



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
TUXTLA GUTIÉRREZ

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA**

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL

**EFFECTO DEL TAMAÑO DE GRANO DE LAS ARCILLAS EN LA ADHERENCIA DE UN
GEOPOLÍMERO.**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:
LUIS FERNANDO VELASCO CASTILLO**

**ASESOR INTERNO:
M.C.A. MIGUEL CID DEL PADRO MARTÍNEZ**

**ASESOR EXTERNO:
DRA. GLORIA MARÍA MARTÍNEZ GONZÁLEZ**

CELAYA, GTO., AGOSTO-DICIEMBRE 2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por cuidar siempre de mí y con su bendición demostrarme que todo se puede.

A la Dra. Gloria María Martínez González, por la oportunidad que me brindo de poder trabajar con ella y en su equipo de investigación, por la confianza y el apoyo que siempre existió, por los nuevos conocimientos y experiencias adquiridas en este proyecto de investigación.

Al M.C. Florencio Javier Pérez Núñez, al Dr. Armando Almendarez Camarillo y el M.C. Martín Caudillo Ramírez por el apoyo y las facilidades prestadas para realizar actividades y pruebas requeridas por esta investigación.

Al M.C.A. Miguel Cid del Padro Martínez, al Dr. Samuel Inciso Sáenz, al M.C. Francisco Martínez por la revisión de este trabajo.

A mis padres, abraham y Leticia, por su apoyo y amor incondicional, por nunca dejarme solo y estar siempre para mí, por ser mi inspiración, mi fuerza, mi ejemplo a seguir y muchas más, gracias.

A mis hermanos Alejandro y Jorge, quienes siempre han cuidado de mí y han estado conmigo, quienes nunca me negaron su ayuda, muchas gracias por estar conmigo.

A mis compañeros de residencia y amigos, Carlos Tamayo y Karla Guerrero con quienes compartí buenos momentos, experiencias y conocimiento.

CELAYA, GTO.

18/12/2018

A QUIEN CORRESPONDA:

Por este medio notifico y hago de su conocimiento que los resultados obtenidos y la información del proyecto "Efecto del tamaño de grano de las arcillas en la adherencia de un geopolímero" desarrollado por Luis Fernando Velasco Castillo con número de control 14270343 durante su residencia profesional en el semestre Agosto-Diciembre pertenecen a la Dra. Gloria María Martínez González, profesor Investigador del Tecnológico Nacional de México en Celaya.

ATENTAMENTE



DRA. GLORIA MARÍA MARTÍNEZ GONZÁLEZ

PROFESOR INVESTIGADOR

RESUMEN

En este trabajo se realiza un estudio sobre el efecto en la adherencia al ladrillo rojo, que tiene un geopolímero al modificar el tamaño de las partículas que lo conforman. El geopolímero está formado a base de tres tipos de arcillas que ya han sido caracterizadas anteriormente y son denominadas como Tepozán, Caolín y Bauwer en adición con Silicato de Sodio comercial. Las arcillas son provenientes de los bancos que pertenecen al poblado de Delgado de Abajo municipio de Comonfort, Gto. Los tamaños a utilizar en esta investigación son propuestas propias, pero se basan en un artículo de investigación en donde al experimentar con arcillas y partículas cerámicas concluyen que el tamaño ideal de estas partículas para que el geopolímero posea una distribución dimensional estable en el rango de 150 μm a 750 μm .

Los tamaños propuestos corresponden a tres Mallas Tyler, #30 (595 μm), #60 (250 μm), #100 (150 μm), las arcillas son sometidas a un proceso de trituración (llamado de primer nivel) con equipos para triturar de tipo Quijadas o Mandíbulas que facilitan una primera disminución en la dimensión de las rocas que posteriormente van a una molienda con un molino de Bolas en donde la reducción es aún mayor, y da como resultado los tamaños requeridos para que mediante tamices sean separados, esta separación se realiza con una serie compuesta de 6 mallas Tyler (#30, #35, #40, #60, #80, #100). La formulación base del geopolímero que sirve de referencia corresponde a 50% silicato de sodio, 23% Tepozán, 21% Caolín y 6% Bauwer con un espesor de 5 mm de mortero, pero con un tamaño de partícula de 235 μm .

