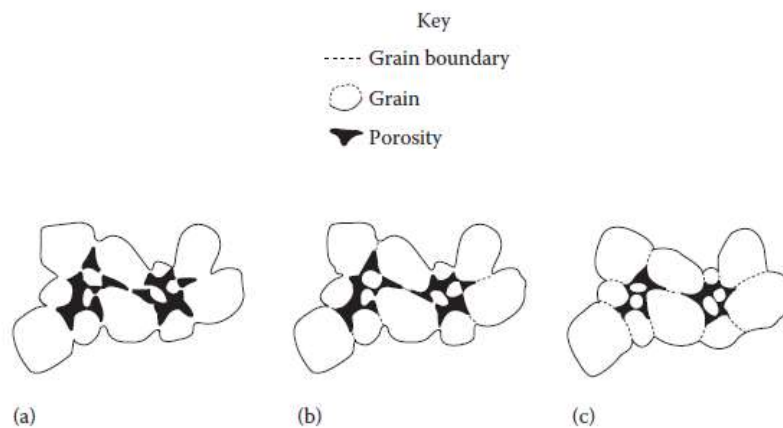


Figura 7.- Cambios que se producen durante la segunda etapa de sinterización. (Cortesía de ASTM International, Materials Park, OH.) (Richerson, 2018).

3. La tercera etapa, denominada sinterización final.

En esta se da la eliminación final de la porosidad (logrando una densidad muy cercana a la teórica). Dicha eliminación se genera por difusión de las vacancias a lo largo de los límites del grano, por lo tanto, los poros deben permanecer cerrados en los límites de grano (ver fig. 8).

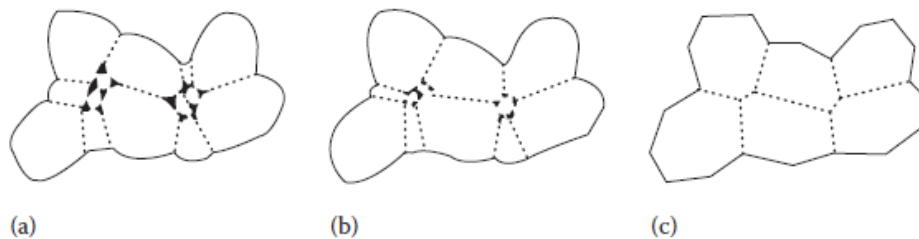


Figura 8.- Cambios que se producen durante la etapa final de sinterización. (a) Crecimiento de grano con fase de poro discontinuo, (b) crecimiento de grano con reducción de la porosidad, y (c) crecimiento de grano con eliminación de la porosidad. (Cortesía de ASTM International, Materials Park, OH.) (Richerson, 2018).

La remoción de poros y la difusión de vacancias son promovidas por el movimiento de los límites de grano y el crecimiento de grano controlado. Sin embargo, si el crecimiento del grano es demasiado rápido, los límites del grano pueden moverse más rápidamente que los poros y dejarlos aislados dentro de un grano. Los granos más pequeños tienen un radio de curvatura más pequeño y más energía motriz para moverse, cambiar de forma e incluso ser consumidos por granos más grandes (Rahaman, 2013).

Cualquiera de los mecanismos antes citados, que se desarrollan durante un proceso a alta temperatura, aumenta el número de enlaces o, lo que es lo mismo, las fuerzas de unión; así se produce la sinterización, sin la afluencia de fase líquida alguna. A pesar de todo, las reacciones puramente en estado sólido son raras cuando se trata con productos naturales, y lo normal es que si se verifica una determinación cuidadosa se encuentren trazas de fases líquidas (Gippini, 1966).

3. ANTECEDENTES

La elaboración de ladrillos en México aún es llevada a cabo principalmente por métodos artesanales. Proyectos como el de la instalación del primer horno ecológico para la elaboración de ladrillos en Hidalgo, así como análisis de las influencias de la mineralogía locales (Guerrero Paz, y otros, 2017) han permitido un avance en la comprensión de la importancia que tiene generar productos con propiedades físicas y mecánicas que cumplan con normas internacionales. De trabajos originados del proyecto de Guerrero Paz y colaboradores demostraron que ladrillos elaborados en diversas ladrilleras del país no cumplen con los valores de resistencia establecidos en normas nacionales. Como resultado de esto se llevaron a cabo proyectos de

investigación con la finalidad de generar alternativas de solución al problema de resistencia evaluando la temperatura de sinterización (Ordoñez, 2018) y la reutilización de materiales de desecho (Maza, 2016) para reducir además el impacto ambiental generado en su elaboración.

Ordoñez (2018) desarrolló un proyecto enfocado a la obtención de un cerámico tradicional de la región de Actopan para su aplicación en la industria de la construcción, basándose principalmente en la evaluación de la temperatura de sinterización. Trabajó con dos tipos de materia prima de dicha región. Estableció que el uso de aditivos como ayuda para la sinterización (materia prima molida) en materia prima con altos contenidos de silicatos ayudó a la sinterización a baja temperatura, obteniendo mejores propiedades mecánicas en el ladrillo, incrementando su resistencia a la compresión de 12 a 17 MPa; mientras que en materia prima con bajos contenidos de silicatos fue mejor agregar un aditivo fundente como el carbonato de bario (BaCO_3), incrementando la resistencia a la compresión del ladrillo de 8 a 20 MPa.

Maza (2018) por su parte, trabajó con 3 principales aditivos que además de mejorar las propiedades físicas y mecánicas del ladrillo, se obtuvo una opción para la disposición adecuada de los aditivos y reducir el impacto ambiental que estos generan. Realizó mezclas con distintos porcentajes de los aditivos, siendo la mezcla de 70 % arcilla, 20 % ceniza de bagazo de caña y 10 % de humo de sílice, con una temperatura de sinterización de 1000 °C, la que mostró los mejores resultados en cuanto a la resistencia a la compresión del ladrillo, incrementando su resistencia de 18 a 21 MPa, y logrando una menor densidad aparente (19.76 % más ligero).

En otro estudio realizado en México por Ponce Peña y colaboradores (2016), analizaron el efecto en las propiedades mecánicas de los ladrillos con la adición de vidrio con diferentes tamaños: 0.2 mm, 0.3 mm y 0.5 mm a la mezcla de elaboración. Concluyeron que al añadir 30 % peso de la molienda de desperdicio de vidrio a la mezcla de elaboración de ladrillos se mejoran sus propiedades tales como como la absorción de agua (una reducción del 15 %) y la resistencia mecánica del ladrillo (incrementando de 2 a 7 MPa).

En cuanto a más investigaciones de este tipo a nivel mundial, Phonphuak (Phonphuak & Kanyakam, 2016) en su investigación incorporó porcentajes de vidrio (0.5 % hasta 10 % peso) en la mezcla de elaboración de ladrillo, utilizando además tres temperaturas de sinterización: 900°, 950° y 1000 °C. Dichas variables mostraron como resultado que, con la combinación de 10 % peso de vidrio y una temperatura de horneado de 1000 °C, se generó un aumento del 20 % en la resistencia a la compresión del ladrillo, además, por medio de microscopia electrónica de barrido observaron una reducción de porosidad.

Similar al estudio de Phonphuak y Kanyakam es el estudio realizado por Chidiac (Chidiac & Federico, 2017). En su investigación utilizaron una combinación de desperdicio de vidrio y polvo de **shale**; empleando un tamaño de partícula en el vidrio reciclado por debajo de los 300 micrómetros. Las proporciones de las mezclas fueron propuestas desde 15-85 % hasta 95-5 %, donde siempre el shale tenía el mayor porcentaje. Una vez realizadas las distintas pruebas de caracterización y pruebas físico-mecánicas, observaron un incremento en dichas propiedades (una mejora del 21 % en la resistencia mecánica), debida principalmente al tamaño de partícula del vidrio incorporado.

Diversos estudios alrededor del mundo buscan encontrar un uso de materiales reciclables o de desperdicio, incorporándolos principalmente en materiales de la construcción. Un trabajo presentado por Ukwatta (Ukwata & Mohajerani, 2017) incorporó biosólidos producto del proceso de tratamiento de aguas residuales, analizando los rangos de sinterización de los ladrillos, dando como resultado una reducción en la densidad del ladrillo en un 15 %, manteniendo un valor muy similar en la resistencia mecánica con respecto al blanco.

Un estudio realizado por Eliche-Quezada en España (Eliche-Quezada & Lopez-Perez, 2016), analizó la viabilidad del uso de biomásas (utilizando un 10 % peso de ceniza de arroz y un 20 % peso de ceniza de madera) como un segundo material en la manufactura de ladrillos, incorporándolo en distintos porcentajes. Los resultados mostraron una disminución máxima de resistencia a la compresión de 73 %, con una temperatura de sinterización de 1000 °C.

La incorporación de pumicita en las propiedades del ladrillo fue analizada por Karaman (Karaman, Gunal, & Ersahin, 2008); en su investigación incorporó de manera gradual la pumicita (de 10 hasta 90 %, con aumentos del 10%), dando como resultado una disminución en las propiedades mecánicas del ladrillo (reducción máxima de la resistencia a la compresión del 66 %), y en la densidad del mismo (reducción máxima del 28 %). Por su parte, Gencil (Gencil, 2015) preparó mezclas que contenían pumicita en diferentes proporciones (0 hasta 40 % en peso), sinterizando el ladrillo a temperaturas de 900 y 1000 °C respectivamente. Los resultados mostraron que el uso de este aditivo contribuía a la disminución de la densidad del ladrillo del 12 %, además de que la conductividad térmica se redujo en un 30 % en comparación con el ladrillo de referencia.

Trabajos como el de Niroumand (Niroumand, Zainb, & Alhosseinic, 2013) analizaron la incorporación de material reactivo en la mezcla. Para obtener el material reactivo sometieron a molienda la misma materia prima. Como resultado de su incorporación obtuvieron un aumento del 480 % en la resistencia mecánica del adobe.

Cabe señalar que únicamente los trabajos presentados por Niroumand y Maza trabajaron de manera indirecta (no fue su objetivo principal) con material reactivo y se observa su influencia en el mejoramiento de la resistencia mecánica; por ello la importancia de implementar el término “**material reactivo**” en la presente investigación y su influencia marcada en las propiedades mecánicas. Por lo tanto, a pesar de que aditivos como la pumicita o biosólidos disminuyeron la resistencia mecánica del ladrillo, el darle el tratamiento de molienda y así obtener material reactivo, o en su caso trabajar con tamaños finos de partícula (aserrín) provocaría que los aditivos mejoren la resistencia mecánica del ladrillo.

La siguiente Tabla resume algunos de los antecedentes más relacionados con la presente investigación, comparando los valores más importantes como la resistencia a la compresión, la temperatura de sinterización, los valores de densidad, tamaños de partícula (TP) y porosidades.

Tabla 7.- Resumen de antecedentes estudiados con las principales características de los ladrillos a manera de comparación.

Aditivo	Cantidad (% peso)	TP (µm)	Temp. Sint. (°C)	Resistencia a la Compresión (MPa)		Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)		Referencias
				Blanco	Con Aditivo		Blanco	Con Aditivo	
Ayuda p/sinterización (Arcilla molida)	5	0.1		1.49	12.07				Niroumand (2013)
Vidrio	20-30	500-212	1000	1.8	6.8				Ponce Peña (2016)
	10	>100	1000	16	24.65	1.70 - 1.76	34	32	Phonphuak (2015)
Pumicita	10-40		900	31	18	1.58 - 1.77	31	39	Gencel (2015)
Biosolidos	5-25	75>	1050	28	29.5	1.83			Ukwatta (2017)
Ceniza de madera	10-30	<100	1000	52	54.5	1.39 - 1.87	30	35	Quesada (2016)
Papel	5-20	<2000	900 - 1000	25	22	1.31- 1.72	21	23	Kizinievic (2017)
Humo de sílice (HS) y ceniza de bagazo de caña (CBC)	20-40	HS <1 CBC< 10	1000	17	21	1.6	34	37	Maza (2017)

4. JUSTIFICACIÓN

El obtener un producto ligero y resistente como el que se pretende en esta investigación, es uno de los objetivos principales del estudio de materiales. Lograr además esto en un material de construcción presenta un gran reto.

El estudio y análisis de las propiedades finales del ladrillo, al incorporar diversos aditivos, así como relacionar las mismas con la microestructura resultante después de la sinterización, involucrando además las características físico-químicas de los aditivos y las materias primas de origen, permiten una mejor comprensión y conocimiento de todos los procesos involucrados durante la elaboración de estos productos cerámicos.

El establecer condiciones en las cuales ciertos aditivos son más eficaces con las características iniciales de la materia prima y generar nuevos productos desarrollados a partir de diversas necesidades (como por ejemplo la reducción del impacto ambiental), ha dado como resultado productos compuestos que, además de incorporar materiales reciclables, mejoran sus propiedades tanto físicas como mecánicas.

En cuanto a los aditivos que se han seleccionado en este proyecto, el aserrín tiene como objetivo la generación de porosidad y la disminución de la densidad, mientras que el vidrio y la pumicita tienen como objetivo el aumento en la resistencia mecánica, estos recibirán un tratamiento de molienda, con la finalidad de superar efectos negativos vistos en las referencias. Además, estos materiales son económicos y fáciles de conseguir por lo que no representaría un problema de disponibilidad y costo.

Según el censo de población y vivienda INEGI 2010, en México el 86.3 % de las viviendas están construidas con materiales recomendados para su uso en muros, tales como el tabique, ladrillo, block, piedra, cemento o concreto, y a las viviendas construidas con materiales no adecuados se les suman las casas deterioradas que necesitan reparación. Aunado a esto se tiene el problema de la falta de

conocimiento por parte de los productores de técnicas para mejorar la calidad del ladrillo en México, por ejemplo, destaca el desconocimiento en algunos productores del tipo, características y cantidades de materia prima óptimos para la producción.

El obtener un ladrillo ligero y resistente tiene un campo de aplicación muy amplio debido a las distintas ventajas que representa. La sustitución de “arcilla” por residuos ha contribuido a disminuir la densidad de los ladrillos, lo que representa una gran ventaja cuando se utilizan para la construcción de estructuras frecuentemente afectadas por terremotos (Maza-Ignacio, Jiménez-Quero, Guerrero-Paz, & Montes-García, 2019). En el campo de la arquitectura, actualmente los arquitectos requieren este tipo de materiales, debido a los nuevos diseños empleados en edificaciones.

Es por ello que investigaciones como la que se presenta a continuación, permiten contribuir a mejorar la calidad y el desarrollo de nuevos productos de ladrillo, con la implementación de aditivos que le otorgue características que le permitan competir a nivel mundial con los nuevos productos generados en la industria de la construcción, fomentando además un desarrollo científico y tecnológico en el país.

5. OBJETIVOS

5.1. *Objetivo general*

Obtener un ladrillo de alta resistencia mecánica y baja densidad mediante la incorporación de mezclas de aditivos con alta reactividad utilizando materia prima de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec, Hidalgo.

5.2. *Objetivos específicos*

- Conocer el efecto de la temperatura de sinterización en las propiedades mecánicas y físicas de ladrillos elaborados con aserrín y materia prima de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec, Hidalgo.

- Evaluar los efectos de la incorporación de aserrín-vidrio reactivo y aserrín-pumicita reactiva en las propiedades mecánicas y físicas de ladrillos elaborados con materia prima de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec, Hidalgo.

- Evaluar los efectos de la incorporación de aserrín y aserrín-vidrio reactivo en las propiedades mecánicas y físicas de ladrillos elaborados con materias primas con distinta mineralogía a la identificada en la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec, Hidalgo.

6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1. MATERIALES

6.1.1. *Materia prima*

La “arcilla” (ROM1) utilizada en esta investigación fue obtenida del municipio de Tulancingo en el estado de Hidalgo, México, con coordenadas 20°01'48.2"N 98°24'52.5"W en la localidad de “Los Romeros” (Región de Tulancingo), Hidalgo.

Por su parte la “arena” (SANTUL1) que conforma la mezcla de la materia prima fue obtenida de la presa localizada en la localidad de Santiago Tulantepec (Región de Tulancingo), Hidalgo, con coordenadas: 20°03'21.4"N 98°19'50.8"W.

La materia prima fue utilizada hasta que estuvo totalmente seca, para ello fue dejada secar a temperatura ambiente. Una vez seca fue desaglomerada por medio de mortero, y para controlar la homogeneidad del material en cuanto al tamaño, la materia prima fue cribada por la malla #18 (1mm).

En cuanto a la materia prima de Actopan-El Arenal que será empleada para el objetivo específico 3, se mantendrán las condiciones de elaboración del ladrillo establecidas por Ordoñez (Ordoñez, 2018), utilizando para su identificación los acronimos **ACT9** para el material “arcilla”, y **ACT10** para el material “arena”.

6.1.2. *Aditivos*

✓ Aserrín

El aserrín utilizado en el presente trabajo fue obtenido de un negocio de madera local. Se realizó un estudio previo para establecer el tamaño de partícula adecuado de aserrín con base en pruebas físicas y mecánicas de ladrillos. Los resultados de este estudio se muestran en el Anexo I. Se encontró que el aserrín de tamaño -#20, con un diámetro mediano de partícula de 0.32 mm y un tamaño máximo de 2 mm,

era el adecuado. Por lo tanto, este tamaño fue el utilizado en todas las pruebas del presente trabajo para obtener ladrillo ligero y resistente.

✓ Pumicita

La pumicita que se utilizó fue colectada del municipio de Huichapan en el estado de Hidalgo. Para obtener este aditivo con alta reactividad, el aditivo se sometió a un proceso de molienda a diferentes tiempos (véase Anexo II), dando como resultado que en 4 horas de molienda se tiene un porcentaje cercano a 18 % vol. de partículas reactivas, un diámetro mediano (D50) de partícula de 2.9 μm y un tamaño máximo de partícula de 48 μm .

✓ Vidrio

Este aditivo se obtuvo de la trituración de botellas de vidrio color ambar. La molienda del vidrio se realizó con el mismo equipo y bajo las mismas condiciones que las empleadas para la molienda de la pumicita. Se obtuvo un 9 % vol. de partículas reactivas, un diámetro mediano de partícula de 3.5 μm y un tamaño máximo de partícula de 36 μm .

6.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este apartado se explican las etapas de la metodología llevada a cabo, así como las técnicas de caracterización y sus principales fundamentos, que se emplearon para conocer las características de los materiales utilizados.

En el siguiente diagrama de la Figura 9 se muestra la metodología experimental realizada.

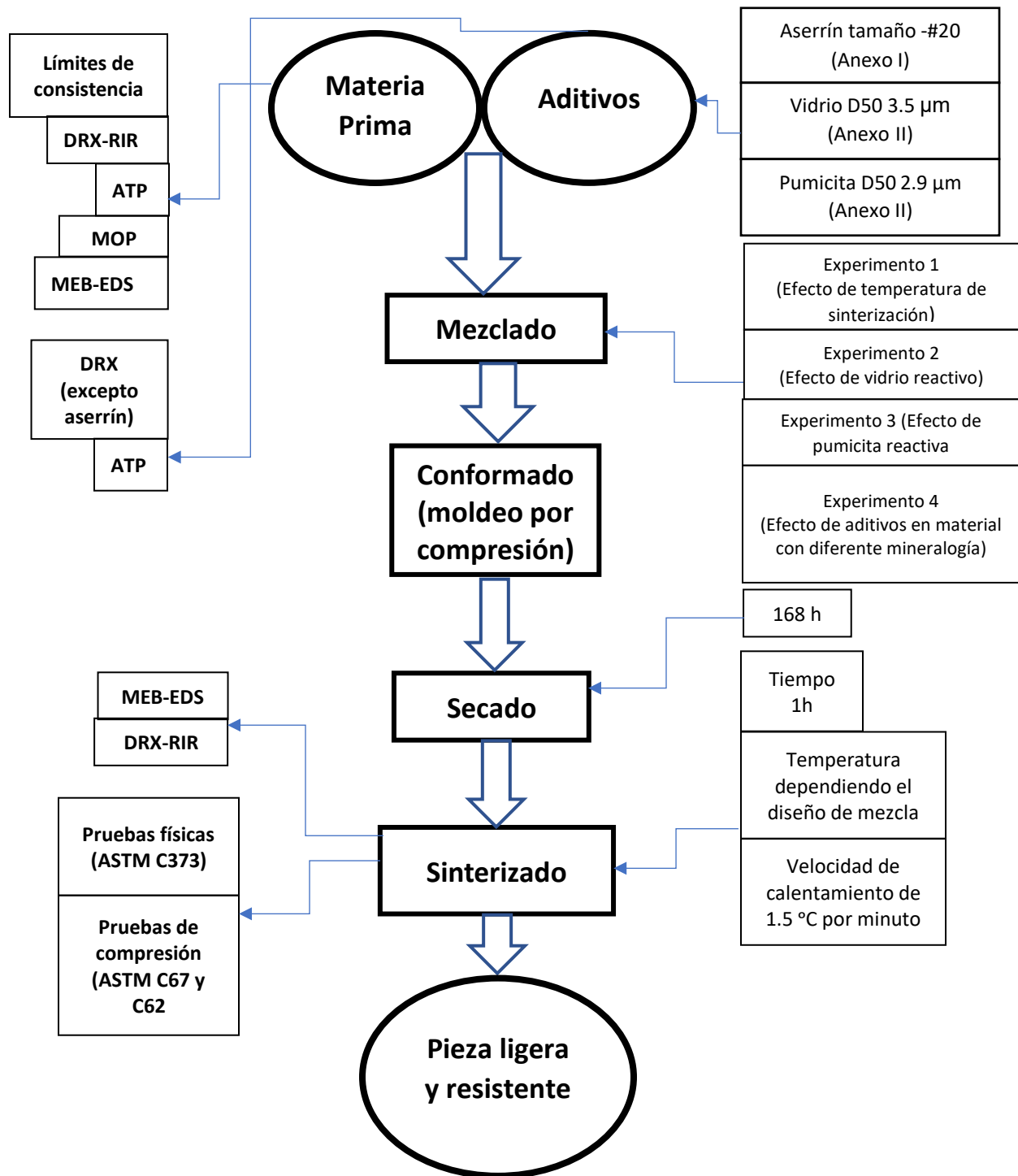


Figura 9.- Metodología experimental propuesta.

6.2.1. Diseño de experimentos

Debido a que en el presente estudio se trabajaron diferentes variables experimentales se diseñaron cuatro experimentos, los cuales están relacionadas a los 3 objetivos específicos del presente trabajo. Las Tablas 8, 9, 10, 11 y 12 muestran dichos experimentos.

Tabla 8.- Factores experimentales a considerar.

Factor						
Número de experimento	Mineralogía (materias primas)	Contenido de agua (35 %)	Aserrín malla -#20 (20 % vol.)	Temperatura de sinterización (°C)	Cantidad de vidrio reactivo	Cantidad de pumicita reactiva
1	Constantes	Constante	Constante	Variable	Variable	Variable
2				Constante		
3						
4	Variables	Constante	Constante	Variable		

Tabla 9.- Experimento 1 para cumplimiento del objetivo específico 1. Utilizando un 30 % en peso del material "ROM1" y 70 % en peso del material "SANTUL1".

Experimento 1	Temperatura de Sinterización (°C)
Mezcla1	900
Mezcla2	950
Mezcla3	1000
Mezcla4	1050
Mezcla5	1100

Tabla 10.- Experimento 2 para cumplimiento del objetivo específico 2. Utilizando un 30 % en peso del material "ROM1", un 70 % en peso del material "SANTUL-1" y una temperatura de sinterización de 900 °C.

Experimento 2	Vidrio reactivo (% peso)
Mezcla6	1
Mezcla7	2
Mezcla8	3
Mezcla9	4
Mezcla10	5

Tabla 11.- Experimento 3 para cumplimiento del objetivo específico 2. Utilizando un 30 % en peso del material "ROM1", un 70 % en peso del material "SANTUL1", y una temperatura de sinterización de 900 °C.

Experimento 3	Pumicita reactiva (% peso)
Mezcla11	1
Mezcla12	2
Mezcla13	3
Mezcla14	4
Mezcla15	5

Tabla 12.- Experimento 4 para cumplimiento de objetivo específico 3. Utilizando un 40 % en peso del material "ACT9", un 60 % en peso del material "ACT10 y una temperatura de sinterización de 900 °C.

Experimento 4	Condiciones
Mezcla16	20 % vol. de aserrín
Mezcla17	1-5 % en peso de vidrio reactivo
Mezcla18	20 % vol. de aserrín y porcentaje de vidrio reactivo idóneo encontrado en mezcla 17

Para la fase de mezclado se empleó el uso de una mezcladora marca Blazer Modelo B10 (Figura 10). El tiempo de mezclado fue de 5 minutos para obtener una completa homogenización.



Figura 10.- Mezcladora Blazer Modelo B10.

6.2.2. Conformado

Cada mezcla en particular se vertió de forma manual a un molde con seis cavidades de dimensiones 13.5 cm * 6.8 cm * 2.5 cm cada una. Una vez que las piezas fueron extraídas del molde y es manejable se les aplicó un tratamiento de “pulido” con un paño humedo para eliminar protuberancias.

6.2.3. Secado

Se dejaron los ladrillos a temperatura ambiente alrededor de 168 horas para su secado. Una vez secos se tomaron las medidas de largo, anchura y grosor por triplicado y se pesó cada pieza.

6.2.4. Sinterizado

La sinterización de los ladrillos se llevó a cabo a una velocidad de calentamiento de 1.5 °C por minuto hasta llegar a la temperatura deseada, una vez alcanzada la

temperatura deseada (indicada en las Tablas 9, 10 y 11), ésta se mantuvo por 60 minutos. El enfriamiento se realizó apagando el horno y manteniendo las piezas en el mismo.

6.3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

6.3.1. Límites Atterberg

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico. Con ellos, es posible clasificar el suelo en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), simbología mostrada en la Tabla 13.

Tabla 13.- Símbolos de grupo según el SUCS.

Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Subfijo
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Probablemente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (> 50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo (< 50)	H

Para la clasificación se obtuvieron los límites Atterberg según la norma ASTM D4318. A continuación se explica de manera breve este procedimiento. Las materias primas se desaglomeran con mortero y posteriormente se criban por malla #100; a los polvos resultantes se les agrega agua hasta tener una especie de lodo. Esta mezcla se deja reposar durante 24 horas. Pasadas las 24 horas se procede a realizar la prueba vertiendo la mezcla en una copa de Casagrande y se siguen las instrucciones de la norma ASTM D4318. Una vez que se obtienen los valores del límite líquido e índice de plasticidad de las materias primas, por medio de una carta de plasticidad (véase Figura 11), se clasificó el material dependiendo de la zona

donde se ubicó, relacionando el símbolo de la zona con las características del material (Tabla 14).

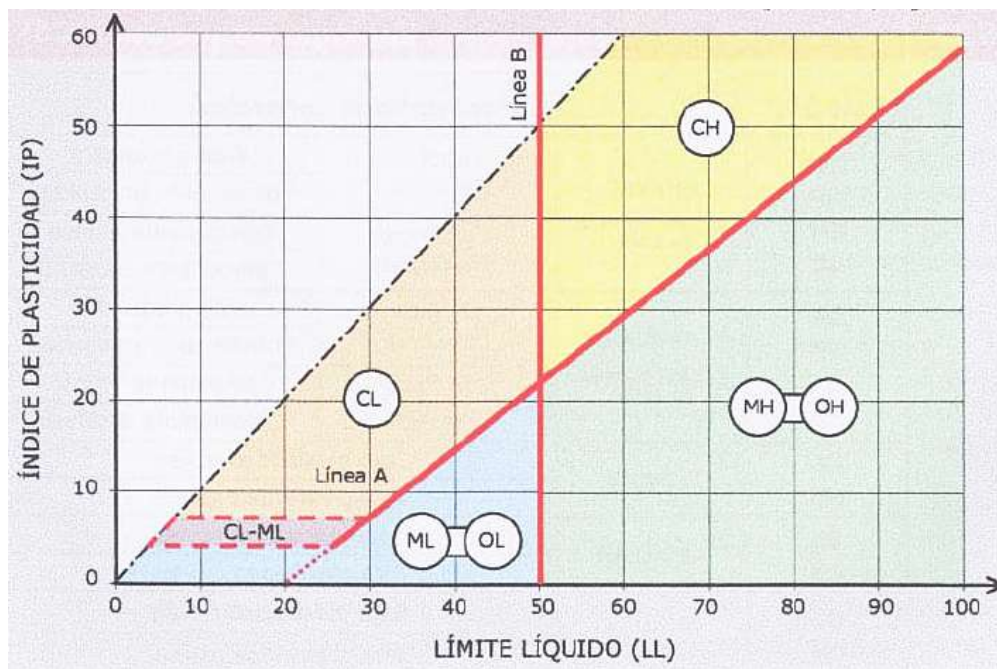


Figura 11.- Carta de plasticidad o Casagrande para los suelos cohesivos, además de una clasificación general de algunos materiales conocidos (simbología explicada en la Tabla 11) (Bañón Blázquez 2008).

Tabla 14.- Tipología de suelos según el SUCS.

SIMBOLO	CARACTERISTICAS GENERALES			
GW	Gravas (>50 % en tamiz #4 ASTM)	Limpias (finos <5 %)	Bien graduadas	Materiales no plásticos
GP		Con finos (finos >12 %)	Pobrementemente graduadas	
GM			Componente limoso	
GC		Componente arcilloso		
SW	Arenas (<50 % en tamiz #4 ASTM)	Limpias (finos <5 %)	Bien graduadas	
SP		Con finos (finos >12 %)	Pobrementemente graduadas	
SM			Componente limoso	
SC		Componente arcilloso		
ML	Limos	Baja plasticidad (LL <50)		Materiales plásticos
MH		Alta plasticidad (LL >50)		
CL	Arcillas	Baja plasticidad (LL <50)		
CH		Alta plasticidad (LL >50)		
OL	Suelos Orgánicos	Baja plasticidad (LL <50)		
OH		Alta plasticidad (LL >50)		
Pt		Suelos altamente orgánicos		

Ecuaciones para la clasificación:

a) Contenido de humedad (w): Razón entre peso del agua y peso del suelo seco de una muestra. Se expresa en porcentaje por la ecuación 1:

$$w: \left(\frac{W_w}{W_s} \right) * 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

W_w : Peso agua

W_s : Peso suelo seco

b) Límite Líquido (LL): contenido de humedad del suelo en el límite entre el estado semi-líquido y plástico.

c) Límite Plástico (LP): contenido de humedad del suelo en el límite entre los estados semi-sólido y plástico.

d) Índice de Plasticidad (IP): diferencia entre los límites líquido y plástico, es decir, el rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene plástico, obteniendolo con la ecuación 2:

$$IP = LL - LP \quad \text{Ec. 2}$$

6.3.2. Análisis de tamaño de partícula

Para la medición y análisis de tamaño de partícula (ATP), tanto de la materia prima como de los aditivos, se realizó una dispersión. Para el caso de los aditivos, se utilizó una solución de hexametáfosfato de sodio (NaPO_3)₆ al 0.2 % en peso, usando como medio dispersante el agua destilada. En el caso de la materia prima al medio dispersante (sin hexametáfosfato de sodio) se agregó silicato de sodio (Na_2SiO_3) aplicado de igual manera en 0.2 % peso. Después de este proceso de dispersión,

los materiales fueron sometidos a vibración ultrasónica para asegurar que no se presenten aglomeraciones, aplicando un tiempo de sonicación de 5 minutos.