Los geopolímeros obtenidos serán probados como recubrimiento, con una capa que cubra al ladrillo rojo que tendrá un espesor de 5 mm, las pruebas a las que se someterán los geopolímeros son: Secado, quemado, tiempo de absorción del agua, adherencia al ladrillo rojo y análisis de composición química SEM de la arcilla Bauwer.

A partir de la prueba de quemado, se selecciona al geopolímero o a los geopolímeros que presenten mejores resultados, es decir, no presenten algún tipo de fractura, estos serán los únicos a los que exclusivamente se le someterá a la prueba de adherencia. Para efectos de reconocimiento y experimentación preliminar se utilizan probetas de ladrillo rojo, pero con un tamaño menor a las medidas reales, que el ladrillo comercial, denominadas probetas representativas. El uso de estas probetas brinda la posibilidad de obtener información real sobre el comportamiento que tiene dicho geopolímero elaborado con diferentes tamaños de partícula, y nos permiten predecir resultados favorables o no, antes de que se haga uso del geopolímero en los ladrillos de tamaño real.

Las pruebas realizadas muestran un comportamiento interesante, el geopolímero adquiere una mayor resistencia al calor si las partículas que lo conforman poseen un mayor tamaño caso estudiado con el tamaño de partícula de 595 μm , este geopolímero mostraba mejor comportamiento al momento de exponerlo a altas temperaturas sobre los 1000 $^{\circ}\text{C}$ esto se afirma ya que no sufrió fisuras ni fracturas por efectos del calor, otro dato interesante es que al aumentar el tamaño de las partículas la capacidad de adherirse al ladrillo rojo comienza a disminuir, es decir, a mayor tamaño de partícula menor adherencia, esto se determinó al realizar las pruebas de adherencia con las probetas de tamaño real, aun así la adherencia que posee este geopolímero le permite permanecer estable sobre el ladrillo rojo.

CONTENIDO	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Tecnológico Nacional de México Campus Celaya	2
1.2 Descripción de la Problemática A Resolver	2
1.3 Objetivo General	3
1.4 Justificación	3
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	
2.1 Arcillas y sus características	4
2.2 Composición química de las arcillas Tepozán, Caolín, Bauwer.	5
2.3 Caracterización Mineralógica de las arcillas Tepozán, Caolín, Bauwer.	5
2.4 Análisis Termogravimétrico Tepozán, Caolín, Bauwer	7
2.5 Arcilla y Material refractario	9
2.5.1 Material Refractario	9
2.6 Agente Activador Alcalino	11
2.7 Geopolímeros	12
2.7.1 Generalidades de los geopolímeros	13
2.7.2 Geopolimerización	14
2.7.3 Geopolímero consolidado 50S23T21C6B	15
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	
3.1 Búsqueda del estado del arte sobre geopolímeros	18
3.2 Identificación, Búsqueda y Recolección de la materia prima, en los bancos de Arcillas	18
3.2.1 Identificación	18
3.2.2 Búsqueda y Recolección	18
3.3 Trituración, Molienda y Tamizado de las arcillas	19
3.4 Obtención de geopolímeros usando un agente activador en su formulación conociendo la composición de las arcillas previamente caracterizadas	20
3.4.1 Aplicación de geopolímeros a probetas representativas de ladrillo rojo como medio de soporte.	22
3.4.2 Prueba de secado del geopolímero	23

3.4.3 Pruebas de quemado de ladrillo con geopolímero, con rampas de temperatura y tiempo definido	23
3.4.4 Tiempo promedio de absorción de agua del geopolímero	24
3.5 Pruebas de adherencia del geopolímero sobre el ladrillo rojo de tamaño real	24
3.5.1 Varianza y Desviación estándar para los resultados de adherencia de geopolímero	25
3.6 Análisis de composición de arcilla Bauwer con microscopio electrónico de barrido SEM	26
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1 Prueba de secado de geopolímero	31
4.2 Pruebas de quemado de ladrillo con geopolímero, con rampas de Temperatura y tiempo definido	33
4.3 Tiempo promedio de absorción de agua del geopolímero	37
4.4 Pruebas de adherencia del geopolímero sobre probetas de ladrillo rojo de tamaño real	39
4.5 Análisis de desviación estándar y varianza para adherencia de geopolímero	40
4.6 Resultados de composición de arcilla Bauwer con microscopio electrónico de barrido SEM	41
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1 Conclusiones	42
5.2 Recomendaciones	43
COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y APLICADAS	44
REFERENCIAS	45
ANEXO 1	
Imágenes obtenidas por el análisis SEM realizado a la arcilla bauwer, donde muestra la distribución aproximada de los elementos presentes	46
ANEXO 2	
Gramos de geopolímero para las probetas representativas de malla 30, 60, 100 y para el recubrimiento de los ladrillos de tamaño real con tamaño de partícula de 595 µm correspondiente a malla 30	49

ANEXO 3

Dispositivo de acero coll rolled tipo solera fabricado para prueba de adherencia con ladrillos de tamaño real	52
--	-----------

ANEXO 4

Imágenes de estructura de la capa del geopolímero con medidas de partícula de 150 µm, 250 µm y 595 µm	53
--	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.3 Difractogramas de las arcillas: a) Tepozán, b) Caolín, c) Bauwer. Fases minerales identificadas: caolinita (•), alunita (□), cuarzo (∇), stevensita (☆)	6
Fig. 2.4.1 Termograma de la arcilla Tepozán, intervalo de 25 a 1000°C, a una atmósfera de aire	7
Fig. 2.4.2 Termograma de la arcilla Caolín, intervalo de 25 a 1000°C, a una atmósfera de aire	8
Fig. 2.4.3 Termograma de la arcilla Bauwer, intervalo de 25 a 1000°C, a una atmósfera de aire	8
Fig. 2.6 Estructura amorfa del silicato de sodio consolidado	11
Fig. 2.7.1 Gráfico molecular computarizado de polímeros Mn-(Si-O-Al-O) _n polisialato	13
Fig. 2.7.2 Proceso de geopolimerización	14
Fig. 2.7.3 Difractograma del geopolímero consolidado a 1000 °C	15
Fig. 2.7.3.1 Termograma del geopolímero consolidado de 25 a 1000°C a 1 atm	16
Fig. 2.7.3.2 Termograma del geopolímero consolidado térmicamente a 1000°C 1 atm, en un intervalo de 25 hasta 1000°C	17
Fig. 3.3 Tamizado de arcillas para obtener medidas de malla 30, 60, 100. Después del proceso de trituración y molienda	20
Fig. 3.4 Vista lateral de la capa de geopolímero sobre el ladrillo, conservando la mitad de la longitud de este	21
Fig. 3.4.1 Vista superior de la capa de geopolímero sobre el ladrillo	21
Fig. 3.4.2 Mezclado de las arcillas Tepozán, Caolín, Bauwer con Silicato de Sodio comercial	22
Fig. 3.4.3 Aplicación de Geopolímero en una de las probetas de ladrillo rojo	22
Fig. 3.4.3.1 Mufla FELISA FE-360 para quemar las probetas de ladrillo con geopolímero	23
Fig. 3.5 Prueba de adherencia en equipo universal	24