El equipo utilizado fue un analizador de tamaño de partícula por difracción láser Beckman & Coulter LS13320 (véase Figura 12), el cual mide las distribuciones de tamaño de partícula a partir de la variación angular de la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas dispersas. Además, cuenta con dos opciones de bancos ópticos disponibles: la “longitud de onda única”, sistema que cubre un rango de tamaño de 0.4 micras a 2000 micras y el “sistema multi-longitud de onda por polarización de intensidad diferencial de dispersión” (PIDS) que cubre un rango de tamaño de 0.017 μm hasta 2000 μm .



Figura 12.- Equipo utilizado para el análisis de tamaño de partícula, marca Beckman & Coulter LS13320.

6.3.3. Microscopía Óptica de Polarización

El microscopio de luz polarizada es un microscopio óptico al que se le incorporan dos polarizadores, entre los que se introduce la muestra. En este caso se empleó la técnica del “entellan”, la cual consiste en colocar una cantidad mínima de muestra (0.1 g) tamizada a malla 200 (74 μm) en un porta objetos, agregando 1 gota de Xilol, para posteriormente cubrirlo con un cubre objetos. Esta técnica experimental es un medio para identificar las texturas y estructuras de la materia prima, que aparecen en forma de imágenes características, que se pueden observar debido a su

birrefringencia (Casado-Martínez, Redondo-Yélamos, García-Pérez, Rodríguez-Cheda, & Ramos-Riesco, 2005).

Para este análisis se observaron las muestras con los objetivos 10X y 20X, con luz transmitida y luz reflejada (nicoses paralelos y nicoses cruzados). El equipo utilizado es un microscopio de polarización marca Olympus modelo BX41.

6.3.4. Análisis y semicuantificación de fases por Difracción de Rayos X

Para este análisis los materiales se molieron en un molino de bolas por 20 minutos para evitar en lo posible la textura que presentan por naturaleza las materias primas. El equipo utilizado para el análisis fue un difractómetro de Rayos X marca Bruker D8 Advance con diseño DAVINCI (Figura 13) ubicado en el Centro de Ingeniería Avanzada de la Universidad Politécnica de Tecámac, utilizando una radiación $\text{Cu K}\alpha 1$ y voltaje de 40kV, el rango de detección fue de $4-80^\circ$ en 2θ .

Por medio de esta técnica se identificaron de manera cualitativa y semicuantitativa las fases minerales cristalinas utilizando el software EVA versión 4.0 acoplado a la base de datos Powder Diffraction File (PDF) 2010.



Figura 13.- Difractómetro de Rayos X Bruker Modelo D8 Advance Diseño DAVINCI.

El análisis semicuantitativo por XRD para determinar la fase amorfa empleó el método RIR (Reference Intensity Ratio) (Visser and Wolff, 1964) en combinación con el uso de un estándar interno (Gualtieri, Guagliardi, & Iseppi, 2004). El método RIR es un método generalizado del método del estándar interno (Snyder, 1996), el cual, utiliza generalmente valores de I/I_c , que es la relación de intensidades de las líneas de difracción de 100 % de la fase problema y de la fase corundum (alúmina α) en una proporción 50:50. Dichos valores generalmente vienen publicados por el Centro Internacional para Datos de Difracción PDF (Powder Diffraction File por sus siglas en inglés). La relación entre la intensidad I , y la composición X , para dos fases está representada por la ecuación 3:

$$\frac{I_i}{I_c} = k_i \frac{X_i}{X_c} \quad \text{Ec. 3}$$

Siendo el subíndice i para la fase a identificar, y el subíndice c para el corundum. Si se tiene como constante la proporción 50:50 de ambas fases, $k_i = I_i/I_c$, que es el valor reportado para cada fase en ICDD-PDF como I/I_c . Para cuantificar n fases en un material usando el método RIR es necesario que cada fase tenga su valor I/I_c . La siguiente ecuación es utilizada para determinar la composición de cada fase en un material con varias fases (Chung F. H., 1974):

$$X_i = \left(\frac{k_i}{I_i} \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{k_i} \right)^{-1} \quad \text{Ec. 4}$$

Para muestras sin fase amorfa

$$\sum_{i=1}^n X_i = 1 \quad \text{Ec. 5}$$

Para muestras con fase amorfa

$$\sum_{i=1}^n X_i \neq 1 \quad \text{Ec. 6}$$

Si la muestra problema presenta fase amorfa es necesario utilizar un estándar interno. Gualtieri usó alúmina alfa y encontró que 10 % era una cantidad adecuada para evitar la sobrestimación de fase amorfa (Gualtieri, Guagliardi, & Iseppi, 2004).

Para muestras con estándar interno de alúmina alfa se utiliza la ecuación 7

$$X_i = \frac{1}{1 - X_s} \left[\left(\frac{X_s}{X_{sc}} \right) X_{ic} \right] \quad Ec. 7$$

Donde X_s corresponde al 10 % peso del estándar de alúmina, X_{ic} la fracción refinada en peso de cada fase cristalina. Ahora X_i representa la fracción en peso de la fase i recalculada con respecto a la fracción en peso conocida del estándar agregado X_s , X_{sc} es la fracción refinada en peso del estándar agregado, es decir, X_i representa la fracción en peso considerando a la fase amorfa, X_a , por lo tanto:

$$X_a = 1 - \sum_{i=1}^n X_i \quad Ec. 8$$

Se estableció una rutina de trabajo para la semicuantificación de la fase amorfa de los ladrillos sinterizados, tal que, una cantidad de ladrillo se sometió a molienda en un molino de bolas por 30 minutos y se preparó 1g por muestra, donde el 90 % lo constituía el ladrillo molido y el 10 % $Al_2O_3 \alpha$.

6.3.5. Análisis mineralógico y microestructural por Microscopía Electronica de Barrido (MEB-EDS)

Para este análisis se hizo uso del microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-IT300 (Figura 14), ubicado en la Escuela Superior de Apan de la UAEH, acoplado un accesorio de Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS), con el cual se pudo observar e identificar los elementos presentes.



Figura 14.- Microscopio Electrónico de Barrido JEOL modelo JSM-IT300.

Para la preparación de las muestras de materia prima, los polvos se desaglomerarán mediante mortero, fueron cribadas a malla #100 (149 μm), después los polvos fueron adheridos a cinta de grafito y posteriormente recubiertos mediante una evaporadora con una aleación de oro y paladio. Las muestras de ladrillo se desbastaron con lijas de números: 180, 220, 300, 400 y 600. Posteriormente la muestra se lavó con acetona en un baño de vibración ultrasónica por 5 minutos. Cada muestra se pulió utilizando pasta de diamante de 3 μm y nuevamente se lavó con acetona. La superficie pulida se atacó químicamente en una solución concentrada de Ácido Fluorhídrico (Christogerou, Kavas, Pontikes, Rathossi, & Angelopoulos, 2010). Finalmente, la superficie pulida fue recubierta con Au-Pd mediante una evaporadora. Cinta de grafito fue colocada entre el portamuestras del MEB y dicha superficie pulida.

La composición química obtenida mediante el análisis de EDS permitió determinar la fórmula empírica de un mineral (también conocida como fórmula estructural) por comparación con la fórmula teórica del posible mineral. Por lo anteriormente dicho, se realizó el cálculo de las proporciones atómicas relativas de cada elemento (n) a partir de los porcentajes en peso de los distintos elementos, dividiendo su porcentaje en peso entre su peso atómico. Una vez determinada la cantidad total de átomos a

través de la fórmula teórica del posible mineral, se determinó el valor de K, este valor de K se obtiene dividiendo la cantidad total de átomos y el valor de n. A partir de estas proporciones atómicas relativas se pueden deducir las relaciones atómicas, multiplicando el valor de K por n, la Tabla 15 presenta un ejemplo.

Tabla 15.- Ejemplificación del cálculo de fórmula estructural del cuarzo, a partir de los resultados de porcentaje en peso determinado por EDS.

Elemento	Wt %	Wat	n=	(Kxn)	Aprox.	Relaciones Atómicas
O K	52.34	15.999	3.271	2.3075	2.31	O (2.31)
Si K	47.66	28.086	1.697	1.1969	1.20	Si (1.2)
Total	100	-	4.968	-	-	-
Posible Mineral:	Formula teórica:	Átomos totales:	K=átomos totales/n		Formula empírica	
Cuarzo	SiO ₂	3	0.7053		Si _{1.2} O _{2.31}	

6.4. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DEL LADRILLO SINTERIZADO

Para determinar la resistencia a la compresión de los ladrillos se utilizó una máquina marca Instron, modelo 8802, la cual es mostrada en la Figura 15a. La preparación de las probetas consistió en recubrir con yeso las dos caras que estarían en contacto con las placas de la máquina de prueba para lograr una superficie uniforme y así evitar puntos concentradores de esfuerzos durante el ensayo. La capa de yeso en la superficie de las probetas se muestra en la Figura 15b. Se realizaron pruebas de compresión a 7 probetas por cada punto de estudio y se obtuvo un valor promedio.

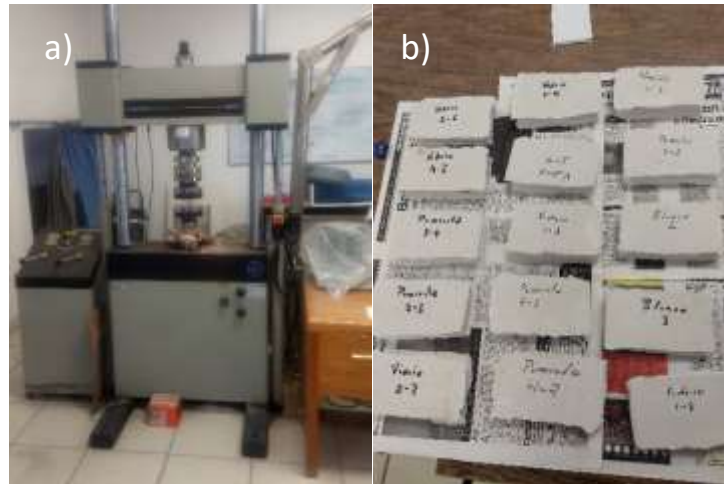


Figura 15.- a) Maquina de fatiga marca Instron 8802 con platos de compresión acoplados para realizar las pruebas de resistencia a la compresión; b) probetas recubiertas con yeso para el ensayo.

La prueba de resistencia a la compresión consiste básicamente en la aplicación de una fuerza normal a la probeta hasta la falla de la misma, el software de la computadora del equipo registra la carga máxima aplicada en el área de contacto. La condición de velocidad de la prueba fue aplicar la carga con una pendiente de rampa de 35 kN/min, según la norma ASTM C67 (Standard Specification for Building Brick). Para determinar el esfuerzo a la compresión se utilizó la siguiente expresión:

$$\text{Esfuerzo a la compresión: } C = \frac{W}{A} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

C = Esfuerzo compresivo de la muestra (*lb/in² o kg/cm² o Pa*)

A = Promedio del área de superficie inferior y superior de la probeta (*in², o cm²*)

W = Carga máxima (*lb o N*)

Las pruebas físicas se realizarán con base en la norma ASTM C373, para ello se prepararon porciones del ladrillo con pesos menores a los 10 g y se eliminaron bordes y zonas propicias a desprendimiento por parte de la muestra mediante un ligero desbaste.

La norma hace uso del método de Arquímedes, permitiendo hacer una medición directa de la densidad aparente, porosidad abierta y absorción de agua. La metodología de la prueba consiste básicamente en eliminar la humedad de las probetas menores a 10 g, para ello se colocaron en un horno a una temperatura de 50 °C por 5 horas, una vez secas las probetas se colocaron en un desecador por un día, después de ese tiempo se pesaron en una balanza midiendo el peso seco (D), luego la pieza se hierve en agua destilada durante 5 horas y se dejó enfriar en el agua durante 24 horas, después se midió el peso húmedo en aire (M), y el peso húmedo suspendido en agua (S). Para la obtención de los valores de densidad aparente, porosidad abierta y absorción de agua se emplearon las siguientes ecuaciones:

La porosidad aparente (**P**), expresada como un porcentaje, la relación del volumen de poros abiertos de la muestra con su volumen exterior (V):

$$P=[(M-D)V]\times 100 \quad \text{Ec. 10}$$

La absorción de agua (**A**), expresada como un porcentaje, la relación de la masa de agua absorbida con la masa del espécimen seco:

$$A=[(M-D)D]\times 100 \quad \text{Ec. 11}$$

La densidad aparente (**B**), en gramos por centímetro cúbico, es el cociente de su masa seca dividida por el volumen exterior, incluyendo poros:

$$B=D*V \quad \text{Ec. 12}$$

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA

7.1.1. Determinación de los límites de consistencia

Los resultados de los límites de consistencia de las materias primas y de la mezcla de éstas con aserrín se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16.- Comparativa de los límites de consistencia de las materias primas y mezclas a utilizar para el conformado del ladrillo.

MATERIA PRIMA	Límite Líquido (w)	Límite plástico	Índice Plástico (IP)
ROM1	50	22	28
SANTUL1	34	19	15
Mezcla de ROM1 30 % peso + SANTUL1 70 % peso + aserrín 20 % vol.	30	18	12

Se observa como el material ROM1 tiene más carácter plástico, debido a presentar el mayor valor de índice de plasticidad. Este valor de plasticidad indicaría en primera instancia un fino tamaño de partícula, recordando que a tamaños finos se presenta un mayor comportamiento plástico en los materiales. Esta alta plasticidad indicaría además la posible presencia de minerales arcillosos, debido al alto límite líquido mostrado y la cantidad de agua requerida durante la prueba.

Siguiendo con la observación de resultados, se tiene que el material SANTUL1 también presenta un comportamiento plástico. Este carácter plástico indicaría que, al igual que con el material ROM1, su tamaño de partícula sea fino, pero no tanto como el correspondiente a ROM1. En cuanto a la mezcla de las materias primas y el aserrín se tiene un impacto en la plasticidad, tal que, está se ve reducida alrededor de un 40 % comparando con el valor de ROM1 y de un 12 % en comparación la plasticidad de SANTUL1.

Además de la obtención de los límites de consistencia, esta comparativa ayudó para analizar como se modifican ciertas características como el contenido de agua necesario al momento de la mezcla de elaboración, disminuyendo de un valor de 50 en el límite líquido a uno de 30 al agregar aserrín .

7.1.2. Análisis de tamaño de partícula

La Figura 16 muestra las curvas de distribución de tamaño de partícula para ROM1, SANTUL1 y la mezcla preparada (30 % ROM1-70 % SANTUL1).

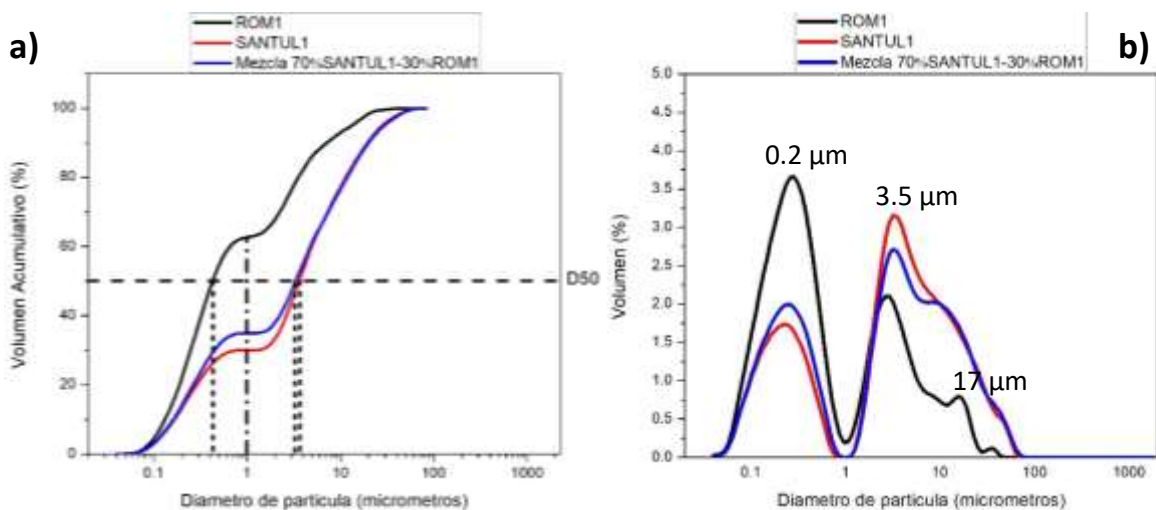


Figura 16.- Análisis de tamaño de partícula por difracción láser de las materias primas y la mezcla de las mismas utilizada en el presente estudio. a) frecuencia acumulativa en volumen y b) Curvas de frecuencia en volumen.

La muestra de ROM1 presenta un 63 % de partículas por debajo de 1 μm. Este porcentaje de partículas reactivas explicaría la alta plasticidad de este material, determinada en el análisis de límites de consistencia. Presenta además un diámetro mediano de partícula (D50) de 0.42 μm y un tamaño máximo de 85 μm.

Por su parte el material SANTUL1 presenta un porcentaje menor de partículas reactivas (29 %). Presenta además un diámetro mediano de partícula de 3.68 μm y un tamaño máximo de 85 μm.

En cuanto a la mezcla 70 % SANTUL1 y 30 % ROM1 se tiene un 35 % de partículas reactivas, un diámetro mediano de tamaño de partícula de 3.27 μm .

Observando las curvas de frecuencia en volumen, las 3 muestras presentan un valor modal aproximadamente en 0.27 μm , siendo ROM-1 quien mayor población presenta en este rango de tamaños finos. En este tamaño (0.2 μm) se reduce la población cuando se hace la mezcla de las materias primas, debido a una nueva distribución de tamaños. Otro valor modal similar en las tres muestras se presenta alrededor de los 3.15 μm . Estas poblaciones en 3.15 μm se atribuyen a los minerales no arcillosos que pueden estar presentes, como el cuarzo y/o feldespatos, siendo SANTUL1 quien presenta una mayor población. En cuanto al pico cercano a los 17 μm visto en ROM1 y SANTUL1, este podría ser debido a la presencia de materia orgánica.

7.1.3. Identificación mineralógica por medio de Microscopía Óptica de Polarización

En la Figura 17 se muestran fotomicrografías del material "ROM-1.

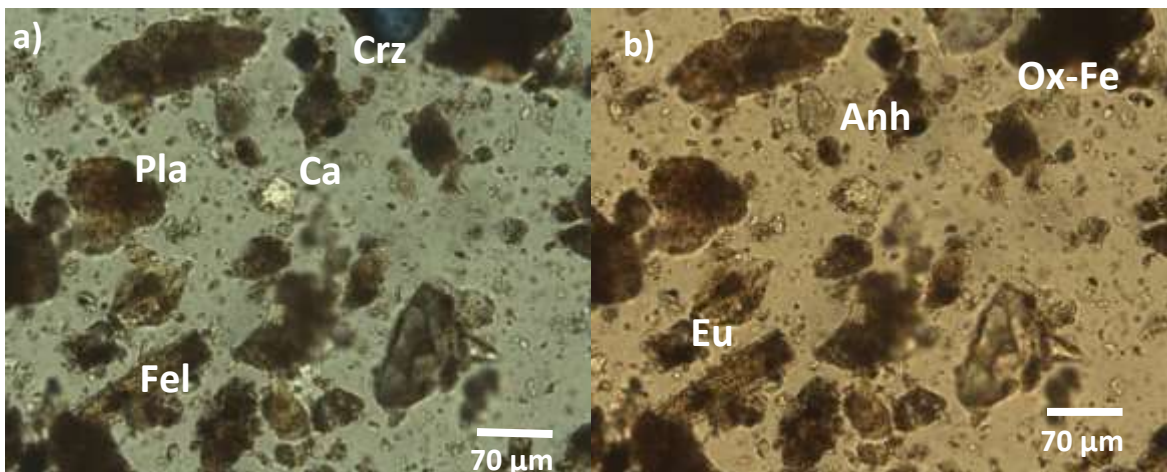


Figura 17.- Material ROM1; a) fotomicrografía obtenida mediante nicoles cruzados observadas a 20X con luz transmitida; b) fotomicrografía obtenida mediante nicoles paralelos. Campo horizontal de la fotografía 0.45 mm.

En la Figura 17 se observa que en general no se presenta una homogenización entre los tamaños de partículas, además de que presenta una cantidad considerable de partículas finas. En las imágenes se observan partículas de **hábito** prismático con forma euهدral (Eu), atribuidas a feldespatos (Fel) cálcicos y sódicos. Esta materia prima muestra partículas de forma anhedral (Anh) que presentan un grado de alteración por óxidos de hierro (Ox-Fe). Se observa indicios de calcita (Ca). Partículas de cuarzo (Crz) junto con feldespatos plagioclasas (Pla) y feldespatos de forma euهدral) representan los grupos de partículas de mayor tamaño.

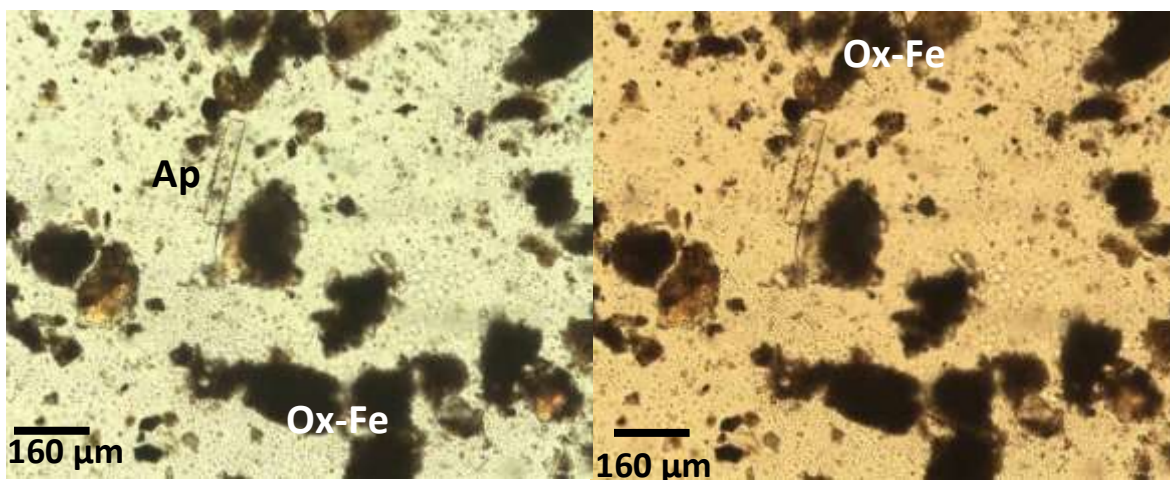


Figura 18.- Material ROM1; a) fotomicrografía obtenida mediante nicols cruzados observadas a 10X con luz transmitida; b) fotomicrografía obtenida mediante nicols paralelos. Campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.

En la Figura 18 se observa de manera más notoria la alteración generada en las partículas a causa de los óxidos de hierro, alterando de manera significativa sus hábitos. Por lo tanto, se aprecia casi en su mayoría partículas anhedrales, a excepción de algunas fases minerales como apatita.

En la Figura 19 se puede apreciar de igual manera una marcada granulometría heterogénea, partículas de tipo euهدral asociadas a feldespatos y partículas subhedrales atribuidas a calcita. La presencia de óxidos de hierro/metálicos mostrados en general puede señalar que las rocas que son la fuente de bancos de

este material son principalmente de composición con dominio andesítico que comprende generalmente plagioclasa y varios minerales ferromagnésicos.

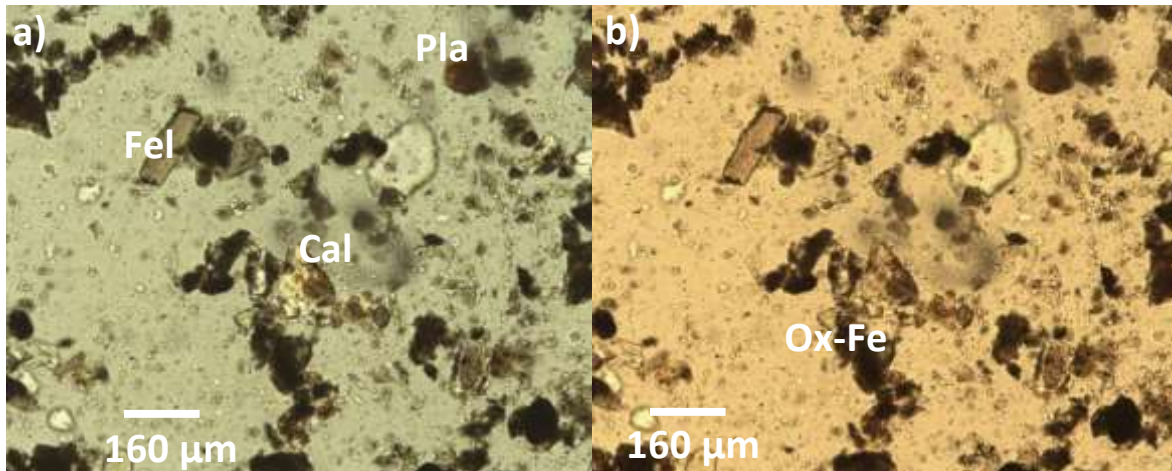


Figura 19.- Material ROM1; a) fotomicrografía obtenida mediante nicols cruzados observadas a 10X con luz transmitida; b) fotomicrografía obtenida mediante nicols paralelos. Campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.

La Figura 20 muestra resultados del análisis por MOP del material SANTUL1.

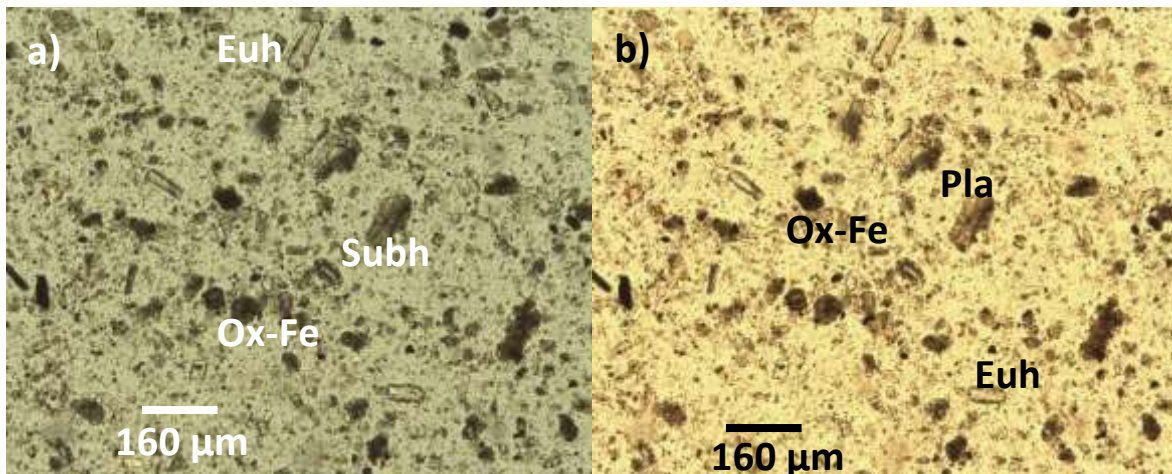


Figura 20.- Material SANTUL1; a) fotomicrografía obtenida mediante nicols cruzados observadas a 10X con luz transmitida; b) fotomicrografía obtenida mediante nicols paralelos. Campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.

En la Figura anterior se observa una gran cantidad de partículas finas con formas de tipo euهدral atribuidas a partículas de apatita, y subhedrales atribuidas a feldespatos alterados por óxidos. Otro aspecto importante es que el grado de alteración de las partículas se mantiene de cierta manera de forma recurrente en varias partículas (ver Figura 21). También se observa una cantidad considerable de mineral apatita.

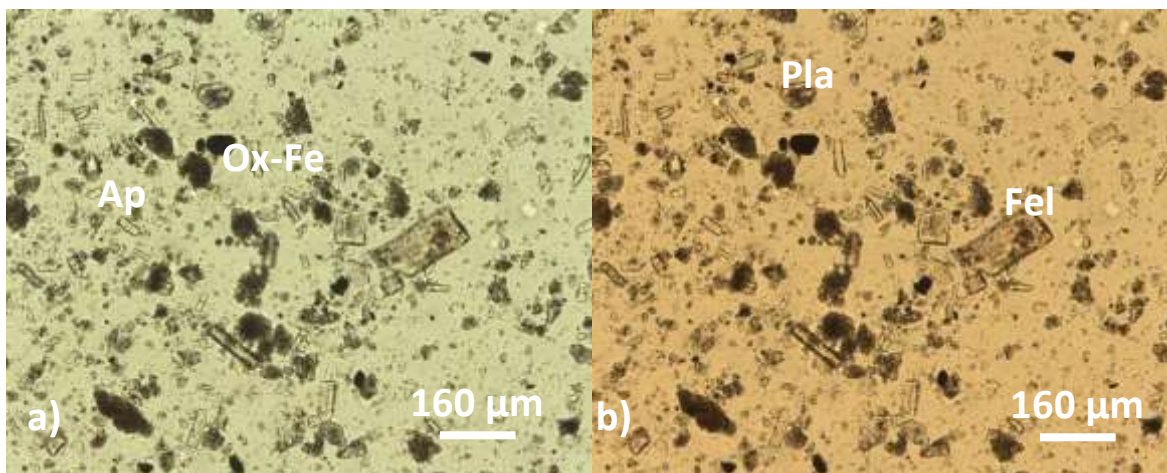


Figura 21.- Material SANTUL1; a) fotomicrografía obtenida mediante nicoles cruzados observadas a 10X con luz transmitida; b) fotomicrografía obtenida mediante nicoles paralelos. Campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.

En la Tabla 17 se agrupan los principales minerales encontrados en el análisis MOP.

Tabla 17.- Resumen de resultados del análisis por microscopía óptica de polarización de la materia prima.

MINERAL	MORFOLOGÍA OBSERVADA EN GENERAL	COLOR	ALTERACIÓN
CUARZO	Subhedral	Azul (Con Nicles Paralelos)	Poca o Nula
FELDESPATOS	Euhedral y Anhedral	Marrón	Fuerte en plagioclasa, considerable en Sódicos y Cálculos
APATITA	Euhedral	Translucido	Nulo
INDICIO DE CALCITA	Anhedral	Blanco	Nulo

7.1.4. Determinación y semicuantificación de fases por DRX-RIR

El análisis por difracción de Rayos X a las materias primas permitió identificar las fases minerales cristalinas presentes y relacionarlas con las propiedades finales del ladrillo. Los resultados se muestran en la Figura 22.

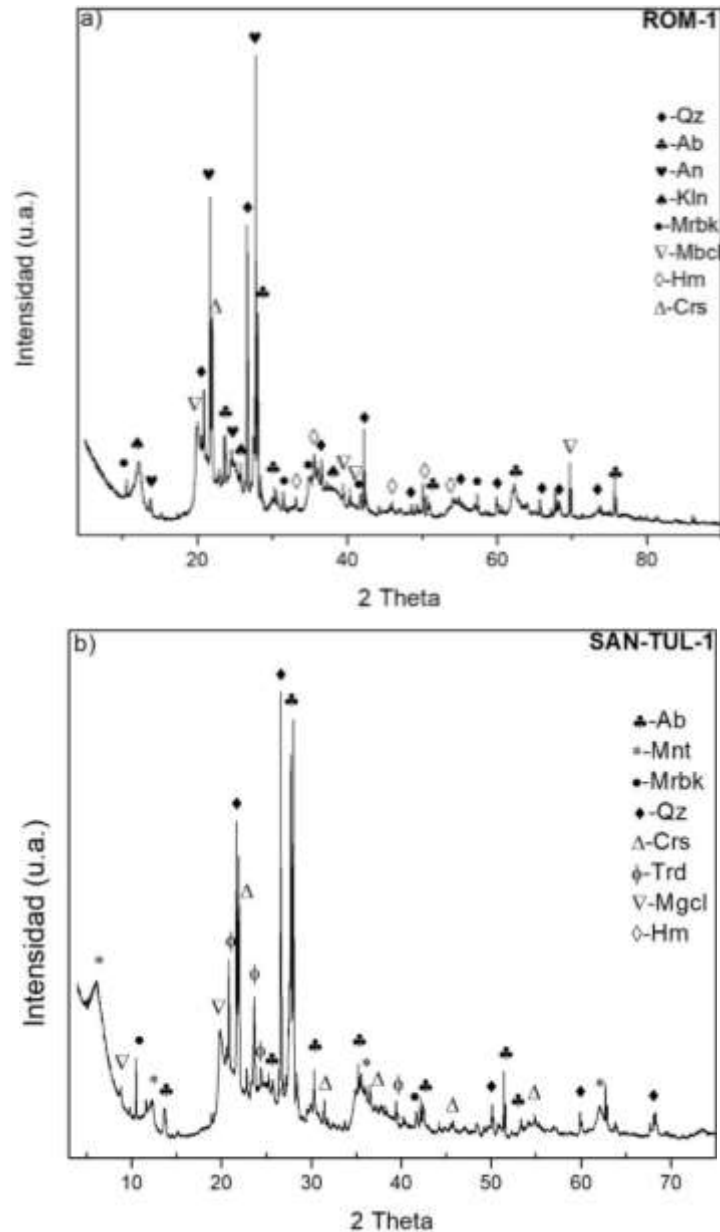


Figura 22.- Difractogramas de las materias primas utilizadas: a) ROM1. b) SANTUL1. Simbología (Whitney & Evans, 2010) Cuarzo (Qz), Albita (Ab), Anortita (An), Caolinita (Kln), Magnesioriebeckita (Mrbk), Magnesiochloritoide (Mbcl), Hematita (Hm), Cristobalita (Crs), Montmorillonita (Mnt), Tridimita (Trd).

En ROM1 las fases que presentaron más intensidad son el cuarzo (y su polimorfo cristobalita) y las correspondientes a los feldespatos (albita y anortita). La presencia

de caolinita explica la alta plasticidad de este material. Destaca la presencia de la fase magnesioriebeckita, que, como se comentó en el marco teórico, tiene una forma de fibra y mantiene su estructura hasta temperaturas de 1000 °C. La fase magnesiocloritoide tendría influencia en la formación de fase amorfa al momento de la pérdida de los OH de su estructura, debido a su estabilidad térmica hasta los 580 °C. También se tiene la presencia de la fase hematita.

En cuanto al material SANTUL1 se observa que de igual manera las fases con mayor intensidad son el cuarzo y la albita. Cabe señalar que en este caso no se identifica anortita. Además del cuarzo también se identifican sus fases polimórficas como la cristobalita y la tridimita, fases (principalmente tridimita) de altas temperaturas. Una fase importante identificada es la montmorillonita, este mineral arcilloso explicaría la alta plasticidad visto en el análisis de los límites de consistencia. Para las fases magnesioriebeckita y magnesiocloritoide identificadas en este material, se comenta lo mismo que en el material ROM1.

Un aspecto a considerar es que en ambos análisis de rayos X no se identificó la aparente apatita vista en el análisis de microscopía óptica de polarización. Esto podría ser debido a que la intensidad de esta fase fuese muy débil, tal que fuera indetectable por el difractómetro.

La Tabla 18 muestra el análisis semicuantitativo de fases por DRX-RIR para ROM1 y la Tabla 19 el análisis DRX-RIR para SANTUL1. Se categorizan las fases minerales presentes dependiendo del grupo al que pertenecen y su porcentaje correspondiente respecto al total.

Tabla 18.- Fases minerales identificadas por DRX y semi-cuantificadas por RIR del material ROM1.

ESPECIE	No. PDF	MINERALOGÍA	ANÁLISIS SEMICUANTITATIVO (% peso)	TOTAL (% peso)
CUARZO	00-005-0490	SiO ₂ , Cuarzo, bajo,	11.20	13.30
	01-071-3839	SiO ₂ , Cristobalita	2.10	
FELDESPATOS	01-078-0933	Na _{0.4} Ca _{0.55} Al _{1.55} Si _{2.45} O ₈ , Anortita, sódica, sintética	46.40	63.50
	00-020-0548	(Na, Ca) (Si, Al) ₄ O ₈ , Albita, calcica, ordenada	17.10	
HEMATITA	01-089-8104	Fe ₂ O ₃ , Hematita, sintética,	1.60	
FILOSILICATOS	01-080-0885	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄ , Caolinita	8.60	
INOSILICATOS	00-020-0656	(Na, Ca) ₂ (Mg, Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ , Magnesioriebeckita	2.80	
NESOSILICATOS	01-076-6006	(Mg _{1.3} Fe _{0.7}) (Al ₄ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₂ , Magnesiocloritoide	10.20	
TOTAL			100.00	

Tabla 19.- Fases minerales identificadas por DRX y semi-cuantificadas por RIR del material SANTUL1 empleada en la elaboración del ladrillo.

ESPECIE	PDF	MINERALOGÍA	ANÁLISIS SEMICUANTITATIVO (% peso)	TOTAL
CUARZO	00-046-1045	SiO ₂ , Cuarzo, sintético.	22.10	40.80
	01-071-3839	SiO ₂ , Cristobalita	6.10	
	00-016-0152	SiO ₂ , Tridimita	12.60	
FELDESPATOS	00-020-0548	(Na, Ca) (Si, Al) ₄ O ₈ , Albita, calcica, ordenada	34.10	
HEMATITA	01-089-8104	Fe ₂ O ₃ , Hematita, sintética,	1.40	
FILOSILICATOS	00-003-0014	Mg Al ₂ O ₃ 5SiO ₂ x H ₂ O, Montmorillonita	7.30	
INOSILICATOS	00-029-1237	(Na, Ca) ₂ (Mg, Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ , Magnesioriebeckita	8.00	
NESOSILICATOS	01-076-6006	(Mg _{1.3} Fe _{0.7}) (Al ₄ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₂ , Magnesiocloritoide	8.40	
TOTAL			100.00	

De la Tabla 18 se puede ver que los feldespatos son el grupo con más presencia en el material ROM1 con un 63.5 % del total. De los feldespatos se tiene para la anortita sodica con un porcentaje del 46.4 % y para la albita cálcica un 17.1 %.

Por su parte las fases de filosilicatos, inosilicatos y nesosilicatos comprenden el 21.6 %, siendo un porcentaje importante de caolinita (8.60 %). Cabe señalar la presencia de magnesoriebeckita (2.8 %) y magnesiocloritoide (10.2 %). Este porcentaje considerable de silicatos es mayor en comparación con los reportados en los antecedentes estudiados.

Por otro lado se tienen porcentajes de las especies de cuarzo y su polimorfo cristobalita, aportando un 13.3 % del total. La presencia de la cristobalita podría aportar cierta estabilidad termodinamica en las transiciones del cuarzo en las temperaturas entre 900–1000 °C, reduciendo los efectos del cambio en volumen (Arndt & Haberle, 1973).

En la Tabla 19 se muestra que el grupo de minerales que predomina en el material SANTUL1 son el cuarzo y sus polimorfos, con un 40.8 % del total. Cabe señalar la presencia de tridimita, una fase que se encuentra en los ladrillos sinterizados a altas temperaturas. Se tiene unicamente albita cálcica la identificada, con un 34.1 %.

Se identificó un porcentaje considerable de filosilicatos detectando el mineral arcilloso montmorrillonita en un 7.3 %. Este mineral arcilloso es el más plastico de la familia de los filosilicatos (Singer & Singer, 1979.).

Del analisis semicuantitativo, el resultado más importante se da en las cantidades encontradas de filosilicatos, nesosilicatos e inosilicatos en ambas materias primas y la presencia de fases de alta temperatura como la tridimita y cristobalita.

En la Figura 23 se presentan los Difractogramas para el vidrio y la pumicita.

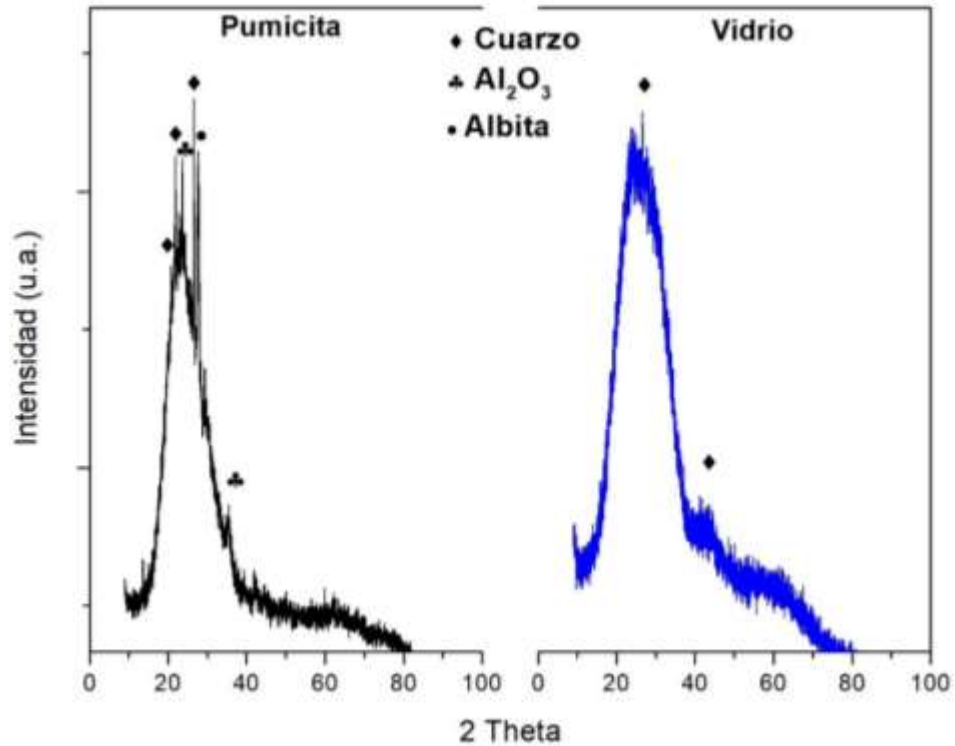


Figura 23.- Patrones de difracción de la pumicita y del vidrio a incorporar en la elaboración de probetas.

De los patrones de DRX resultantes se tiene que los aditivos, a pesar de ser catalogados como materiales amorfos, presentan fases cristalinas. En el caso del Cuarzo, se observa que está presente tanto en la pumicita como en el vidrio. Otras fases presente en la pumicita son Alumina y Albita.

La presencia de estas fases puede influir en la microestructura final del ladrillo.

7.1.5. Análisis mineralógico por MEB-EDS

En la Figura 24 se presentan las fotomicrografías del material ROM1.

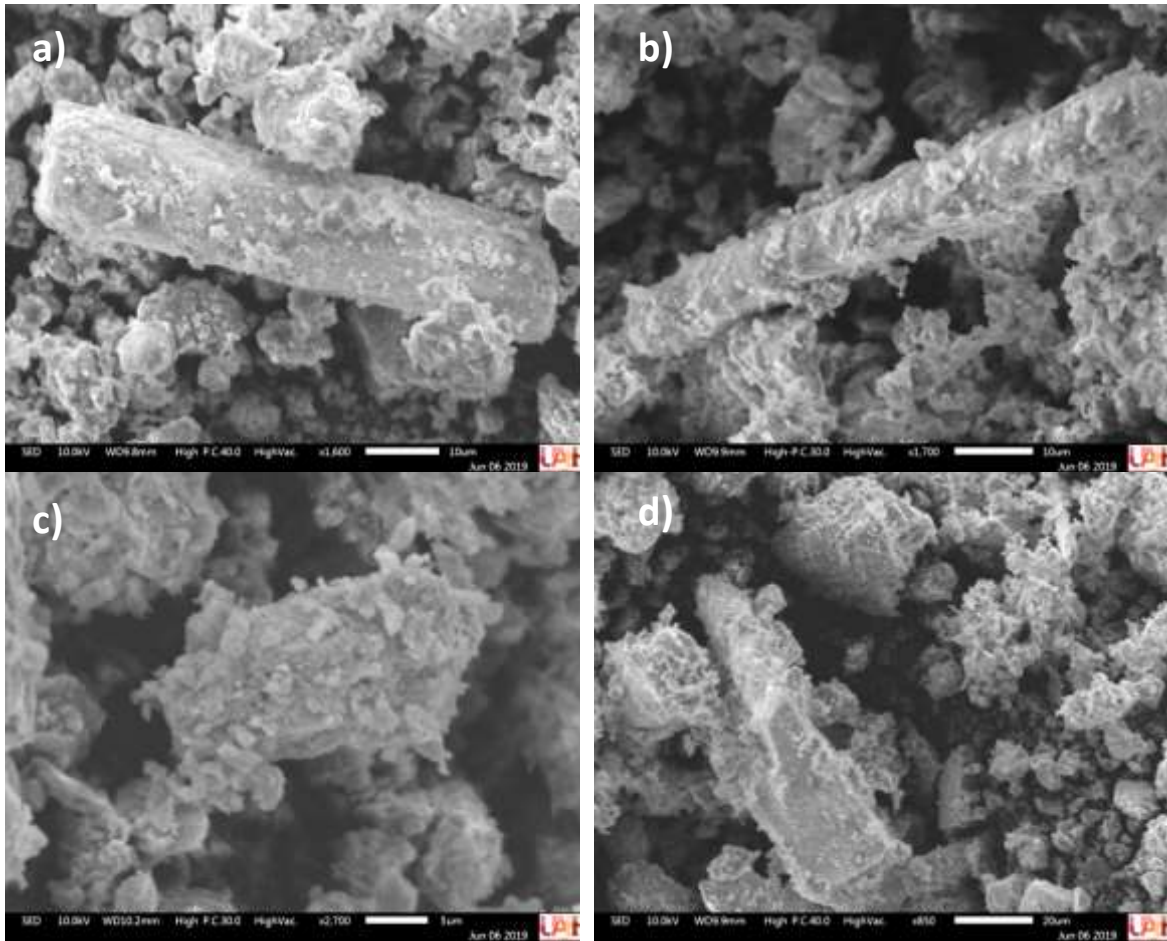


Figura 24.- Fotomicrografías de MEB con electrones secundarios del material ROM1; a) partícula atribuida a cuarzo; b) partícula atribuida a una anortita; c) partícula atribuida a caolinita; d) partícula atribuida a albita.

En la muestra de ROM1 (Figura 24) se observa una gran cantidad de partículas finas en las cercanías con las partículas de mayor tamaño que fueron analizadas. Esto concuerda con los análisis de tamaño de partícula realizados. Entre las especies que pudieron observarse en las fotomicrografías se encuentran principalmente cuarzo, partículas de caolinita y variedades de feldespatos (albita, anortita).

La mayoría de las partículas por debajo de 10 μm tienen una morfología de subhedral a anhedral.

En los análisis mediante EDS se confirmó el problema del efecto de matriz debido a las partículas adheridas y las impurezas como materia orgánica detectada. Algunas partículas de feldspatos, como la anortoclasa, presentan deficiencias en sodio, y en otros la presencia de bario. La presencia de este efecto, aunado a la alteración de óxidos de hierro visto en el análisis MOP, puede explicar la mayor densidad de este material en comparación con otros de la región. Las Tablas de composición de éstas y más partículas se muestran en el Anexo III.

En la Figura 25 se presentan las fotomicrográficas del material SANTUL1.

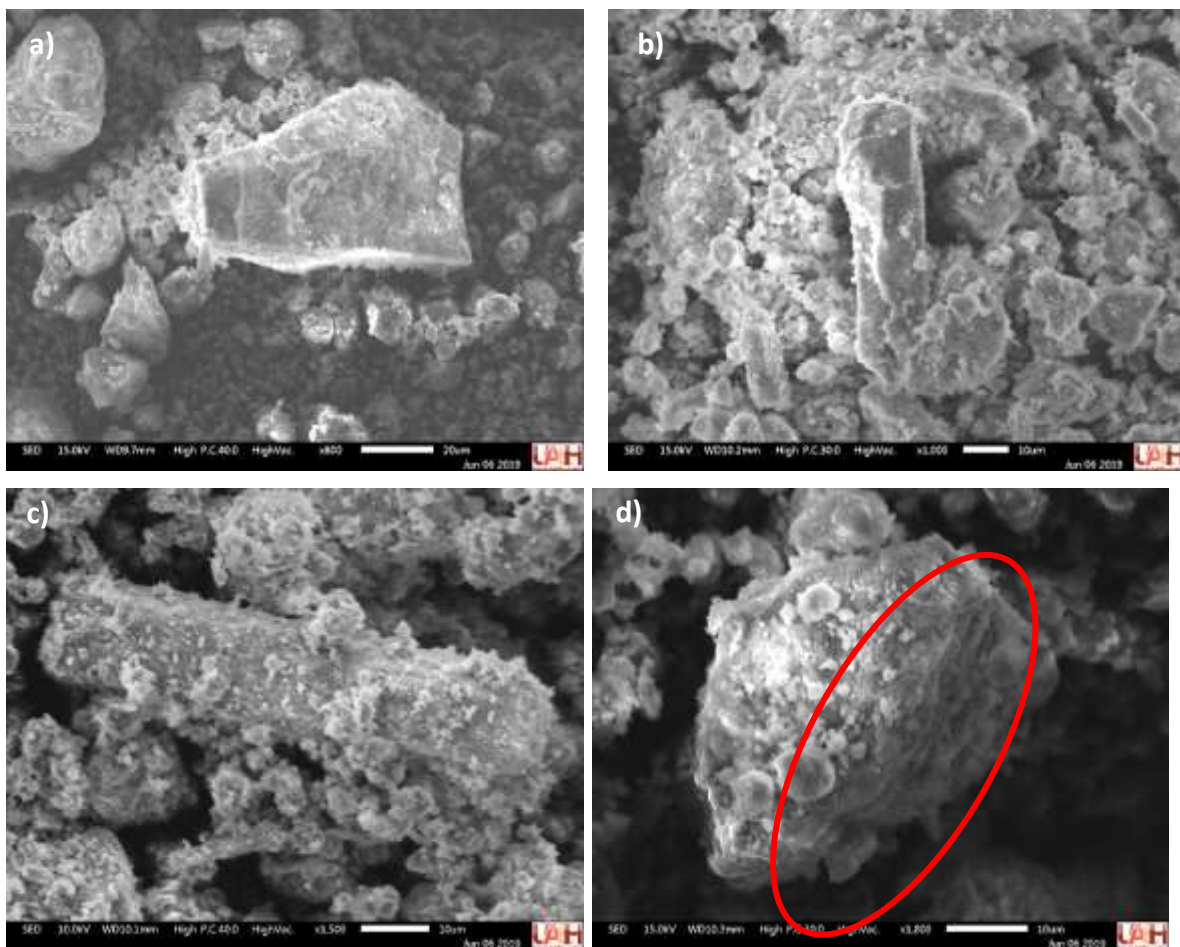


Figura 25.- Fotomicrográficas de MEB con electrones secundarios del material SANTUL1; a) partícula atribuida a cuarzo; b) partícula atribuida a anortoclasa; c) partícula atribuida a plagioclasa; d) partícula atribuida a montmorillonita.

En la fotomicrografía de la Figura 25a se observa una partícula de cuarzo con morfología definida con tamaño mayor a los 30 μm . Por su parte en la fotomicrografía de la Figura 25b se identifica una partícula de anortoclasa, que sobresale de un aglomerado de partículas finas. Se atribuye que este fenómeno, encontrado en muchas partículas analizadas, sea la causa de su alteración morfológica y química. En la Figura 25c se observa una partícula con morfología euhedral asignada a una plagioclasa. En la Figura 25d se observa una partícula de montmorillonita, donde se puede apreciar en la zona señalada en rojo el apilamiento de las capas de este mineral arcilloso.

7.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS LADRILLOS ELABORADOS CON ASERRÍN

El propósito de esta sección es establecer la temperatura de sinterización de los ladrillos en la cual se obtienen las mejores propiedades físicas y mecánicas.

7.2.1. Análisis de la evolución microestructural del ladrillo por microscopía óptica

Lo primero que se observa después de la sinterización del ladrillo es la coloración de las piezas conforme se va incrementando la temperatura. Iniciando en 900 °C se observa un color naranja tenue hasta los 1000 °C, a partir de 1050 °C se observa un color más fuerte, y es en 1100 °C donde se observa un color cobrizo (véase Figura 26).



Figura 26.- Efecto de la temperatura en el color del ladrillo resultante de las mezclas T. Iniciando en 900 °C (primera de izquierda a derecha) y terminando en 1100 °C (primera de derecha a izquierda).

Una vez que se obtuvieron las muestras sinterizadas se observó su microestructura en primera estancia mediante microscopio óptico, esto con el fin de observar la evolución de la microestructura conforme la temperatura de sinterización aumenta. En la Figura 27 se muestran fotografías de las probetas sinterizadas a diferente temperatura.

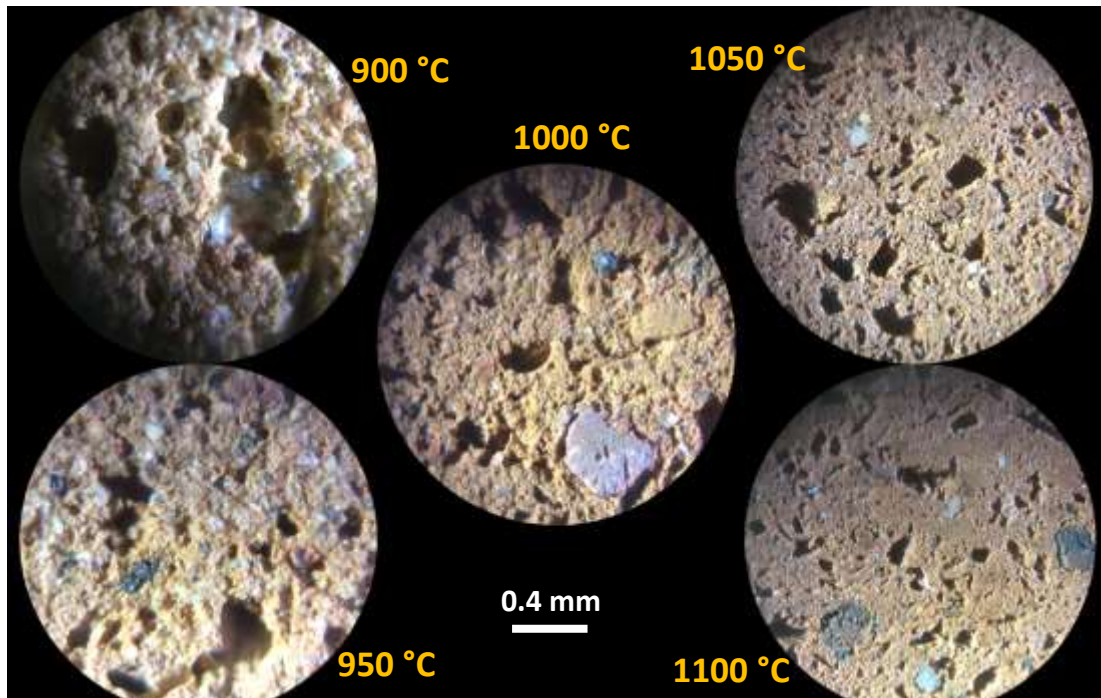


Figura 27.- Fotografías de ladrillos incorporando 20 % vol. de aserrín sinterizados a diferente temperatura.

En la probeta sinterizada a 900 °C se observan formas variadas de poro, además de ciertas “rugosidades” dentro del mismo, atribuidas a la naturaleza fibrosa del aserrín (Serret Guasch & Giralt Ortega, 2013). Otro aspecto a considerar es que se observan regiones donde se presentan zonas con apariencia vitrea dentro de los poros.

En la probeta sinterizada a 950 °C la microestructura empieza a cambiar, respecto a la sinterizada 900 °C. Presenta formas variadas de poros dejados por el sitio que ocupó el aserrín. Con este aumento en la temperatura se aprecia el inicio de la sinterización por fase líquida al tener una superficie menos rugosa con respecto a la probeta anterior.

En la probeta de 1000 °C se observan poros con diferente orientación, y partículas de mayor tamaño. Para las temperaturas de 1050 y 1100 °C los poros ya tienen un tamaño más reducido y algunos aislados entre sí. La superficie a partir de estas temperaturas empieza a ser menos rugosa, un indicativo del aumento de fase líquida en el ladrillo.

7.2.2. Análisis DRX-RIR para las muestras sinterizadas a diferentes temperaturas

La Figura 28 muestra los resultados de DRX de las probetas sinterizadas a diferentes temperaturas.

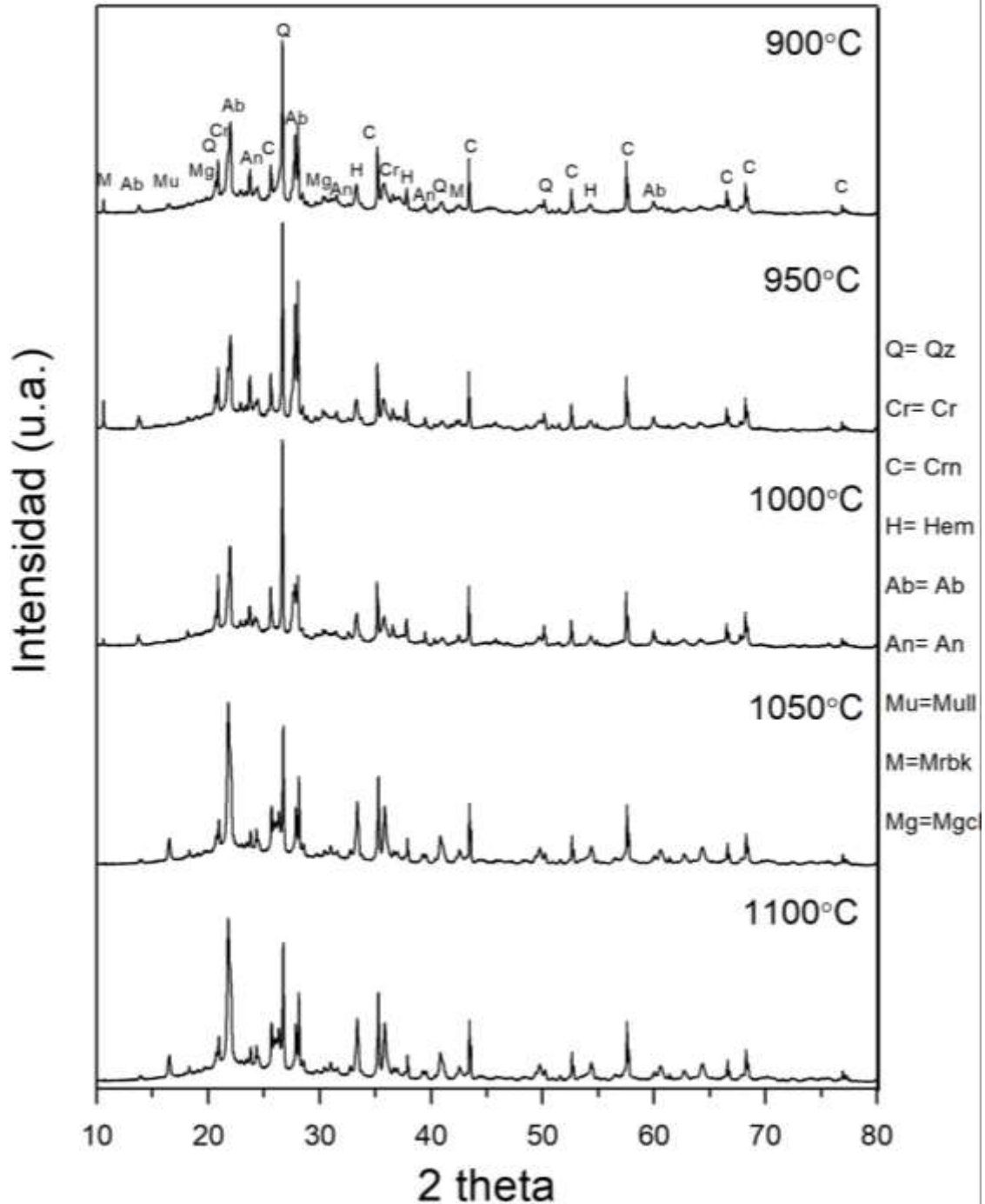


Figura 28.- Difractogramas de ladrillos sinterizados a diferentes temperaturas. Simbología (Whitney & Evans, 2010): Cuarzo (Qz), Albite (Ab), Hematita (Hem), Anortita (An), Mulita (Mull), Cristobalita (Cr), Magnesiocloritoide (Mgcl), Magnesioriebeckita (Mrbk) y Corindón (Crn).