Fig. 3.6 Arcilla Bauwer molida, aproximadamente 3 gramos	26
Fig. 3.6.1 Horno FELISA configurado a 90 °C por 4 horas para extraer el exceso de humedad que afectaría el análisis SEM	27
Fig. 3.6.2 Arcilla Bauwer dentro del horno FELISA antes de iniciar el proceso de secado	27
Fig. 3.6.3 Desecador con muestra de arcilla Bauwer reposando para análisis SEM	28
Fig. 3.6.4 Pines de cobre en presencia de acetona sometidos a un baño ultrasónico	28
Fig. 3.6.5 Pines limpios sin residuos	29
Fig. 3.6.6 Pines colocados en la porta pines con las muestras de arcilla para realizar el análisis SEM	29
Fig. 3.6.7 Microscopio Electrónico de Barrido SEM, JEOL JSM-6510LV	30
Fig. 3.6.8 Vista del proceso de análisis del microscopio electrónico de barrido SEM.	30
Fig. 4.1 Se aprecia la aplicación del geopolímero como cubierta de la probeta	31
Fig. 4.1.1 Geopolímero con tamaño de partículas correspondiente a Malla tyler 60, después de 7 días de Secado	31
Fig. 4.1.2 Geopolímero con tamaño de partículas correspondiente a malla Tyler 100, después de 7 días de secado	32
Fig. 4.1.3 Geopolímero con tamaño de partículas correspondiente a Malla Tyler 30, después de 7 días de secado	32
Fig. 4.2 Geopolímero quemado, probeta número 1, con tamaño de partícula correspondiente a malla 100 presentando evidentes fracturas	33
Fig. 4.2.1 Geopolímero quemado probeta número 2 con tamaño de partícula correspondiente a malla 30, sin ninguna fisura o fractura	34
Fig. 4.2.2 Geopolímero quemado prueba número 2 con tamaño de partícula correspondiente a malla 60 con una fractura y algunas fisuras menores	34
Fig. 4.2.3 Geopolímero quemado probeta número 2 con tamaño de partícula correspondiente a malla 100 presentando leves fisuras y dos fracturas	35
Fig. 4.2.4 Replica Geopolímero quemado probeta número 3 con tamaño de partícula correspondiente a malla 60, con fisura	35
Fig. 4.2.5 Replica Geopolímero quemado probeta número 3 con tamaño de partícula correspondiente a malla 100 con fisura	36
Fig. 4.2.6 Replica Geopolímero quemado probeta número 3, con tamaño de partícula correspondiente a la malla 30 sin ninguna fisura o fractura	36

Fig. 4.3. Geopolímero con tamaño de partícula correspondiente a malla 30 sometido a prueba de absorción	37
Fig. 4.3.1 Geopolímero con tamaño de partícula correspondiente a malla 60 sometido a prueba de absorción	37
Fig. 4.3.2 Grafica de tiempo promedio de absorción de agua de los geopolímeros	38
Fig. 4.6 Imagen EDS de arcilla Bauwer mediante Microscopio electrónico de barrido SEM	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2 Composición de las arcillas	5
Tabla 2.3 Caracterización y balance mineralógico representativo de las arcillas Caolín, Tepozán y Bauwer.	6
Tabla 2.7.3 Caracterización química representativa del geopolímero consolidado.	15
Tabla 3.3 Número de malla y equivalencias en mm y pulgadas	19
Tabla 4.3 Tiempos de absorción de agua de los diferentes geopolímeros	38
Tabla 4.4 Fuerza de tensión de las probetas de ladrillo quemadas.	39
Tabla 4.4.1 Adherencia de las probetas de ladrillo quemadas	39
Tabla 4.4.2 Fuerza de tensión de las probetas de ladrillo sin quemar	39
Tabla 4.4.3 Adherencia de las probetas de ladrillo sin quemar	39
Tabla 4.5 Desviación estándar y Varianza para resultados de adherencia	40
Tabla 4.6 Composición química cualitativa de la arcilla Bauwer	41

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años los seres humanos tienden a requerir de una mayor disponibilidad de servicios y productos, por ejemplo, materiales de construcción, debido a esta causa la industria a nivel mundial sufre cambios, y los más notables son cuando los procesos comienzan a ser obsoletos, a no cumplir con los parámetros de las legislaciones o reglamentos ambientales. Además de que no logran suplir la necesidad de un producto, por eso en las últimas décadas los avances se orientan a tecnologías que estén en armonía con todos los ámbitos de nuestro entorno y sean una alternativa que logre satisfacer los requerimientos del consumo utilizando nuevos productos, nuevos procesos y nuevas fuentes de materia prima que puedan ser empleados en diferentes aplicaciones.

Analizando el siguiente punto, Guanajuato tiene lugares que se dedican a la producción de ladrillo rojo, utilizan hornos que con los ciclos de quemado se va reduciendo su vida útil, la mayoría funciona con gas LP y algunos con energía eléctrica, con un costo alto por operación, sabemos bien que en los procesos de transferencia de calor es muy importante producir la mayor cantidad de calor por el mínimo uso de combustible, esto se traduce a buscar alternativas que ayuden al proceso en general y para disminuir las pérdidas de calor, en nuestro caso por las paredes del horno hacia el exterior y aumentando el tiempo de vida o ciclos de quemado.