Analizando los resultados se tiene que en 900 °C la fase con mayor intensidad es la de cuarzo, seguido por la albita. Destacando la presencia de la fase mullita. Cabe señalar que la fase mullita comúnmente se empieza a detectar a temperaturas mayores a los 1000 °C (Cultrone, y otros, 2004). La presencia de CO₂ proveniente de la combustión del aserrín, aunado a los procesos de amorfización de la caolinita, sería la causa de la presencia de esta fase a baja temperatura. Por otra parte, la fase magnesiocloritoide al ser estable hasta los 580° C (Chopin, y otros, 1992), se ve una reducción en la intensidad del pico con respecto a la materia prima, indicativo que ahora sería parte de la fase amorfa. Con respecto a la magnesioriebeckita, se tiene presencia aún de esta fase, esto debido a su resistencia térmica en esta temperatura (Kusiorowski, Zaremba, Piotrowski, & Adamek, 2012).

En el ladrillo sinterizado a 950 °C se tiene un resultado similar a 900 °C, salvo la disminución en intensidad de los picos de hematita y mullita. En 1000 °C se observa la disminución de los picos de albita y anortita, esto indicaría su transformación en fase líquida. A partir de 1000 °C se observan cambios más notorios en las intensidades de algunas fases, por ejemplo, la disminución en intensidad de cuarzo, indicativo de su transformación en sus fases polimorfos (Baldo & dos Santos, 2002). Además, se da el incremento en intensidad de la fase hematita, producto de la recristalización del Fe³⁺ liberado durante la descomposición de los filosilicatos, inosilicatos y nesosilicatos (Acevedo-Sandoval, Ortiz, Cruz, & Cruz Chávez, 2004).

La secuencia de las reacciones que tienen lugar durante la sinterización depende directamente de la mineralogía de la materia prima, y por lo tanto es difícil hacer una generalización en torno a este proceso, debido a las diferentes tipologías de materiales y su complejidad mineralógica. Estas diferentes tipologías y mineralogía modifican los equilibrios termodinámicos y las cinéticas de las reacciones de transformación, dificultando la identificación de un parámetro común que indique su comportamiento o resistencia a altas temperaturas (Viani, Cultrone, Sotiriadis, Ševčíka, & Šašek, 2018).

Se realizó el análisis DRX-RIR de las fases y fase amorfa, la cual se presenta en la Tabla 20.

De la Tabla anterior se observa cómo al aumentar la temperatura, porcentajes de

Tabla 20.- Fases minerales identificadas por DRX en muestras sinterizadas a diferentes temperaturas, las fases fueron semi-cuantificadas por RIR con el método de estándar interno (10 % Corindón).

	PDF	MINERALOGÍA	ANÁLISIS SEMICUANTITATIVO (% peso)				
			900 °C	950 °C	1000 °C	1050 °C	1100 °C
CUARZO	00-005-0490	SiO ₂ Cuarzo, bajo	16.41		10.83	8.49	5.39
	01-079-1910	SiO ₂ Cuarzo, sintético		7.67			
	01-074-9378	SiO ₂ Cristobalita, sintético	4.23	4.12	5.74		6.49
	01-071-0785	SiO ₂ Cristobalita				6.47	
	00-016-0152	SiO ₂ Tridimita			1.46	2.89	5.47
FELDESPATOS	00-020-0572	NaAlSi ₃ O ₈ Albita, desordenada	9.33	14.38		9.05	4.79
	00-018-1202	(Ca, Na) (Si, Al) ₄ O ₈ Anortita, sódica, intermedia	11.60		9.68	7.35	6.57
	00-073-6461	Na _{0.34} Ca _{0.66} Al _{1.66} Si _{2.34} O ₈ Anortita, sódica		13.35			
	00-020-0554	NaAlSi ₃ O ₈ Albita, ordenada			10.55		
HEMATITA	01-089-8104	Fe ₂ O ₃ Hematita, sintética,	1.94		2.18	2.34	
	01-076-4579	Fe ₂ O ₃ Hematita, sintética,		2.09			
	00-013-0534	Fe ₂ O ₃ Hematita, sintética					4.72
MULLITA	00-089-2814	Al (Al _{0.83} Si _{1.08} O _{4.85}) Mullita, sintética	2.78	2.46	3.29	4.94	5.75
MAGNESIO-RIEBECKITA	00-020-0656	Na ₂ Mg ₃ Fe ₂ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ , Magnesioriebeckita	3.0	3.34	1.42	0.95	0.42
MAGNESIO-CLORITOIDE	01-076-6006	(Mg _{1.3} Fe _{0.7}) (Al ₄ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₂ , Magnesiocloritoide	1.7	1.32	0.96	0.53	0.33
AMORFO			49.01	51.27	53.89	56.99	60.07

cuarzo dan paso a la transición del mismo a cristobalita y tridimita. Esta transición se ve reflejada en el aumento constante de los porcentajes de cristobalita y tridimita a partir de 1000 °C. Cabe señalar que desde la materia prima se detectó presencia de cristobalita, esto explicaría su presencia a temperaturas de 900 y 950 °C.

De igual manera que con el cuarzo, se observa que los feldespatos presentan una disminución de los porcentajes iniciales conforme se incrementa la temperatura de sinterización, indicativo que igualmente, se fue incrementando la cantidad de fase líquida.

La fase hematita presenta un comportamiento creciente con el aumento de la temperatura, sugiriendo que este aumento proviene de los iones Fe^{3+} liberados en la descomposición de los filosilicatos, nesosilicatos e inosilicatos.

Un aspecto a considerar es el porcentaje de mullita que se obtiene a partir de los 900 °C de sinterización. Según la bibliografía, es justo entre los 900 y 950 °C cuando la fase amorfa proveniente de la descomposición de la caolinita es consumida para comenzar la cristalización de la mullita (Bradley, 1951). Este porcentaje de mullita es generado en gran medida por el CO_2 presente en la atmosfera del horno proveniente de la combustión del aserrín.

Respecto a la fase magnesioriebeckita, esta fase estuvo presente en todo el rango de temperatura. Es decir, dicha fase, la cual se considera un asbesto, resistió la aplicación de calor, aunque hubo una cierta cantidad que si se degrado o se descompuso. Se tiene que dicha fase está presente aún de manera significativa a 900 y 950 °C con alrededor de 3 % peso. A partir de 1000 °C se da una disminución significativa de esta fase, alcanzando valores de alrededor de 0.3 % peso. Es importante recordar que los porcentajes observados en la materia prima fueron de alrededor de 6 % peso. Esta fase presenta una forma fibrosa, típica de los asbestos.

La fase magnesiocloritoide tiene una reducción significativa en todas las temperaturas con respecto a los porcentajes iniciales en la materia prima. Esto debido a la pérdida de su estructura a partir de 580 °C, dando paso a su transformación en fase amorfa.

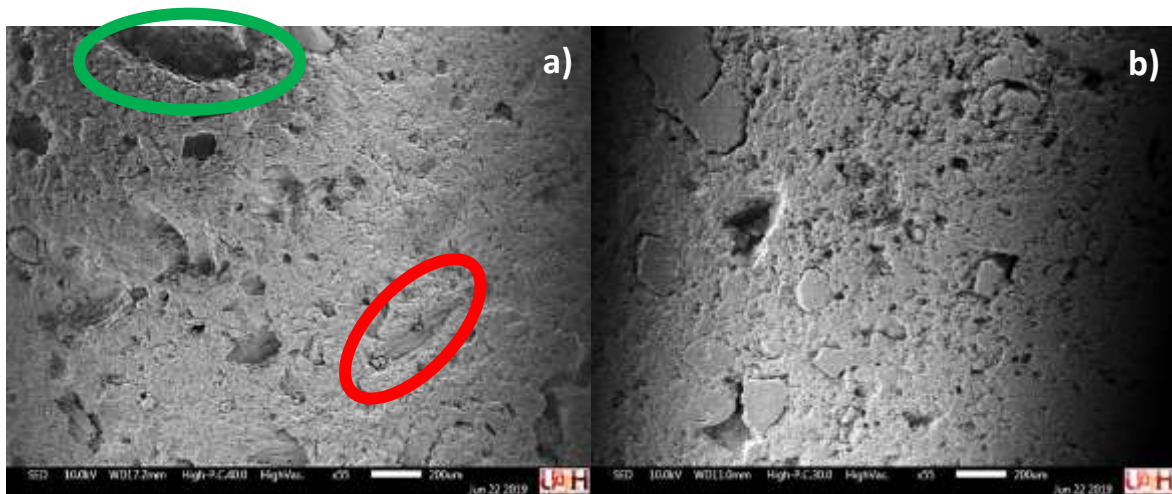
Otro aspecto importante es el porcentaje de fase amorfa presente en el ladrillo. Coletti y colaboradores encontraron presencia de fase amorfa a temperaturas a partir de 1050 °C de sinterización (Coletti, Cultrone, Lara, & Mazzoli, 2016). Ordoñez (2018) incorporó aditivos fundentes, reportando valores superiores al 50 % de fase amorfa. Se sugiere que el origen de la formación de esta alta cantidad de fase amorfa reportada en la Tabla 17 se debe al alto contenido de mineral arcilloso presente en la mezcla (montmorillonita y caolinita), al alto volumen de partículas reactivas y al contenido de aserrín, el cual provocó una posible elevación de temperatura localizada alrededor de cada partícula durante la combustión del

carbono proveniente del aserrín a partir de aproximadamente 600 °C (Moreno, Font, & Conesa, 2017). Otro aspecto a resaltar es el aumento de la fase amorfa con el aumento de la temperatura de sinterización. Este hecho es coincidente con lo observado por microscopía óptica donde, la superficie de las probetas se observa más lisa conforme aumenta la temperatura de sinterización, debido al mayor “mojamiento” de las partículas por la fase líquida.

7.2.3. Análisis microestructural por MEB

En este apartado se comparan probetas para analizar los cambios que sufre la microestructura del ladrillo dependiendo de la temperatura de sinterización; enfocándose principalmente en tamaños y formas de poros, posibles defectos y efectos de la fase líquida.

La comparativa de porosidad en el ladrillo se muestra en la Figura 29.



**Figura 29.- Fotomicrografías obtenidas mediante electrones secundarios tomadas a 55X.
a) probeta sinterizada a 900 °C; b) probeta sinterizada a 1100 °C.**

Del par de fotomicrografías anterior se observa el cambio en los tamaños y formas de poros al aumentar la temperatura de sinterización. En la Figura 29, se muestra el ladrillo sinterizado a 900 °C donde se observan poros menores a 100 μm , así como poros grandes del orden de 600 μm (zona marcada en verde). La forma del

aserrín es conservada por algunos poros (zona señalada en rojo). Al aumentar la temperatura de sinterización se observa una mayor cantidad de poros pequeños y aislados entre sí, tal como se muestra en la Figura 28b para el ladrillo sinterizado a 1100 °C.

La detección de defectos en la microestructura del ladrillo se presenta en la Figura 30.

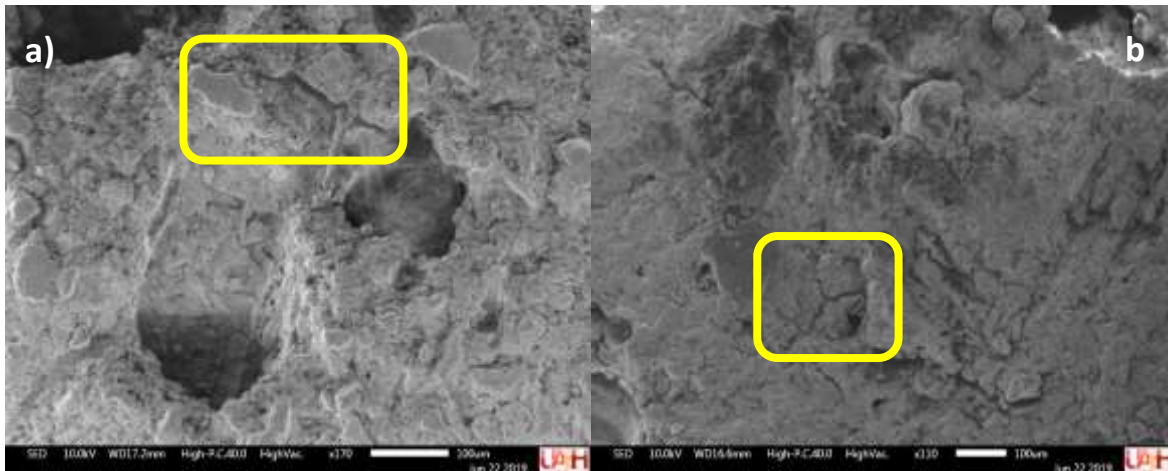


Figura 30.- Fotomicrografías obtenidas mediante electrones secundarios. a) probeta sinterizada a 950 °C; b) probeta sinterizada a 1000 °C.

De la Figura anterior se observa, en la Figura 30a, una especie de micro grieta cercano a un poro (marcada en amarillo), mientras que en la Figura 30b una especie de unión de grietas (de menores tamaños que la probeta anterior). Estas grietas serían causadas debido al cambio en volumen del cuarzo en su transición a cristobalita. Este efecto de grietas se comprueba al comparar los porcentajes reportados en la Tabla 20 de cuarzo en la probeta de 900 °C y su disminución constante al incrementar la temperatura; estos porcentajes de disminución de cuarzo darían paso a la formación de cristobalita (fase que tiene un crecimiento constante conforme se aumenta la temperatura) provocando la aparición de las grietas.

Los efectos de la fase líquida en las partículas presentes en el ladrillo se muestran en la Figura 31.

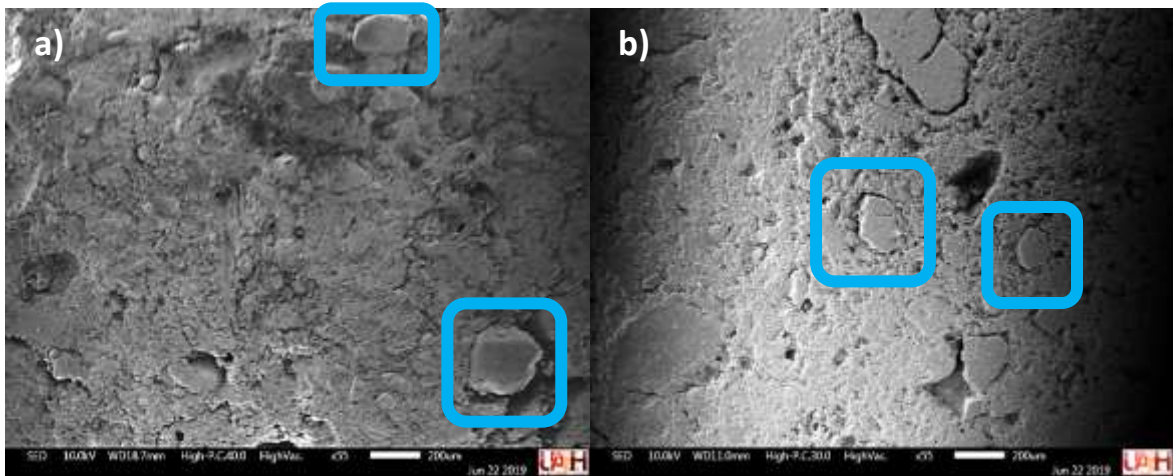


Figura 31.- Fotomicrografías tomadas mediante electrones secundarios a 55X. a) probeta sinterizada a 900 °C; b) probeta sinterizada a 1050 °C.

Observando la Figura 31a se aprecian partículas de tamaños de 200 μm (marcadas en azul). Estas partículas de tamaños “grandes” podrías ser partículas de cuarzo debido a la forma euhedral y subhedrales que presentan. Por otra parte, en la Figura 31b se observan partículas similares en tamaños (marcadas en azul), sin embargo, estas partículas tienden más a formas semiesféricas, un indicativo de que estas partículas fueron “mojadas” por la fase líquida, eliminando por ello los bordes de las mismas. Un caso más evidente del efecto de la fase líquida en la morfología de las partículas se presenta en la Figura 32 (marcado en azul).

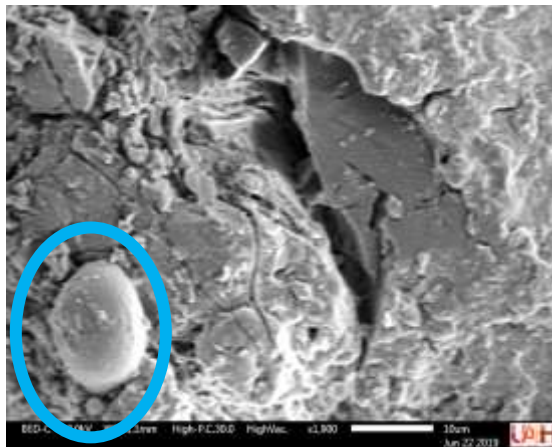


Figura 32.- Fotomicrografía tomadas mediante electrones secundarios a 1900X de la probeta sinterizada a 1100 °C.

En la Figura 33 se muestra la posible presencia de la fase magnesioriebeckita dentro de un poro del ladrillo.



Figura 33.- Fotomicrografía tomadas mediante electrones secundarios a 850X de la probeta sinterizada a 900 °C.

En la zona marcada de blanco de la Figura 33 se aprecia material con forma alargada que cruza la cavidad del poro. Recordando la presencia de magnesioriebeckita en esta temperatura en el análisis DRX-RIR de la Tabla 20, podría darse el caso de que esta fase se encontrara en algunos casos dentro del poro y reforzar la estructura del mismo.

7.2.4. Efecto de la temperatura de sinterización en las propiedades mecánicas y físicas del ladrillo

Los resultados de la prueba de compresión son presentados en la Figura 34.

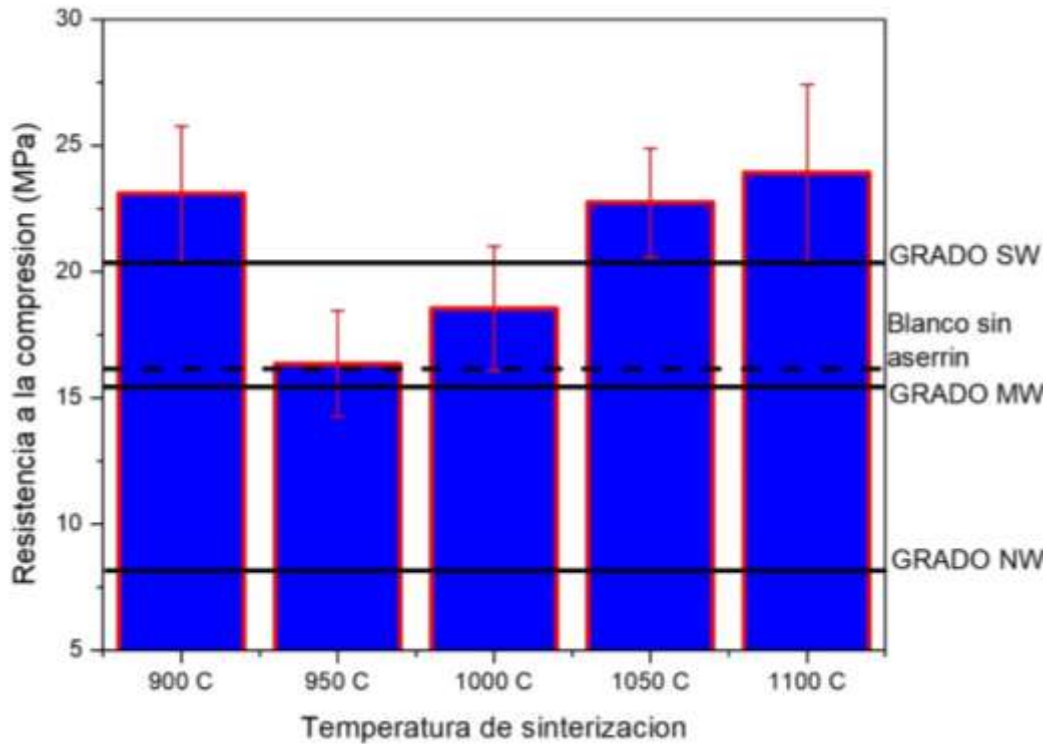


Figura 34.- Resistencia a la compresión obtenida para los lotes sinterizados a diferentes temperaturas (grados según la norma ASTM C62. Simbología: severe weathering (SW), moderate wearing (MW) y normal weathering (NW)), agregando 20 % vol. de aserrín.

De la Figura anterior se observa que desde 900 °C se tiene un valor elevado de resistencia a la compresión de 23 MPa. Para hacer una mejor explicación y análisis de esta elevada resistencia se presenta una Tabla de “posibles causas” (Tabla 21) para correlacionar los resultados vistos en DRX-RIR y MEB con esta resistencia mecánica.

Tabla 21.- Posibles causas de la resistencia obtenida en el ladrillo elaborado con 20 % vol. de aserrín sinterizado a 900 °C.

	¿Presencia de Magnesioriebeckita?	¿Presencia de Aserrín?	¿Presencia de mullita?	Resistencia a la compresión (MPa)
Blanco	Si	No	No (Palma, 2017)	16
Ladrillo con aserrín	Si	Si	Si	23

En el análisis de DRX se observó presencia de magnesioriebeckita tanto en el blanco como en el ladrillo incorporando aserrín. Como se comentó en apartados anteriores, esta fase tiene un hábito fibroso resistente y flexible (Kusiorowski, Zaremba, Piotrowski, & Adamek, 2012) y al estar, posiblemente, en algunos poros, reforzaría su estructura (ver Figura 35) al momento de aplicar una carga. Este reforzamiento explicaría el valor de resistencia elevado de 16 MPa desde el blanco.

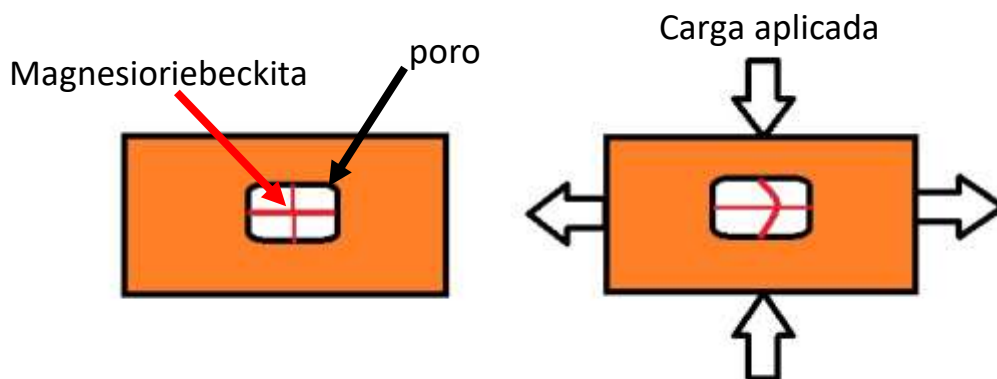


Figura 35.- Posible efecto de la magnesioriebeckita en el poro del ladrillo al aplicar una carga.

Ahora bien, la presencia del aserrín tendría efectos marcados en el ladrillo debido a su incorporación. El primero de ellos es que regula la plasticidad de la mezcla elaboración del ladrillo, tal cómo se observó en el análisis de límites de consistencia. Esta regulación de plasticidad evitó en primera instancia la disminución de grietas en el ladrillo al momento del secado y posterior cocción, esta disminución de defectos daría un incremento de la resistencia. Otro efecto del aserrín esta en la generación de calor localizada en los puntos de contacto entre partículas. Esta energía localizada generada durante la combustión del aserrín, aunado a la alta energía proveniente del alto contenido de partículas reactivas visto en el análisis de tamaño de partícula, generaría los porcentajes de fase amorfa vistos en el análisis RIR de la Tabla 20. Un efecto adicional del aserrín se relaciona al porcentaje de

fase mullita encontrado en la semicuantificación de DRX-RIR en esta temperatura. Según lo visto en referencias la presencia de CO₂ (que en este caso estaría presente debido a la combustión del aserrín) en la atmosfera del horno, propicia la formación de mullita, a partir de la caolinita, a temperaturas menores de 1000 °C (Linares, Huertas, & Capel, 1983). Entonces, se puede establecer que el aumento de resistencia a 23 MPa del ladrillo con aserrín sinterizado a 900 °C sea debido a los porcentajes de fase mullita presentes.

Se presenta una disminución de resistencia en 950 °C. Esta disminución se atribuye a la transición de cuarzo, por efecto de la temperatura, primero a cuarzo β y después a cristobalita (Bradley, 1951). Esta transición generará un cambio en volumen (descrito en apartados anteriores,) provocando la aparición de grietas dentro del cuerpo del ladrillo, las cuáles fueron vistas en el análisis de MEB.

En 1000 °C se presenta un incremento en la resistencia con respecto al lote anterior. Esto se atribuye al inicio de la sinterización por fase líquida en la mayor parte del cuerpo del ladrillo. La fase líquida comienza a “sellar” las grietas vistas en 950 °C. Sin embargo, aun se observan algunas grietas de menores tamaños como los mostrados en la Figura 29b, por ello la resistencia aún no se incrementa de manera significativa.

Por otro lado en 1050 °C se da un aumento en la resistencia. Esto debido a la formación en mayor medida de la fase mullita a partir de la descomposición de la caolinita y la montmorillonita (Gonzalez Peña & Alvarez-Estrada, 1973). A la temperatura de 1100 °C se obtiene la resistencia más alta de los cinco lotes. Se atribuye esto al alto porcentaje de la fase mullita en ladrillo visto en el análisis y al porcentaje de material amorfo presente visto en el análisis RIR, además de la mayor eliminación de la porosidad visto en las fotomicrografías de MEB.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas físicas. Los resultados de densidad de las probetas son mostrados en la Figura 36.

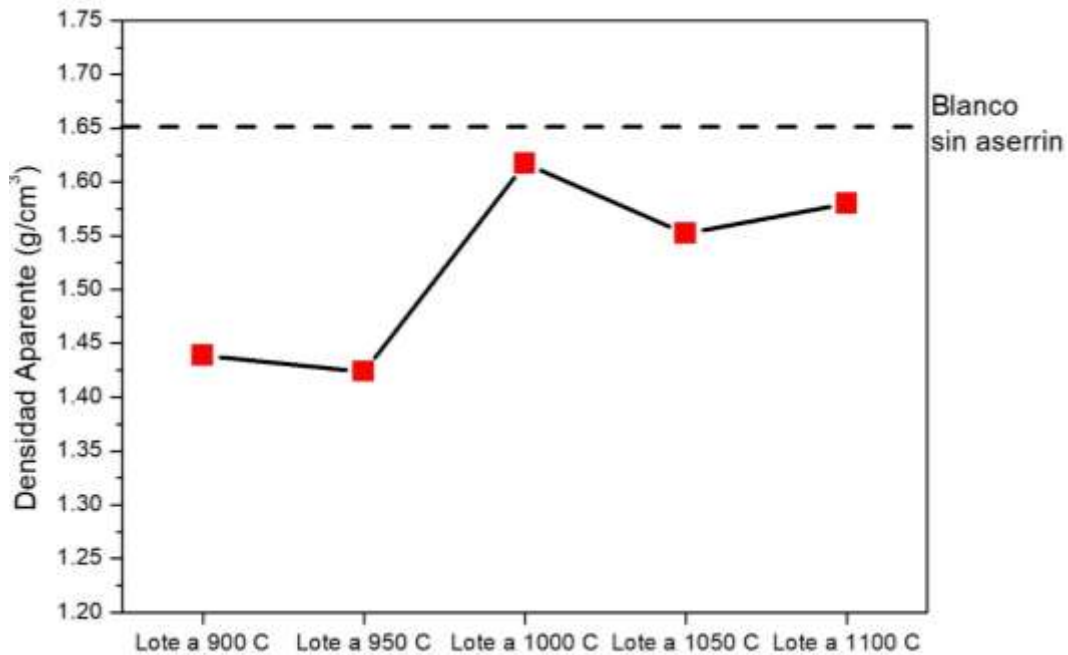


Figura 36.- Efecto de la temperatura en la densidad aparente de los ladrillos de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec, agregando 20 % vol. de aserrín.

De la Figura anterior se aprecia un incremento de la densidad a partir de los 1000 °C, donde los valores más altos son los obtenidos a 1000 y 1100 °C respectivamente. Estos resultados de densidad concuerdan con lo propuesto en el análisis DRX-RIR de que a 1000 °C, el principal mecanismo de sinterización es por fase líquida. La fase líquida resultante sella algunos canales de poros (como se apreció en el análisis MEB). Recordando la semicuantificación de fases por DRX-RIR, se tiene en 1100 °C de sinterización el mayor porcentaje de material amorfo y en 1050 °C el segundo más alto. Los altos valores y tamaños de porosidad observados en las fotomicrografías de MEB provocan la densidad baja en los 900 y 950 °C. Estos valores de densidad tendrán influencia con otras propiedades físicas del ladrillo.

El sistema de porosidad del ladrillo es, de hecho, el elemento principal, que correlaciona los materiales de construcción y determina su durabilidad. Los resultados obtenidos para porosidad se muestran en la Figura 37.

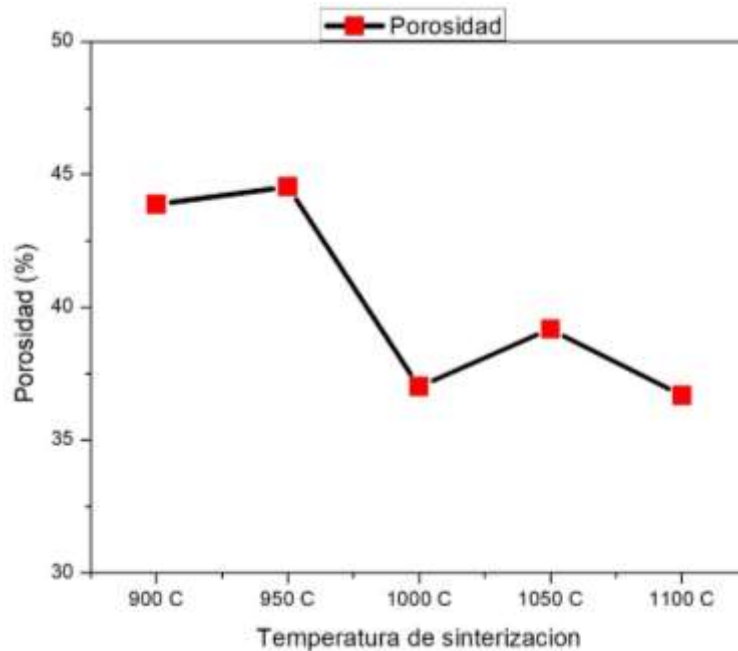


Figura 37.- Efecto de la temperatura de sinterización en los porcentajes de porosidad de los ladrillos de Tulancingo-Santiago Tulantepec, agregando 20 % vol. de aserrín.

Observando la Figura anterior se tiene que los mayores valores de porosidad están en las temperaturas de 900 y 950 °C respectivamente. Al no iniciarse aún de manera más general la sinterización por fase líquida se presentan poros de tamaños grandes y conectados entre sí, causados en gran parte por el aserrín.

A partir de 1000 °C la porosidad disminuye, al presentarse el crecimiento del grano y el aumento de la fase amorfa. En 1050 °C se observa un ligero incremento en el porcentaje de porosidad, esto se atribuye a la presencia de posibles micro-grietas (que en algunos casos pudieron observarse en la superficie de las probetas) generadas por la contracción del ladrillo, por lo que se intuye que en algunos casos se presentaron de manera interna.

En la mayor temperatura, 1100 °C, se observa una disminución en la porosidad, esto debido a que la fase líquida sella las grietas que podrían haberse generado en 1050 °C, aunado a la cantidad de fase amorfa observada en el análisis de DRX-RIR.

Los resultados de absorción de agua se muestran en la Figura 38.

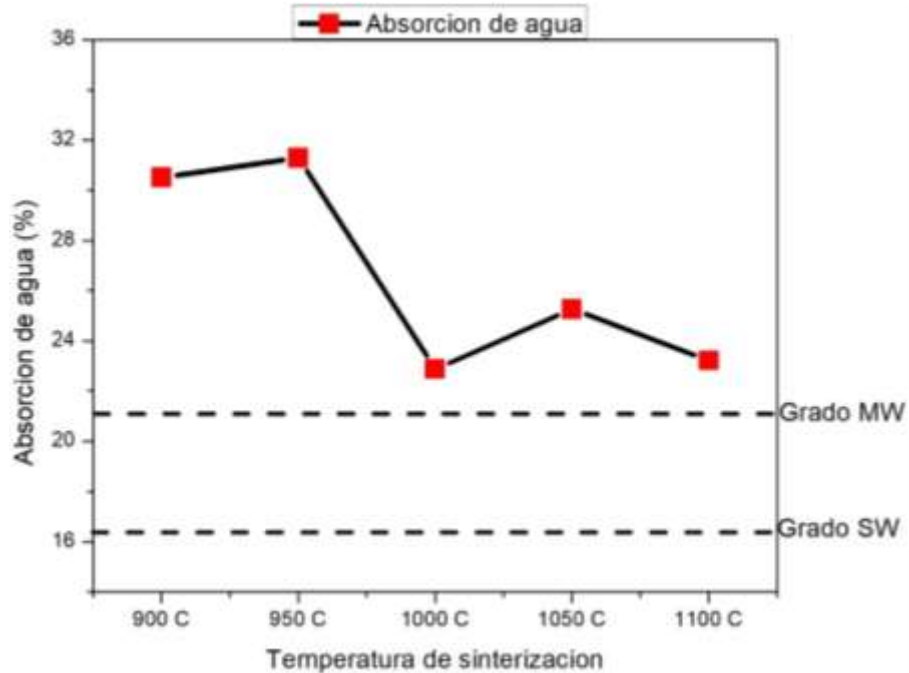


Figura 38.- Efecto de la temperatura de sinterización en la absorción de agua en los ladrillos de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec, agregando 20 % vol. de aserrín. (grados según la norma ASTM C62. Simbología: severing weathering (SW) y moderating weathering (MW)).

De la Figura anterior se corrobora que los lotes de 900 y 950 °C son los que presentan un mayor porcentaje de absorción de agua. El ligero incremento que presenta 950 °C se atribuye a que las grietas conectan los canales de porosidad y por ende absorber un mayor porcentaje de absorción. Con respecto a los lotes sinterizados a partir de 1000 °C, estos presentan comportamientos similares, a excepción de 1050 °C. Cabe señalar que estos últimos 3 lotes se encuentran cercanos a los valores que requieren el grado MW para el cumplimiento de la norma ASTM C62.

Los porcentajes de contracción resultantes respecto a las temperaturas de sinterización se muestran en la Figura 39.

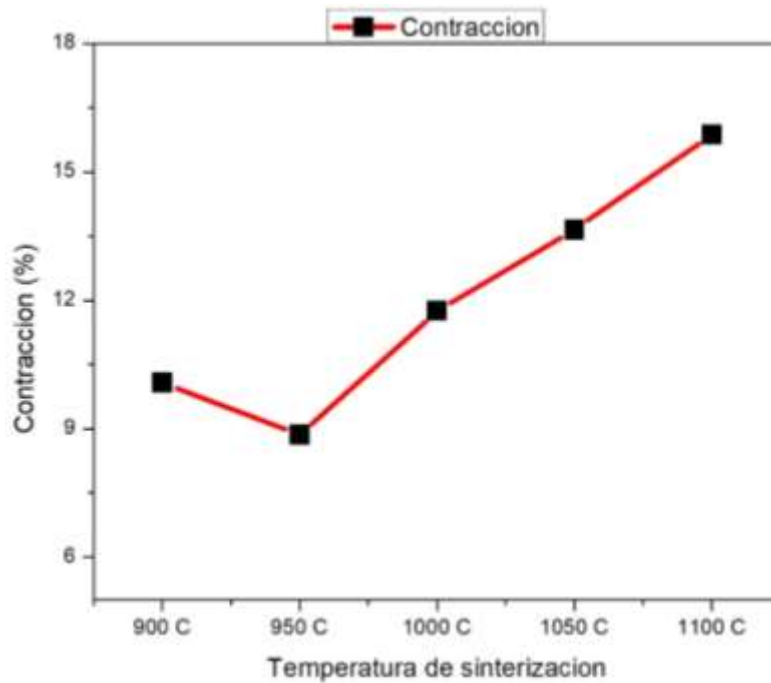


Figura 39.- Efecto de la temperatura de sinterización en la contracción de los ladrillos de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec, agregando 20 % vol. de aserrín.

El lote sinterizado a 1100 °C muestra el mayor porcentaje de contracción, debido a la eliminación de porosidad vista en la Figura 36. A partir de 1000 °C los ladrillos y presentan el inconveniente de superar el 12 % de contracción, valor mínimo para considerar un ladrillo de calidad (Okunade, 2008). Por su parte los sinterizados entre 900 y 950 °C no presentan este inconveniente debido a sus porcentajes de porosidad.

7.3. EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE ASERRIN-VIDRIO Y ASERRIN-PUMICITA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS LADRILLOS

El proposito de esta sección es encontrar un porcentaje de incorporación de vidrio/pumicita con el cual se puedan mejorar algunas propiedades del ladrillo, como la absorción de agua o disminuir la densidad.

7.3.1. Análisis microestructural por microscopía óptica

Se tomaron fotografías de los lotes de 2 %, 3 % y 5 % de incorporación de vidrio/pumicita. Se eligieron estos porcentajes para agilizar los tiempos de análisis. La comparativa de la microestructura generada en el ladrillo al agregar la aserrín-pumicita y aserrín-vidrio se muestra en la Figura 40.

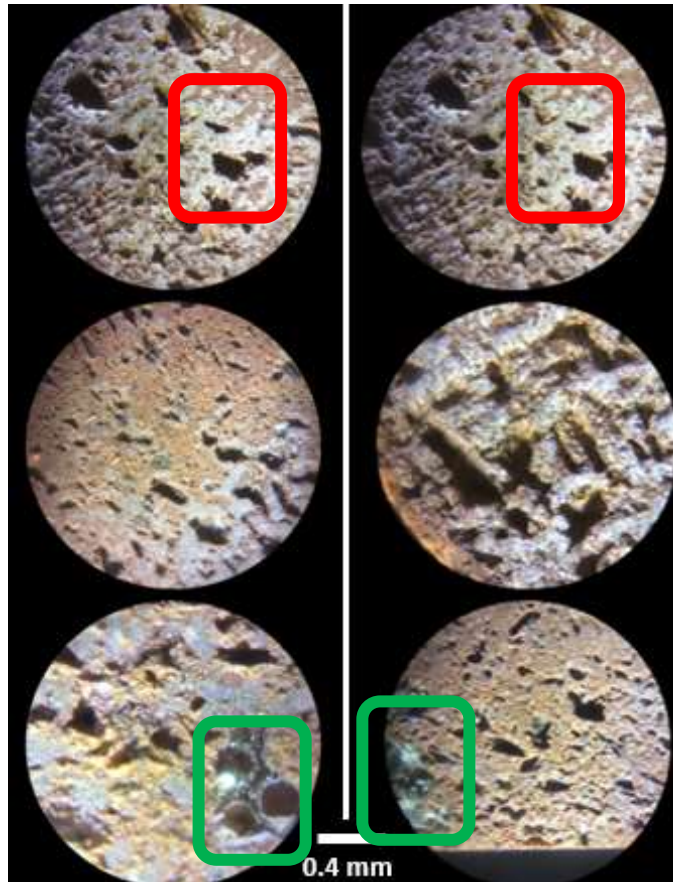


Figura 40.- Efecto en la microestructura al incorporar aserrín-pumicita (fotomicrografías del lado izquierdo) y aserrín-vidrio (fotomicrografías del lado derecho). En orden de arriba hacia abajo de la ilustración están los lotes de 2 % de incorporación, 3 % de incorporación y 5 % de incorporación.

En la Figura anterior se observa, en el caso de la pumicita, regiones, marcadas en color rojo, con apariencia “blancuzca” en la superficie en los lotes de 2 y 3 %. En primera instancia esto sería debido a un efecto provocado por las fases de la pumicita como la alúmina o una reacción de los feldespatos cálcicos, dando esta coloración (Gencel, 2015). En el caso de la probeta de 5 % se aprecia una zona, marcada en color verde, con un aspecto vitreo translucido.

Para el caso de las probetas donde se agregó vidrio en los porcentajes de 2 y 3% se observan algunos poros con material amorfo dentro del mismo, siendo en 2 % donde se tiene más cantidad de poros con estas características. La mayor presencia

de esta característica se atribuye a la baja temperatura de ablandamiento del vidrio. Este hecho provocaría que en el lote de 5 % se aprecie una zona vítrea translúcida considerable, similar a la encontrada en 5 % de pumicita (igual marcada en verde).

7.3.2. Análisis DRX-RIR para las muestras con la incorporación de vidrio y pumicita

La Figura 41 muestra los resultados del análisis DRX para las probetas elaboradas con aserrín-vidrio.

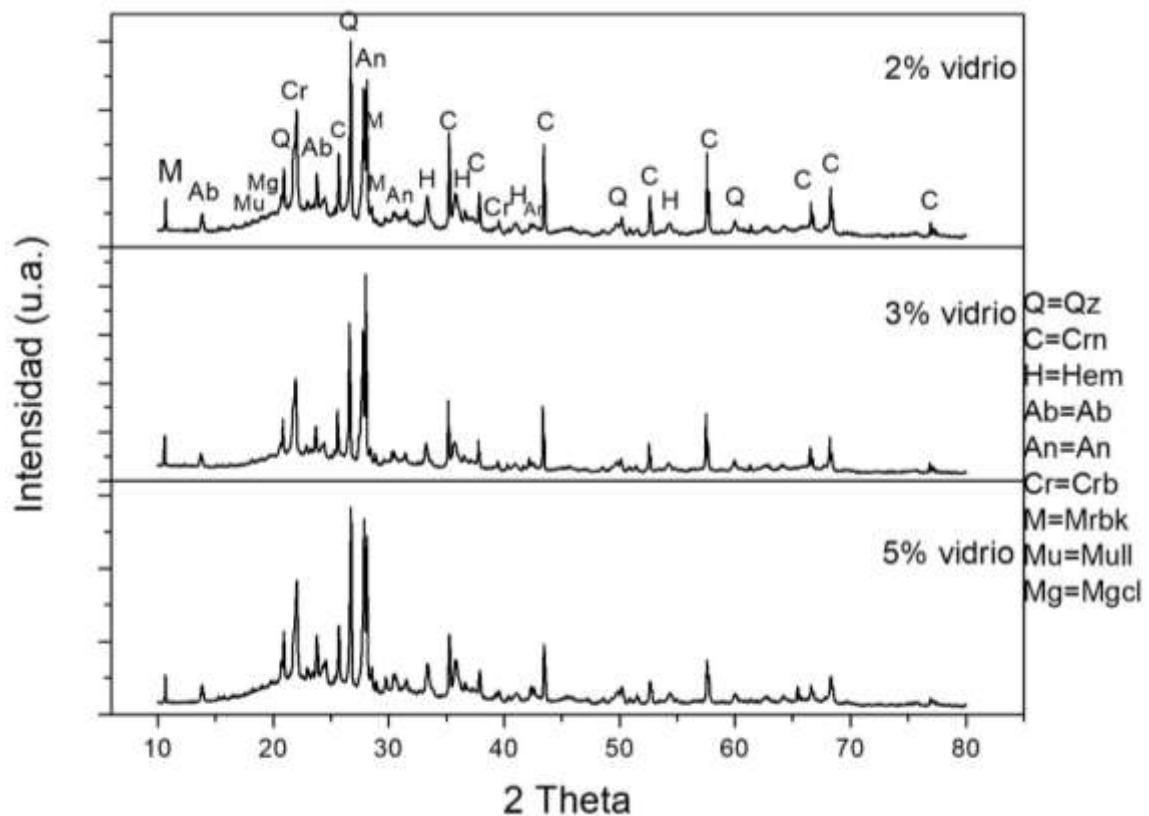


Figura 41.- Difractogramas de ladrillos elaborados con 20 % de aserrín, incorporando vidrio en 2, 3 y 5 %, sinterizados a 900 °C. Simbología (Whitney & Evans, 2010): Cuarzo (Qz), Albita (Ab), Hematita (Hem), Anortita (An), Mulita (Mull), Cristobalita (Crb), Corindón (Crn) y Magnesioriebeckita (Mrbk).

De la Figura anterior destaca la casi nula intensidad de la fase mullita, esto indicaría que el vidrio tendría un efecto en la formación o no formación de fases. Otro aspecto importante es que se tiene presencia de magnesioriebeckita, con una intensidad muy similar en los 3 porcentajes de adición de vidrio. Los resultados de la adición del vidrio muestran que, en 3 % de adición, algunas fases como el caso del cuarzo y la albita disminuyen su intensidad en comparación con los otros porcentajes. En el caso de la anortita se observa como fase principal en este porcentaje. Al incorporar 5 % de vidrio se observan intensidades en las fases muy similares a los obtenidos en 2 %.

La Figura 42 muestra los resultados del análisis DRX para las probetas elaboradas con aserrín-pumicita.

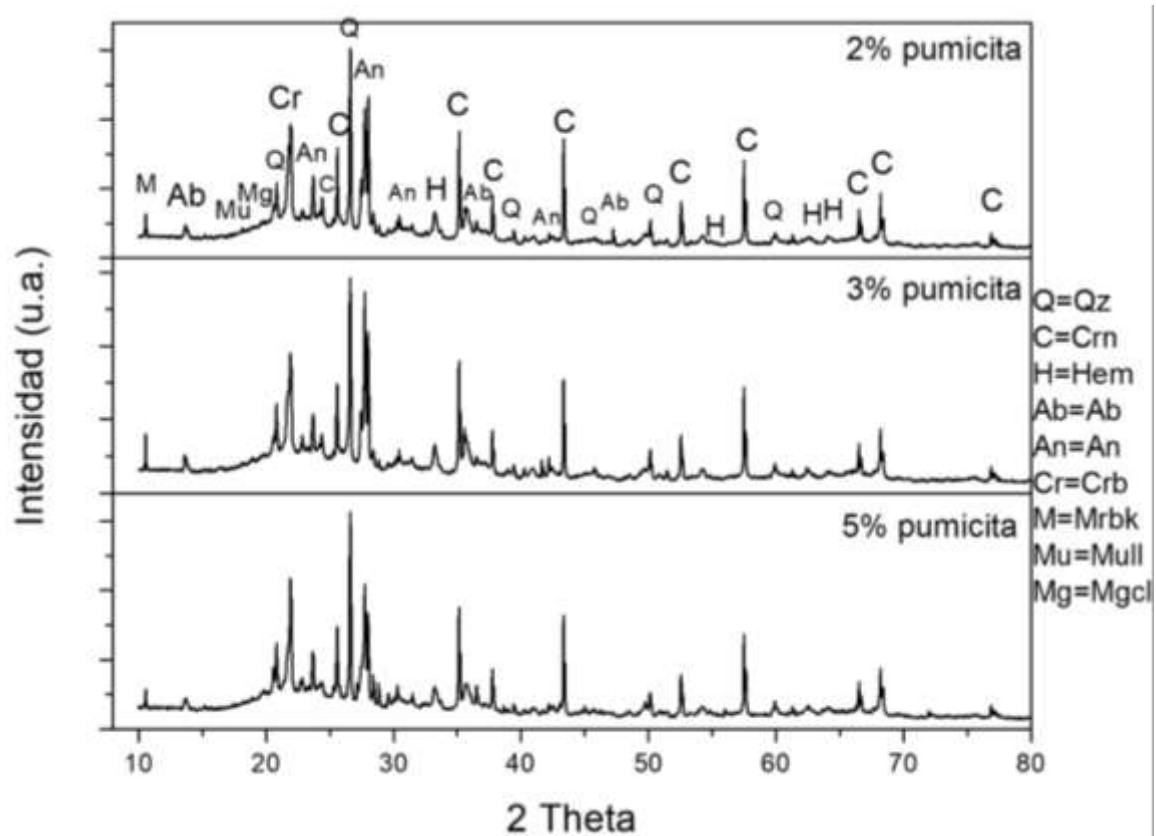


Figura 42.- Difractogramas de ladrillos elaborados con 20 % vol. de aserrín, incorporando pumicita en 2, 3 y 5 %, sinterizados a 900 °C. Simbología (Whitney & Evans, 2010): Cuarzo (Qz), Albita (Ab), Hematita (Hem), Anortita (An), Cristobalita (Crb), Corindón (Crn) y Magnesioriebeckita (Mrbk).

Analizando la Figura 41, se observa que, al igual que con el vidrio, la fase mullita no presenta mucha intensidad. En el caso de la incorporación de la pumicita se tiene comportamientos muy similares entre los 3 porcentajes de adición, únicamente se observa una disminución en la intensidad del pico principal de anortita en 5 %. Esto podría indicar un aumento de fase amorfa en el ladrillo por efecto de la fusión de esta fase. Al igual que en el caso de la adición del vidrio, la presencia de magnesioriebeckita es muy similar en cuanto a intensidad en los 3 porcentajes de adición de pumicita.

El análisis RIR, tanto de la adición de vidrio como de pumicita, se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22.- Fases minerales identificadas por DRX en muestras incorporando 2, 3 y 5 % de pumicita y vidrio, las fases fueron semi-cuantificadas por RIR con el método de estándar interno (10 % Corindón).

	PDF	MINERALOGIA	ANÁLISIS SEMICUANTITATIVO (% peso)					
			PUMICITA			VIDRIO		
			2 %	3 %	5 %	2 %	3 %	5 %
CUARZO	00-005-0490	SiO ₂ , Cuarzo, bajo	7.79	6.67	7.97			
	01-075-8322	SiO ₂ , Cuarzo				11.02	8.94	11.84
	01-071-0785	SiO ₂ , Cristobalita	2.02	1.63	2.53	3.96	2.10	2.82
FELDESPATOS	00-020-0572	NaAlSi ₃ O ₈ , Albita, desordenada	9.15	5.75	3.75	15.44	18.96	12.66
	00-041-1486	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ , Anortita, ordenada	19.88	23.52	15.86	41.24	29.22	42.17
HEMATITA	01-089-8104	Fe ₂ O ₃ , Hematita, sintética,	1.04	1.08	1.44	3.58	1.63	3.01
MAGNESIO-REBECKITA	00-029-1236	Na ₂ Mg ₃ Fe ₂ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ , Magnesioriebeckita	2.51	3.63	0.92	4.24	4.9	4.46
MULLITA	00-089-2814	Al (Al _{0.83} Si _{1.08} O _{4.85}), Mullita, sintética	0.98	0.81		3.58	0.86	3.01
AMORFO			56.63	56.91	67.53	16.94	33.39	20.03

De la Tabla 22 se observa que, en el caso de la adición de vidrio, se da una disminución en la formación de fase amorfa en el ladrillo en comparación con los ladrillos con únicamente aserrín. Esta disminución de fase amorfa podría explicarse al comparar los porcentajes de anortita vistos en el análisis de DRX-RIR del ladrillo sin aditivo, observando que al agregar vidrio este porcentaje se duplica. Podría presentarse una recristalización de feldespatos sódicos y potásicos, recordando que en la elaboración del vidrio se incorporan óxidos con estos iones. Este fenómeno de formación o inhibición que provoca la incorporación de vidrio que se propone necesita una investigación más a fondo.

En el análisis para la pumicita se tiene un efecto contrario al del vidrio, al tener un contenido de fase amorfa similar al observado en las mayores temperaturas de sinterización. Se observa una disminución en porcentajes de fases de cuarzo y de feldespatos. Se propone que la fase líquida fundió porcentajes de estas fases al avanzar a través del cuerpo del ladrillo.

7.3.3. Efecto en las propiedades mecánicas y físicas del ladrillo en función del porcentaje de incorporación de vidrio y pumicita.

Los resultados de las pruebas de compresión tanto del vidrio como de la pumicita se presentan en la Figura 43.

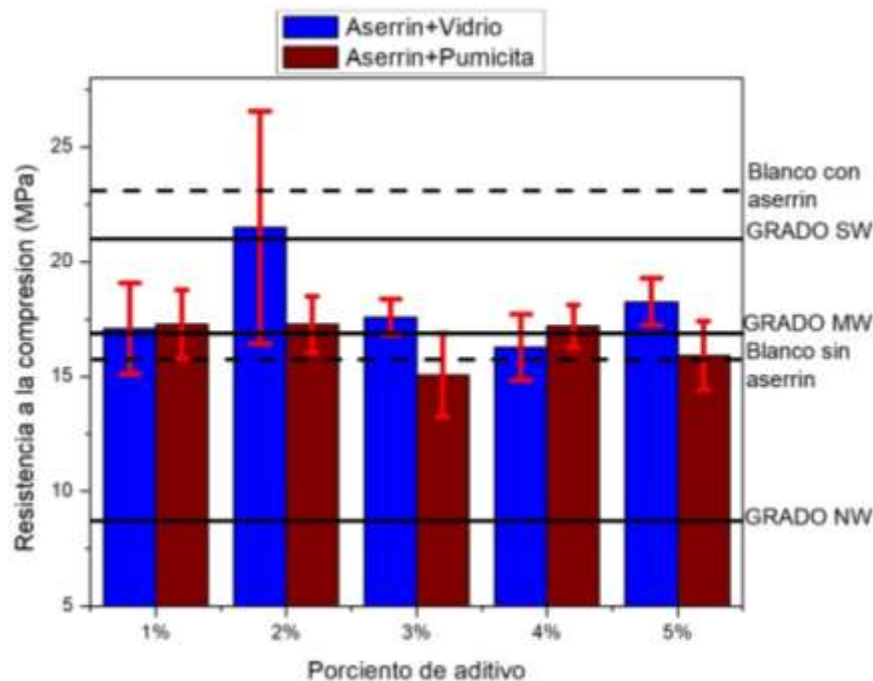


Figura 43.- Comparativa de la resistencia a la compresión obtenida por porcentajes de incorporación de aditivo más 20 % vol. de aserrín, con respecto a los valores mínimos requeridos según la norma ASTM C62 y con respecto a los blancos.

En la Figura anterior se observa que en todos los porcentajes en sustitución de los aditivos disminuye la resistencia mecánica del ladrillo con respecto al blanco con aserrín. Por otra parte, en la mayoría también se da un ligero aumento con respecto al blanco sin aserrín. La mayoría de los lotes está dentro del rango para la categoría MW de la norma ASTM C62.

El lote de 2 % de vidrio más 20 % vol. de aserrín es el que discrepa con el resto de los lotes al presentar una resistencia similar a la del “blanco” con aserrín, sin embargo, se debe considerar la desviación estándar de este lote al ser el de mayor valor de todos.

Un aspecto a considerar es la disgregación que el vidrio que pudo tener este lote con respecto a los demás. Al realizar una inspección del adobe y romperlo, se encontró la presencia de algunos cúmulos del aditivo en el cuerpo. Estos cúmulos de vidrio actuarían en detrimento de la resistencia mecánica del ladrillo.

Un indicativo de la disminución en la resistencia mecánica se presenta desde la inspección visual de la muestra (y posterior análisis por microscopio óptico). En el cuerpo se apreciaba una superficie con texturas e inclusive protuberancias. Cabe recordar que en el análisis de Difracción de Rayos X el vidrio y la pumicita tenían presencia de fase cuarzo. La disminución de resistencia sería causada por la transformación del cuarzo a sus polimorfos.

Este fenómeno se apreció al tomar una fotomicrografía de un ladrillo que se le incorporó vidrio (véase Figura 44), en la cual se observan grietas en la superficie. Este fenómeno se observó en la mayoría de las probetas que se incorporó vidrio, a excepción del lote incorporando 1 %.



Figura 44.- Fotografía tomada a probeta elaborada incorporando vidrio en 5 % peso, dónde se aprecian grietas alrededor de una protuberancia de vidrio.

Por su parte, las probetas elaborados con pumicita mantienen comportamientos similares en 3 puntos de la gráfica, cumpliendo con el grado MW de la norma. A pesar de tener un porcentaje mayor de fase amorfa, prácticamente no hay presencia de la fase mullita.

La casi nula presencia de la fase mullita en los lotes con los aditivos provocaría que no se presente una mejora de la resistencia mecánica.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas físicas. Los resultados de densidad de las probetas son mostrados en la Figura 45.

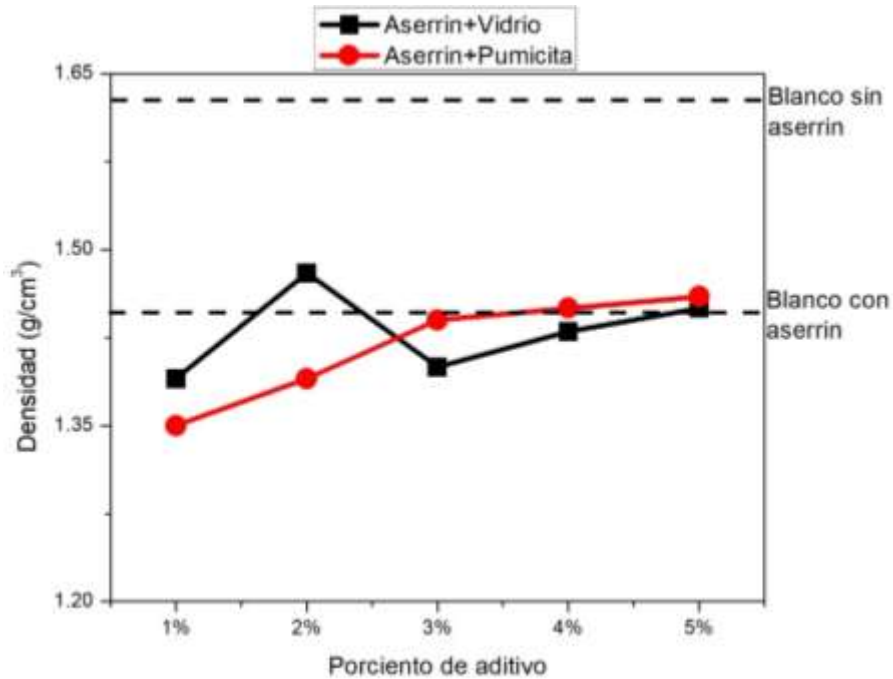


Figura 45.- Valores de densidad del ladrillo sinterizado a 900 °C agregando 20 % vol. de aserrín en función del porcentaje de sustitución de vidrio/pumicita.

Analizando la Figura 45 se tiene que el aditivo que provoca una disminución más marcada de la densidad es la pumicita en bajos porcentajes de incorporación a la mezcla. A partir de un 3 % de incorporación de este aditivo se tiene un comportamiento similar, superando a los valores de densidad del vidrio en los mismos porcentajes de adición. Los valores de densidad de 1 y 2 % de vidrio, como se observó en el análisis RIR, inhibirían la formación de fase líquida, provocando que los poros no sean recubiertos y por ende ocupen más volumen. Al agregar pumicita en porcentajes mayores a 2 % se tienen densidades menores en comparación con el blanco con aserrín.

Los valores de porosidad de los ladrillos se presentan en la Figura 46.

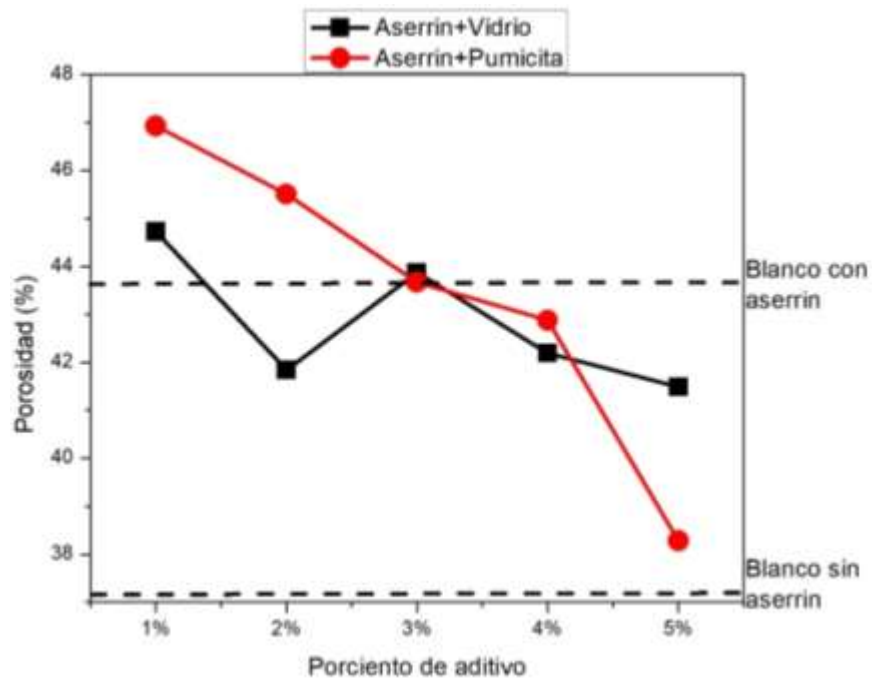


Figura 46.- Valores de porosidad resultantes del ladrillo sinterizado a 900 °C agregando 20 % vol. de aserrín en función del porcentaje de sustitución de vidrio/pumicita.