Un ejemplo del desarrollo de estos nuevos materiales es obtener un geopolímero refractario con buena adherencia en donde las arcillas juegan un papel muy importante para que se pueda emplear como recubrimiento de las paredes de los hornos ladrilleros, mejorando el aislamiento con el exterior que se traduce en un mayor aprovechamiento de la energía que produce el calor, esto es muy probable debido a que se han encontrado presencia de minerales como SiO_2 , Al_2O_3 , en la composición de las arcillas, demuestran que pueden ser potencialmente utilizadas para este fin. Ahora, en el poblado de Delgado de abajo existen bancos de diferentes tipos de arcilla, para el desarrollo de este geopolímero, y que son de mucho interés por sus altas características refractarias, además de que se les han sometido a estudios de tamaños de partícula, y de acuerdo a los resultados se conoce y reafirma el alto potencial en esta clase de aplicación.

El desarrollo de geopolímeros causaría una mejora en la situación económica de los habitantes del lugar, ya que se podría comercializar mucha más cantidad de esta materia prima, siendo actualmente el costo por tonelada de 180 a 200 pesos el cual es relativamente bajo. Como resultado tendríamos un menor consumo de energía, disminuyendo el nivel de contaminación, una mayor vida útil de los hornos que se traduce en una mayor producción y posicionamiento en el mercado de este nuevo producto.

1.2 TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO CAMPUS CELAYA

Institución pública de educación, fundada en 1958, iniciando servicios desde secundaria técnica. Actualmente dedicada a la educación superior en niveles de licenciatura, maestría y doctorado.

MISIÓN: Formamos ciudadanos del mundo con orientación a la investigación e innovación; nos vinculamos a los diferentes sectores con respeto por el entorno, viviendo principios y valores que nos permitan desempeñarnos de manera efectiva en la sociedad del conocimiento y contribuir así al desarrollo socioeconómico de México y del mundo.

VISIÓN: Desarrollar las futuras generaciones de líderes en los ámbitos: empresarial, investigación, innovación, educativo y público; logrando ser la mejor Institución de Educación Superior Tecnológica del país

A partir del rigor intelectual, el espíritu crítico, la transversalidad en el conocimiento, la innovación y el emprendedurismo, son personas y profesionales competentes, con capacidades y habilidades para enfrentar los retos presentes y futuros como agentes de cambio económico y social. Somos una institución con personal docente, de investigación y de apoyo a la educación, comprometidos con la satisfacción de nuestros grupos de interés.

1.3 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA A RESOLVER

El estado de Guanajuato es una zona donde se produce Ladrillo Rojo, un material de mucha utilidad para la industria de la construcción.

- En el proceso de fabricación se enfrenta a un problema central, el cual trata del ciclo de vida de los hornos ladrilleros, estos hornos están constituidos del mismo material, es decir, ladrillo. Debido a las altas temperaturas y el efecto que estas causan en cada ciclo de quemado, las paredes de los hornos se deforman y tienden a abrirse afectando su estructura y reduciendo considerablemente la vida útil del mismo.
- Se desconoce si alguna de las nuevas propuestas de tamaño de partícula generará un geopolímero con buena adherencia al ladrillo rojo y podrá ser utilizado como recubrimiento para los hornos ladrilleros.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Obtener un geopolímero con buenas propiedades refractarias y buena adherencia al ladrillo rojo usando arcillas con diferentes tamaños de partículas y un agente activador alcalino.

1.4.1 OBJETIVO ESPECÍFICO

Observar el efecto que tiene el calor sobre el geopolímero con sus diferentes tamaños de partículas y determinar si son aptos como recubrimiento para fines refractarios.

1.5 JUSTIFICACIÓN

En el poblado de Delgado de Abajo cuentan con arcillas de bajo costo con alto contenido de Si y Al, lo que permitirá obtener un geopolímero refractario haciendo uso de ellas, debido a que en la actualidad se está optando por avances tecnológicos y científicos más amigables con nuestro entorno, los geopolímeros representan una línea relativamente nueva de investigación en el país. Al obtener un geopolímero con buena adherencia se podrá usar como recubrimiento en la pared de los hornos ladrilleros ya que las arcillas presentan buenas características refractarias. La ventaja de los geopolímeros es que en su proceso de obtención no contaminan ya que solo existe presencia de arcilla y un agente alcalino como el silicato de sodio que cumple la función de activador, además es un proceso relativamente más sencillo, más económico y menos contaminante, si lo comparamos con la obtención del cemento portland.