De la Figura 46 se observa como al añadir la pumicita se tiene cierta tendencia del ladrillo para disminuir su porosidad, concordando con los porcentajes de material amorfo obtenidos del análisis de DRX. Al agregar vidrio no se observan diferencias considerables en los valores de porosidad comparandolos con el blanco con aserrín.

Los resultados de absorción de agua de los ladrillos se presentan en la Figura 47.

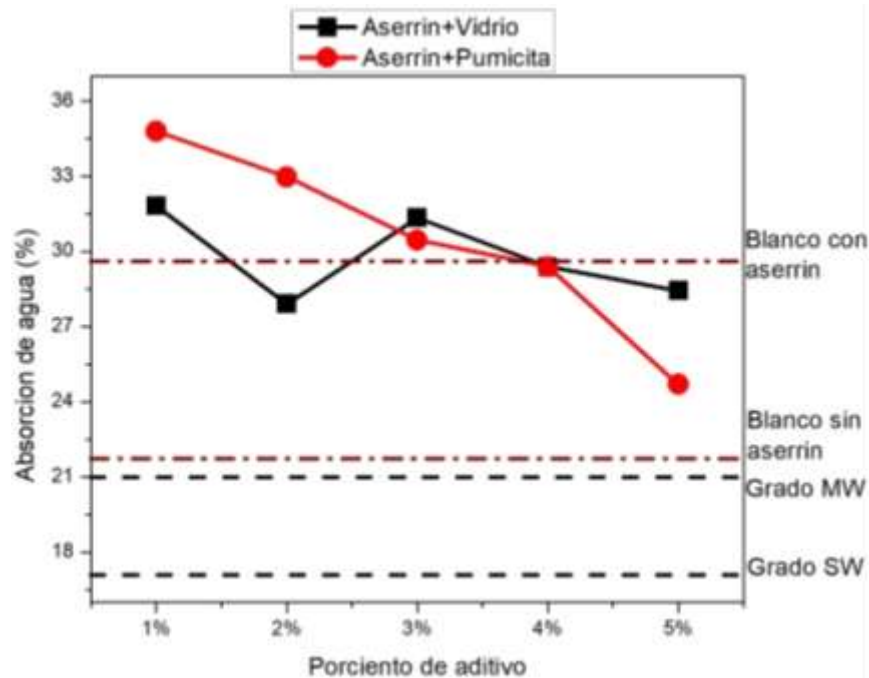


Figura 47.- Valores de absorción de agua del ladrillo sinterizado a 900 °C agregando 20 % vol. de aserrín en función del porcentaje de sustitución de vidrio/pumicita.

En la Figura 47 se observa que ningún lote logra alcanzar ningún rango de la norma ASTM C62. Los valores de 1 % del vidrio y pumicita presentan los porcentajes mayores con 35 % para la pumicita y un 32 % para el vidrio. Se tiene un comportamiento descendente constante al incorporar más cantidad de la pumicita al ladrillo. En el caso del vidrio se tiene un comportamiento, en el caso del 2 % de incorporación, de una menor absorción que la obtenida en el “blanco con aserrín”, bajando en un 2.5 % aproximadamente.

7.4. EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE ASERRÍN Y ASERRÍN-VIDRIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LADRILLOS ELABORADOS CON MATERIAS PRIMAS CON DISTINTA MINERALOGÍA A LA IDENTIFICADA EN LA REGIÓN DE TULANCINGO-SANTIAGO TULANTEPEC, HIDALGO.

El propósito de esta sección es comprender y relacionar las propiedades finales de los ladrillos con base en características como la mineralogía y tamaños de

partícula de las materias primas de las regiones productoras de ladrillo. En este caso se comparan las materias primas de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec, ambas ubicadas en el Estado de Hidalgo, México.

7.4.1. Comparativa de las características mineralógicas de la materia prima y propiedades mecánicas y físicas de ladrillos de las regiones Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec

Una de las características más importantes que relacionan las propiedades finales del ladrillo es la mineralogía de las materias primas que se implementan.

Los resultados de DRX-RIR de las materias primas de Actopan-El Arenal, así como los resultados de DRX-RIR, y pruebas mecánicas y físicas de los ladrillos de Actopan-El Arenal sin aditivos fueron tomados del trabajo de Ordoñez (2018).

El análisis DRX-RIR de las materias primas para la elaboración de los ladrillos de las regiones de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23.- Análisis por el método RIR-DRX, de las fases minerales presentes en las materias primas de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec.

	PDF	Mineralogía	Análisis Semicuantitativo (% peso)								
			ACT9	Total	ACT10	Total	ROM1	Total	SANTUL1	Total	
Cuarzo	01-070-7344	Cuarzo	5.7	5.7	20.0	26	13.30	22.10	40.80		
	00-005-0490	Cuarzo								11.2	
	00-046-1045	Cuarzo									6.10
	01-071-3839	Cristobalita								2.10	
	00-039-1425	Cristobalita								5.9	
	00-016-0152	Tridimita									12.60
Feldspatos	01-076-0926	Albita cálcica		61.1	24.6	69	63.50	34.10	34.10		
	00-010-0393	Albita	31.5								
	00-020-0548	Albita calcica								17.10	
	00-041-1486	Anortita								44.0	
	01-078-0933	Anortita sódica									46.40
	00-018-1202	Anortita sódica	20								
	00-008-0048	Ortoclasa	9.6								
Filosilicatos	01-080-0885	Caolinita					8.60	7.30	7.30		
	00-003-0014	Montmorillonita									7.30
Micas	01-070-1869	Moscovita	32.5	33.2	1.7	3.7					
	01-078-4316	Vermiculita	0.7								
	00-034-0166	Vermiculita			2.0						
Inosilicatos	00-043-0665	Ferrotschermakita			1.1	1.10	2.80	2.80	8.00		
	00-020-0656	Magnesioriebeckita									
	00-020-1237	Magnesioriebeckita								8.00	
Neso-silicato	01-076-6006	Magnesiochloritoide					10.20	10.20	8.40	8.40	
Hematita	00-033-0664	Hematita			0.7	0.7	1.60	1.60	1.40	1.40	
	01-089-8104	Hematita									1.60
TOTAL			100		100		100		100		

De la Tabla anterior destaca que la materia prima de Actopan-El Arenal no presentó ninguna fase de mineral arcilloso. De este material resaltan los porcentajes de los distintos tipos de mica, en cambio como se mostró en apartados anteriores. Por su parte la materia prima de Tulancingo-Santiago Tulantepec presenta, tanto caolinita como montmorillonita.

También se tiene que la materia prima de Tulancingo presenta una mayor cantidad de fases de cuarzo y sus polimorfos. Por otra parte se tiene una mayor porcentaje en general de feldspatos en el material de Actopan. En cuanto a los porcentajes de inosilicatos se tiene que el material ACT10 presenta este tipo de mineral, sin embargo en un porcentaje menor que en las materias primas de Tulancingo. La diferencia principal esta en las formas de estos minerales, destacando la magnesioriebeckita y su estructura fibrosa.

En cuanto a la presencia de fase hematita, se observa que en Tulancingo esta presente en las 2 materias primas y por ende un mayor contenido, mientras que en Actopan únicamente en el material ACT10.

En la Tabla 24 se muestra la semicuantificación de fases una vez que los ladrillos fueron sinterizados.

Tabla 24.- Análisis semicuantitativos por el método RIR-DRX de los ladrillos sinterizados a 900 °C de las regiones de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec.

	PDF	Mineralogía	Análisis Semicuantitativo (% peso)			
			Actopan-El Arenal	TOTAL	Tulancingo-Santiago Tulantepec	TOTAL
Cuarzo	01-070-7344	Cuarzo	13.08	14.48		20.64
	00-005-0190	Cuarzo			16.41	
	01-071-3839	Cristobalita	1.4			
	01-074-9378	Cristobalita			4.23	
Feldespatos	01-076-0926	Albita cálcica	21.38	28.00		20.93
	00-020-0572	Albita			9.33	
	00-018-1202	Anortita sódica			11.60	
	00-020-0528	Anortita	6.62			
Hematita	01-089-8104	Hematita		2.58	1.94	1.94
	00-024-0072	Hematita	2.58			
	00-089-2814	Mullita			2.78	2.78
	00-020-0656	Magnesioriebeckita			3.0	3.0
	01-076-6006	Magnesiocloritoide			1.7	1.7
Amorfo			54.94		49.01	

De la Tabla 24 se observa la disminución en ambas regiones de los contenidos de cuarzo después de la sinterización del ladrillo. De igual manera que con el cuarzo, se da una disminución en porcentaje de feldespatos con respecto al visto en la materia prima. El ladrillo de Actopan presenta más porcentaje de fase amorfa, atribuido a la mayor presencia feldespatos en la materia prima. La presencia de mullita y magnesioriebeckita en el ladrillo de Tulancingo (fases no presentes en Actopan), explicaría la mayor resistencia mecánica del ladrillo.

7.4.2. Efecto de la incorporación de aserrín en las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos de la región de Actopan-El Arenal; comparativa con ladrillos de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec

Se analizó el comportamiento mecánico del ladrillo de Actopan al agregar aserrín a la mezcla de elaboración. Su comparación con los valores del ladrillo de Tulancingo se muestra en la Figura 48.

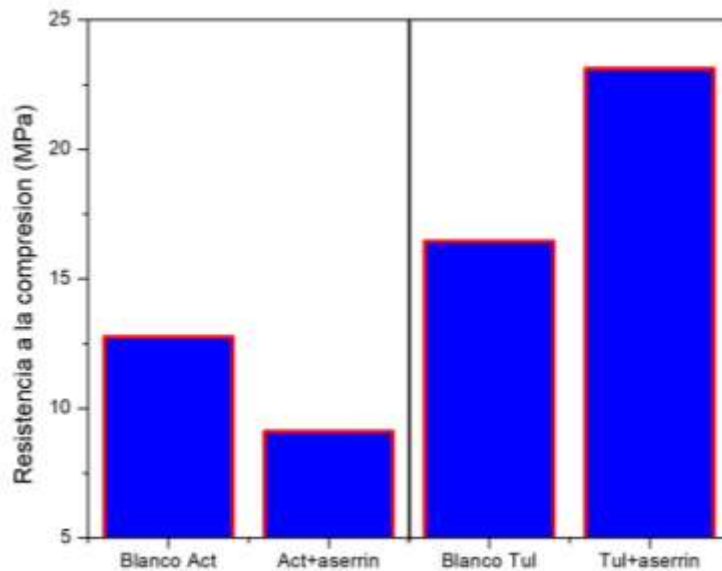


Figura 48.- Comparativa de la resistencia a la compresión de los ladrillos de la región de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec, sinterizados a 900 °C, agregando un 20 % vol. de aserrín.

De la Figura anterior se aprecia cómo al agregar aserrín al ladrillo de Actopan este reduce su resistencia mecánica. Esta disminución se atribuye al aumento de la porosidad que crea la materia orgánica al combustionar. Esta nueva porosidad haría de concentrador de esfuerzos y por ende la disminución de resistencia. Por su parte la incorporación de aserrín en el materia de Tulalancingo provocó los efectos descritos en puntos anteriores de esta investigación.

Los resultados de las pruebas físicas se muestran en la Figura 49.

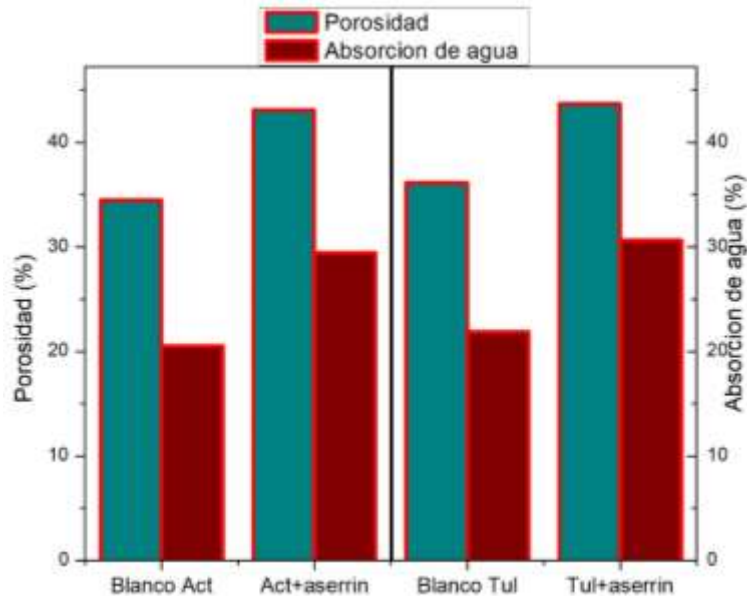


Figura 49.- Comparativa de la porosidad y absorción de agua de los ladrillos de las regiones de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec, sinterizados a 900 °C, incorporando un 20 % en vol. de aserrín.

De la Figura 49 se observan valores muy similares en ambos aspectos en los 2 ladrillos. Se presenta un aumento en la porosidad del ladrillo de Actopan en un 25 % con respecto al blanco. Sin embargo, también se aumenta la absorción de agua en un 43 %.

La densidad del blanco de Actopan es de 1.62 g/cm³ y para el blanco de Tulancingo de 1.65 g/cm³. Se tiene que en general los ladrillos si aditivos presentan en general una densidad entre 1.6 g/cm³ y 1.7 g/cm³. Para los ladrillos incorporando 20 % vol. de aserrín se tiene un valor de 1.46 g/cm³ para Actopan y de 1.43 g/cm³ en Tulancingo. Se tiene que al agregar aserrín en porcentajes de volumen se reduce aproximadamente en dicho porcentaje la densidad del ladrillo.

Cabe señalar que, aunque ambos ladrillos tienen valores altos de absorción de agua, cumplen con el rango NW de la norma ASTM C62. La norma ASTM C62 se basa en regiones donde existen condiciones climáticas de nieve (cosa muy poco común en el centro y sur de México), por lo que estos ladrillos bien pueden ser utilizados en estas regiones de México.

7.4.3. Efecto de la incorporación de aserrín-vidrio en las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos de la región de Actopan-El Arenal, comparativa con ladrillos de la región de Tulancingo-Santiago Tulantepec

De manera inicial se decidió analizar el comportamiento de la incorporación de únicamente vidrio en porcentajes desde 1-5 % en la mezcla de elaboración del ladrillo de Actopan. Esto con el fin de encontrar un porcentaje idóneo de este aditivo, además de analizar cómo influye la incorporación de material reactivo en las propiedades mecánicas del ladrillo.

Los resultados del análisis de resistencia mecánica se muestran en la Figura 50.

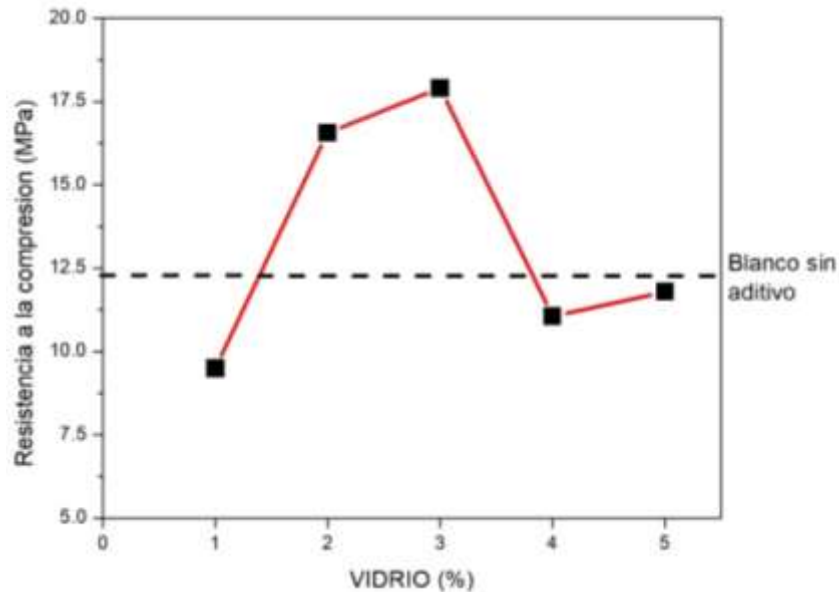


Figura 50.- Efecto de la adición de vidrio reactivo en la resistencia mecánicas del ladrillo de Actopan-El Arenal sinterizado a 900 °C.

Se observó que la adición de 3 % de vidrio reactivo generó la mayor resistencia mecánica con un valor de 18 MPa, representando un aumento del 45 % con respecto al blanco. Este incremento se explicaría en primera instancia a la cantidad de partículas reactivas incorporadas y su influencia en la creación de fase líquida.

Otra de las causas sería debido al bajo contenido de cuarzo en esta materia prima. Debido a este bajo contenido de cuarzo no afectaría en demasía el cambio en volumen de la transición de cuarzo α a cristobalita β . Se observa al agregar 4 y 5 % de aditivo se da una disminución de resistencia mecánica, manteniendo valores similares entre estos dos porcentajes.

Una vez establecido que el porcentaje óptimo de vidrio para incorporar al ladrillo de Actopan fue 3 %, se procedió a hacer un lote agregando además de un 20 % en volumen de aserrín. Se compararon las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos de Tulancingo. En la Figura 51 se presentan los resultados de la prueba de compresión.

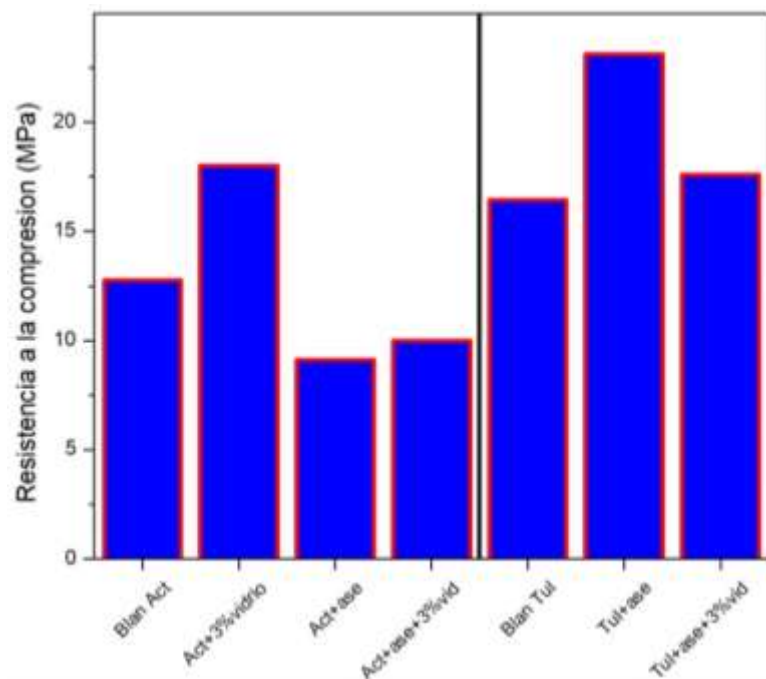


Figura 51.- Comparativa del efecto de incorporación de 3 % de vidrio y 20 % vol. de aserrín, en la resistencia mecánica de los ladrillos de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec, sinterizados a 900 °C.

Para un análisis más detallado de la Figura 50 se hará uso de una Tabla de “posibles causas” como la presentada en la sección 7.2.4. Las posibles causas son presentadas en la Tabla 25.

Tabla 25.- Posibles causas de las resistencias a la compresión de los ladrillos de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec.

	Presencia de magnesioriebeckita	Presencia de mullita	Partículas reactivas	Presencia de aserrín	Resistencia a la compresión (MPa)
Blanco Actopan	NO	NO	NO	NO	12.00
Blanco Tulancingo	SI	NO	SI	NO	16.00
Actopan con vidrio	NO	NO	SI	NO	18.00
Actopan con aserrín	NO	NO	NO	SI	9.00
Tulancingo con aserrín	SI	SI	SI	SI	23.00
Actopan con aserrín y vidrio	NO	NO	SI	SI	10.00
Tulancingo con vidrio y aserrín	SI	MUY POCA	SI	SI	16.00

De la Tabla 25, comparando los blancos de las regiones, se tiene que en Actopan no se tiene presencia de las posibles causas de la alta resistencia mecánica en los ladrillos, mientras que en Tulancingo se tiene presencia de magnesioriebeckita y de alto contenido de partículas reactivas. Por otra parte, se tiene que al incorporar partículas reactivas en Actopan se da un aumento significativo en la resistencia mecánica. Este incremento es atribuido (a expensas del estudio de DRX-RIR) a la formación de fase líquida producto de la alta energía proveniente del material reactivo, que en este caso sería aportada por el vidrio.

Al incorporar aserrín a los ladrillos se tiene una marcada diferencia entre las resistencias mecánicas. Se observa que, sin la presencia de partículas reactivas,

magnesioriebeckita o mullita, la alta porosidad resultante del aserrín actuaría como puntos concentradores de esfuerzos.

Al incorporar partículas reactivas y aserrín se da un ligero incremento en la resistencia en Actopan y una menor resistencia en Tulancingo. En el caso de Actopan que, a pesar de contar con presencia de partículas reactivos, esta cantidad de partículas reactivas no sería la suficiente para promover una cantidad suficiente de fase amorfa que ayude a que no se vea afectada la microestructura del ladrillo por la cantidad de porosidad. En cuanto a las probetas de Tulancingo, se tiene lo propuesto en el apartado 7.3.3.

Las pruebas físicas en base a la norma ASTM C373 se muestran en la Figura 52.

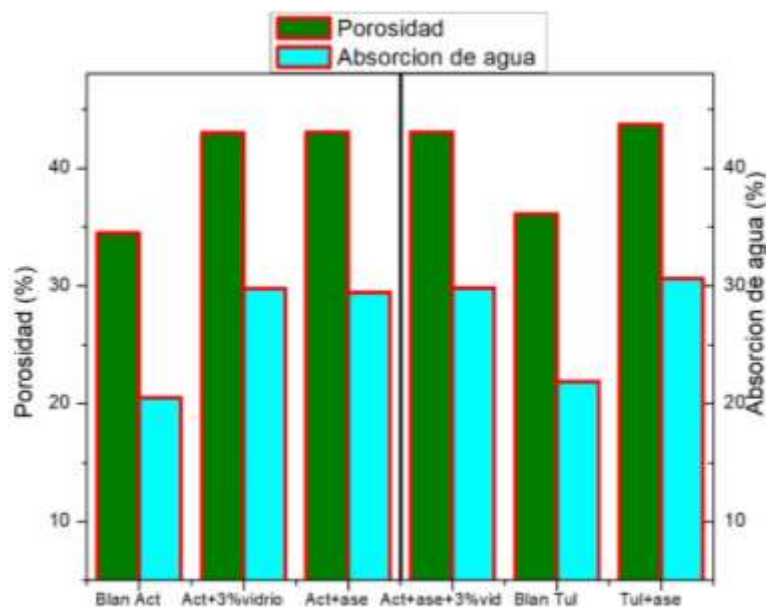


Figura 52.- Comparativa del efecto de la incorporación de 3 % peso de vidrio y 20 % vol. de aserrín en la porosidad y la absorción de agua en los ladrillos de la región de Actopan-El Arenal y Tulancingo-Santiago Tulantepec, sinterizados a 900 °C.

De las pruebas físicas se tiene que la incorporación del vidrio disminuye un poco la absorción de agua en ambas probetas, indicativo de la formación de fase líquida comentada anteriormente. En cuanto a la porosidad los valores se mantienen similares a las probetas que únicamente se le incorporó aserrín.

8. CONCLUSIONES GENERALES

1. Se obtuvo ladrillo elaborado con 20% vol. de aserrín cribado bajo malla #20 y sinterizado a 900 °C con alta resistencia a la compresión (23 MPa, un incremento del 43 % con respecto al blanco), alta porosidad (43 %) y una baja densidad (1.43 g/cm³, una reducción del 14 % con respecto al blanco). Esta alta resistencia se atribuye a la presencia en 2.78 % peso de la fase mullita proveniente de la caolinita, la cual se formó en gran medida por la presencia de CO₂ en la atmosfera del horno por efecto de la combustión y posterior eliminación del aserrín. El 3 % en peso de la fase magnesioriebeckita (fibras minerales conocidas como asbestos) presente en el ladrillo sinterizado a 900 °C refuerza la microestructura del ladrillo y por ende ayuda a esta alta resistencia. También se considera que el 35% en volumen de partículas reactivas presentes en la mezcla de las materias primas influye en la alta resistencia mecánica debido a un aumento en la difusión en estado sólido, causado por un mayor número de puntos de contacto entre partículas, lo anterior relacionándolo con el porcentaje de fase amorfa cuantificado en 900 °C.
2. Se encontró que la temperatura de sinterización de 900 °C es la temperatura donde se obtienen las mejores propiedades. Esta baja temperatura supone además un impacto benéfico en la energía consumida por los hornos.
3. La incorporación de vidrio reactivo o pumicita reactiva (sin aserrín) para la mejora de la resistencia mecánica de ladrillos es viable cuando las materias primas originales cuentan con porcentajes relativamente bajos de partículas reactivas o sin la presencia de minerales arcillosos en su mineralogía. La incorporación de 3 % en peso de vidrio reactivo mejoró la resistencia a la compresión de 12 a 18 MPa en ladrillos sinterizados a 900 °C elaborados con materias primas que no presenta minerales arcillosos en su mineralogía.

-
4. La importancia de un estudio microestructural de las materias primas permite realizar una adecuada selección de aditivos, para así obtener un producto final con una alta resistencia mecánica y una baja densidad.

TRABAJOS A FUTURO

Caracterización de materia prima de diferentes zonas ladrilleras del estado de Hidalgo, México, identificando las fases mineralógicas semi-cuantificando los contenidos de filosilicatos para relacionar dicho contenido con la resistencia mecánica y la temperatura de sinterización.

Caracterización de materia prima de diferentes estados del país de zonas ladrilleras, identificando los materiales con alto contenidos de material reactivo en el cual se podría incorporar material orgánico para disminuir su densidad.

Identificar materias primas con bajos contenidos de filosilicatos y bajos contenidos de material submicrométrico, a estos materiales se les puede añadir una combinación de material reactivo para favorecer su sinterización a baja temperatura y alcanzar valores de resistencia mecánica aceptables.

Trasladar los procedimientos plasmados en esta investigación al sector ladrillero artesanal.

9. REFERENCIAS

- (15 de Abril de 2015). Obtenido de <http://www.miacademiavirtual.com/montepio/nd/fresco/repository/EK000079978.pdf>
- Abbas, S., Saleem, M. A., Kazmi, S. M., & Munir, M. (2017). Production of Sustainable Clay Bricks using Waste Fly Ash: Mechanical and Durability Properties. *Journal of Building Engineering*.
- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz, H. E., Cruz, S. M., & Cruz Chávez, E. (2004). El papel de oxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana (en linea)*, 22 (4), 485-497.
- Agencia Suiza para el desarrollo y la cooperacion, C. (2013). *Red de información de Productores de Ladrillo*. Obtenido de Red de Ladrilleras: <http://www.redladrilleras.net/apps/estadisticas/stats.php>
- Al-Ani, T., & Sarapää, O. (2008). Clay and Clay Mineralogy. Physical-Chemical properties and industrial uses. *GEOLOGIAN TUTKUSKESKUS*.
- Allegretta, I., Eramo, G., Pinto, D., & Heinc, A. (2016). The effect of mineralogy, microstructure and firing temperature on the effective thermal conductivity of traditional hot processing ceramics. *Applied Clay Science*.
- Andrini, L., Gauna, M., Conconi, M., Suarez, G., Requejo, F., Aglietti, E., & N.M., R. (2016). Extended and local structural description of a kaolinitic clay, its fired ceramics and intermediates: An XRD and XANES analysis. *Applied Clay Science*, 39-45.
- Arndt, J., & Haberle, F. (1973). Thermal Expansion and Glass Transition Temperatures of Synthetic Glasses of Plagioclase-Like Compositions. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 175-183.
- ASTM. (2012). *ASTM "Standard Specification for Pedestrian and light traffic paving brick"*. United States.
- ASTM. (2016). ASTM C67-14. En ASTM. Estados Unidos.
- ASTM. (2017). C373. Estados Unidos.
- ASTM. (2017). C62. Estados Unidos.
- ASTM. (s.f.). *ASTM D4318-95a*. Estados Unidos.
- Baldo, J., & dos Santos, W. (2002). Phase transitions and their effects on the thermal diffusivity behaviour of some SiO₂ polymorphs. *Cerâmica*, 172-177.
- Bañon Blasquez, L. (2008). *Clasificación de suelos*.
- Barton, C., & Karathanasis, A. (2002). Clay Minerals. *Encyclopedia of Soil Science*, 187-192.
- Baudin, C., & Moya, J. (n.e.p.). Sinterización en Estado Sólido. *Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 133-142.

-
- Böhler, L., Görtler, G., Krail, J., & Kozek, M. (2019). Carbon monoxide emission models for small-scale biomass combustion of wooden pellets. *Applied Energy*.
- Bohor, B. F. (1959). *Characterization of illite and its associated mixed layers*,. Illinois: Ph. D. Thesis, Univ.
- Bradley, W. G. (1951). High Temperature Thermal Effects of Clay and Related Materials. *American Mineralogist*, 182-201.
- Brindley, G. W. (1959). "Kaolinite-Mullite reaction series". *American Ceramic Society*, 314-318; 319-324.
- Brindley, G. W., & Ali, S. Z. (1950). "Thermal transformations in magnesium chlorites",. *n.e.p.* (págs. 25-30). *n.e.p.*: *n.e.p.*
- Brindley, G., & Brown, W. (1981). *Clay Mineralogy, Me. Crystal structures of clay minerals and their X-Ray identification*. New-York, 1968: Graw-Hill Book Company,.
- Calabria, J., Vasconcelos, W., & Boccaccini, A. (2009). Microstructure and chemical degradation of adobe and clay bricks. *Ceramics International*, 665-671.
- Casado-Martínez, F., Redondo-Yélamos, M., García-Pérez, M., Rodríguez-Cheda, J., & Ramos-Riesco, M. (2005). Luz Polarizada: Aplicación al Estudio de Materiales. *Chapter*, 163-170.
- Chidiac, S., & Federico, L. (2017). Effects of wasted glass additions on the properties and durability of fired clay bricks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1458–1466.
- Chopin, C., Seidel, E., Theye, T., Ferraris, G., Ivaldi, G., & Catti, M. (1992). Magnesiochloritoid, and the Fe-Mg series in the chloritoid group. *Euro Journal Mineral*, 67-76.
- Christogerou, A., Kavas, T., Pontikes, Y., Rathossi, C., & Angelopoulos, G. (2010). Evolution of microstructure, mineralogy and properties during firing of clay-based ceramics with borates. *Ceramics international*, 36,, 567-575.
- Chung, F. H. (1974). Quantitative Interpretation of X-Ray Diffraction Patterns of Mixtures 1. Matrix-Flushing Method for Quantitative Multicomponent Analysis. *J. Appl. Cryst.*, 519-525.
- Chung, F. H. (1974). Quantitative Interpretation of X-ray Diffraction Patterns of Mixtures 2. Adiabatic Principle of X-ray Diffraction Analysis of Mixtures. *J. Appl. Cryst.*, 526-531.
- Chung, F. H. (1975). Quantitative Interpretation of X-ray Diffraction Patterns of Mixtures 3. Simultaneous Determination of a Set of Reference Intensities. *J. Appl. Cryst.*, 17-19.
- CIATEC. (2015). "Análisis de Mercado del Sector de la Construcción y Proyecto Piloto a Nivel Región Basado en un Portafolio de Políticas Públicas con el Objetivo de Reducir los CCVC de Ladrilleras Artesanales en México". Ciudad de México.
- Cole, W. F., & Segnit, E. R. (1963). "High temperature phases developed in some kaolinite-mica-quartz. *Trans. British Ceramic Society*. 62., 375-395.

-
- Coletti, C., Cultrone, G., Lara, M., & Mazzoli, C. (2016). Combined multi-analytical approach for study of pore system in bricks: How much porosity is there? *Materials Characterization*.
- Cullity, B., & Stock, S. (2014). *Elements of X-Ray Diffraction (Tercera edición ed.)*. New Jersey, Estados Unidos de América: Pearson.
- Cultrone, G., Sebastián, E., Elert, K., de la Torre, M., Cazalla, O., & Rodríguez-Navarro, C. (2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society* 24, 547-564.
- Cusidó, J. C., Soriano, C., & Devant, M. (2015). Incorporation of paper sludge in clay brick formulation: Ten years of industrial experience. *Applied Clay Science*, 191-198.
- Dalkilic, N., & Nabikoglu, A. (2017). Traditional manufacturing of clay brick in the historical buildings of Diyarbakir. *Frontiers of Architectural Research*.
- Darell, D., & Ebbing, S. D. (2010). *Química General*. Mexico, D.F.: Cengage Learning.
- de la Fuente, C., Queralt, I., & Sanfeliu, T. (s.f.). Transformaciones mineralógicas en los procesos cerámicos y su aplicación en el control de calidad. *Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona*, 130-147.
- de Liberto, P. (1964). *Las arcillas, clasificación, identificación, usos y especificaciones*. México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Vol. 27.
- Della Ventura, G., Redhammer, G. J., Iezzi, G., Hawthorne, F. C., & Papin., A. (2005). A Mössbauer and FTIR study of synthetic amphiboles along the magnesioriebeckite - Ferri-clinoholmquistite join. *Physics and Chemistry of Minerals* 32(2), 103-113.
- Drysdale, R., & Hamid, A. (2007). *Masonry structures: behavior and design*. Prentice-Hall, Inc.
- Duffin, C. (2006). Silicate Minerals : An Overview. *British Micromount Society, Occasional Paper*.
- Eliche-Quezada, D., & Lopez-Perez, J. (2016). Characterization and evaluation of rice husk and wood ash in sustainable clay matrix bricks. *Ceramic International*.
- Elinwa, A. U. (2007). Effect of addition of sawdust ash to clay bricks. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 263-270, .
- Epp, J. (2016). X-Ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization. Alemania.
- European-Statistics. (2010). Recycling e secondary material price indicator e statistics.
- Everhart, J. O. (1957). Use of auxiliary fluxes to improve structural clay bodies. *J. Am. Ceram. Soc. Bull.*, 36,, 268-271.
- Fadele, O., & Ata, O. (2018). Water absorption properties of sawdust lignin stabilised compressed laterite bricks. *Case Studies in Construction Materials*.
- Feldspar. *What is Feldspar? Industrial Minerals Association*. (18 de Julio de 2007). Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Feldespatos#cite_ref-feldspar_1-0

-
- Fernandes, F. M. (2019). Clay Bricks. *Long-term Performance and Durability of Masonry Structures*.
- Fernandez Navarro, J. M. (1962). Plasticidad de las arcillas. *Departamento de Silicatos del Patronato "Juan de la Cierva", de Investigación Técnica.*, 449-473.
- FEVE, (. C. (2017). *Glass recycling hits 73% in the EU*. Obtenido de <http://feve.org/glass-recycling-hits-73-eu/>
- Gaggino, R. (2009). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción. *Revista INV*, 63.
- Galán-Arboledas, R., Cotes-Palomino, M., Bueno, S., & Martínez-García, C. (2017). Evaluation of spent diatomite incorporation in clay based materials for lightweight bricks processing. *Construction and Building Materials*, 327–337.
- García, G. (1997). *Algunos Análisis Físico-químicos para la identificación de los minerales componentes de una arcilla*. Medellín, Colombia.
- García–Palencia, O., Pencue, L., & Villacrez–Pastas, C. (2010). Determinación de la microestructura cerámica mediante procesamiento óptico–digital de imágenes MEB. *Ingeniería y Ciencia, Volumen 6*, 57-73.
- Gencel, O. (2015). Characteristics of fired clay bricks with pumice additive. *Energy and Buildings*.
- Goel, G., & Kalamdhad, A. (2017). An investigation on use of paper mill sludge in brick manufacturing. *Construction and Building Materials* 148 , 334–343.
- Goforth, B. G. (2005). Spatial distribution and properties of ash and thermally altered soils after high-severity forest fire, southern California. *International Journal of Wildland Fire* 14(4), 343-354.
- Gonzalez Peña, J. M., & Alvarez-Estrada, D. (1973). Formación de mullita a partir de silicatos de aluminio naturales, estudiada fundamentalmente por microscopía electrónica de barrido (SEM). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 149-165.
- Griffiths, L., Heap, M. J., Xu, T., Chen, C., & Baud, P. (2017). The influence of pore geometry and orientation on the strength and stiffness of porous rock. *Journal of Structural Geology* 96, 149-160.
- Grim, R. E. (1957,). "X-Ray study of clay-mineral reactions at elevated temperature", *Bull. Soc. Franc. Ceram .. 36* , 21-27.
- Gualtieri, A. F., Riva, V., Bresciani, A., Maretti, S., Tamburini, M., & Viani, A. (2014). Accuracy in quantitative phase analysis of mixtures with large amorphous contents. The case of stoneware ceramics and bricks. *Journal of Applied Crystallography*, 835-846.
- Gualtieri, A., Guagliardi, A., & Iseppi, A. (2004). The Quantitative Determination of the Crystalline and the Amorphous Content by the Rietveld Method: Application to Glass Ceramics with Different Absorption Coefficients. *Diffraction Analysis of the Microstructure of Materials*, 148-165.

-
- Guerrero Paz, J., Moreno, T. R., Cardoso Legorreta, E., Cruz Rivera, J. J., Ramos Aspeitia, M. O., Corral Avitia, A. Y., & Torres Pérez, J. (2017). *Impulso al desarrollo tecnológico de la fabricación del ladrillo*. Pachuca, Hidalgo, México: PROMEP.
- Guerrero, A. L. (2016). Analiza CIATEQ mercado de la industria ladrillera artesanal. *CONCACYT*, México.
- Haldar, S., & Tišljár, J. (2014). Chapter 2 - Basic Mineralogy. En S. Haldar, & J. Tišljár, *Introduction to Mineralogy and Petrology* (págs. 39-79). Elseiver.
- Hernandez Yañez, O. A. (2015). *Caracterización mineralógica y química de arcillas de suelos utilizados en la industria ladrillera en el estado de Hidalgo, México*. Pachuca, Hidalgo, México.
- Hernández, A., Bastias, J., Matus, D., & Mahaney, W. (2018). Provenance, transport and diagenesis of sediment in polar areas: a case study in Profound Lake, King George Island, Antarctica. *Polar Research*, 37.
- Hillier, S. (2000). Accurate quantitative analysis of clay and other minerals in sandstones by XDR: comparison of a Rietveld and a reference intensity ratio (RIR) method and the importance of sample preparation. *Clay minerals*, 35, 291-302.
- INEGI. (23 de OCT de 2010). *INEGI*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est>
- Ivanić, M., Vdović, N., de Brito Barreto, S., Bermanec, V., & Sondi, I. (2015). Mineralogy, surface properties and electrokinetic behaviour of kaolin clays derived from naturally occurring pegmatite and granite deposits. *Geologia Croatica*, 139-145.
- JEOL. (s.f.). *Scanning Electron Microscope A to Z*. Korea.
- Johnson, Q., & Zhou, R. S. (2000). Checking and estimating RIR values. *Advances in X-ray Analysis*, Vol.42, 287-296.
- Juárez, B. A. (N. ep.). *Mecánica de suelos*. LIMUSA.
- Karaman, S., Gunal, H., & Ersahin, S. (2008). Quantitative Analysis of Pumice Effect on Some Physical and Mechanical Properties of Clay Bricks. *Journal of Applied Sciences* 8, 1340-1345.
- Khanlari, Namazi, & Lor. (2012). Assessment of engineering properties of clay soils as brick and tiles materials in Hamedan, west of Iran. *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy*, 369-376.
- Kizinievic, O., Kizinievic, V., & Malaiškiene, J. (2018). Analysis of the effect of paper sludge on the properties, microstructure and frost resistance of clay bricks. *Construction and Building Materials* 169, 689–696.
- Kostov, I. (1968.). *Mineralogy, Oliver and Boyd*, . Edinburgh, .
- Kusiorowski, R., Zaremba, T., Piotrowski, J., & Adamek, J. (2012). Thermal decomposition of different types of asbestos. *Journal of Thermal analysis and calorimetry*, 693-704.

-
- Laurita, S., & Rizzo, G. (2019). The First Occurrence of Asbestiform Magnesio-Riebeckite in Schists in the Frido Unit (Pollino Unesco Global Geopark, Southern Italy). *Fibers*.
- Linares, J., Huertas, F., & Capel, J. (1983). La arcilla como material cerámico, características y comportamiento. *Departamento de Prehistoria, Universidad de Granada*, 479-490.
- Liu, P. (2017). Changes of Atterberg limits and electrochemical behaviors of clays with dispersants as conditioning agents for EPB shield tunnelling. *ELSEIVER*.
- Luke, G., Heap, Tao, Chong-feng, & Patrick. (2017). The influence of pore geometry and orientation on the strength and stiffness of porous rock. *Journal of Structural Geology* 96, 149-160.
- Mari, E. A. (1998). Los materiales cerámicos. Argentina: Alsina.
- Martínez. C. F. J., R. Y. (2005). Luz Polarizada: Aplicación al Estudio de Materiales. 163-170.
- Maschio, S., Furlani, E., Tonello, G., Faraone, N., Aneggi, E., Minichelli, D., . . . Bruckner, S. (2009). Fast firing of tiles containing paper mill sludge, glass cullet and clay. *Waste Management* 29, 2880–2885.
- Maza, O. (2016). Efectos de la incorporación de residuos industriales en la resistencia y durabilidad de ladrillos de arcilla. México.
- Misra, M. K. (1993). Wood ash composition as a function of furnace temperature. *Biomass Bioenergy* 4(2), 103-116.
- Monteiro, N. S., & Vieira, F. C. (2014). On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. *Construction and Building Materials* 68, 599–610.
- Moreno, A. I., Font, R., & Conesa, J. A. (2017). Combustion of furniture wood waste and solid wood: Kinetic study and evolution of pollutants. *FUEL*, 169-177.
- Muñoz, V. P., Morales, M., Letelier, G. V., & Mendivil, M. (2016). Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. *Construction and Building Materials*, 241-252.
- Nieto, G. (2010). Fundamentos en la preparación de muestras para microscopía electrónica de barrido. México.
- Niroumanda, H., Zainb, M., & Alhosseini, S. (2013). The Influence of Nano-Clays on Compressive Strength of Earth Bricks as Sustainable Materials. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 89, 862-865.
- Ojova, M. (2008). Configurons: Thermodynamic Parameters and Symmetry Changes at Glass Transition. *Entropy*, 334-364.
- Okunade, E. A. (2008). The effect of wood ash and sawdust admixtures on the engineering properties of a burnt laterite-clay brick. *Journal of applied science*, 1042-1048.
- Ordoñez, H. D. (2018). *Obtención de cerámico tradicional estructural por sinterización de baja temperatura*.

-
- Ortega de La Rosa, J. (2015). Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos fabricados con arcilla y arena del municipio de Huichapan en el Estado de Hidalgo. México.
- Palma, E. (2017). *Estudio de propiedades mecánicas y físicas de los ladrillos elaborados con arcilla y lama del municipio de Tulancingo, Estado de Hidalgo*. San Luis Potosí, México.
- Phonphuak, N., & Kanyakam, S. (2016). Utilization of waste glass to enhance physical/mechanical properties of fired clay brick. *Journal of Cleaner Production* 112 , 3057-3062.
- Poce Peña, P., Gonzalez Lozano, M. A., Rodríguez Pulido, A., Lara Castro, R. H., Quiñonez Jurado, Z. V., Pérez Medina, J. C., . . . Villavicencio Torres, A. (2016). Effect of crushed glass cullet sizes on physical and mechanical properties of red clay bricks. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Rahaman, M. N. (2013). *Ceramic processing and sintering*.
- Ramírez Calderon, Y. E. (2012). *Determinación de las fases presentes en pisos y revestimientos cerámicos a base de arcilla cocidos a diferentes temperaturas y su influencia en las propiedades técnicas*. Bogotá.
- Rat'kova, V. P., Yatsenko, N. D., Ivanyuta, G. N., & Nechaev, P. B. (2004). Optimization of clay properties for selecting brick molding method. *Glass and Ceramics* 61 , 379-381.
- Richerson, D. W. (2018). *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design; 4th Edition*. New York: Taylor and Francis.
- Russ, W., Mortel, H., & Meyer-Pittroff, R. (2005). Application of spent grains to increase porosity in bricks. *Construction and Building Materials* 19 , 117–126.
- Schneider, H., Schreuer, J., & Hildmann, B. (2008). Structure and properties of mullite—A review. *Journal of the European Ceramic Society* (28) , 329–344.
- sciencePhoto. (s.f.). Obtenido de SciencePhotoLibrary:
<https://www.sciencephoto.com/media/1003519/view/chlorite-sem>
- Serret Guasch, N., & Giralt Ortega, G. (2013). Caracterización de aserrín de diferentes maderas. Cuba.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Panorama Minero del Estado de Hidalgo*. Secretaría de Economía.
- Singer, F., & Singer, S. (1979.). *Cerámica Industrial (Primera Edición ed., Vol. I)*. (J. Dominguez Sanz, Trad.) España:: URMO, S.A. de ediciones Espartero,10-Bilbao-9.
- Souza, A. E., Teixeira, S. R., Santos, G. T., & Longo, E. (2013). Addition of sedimentary rock to kaolinitic clays: influence on sintering process. *Cerâmica* 59 , 147-155.
- Spieb, L., & Teichert, G. (2009). *Moderne reontgenbeugung*. Alemania.
- Sundius, N., & Bystrom, A. M. (1953). "Descomposition products of muscovite at temperatures between 1.000° and 1.260°C". *Trans. British Ceramic Society.*, 52., 632-642.

-
- Tan, X., Liua, F., Hu, L., Reed, A. H., Furukawa, Y., & Zhang, G. (2016). Evaluation of the particle sizes of four clay minerals. *Applied Clay Science* .
- Ukwata, A., & Mohajerani, A. (2017). Characterisation of fired-clay bricks incorporating biosolids and the effect of heating rate on proprieties of bricks". *Construction and Building Materials 142* , 11–22.
- United-Nations-Environment-Programme. (23 de Septiembre de 2009). *Common Carbon Metric for Measuring Energy Use and Reporting Greenhouse Gas Emissions From Buiding Operations*.
- Vallejo, L. I. (2006). *Ingeniería Geológica*. PEARSON.
- Vasic´, M. V., P. L., Zdravkovic´, J. D., Backalic´, Z., & Radojevic, Z. (2017). The study of thermal behavior of montmorillonite and hydromica brick clays in predicting tunnel kiln firing curve. *Construction and Building Materials 150* , 872–879.
- Viani, A., Cultrone, G., Sotiriadis, K., Ševčíka, R., & Šašek, P. (2018). The use of mineralogical indicators for the assessment of firing temperature. *Aplied Clay Science 163* , 108-118.
- Vieira, C. M., Pinheiro, R. M., Sanchez Rodriguez, R. J., Candido, V. S., & Monteiro, S. N. (2016). Clay bricks added with effluent sludge from paper industry: Technical, economical and environmental benefits. *Applied Clay Science*.
- Vigueras, S. L. (2018). *Diseño de cerámicos microporosos vía RBAO*. Pachuca.
- Wahl, F. M. (1965). "High-temperature phases of tree-layer clay minerals and their interactions with common ceramic materials. *American Ceramic Society Bulletin 44* , 676-681.
- Watchman Jr., J. B. (1967). "Mechanical properties of ceramics. An introductory survey", . *American Ceramic Society Bulletin*, 757-774.
- Weng, C. D. (2002). Utilization of sludge as brick materials. *Adv. Environ. Res.*, 1-7.
- Wenk, H. R. (2004). *Minerals Their Constitution and Origin*. Cambridge University Press.
- Whitney, & Evans. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist, Volume 95*, 185–187.
- Wilson, M. J., Wilson, L., & Patey, I. (2014). The influence of individual clay minerals on formation damage of reservoir sandstones: a critical review with some new insights. *Clay Minerals, 49(2)* , 147-164.
- Wilson, Wilson, & Patey. (2014). The influence of individual clay minerals on formation damage of reservoir sandstones: a critical review with some new insights. *Clay Minerals*, 147-164.
- Zhang, L. Y. (2013). Productions of bricks from waste materials - A review,. *Construction Buildings Materials*, 643-655.
- Zhou, C., & Keeling, J. (2013). Fundamental and applied research on clay minerals: From climate and environment to nanotechnology. *Applied Clay Science*, 3-9.

-
- Zhu, M., Wanga, H., Liu, L., Ji, R., & X., W. (2017). Preparation and characterization of permeable bricks from gangue and tailings. *Construction and Building Materials* 148 , 484-491.
- Zihms, S., Switzer, C., Karstunen, M., & Tarantino, A. (2013). Understanding the effect of high temperature processes on the engineering. *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3427-3430.

ANEXOS

ANEXO I

EFFECTO DEL TAMAÑO DEL ASERRÍN EN LAS PROPIEDADES
FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LADRILLOS DE LA REGIÓN DE
TULANCINGO-SANTIAGO TULANTEPEC

Se establecieron 3 parámetros para la selección del tamaño de aserrín a utilizar durante la investigación, dichos parámetros son:

- Resistencia a la compresión del ladrillo
- Propiedades físicas del ladrillo resultante
- Cantidad de masa que se obtiene por tamaño

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos, así como la discusión de resultados.

El aserrín que se utilizó en este trabajo fue conseguido como material de desecho de una carpintería local. Para obtener una muestra representativa se realizó el método de cuarteo, después se llevó a cabo un análisis de cribas por 3 tamaños (#20, #60 y #100). La Tabla 1.1 muestra dicho análisis.

Tabla 1.1.- Cantidad de masa de aserrín obtenida dependiendo del tamaño de malla.

Masa obtenida después del cuarteo (1093 g)		
Malla	Masa que pasa o retiene (g)	Porcentaje (%)
(+20)	403	36.87
(-20+60)	564	51.60
(-60+100)	88	8.05
-100	38	3.48

De la Tabla anterior se observa que la mayor cantidad de material se presenta por debajo de la malla #20 y la menor cantidad se obtiene cuando se criba el aserrín por malla #100.

De este resultado, se decidió probar 5 rangos de tamaño para incorporar a la mezcla de elaboración de ladrillo, dichos rangos se muestran a continuación.

Tabla 1.2.- Rangos de tamaños de partículas de aserrín conforme a las 3 aberturas de tamices a utilizar.

Rango	Tamaño de malla	Rango en μm
1	-20	<841
2	-60	>250
3	-100	>149
4	-20+60	<841, >250
5	-60+100	<250, >149

Se procedió entonces a realizar un análisis de tamaño de partícula para verificar los diámetros medios y valores modales de partícula de los rangos de tamaño utilizando el analizador de tamaño de partícula descrito en apartados anteriores, para ello se utilizó el módulo de polvo seco del equipo, los resultados se muestran en la Figura 1.1.

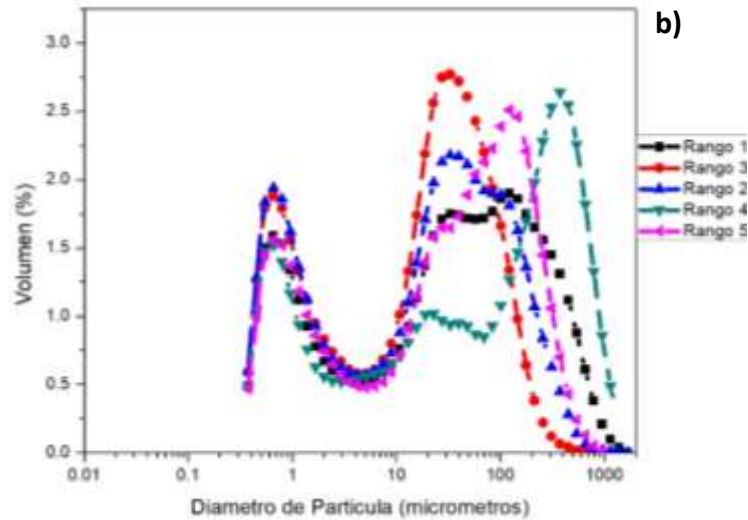
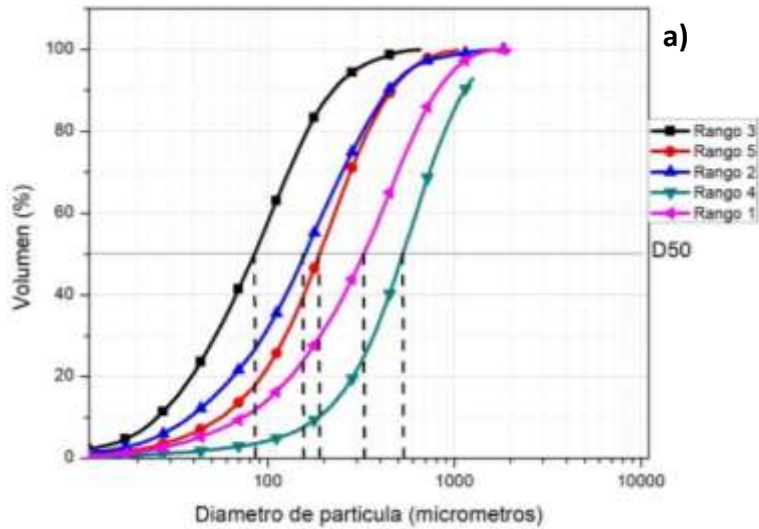


Figura 1.1.- Análisis de tamaño de partícula por difracción láser de los tamaños de aserrín. a) frecuencia acumulativa en volumen y b) Curvas de frecuencia en volumen.

De la Figura 1.1.a se observa que para el rango 3 un diámetro medio de 84 μm , mientras el rango 5 presenta un D50 de 189 μm , en cuanto al tamaño de diámetro de partícula del rango 2 se tiene un diámetro medio de 158 μm , para el aserrín tamizado en el rango 4 el D50 resultante esta en un tamaño de 531 μm , finalmente para el aserrín obtenido en el rango 1 se tiene un diámetro de partícula medio de 328 μm . El tamaño máximo de partícula en los 5 rangos es de 2 mm.

En la Figura 1.1.b se observa una mayor población en tamaños menores a 1 μm en los rangos con mayor distribución de tamaño de partícula. El rango 4 es por su parte quien mayor población presenta de partículas de mayor tamaño. En el caso del rango 2 se observa que este no presenta un pico muy marcado en tamaños mayores a 10 μm , indicativo que presenta la mayor distribución de tamaño de partícula.

❖ Resistencia a la compresión obtenida según tamaño de aserrín

Para este análisis se elaboraron 7 probetas incorporando el aserrín. Únicamente el aserrín de rango 3 no fue sometido a análisis debido a que al momento del secado del adobe este se agrietaba por lo que no era apto para las pruebas mecánicas.

Los datos de las pruebas son mostrados en la Tabla 1.3 y la Figura 1.2.

Tabla 1.3 Datos de probetas de ladrillos elaboradas mediante aserrín cribado a malla -20 sometidos a pruebas de compresión.

Rango	Tensión Máxima (MPa)	Desviación estándar de tensión máxima
1	18.56	0.70
4	19.78	3.00
2	20.70	2.77
5	18.69	4.28

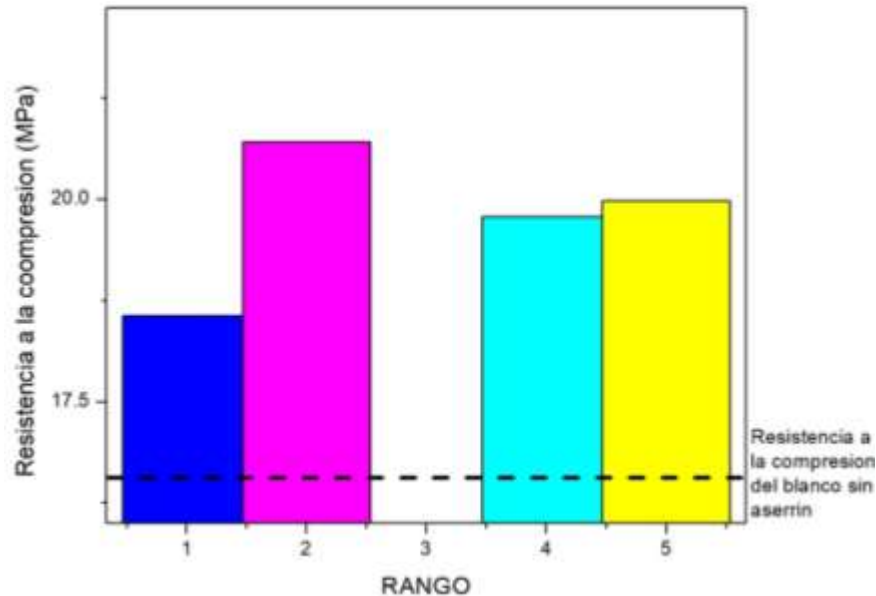


Figura 1.2.- Comparativa de resistencia a la compresión entre los rangos de tamaño de aserrín, a excepción del rango 3 el cual no fue sometido a análisis, ladrillo sinterizado a 1000 °C.

Analizando esta comparativa se aprecia que cuando se presenta una distribución de tamaño de partícula (rangos 1 y 2) la resistencia aumenta significativamente, en cambio cuando la distribución es más reducida (rango 4 y 5) no se aprecian incrementos en la resistencia a la compresión entre los lotes.

Se observa que en la mayoría de los casos se incrementa la resistencia con respecto al blanco sin aserrín, siendo el rango 2 el que mayor resistencia presentó con 20.77 MPa, un incremento del 27 %.

❖ Pruebas físicas

Uno de los aspectos importantes es la evaluación de las propiedades físicas del producto resultante, para ello se realizaron pruebas según dicta la norma ASTM C373 a los 5 lotes de ladrillos elaborados con los rangos de tamaños de mallas mencionados en apartados anteriores. Los resultados y sus discusiones son presentadas a continuación.

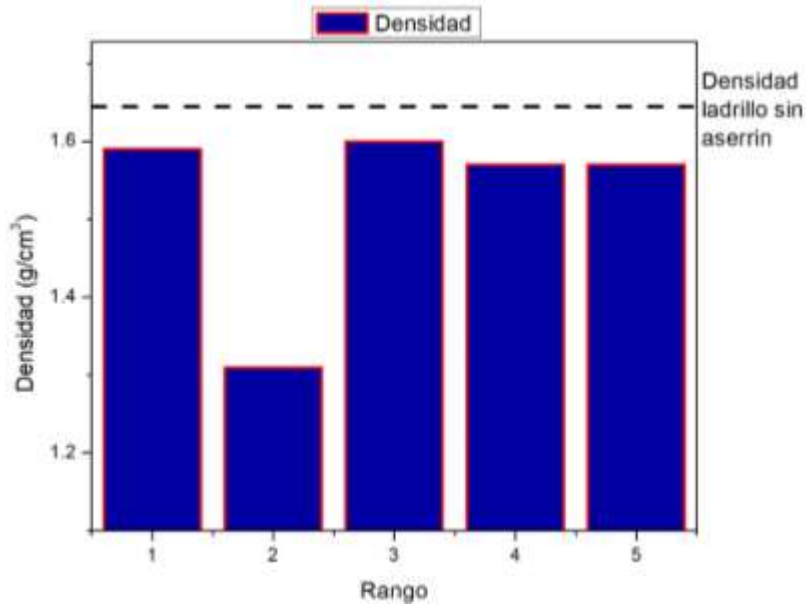


Figura 1.3 Valores de Densidad Bulk los 5 lotes de ladrillos sometidos a pruebas según la norma ASTM C373.

De la Figura anterior se tiene que el lote que presenta una menor densidad es el elaborado del rango 2, en cuanto a los demás lotes estos presentan densidades muy similares a pesar de los tamaños del aserrín. Se establece entonces que el tamaño del aserrín no influye en la densidad del ladrillo.

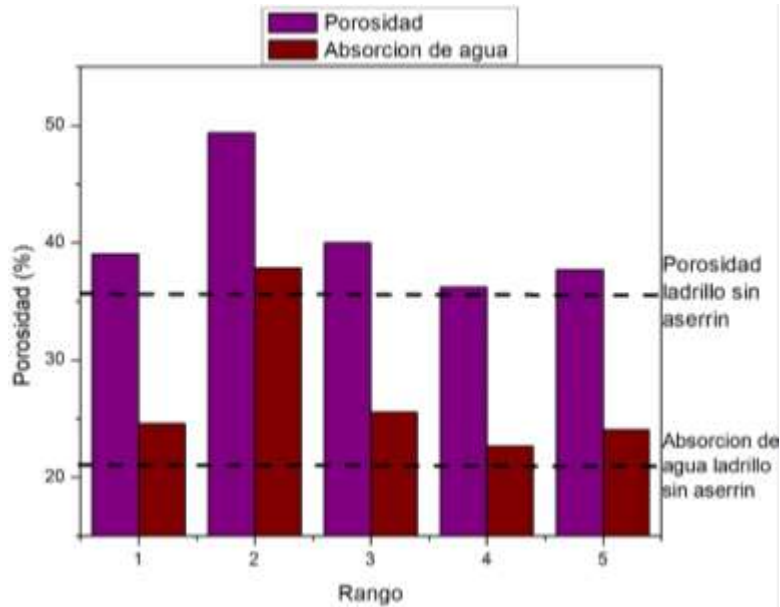


Figura 1.4.- Valores de porosidad y absorción de agua de los 5 lotes de ladrillos elaborados con las mallas y rangos mostrados en el eje de las abscisas.

De la Figura anterior se observa que de nueva cuenta el mayor valor se presenta en el lote producido con el rango 2. A pesar de que los otros 4 rangos presentaron densidades muy similares, estos presentan porosidades variadas, esto puede ser debido a los tamaños y formas de los poros. Estos porcentajes de porosidad obtenidos son mayores que muchos vistos en referencias (Chidiac & Federico, 2017).

Para la absorción de agua se tiene que al momento de la obtención de resultados se comprueba que el lote que presenta la mayor cantidad de absorción de agua es el elaborado con el rango 2 concordando con la porosidad del ladrillo, sin embargo, esto genera un inconveniente al incumplir en este rubro en la norma ASTM C62.

Por otra parte, los demás lotes presentan valores máximos de 25 % aproximadamente, un valor no tan alejado del límite en la categoría de MW (22 %), por lo cual se estudiarán alternativas para disminuir este aspecto, o esperar que bajo la adición de los aditivos propuestos se logre entrar en los rangos de la norma.

En base a los resultados mostrados en este anexo se estableció que el tamaño ideal de aserrín para incorporar al ladrillo es el rango 1, a pesar de que el rango 2 presento los valores más altos de resistencia el rango 1 tiene una menor desviación estándar y da un valor más confiable, además de propiedades físicas buenas, asimismo de que en este rango se tiene la mayor cantidad de material.

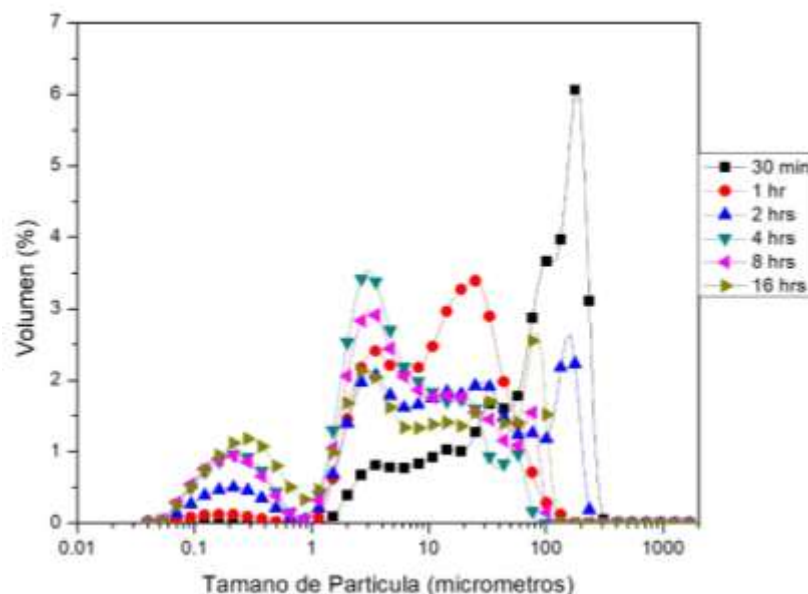
ANEXO II
EFECTO DEL TIEMPO DE MOLIENDA EN LA PUMICITA PARA LA
OBTENCIÓN DE MATERIAL REACTIVO

Se establecieron 4 tiempos de molinenda para hacer una comparativa y verificar cual es el tiempo en el cual se da el maximo refinamiento de la materia prima. Se eligió a la pumicita como material base, debido a que, como se comenta en el apartado de materiales, la pumicita y el vidrio comparten la fase mayoritaria de Sílice (SiO_2), buscando agilizar con ello el tiempo de análisis. Los tiempos propuestos para la molienda fuerón de 0.5 hrs, 1 hr., 2hrs., 4hrs., 8hrs. y 16hrs.

Una vez obtenidos nuestros polvos despues del proceso de molienda, se ralizo el análisis de tamaño de partícula utilizando un equipo Beackman Coulter LS I3 320 por laser, utlizando además un dispersante de Haxametafosfato de Sodio ($(\text{NaPO}_3)_6$) en un porcentaje de 0.2 % peso en agua destilada, además de someter la suspensión a un baño ultrasonico durante 5 minutos.

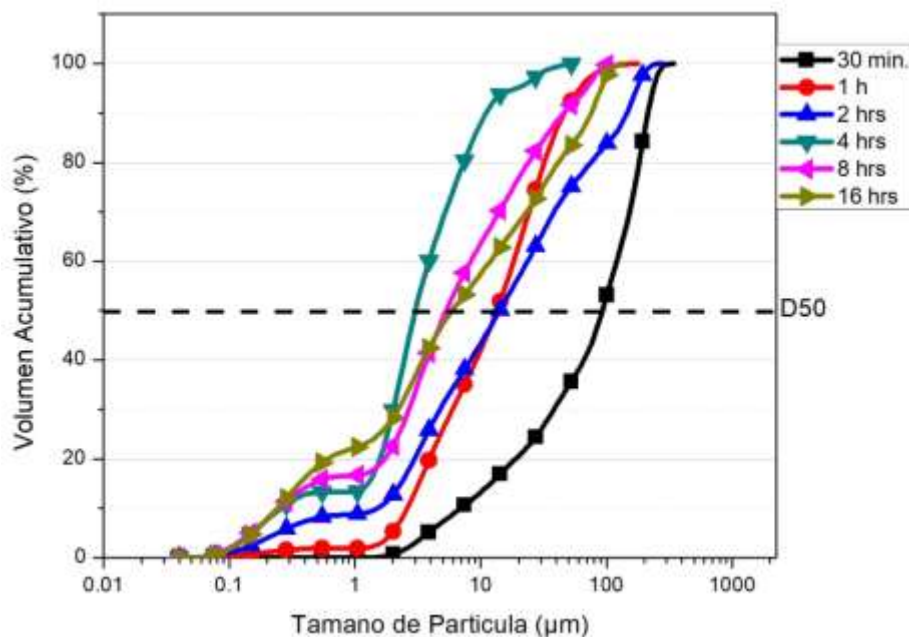
➤ Análisis de tamaño de partícula pumicita

Los resultados del análisis a diferentes tiempos de molienda se muestran en la grafica 2.1.



Gráfica 2.1 Comparativa de los tamaños de partícula modales resultantes de los distintos tiempos de molienda realizados en la pumicita.

Como se puede observar, a partir de una hora se obtienen un principal valor modal similar, sin embargo es en la región de partículas por debajo de $1\ \mu\text{m}$ donde a partir de 4 horas se presenta un incremento sustancial en la población de este tamaño de partícula. Enfocándose en el tiempo de 4 horas de molienda, se tiene que el principal valor modal de $2.31\ \mu\text{m}$ presenta una población cercana al máximo visto en el tiempo de 2 horas de molienda. El tiempo de 2 horas también presenta un volumen importante de partículas de mayor tamaño en comparación con la de 4 horas por ejemplo, se aprecia claramente como a partir de tiempos mayores de molienda empezando desde 4 a 16 horas se ve un incremento en la región de tamaños cercanos a los $100\ \mu\text{m}$, se atribuye este incremento al fenómeno de soldadura en frío que podría presentarse en este material.



Gráfica 2.2 Distribución de tamaño de partícula en función de su volumen acumulado para la obtención de los diámetros medianos de las partículas sometidas a distintos tiempos de molienda.

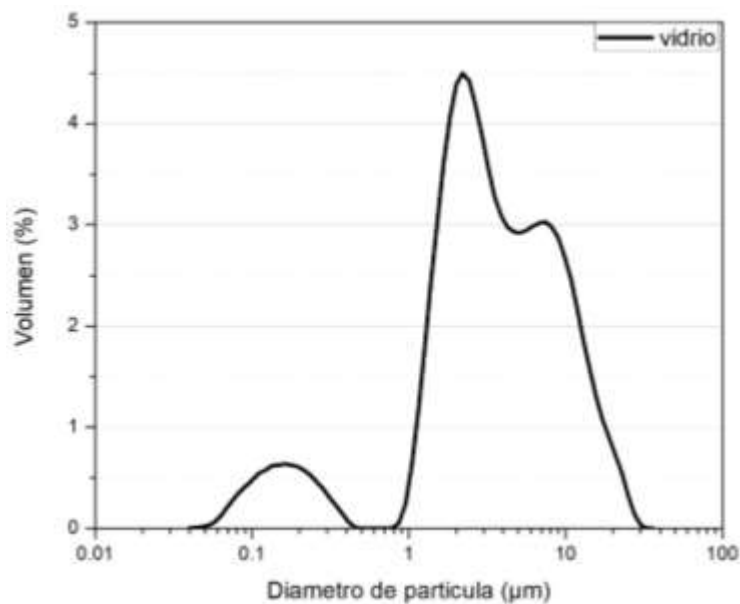
Analizando la gráfica anterior se observa el gran incremento en el volumen de partículas reactivas a partir de 4 horas, en 30 minutos de molienda el volumen de

partículas reactivas es prácticamente nulo en comparación con el cercano al 80 % muy similar en los tiempos desde 4 a 16 horas.

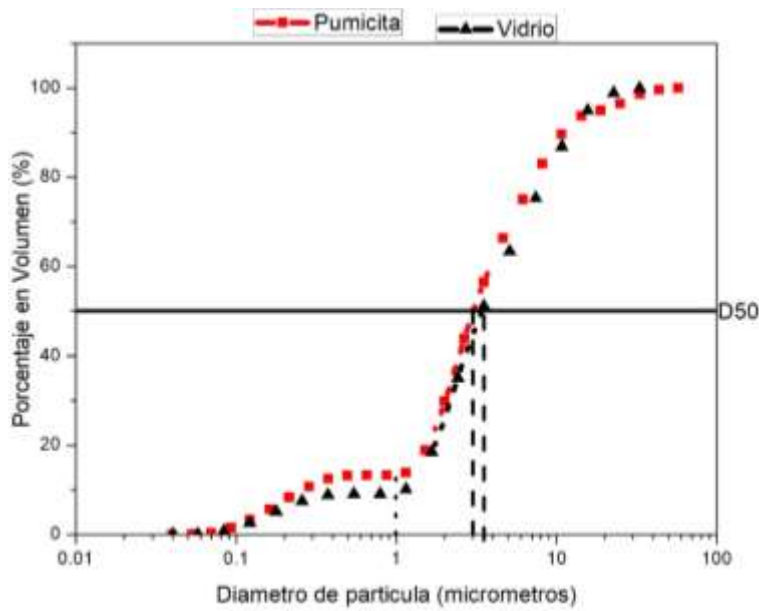
Es por ello que se estableció como un tiempo de molienda de 4 hrs para la refinación del vidrio, los resultados de la molienda del vidrio y su análisis de tamaño de partícula se muestran a continuación.

➤ Análisis de tamaño de partícula vidrio

En la gráfica 2.3 se observa un valor modal principal en un diámetro entre 2 y 3 micras, analizando la región de partículas nanométricas esta presenta un volumen considerable, de igual manera se obtuvo su diámetro mediano para verificar el tamaño de partícula en un porcentaje acumulativo D50, los resultados se muestran en la siguiente gráfica, haciendo además una comparación con el obtenido en la pumicita.



Gráfica 2.3 Análisis de tamaño de partícula de la molienda de vidrio a 4 horas, muestra dispersada con hexametáfosfato de sodio en baño ultrasónico.



Gráfica 2.4 Comparativa entre diámetros medios de los aditivos sometidos a las mismas condiciones de molienda.

El valor obtenido de diámetro medio de los aditivos molidos es de 3.40 µm, por lo que se puede decir que este tamaño ayudara en tener una distribución de tamaños adecuada propiciando la interacción partícula-partícula al momento de la mezcla de este aditivo y la materia prima. Se observa que nuestros aditivos se comportaron de una manera similar al porceso de molienda, unicamente difiriendo en el porcentaje de volumen de partículas por debajo de 1 micrometro.

En base a los resultados de molienda del vidrio y la pumicita se concluye que ambos materiales tiene un comportamiento similar en la molienda, obteniendo un porcentaje considerable de tamaño de partículas reactivas y a partir de este tamaño una buena distribución de tamaños.

ANEXO III
ANÁLISIS POR MEB-EDS DE LA MATERIA PRIMA DE
TULANCINGO-SANTIGO TULANTEPEC

Tabla 3.1 Identificación de una partícula de Caolinita por MEB-EDS del material "ROM-1".

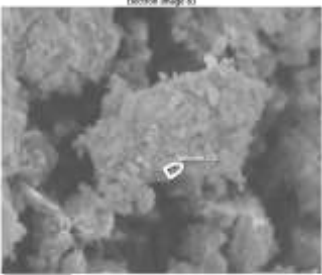
Microanálisis	Elemento	Wt %	Wat	n	Kxn	Aprox	Relaciones Atómicas
	C	10.07	12.011	0.838	2.6440	2.65	
	O	56.95	15.999	3.559	11.2292	11.2	O(11.2)
	Na	0.4	22.989	0.017	0.0536	0.05	
	Mg	0.4	24.312	0.016	0.0505	0.05	
	Al	10.28	26.981	0.318	1.0033	1	Al(1)
	Si	16.93	28.086	0.602	1.8994	1.9	Si(1.89)
	Cl	0	35.453	0	0.0000	0	
	K	0.73	39.102	0.018	0.0568	0.05	
	Ba	1.13	137.34	0.008	0.0252	0.02	
	Pb	2.57	207.19	0.012	0.0379	0.03	
	Total		100		5.388		
Por comparación con la fórmula teórica de: Caolinita		Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ Fórmula Empírica	No. De Átomos: 17	K= Átomos/n 3.155159614		Observaciones: Gran cantidad de partículas finas en la superficie	

Tabla 3.2 Identificación de una partícula de Cuarzo por MEB-EDS del material "ROM-1".

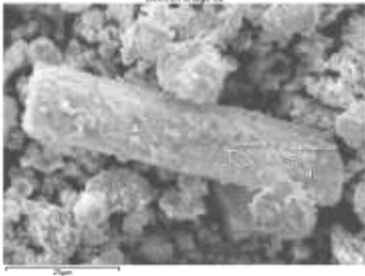
Microanálisis	Elemento	Wt %	Wat	n	Kxn	Aprox	Relaciones Atómicas
	O	50.43	15.999	3.1521	1.7551	2.65	O((2.65))
	C	0	12.011	0.0000	0.0000		
	Na	0	22.989	0.0000	0.0000		
	Mg	0	24.312	0.0000	0.0000		
	Al	3.29	26.981	0.1219	0.0679		
	Si	41.18	28.086	1.4662	0.8164	1.9	Si(1.9)
	Cl	0	35.453	0.0000	0.0000		
	K	0	39.102	0.0000	0.0000		
	Ba	5.06	137.34	0.0368	0.0205	0.02	
	Pb	0	207.19	0.0000	0.0000		
	Total		99.96		5.388		
Por comparación con la fórmula teórica de: Cuarzo		SiO ₂ Fórmula Empírica	No. De Átomos: 3	K= Átomos/n 0.556792873		Observaciones: Gran cantidad de partículas finas en la superficie	

Tabla 3.3 Identificación de una partícula de Anortoclasa por MEB-EDS del material "ROM-1"

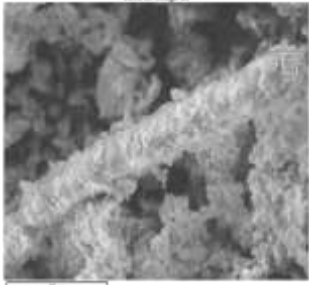
Microanálisis	Elemento	Wt %	Wat	n	Kxn	Aprox	Relaciones Atómicas
	O	56.35	15.999	3.5221	8.4980	8.5	O(8.5)
	C	7.95	12.011	0.6619	1.5970	1.6	
	Na	0.19	22.989	0.0083	0.0199	0.01	Na(0.01)
	Mg	0.01	24.312	0.0004	0.0010	0.001	
	Al	4.1	26.981	0.1520	0.3666	0.37	Al(0.37)
	Si	26.98	28.086	0.9606	2.3178	2.3	Si(2.3)
	Cl	0.04	35.453	0.0011	0.0027	0.002	
	K	0.41	39.102	0.0105	0.0253	0.02	K(0.02)
	Ba	2.34	137.34	0.0170	0.0411	0.02	
	Pb	1.48	207.19	0.0071	0.0172	0.017	
	Total		99.85		5.388		
Por comparación con la fórmula teórica de: Anortoclasa		$\text{Na}_{0.75} \text{K}_{0.25} \text{AlSi}_3 \text{O}_8$ Fórmula Empírica	No. De Átomos: 13	K= Átomos/n 2.412769117			
							Observaciones: Gran cantidad de partículas finas en la superficie

Tabla 3.4 Identificación de una partícula de Cuarzo por MEB-EDS del material "SAN-TUL-1"

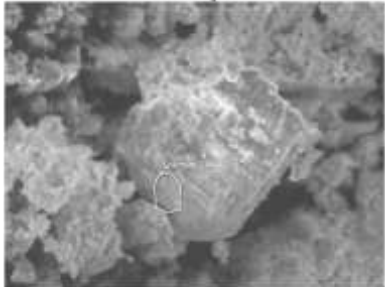
Microanálisis	Elemento	Wt %	Wat	n	Kxn	Aprox	Relaciones Atómicas
	O	51.578	15.999	3.2238	1.7950	1.8	O(1.8)
	C	0	12.011	0.0000	0.0000	0	
	Na	0.44	22.989	0.0191	0.0107	0.01	
	Mg	0.11	24.312	0.0045	0.0025		
	Al	2.07	26.981	0.0767	0.0427	0.04	
	Si	43.19	28.086	1.5378	0.8562	0.86	Si(0.86)
	Cl	0	35.453	0.0000	0.0000	0	
	K	0.52	39.102	0.0133	0.0074	0.007	
	Ba	0.71	137.34	0.0052	0.0029	0.02	
	Pb	1.38	207.19	0.0067	0.0037	0.003	
	Total		99.998		5.388		
Por comparación con la fórmula teórica de: Cuarzo		SiO_2 Fórmula Empírica	No. De Átomos: 3	K= Átomos/n 0.556792873			
							Observaciones: Gran cantidad de partículas finas en la superficie

Tabla 3.5 Identificación de una partícula de Albita por MEB-EDS del material "ROM-1"

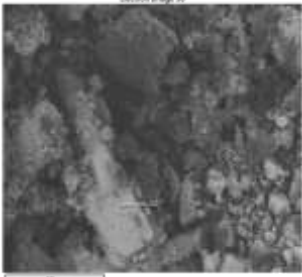
Microanálisis	Elemento	Wt %	Wat	n	Kxn	Aprox	Relaciones Atómicas
	O	52.73	15.999	3.2958	7.9521	7.96	O(7.9)
	C	5.32	12.011	0.4429	1.0687	1.06	
	Na	3.47	22.989	0.1509	0.3642	0.37	Na(0.37)
	Mg	0	24.312	0.0000	0.0000	0	
	Al	11.19	26.981	0.4147	1.0007	1	Al(1.00)
	Si	22.33	28.086	0.7951	1.9183	1.91	Si(1.91)
	Cl	0	35.453	0.0000	0.0000	0	
	K	0.16	39.102	0.0041	0.0099	0.01	
	Ca	3.5	40.08	0.0873	0.2107	0.21	Ca(0.21)
	Ba	0.95	137.34	0.0069	0.0167	0.01	
	Total		99.65		5.388		
Por comparación con la fórmula teórica de: Albita		$\text{Na}_{0.95} \text{Ca}_{0.05} \text{Al}_{1.05} \text{Si}_{2.95} \text{O}_8$ Fórmula Empírica		No. De Átomos: 13	K= Átomos/n 2.412769117		
Observaciones:							

Tabla 3.6 Identificación de una partícula de Montmorillonita por MEB-EDS del material "SAN-TUL-1"

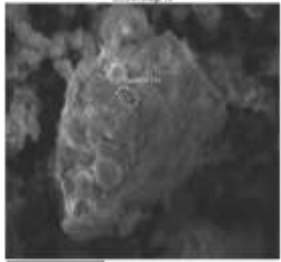
Microanálisis	Elemento	Wt %	Wat	n	Kxn	Aprox	Relaciones Atómicas	
	O	54.76	15.999	3.4227	14.6107	14.61	O(14.61)	
	C	8.12	12.011	0.6760	2.8859			
	Na	0.03	22.989	0.0013	0.0056	0.006	Na(0.006)	
	Mg	0.19	24.312	0.0078	0.0334	0.03	Mg(0.03)	
	Al	14.31	26.981	0.5304	2.2640	2.27	Al(2.27)	
	Si	15.77	28.086	0.5615	2.3969	2.4	Si(2.4)	
	Fe	5.47	55.847	0.0979	0.4181	0.41		
	Ti	1.03	47.867	0.0215	0.0919	0.1		
	Ba	0.19	137.34	0.0014	0.0059	0.006		
	K	0.1	39.098	0.0026	0.0109	0.01		
	Pb	0.02	207.2	0.0001	0.0004			
	Total		99.99		5.388			
	Por comparación con la fórmula teórica de: Montmorillonita		$(\text{Na,Ca})_{0.3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ Fórmula Empírica		No. De Átomos: 23	K= Átomos/n 4.26874536		
Observaciones:								

Tabla 3.7 Identificación de una partícula de Plagioclasa por MEB-EDS del material de "ROM-1"


Microanálisis	Elemento	Wt %	Wat	n	Kxn	Aprox	Relaciones Atómicas
	O	52.48	15.999	3.2802	7.9144	7.91	O(7.9)
	C		12.011	0.0000	0.0000	0	
	Na	0	22.989	0.0000	0.0000	0	
	Mg	0.18	24.312	0.0074	0.0179	0.02	
	Al	6.29	26.981	0.2331	0.5625	0.56	Al(0.56)
	Si	41.05	28.086	1.4616	3.5265	3.52	Si(3.52)
	Cl	0	30.97	0.0000	0.0000	0	
	S	0	32.064	0.0000	0.0000	0	
	Ba	0	137.34	0.0000	0.0000	0	
	K	0	39.102	0.0000	0.0000	0	
	Fe	0	55.847	0.0000	0.0000	0	
	Total		100		5.388		
Por comparación con la fórmula teórica de: Plagioclasa		$Na_{0.5} Ca_{0.5} Si_3 AlO_8$ Fórmula Empírica	No. De Átomos: 13	K= Átomos/n 2.412769117			
Observaciones: Análisis del espectro 248							

Tabla 3.8 Identificación de una partícula de Cuarzo por MEB-EDS del material de "SAN-TUL-1"

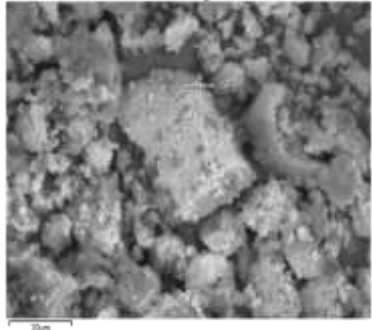
Microanálisis	Elemento	Wt %	Wat	n	Kxn	Aprox	Relaciones Atómicas
	O	58.9	15.999	3.6815	2.0498	2.04	O(2.04)
	C	9.89	12.011	0.8234	0.4585	0.46	
	Na	0	22.989	0.0000	0.0000	0	
	Mg	0.06	24.312	0.0025	0.0014	0.02	
	Al	3.61	26.981	0.1338	0.0745	0.07	
	Si	25.18	28.086	0.8965	0.4992	0.5	Si(0.50)
	P	0	30.97	0.0000	0.0000	0	
	S	0.31	32.064	0.0097	0.0054	0.005	
	Ba	0	137.34	0.0000	0.0000	0	
	K	0.08	39.102	0.0020	0.0011	0.001	
	Fe	0	55.847	0.0000	0.0000	0	
	Total		98.03		5.388		
Por comparación con la fórmula teórica de: Cuarzo		SiO ₂ Fórmula Empírica	No. De Átomos: 3	K= Átomos/n 0.556792873			
Observaciones: Análisis del espectro 247							

Tabla 3.9 Identificación de una partícula de Anortoclasa por MEB-EDS del material "SAN-TUL-1"

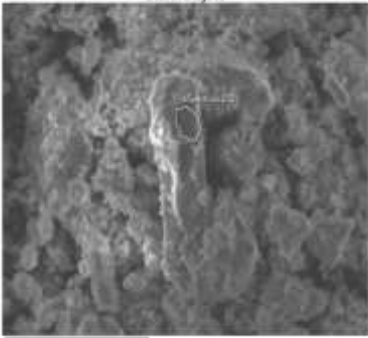
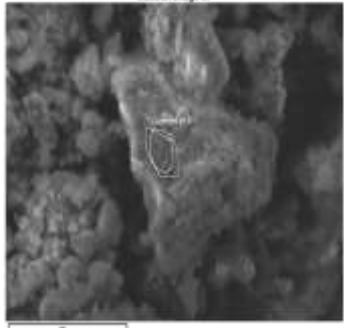
Microanálisis	Elemento	Wt %	Wat	n	Kxn	Aprox	Relaciones Atómicas
	O	50.56	15.999	3.1602	7.6248	7.62	O(7.9)
	C	5.35	12.011	0.4454	1.0747	0	
	Na	1.11	22.989	0.0483	0.1165	0.12	Na(0.12)
	Mg	4.15	24.312	0.1707	0.4119	0.41	
	Al	9.32	26.981	0.3454	0.8334	0.83	Al(0.83)
	Si	18.23	28.086	0.6491	1.5661	1.57	Si(1.57)
	P	0	30.97	0.0000	0.0000	0	
	S	0.37	32.064	0.0115	0.0278	0.03	
	Ba	0	137.34	0.0000	0.0000	0	
	K	0.31	39.102	0.0079	0.0191	0.01	K(0.01)
	Fe	6.33	55.847	0.1133	0.2735	0.27	
	Total		95.73		5.388		
<p>Por comparación con la fórmula teórica de: Anortoclasa</p>		$\text{Na}_{0.75}\text{K}_{0.25}\text{AlSi}_3\text{O}_8$ Fórmula Empírica	No. De Átomos: 13	$K = \text{Átomos}/n$ 2.412769117			
Observaciones:							

Tabla 3.10 Identificación de una partícula de Albita por MEB-EDS del material "SAN-TUL-1"

Microanálisis	Elemento	Wt %	Wat	n	Kxn	Aprox	Relaciones Atómicas
	O	42.54	15.999	2.6589	6.4154	8.34	O(7.9)
	C	0	12.011	0.0000	0.0000	1.58	
	Na	0.35	22.989	0.0152	0.0367	0.05	Na(0.37)
	Mg	0.26	24.312	0.0107	0.0258	0.02	
	Al	16.18	26.981	0.5997	1.4469	0.8	Al(1.00)
	Si	17.54	28.086	0.6245	1.5068	1.52	Si(1.91)
	P	0	30.97	0.0000	0.0000	0.21	
	Cl	0.16	35.45	0.0045	0.0109	0.03	
	Ba	0	137.34	0.0000	0.0000	0.007	
	K	0.57	39.102	0.0146	0.0352	0.06	Ca(0.21)
	Fe	18.88	55.847	0.3381	0.8157	0.21	
	Total		96.48		5.388		
<p>Por comparación con la fórmula teórica de: Albita</p>		$\text{Na}_{0.95}\text{Ca}_{0.05}\text{Al}_{1.05}\text{Si}_{2.95}\text{O}_8$ Fórmula Empírica	No. De Átomos: 13	$K = \text{Átomos}/n$ 2.412769117			

GLOSARIO

Ensayo de llama: Método analítico usado en química para detectar la presencia de ciertos elementos, principalmente iones de metales, basado en el espectro de emisión característico a cada elemento.

Epigénico: Término utilizado para describir un proceso que ocurre sobre o cerca de la superficie de la Tierra (cf. Hipogénico).

Esquisto: Constituyen un grupo de rocas caracterizados por la preponderancia de minerales laminares que favorecen su fragmentación en capas delgadas.

Estrato: En Geología se llama estrato a cada una de las capas en que se presentan divididos los sedimentos, las rocas sedimentarias, las rocas piroclásticas y las rocas metamórficas cuando esas capas se deben al proceso de sedimentación.

Friable: Propiedad de un material que lo hace fácilmente rompible, desmenuzable.

Gneis: Se denomina gneis a una roca metamórfica compuesta por los mismos minerales que el granito (cuarzo, feldespato y mica) pero con orientación definida en bandas, con capas alternas de minerales claros y oscuros.

Hábito: Término que se refiere al desarrollo relativo de las caras y formas en un cristal.

Hipogénico: Que se ha formado en el interior de la Tierra.

Interestratificación: Literalmente, «entre dos estratos»; p. ej., una colada de lava puede aparecer interestratificada entre dos estratos sedimentarios; una caliza puede estar interestratificada entre dos estratos de pizarra.

Limo: Sedimento clástico incoherente transportado en suspensión por los ríos y por el viento, que se deposita en el lecho de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados. Para que se clasifique como tal, el diámetro de las partículas de limo varía de 0,0039 mm a 0,0625 mm.

Roca ígnea: Son aquellas que se forman cuando el magma (roca fundida) se enfría y se solidifica.

Shale: Roca detrítica de grano fino, una lutita, con laminación paralela a la estratificación, que no ha sufrido condiciones de metamorfismo.

Silicificación: Es el proceso por el cual la madera, los huesos, las conchas y otros materiales a veces fosilizan o petrifican por acción de silicatos como el jaspe, el cuarzo criptocristalino e incluso el ópalo.