Al usar las arcillas de la comunidad en la elaboración de nuevos productos es posible mejorar la calidad de vida de sus habitantes, ya que es un medio de ingresos económicos.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

2.1 Arcillas y sus Características.

Las arcillas pueden tener varios usos, dependen del área en la que sean utilizadas, ya sea en la industria o en un laboratorio científico. En una dimensión internacional el uso y aplicaciones de las arcillas son muy variadas, pero su mayor aplicación es en los productos cerámicos. Los significados del término arcilla pueden ser ambiguos y debido a esto requiere de diferentes tipos de clasificaciones para poder ser entendidas, estas clasificaciones son: Tamaño de partícula, mineralógica, petrografía, propiedades físicas y varias más. Las arcillas son fruto de los agentes de meteorización físico-químicos actuantes sobre la roca madre original y se puede considerar como unas acumulaciones naturales, consolidadas o no, de tamaño de grano fino ($< 1 \mu\text{m}$ según los químicos que estudian los coloides, $< 2 \mu\text{m}$ según los mineralogistas e investigadores del suelo, y $< 4 \mu\text{m}$, según los sedimentólogos) y constituidas por variados minerales arcillosos (silicatos aluminicos hidratados, con iones principalmente Mg, Fe, K y Na) y otros minerales acompañantes como el cuarzo, los feldspatos, los carbonatos, etc. Además, salvo excepciones, poseen un comportamiento físico muy peculiar frente al agua su plasticidad, e incluso endurecen cuando son secadas o sometidas a tratamientos térmicos a alta temperatura.

Una de las definiciones del concepto “arcilla” con mayor veracidad es el siguiente “Materia prima natural con una constitución de partida compuesta por minerales de tamaño fino, que se comporta plásticamente con el agua y que endurece al ser secada o calentada”; según la nomenclatura de los comités de la AIPEA y de la Clay Minerals Society (CMS). Desde un punto de vista petrográfico, las arcillas tienen múltiples parámetros de identificación; siendo así las rocas que en su composición contienen minerales de tipo arcillosos pueden clasificarse por su mineralogía con alto contenido de caolinita, y su alto contenido de alúmina, origen geológico de tipo sedimentario, a sus propiedades físicas como plasticidad, reología, a su utilización en procesos industriales más específicamente en el sector refractario y muchas otras clasificaciones, es difícil definir una sola clasificación que involucre todas las características existentes de las arcillas (Díaz y Torrecillas, 2002).

Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esméticas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita). La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato) (García y Suárez, 2018).

Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esméticas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlamilar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlamilar es el sodio, las esmécticas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esméctica, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si, por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida (García y Suárez, 2018).

2.2 Composición química de las arcillas Tepozán, Caolín, Bauwer.

Una investigación anterior mediante una técnica de análisis instrumental conocida como Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS) se determinó la composición química de las arcillas Tepozán, Caolín y Bauwer, los elementos se muestran en porcentaje de masa en la Tabla 2.2, así como el agua caracterizada y las pérdidas de cada arcilla por calcinación (Torres, 2013).

Tabla 2.2 Composición de las arcillas

COMPUESTO	TEPOZAN	CAOLIN	BAUWER
SiO ₂	62.76	47.90	68.13
Al ₂ O ₃	22.06	28.33	6.78
CaO	0.31	0.38	0.32
MgO	0.54	0.49	9.29
Fe ₂ O ₃	0.82	0.22	0.61
Na ₂ O	0.23	0.48	0.39
K ₂ O	0.22	2.98	0.12
%H ₂ O	1.95	0.32	7.12
%PPC(500)	1.58	1.20	2.75
%PPC(1000)	9.42	17.69	3.82

El análisis realizado brinda un panorama sobre los compuestos químicos de las arcillas, por ejemplo, se puede apreciar que los Óxidos (CaO, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O) están en una cantidad muy pequeña, a diferencia de los otros óxidos como el SiO₂ y Al₂O₃ que su porcentaje llega a ser muy alto debido a que la base de su composición es de Si y Al.

2.3 Caracterización mineralógica de las arcillas Tepozán, Caolín, Bauwer.

Entre las fases minerales identificadas en las arcillas se encuentra el cuarzo, la caolinita y la stevensita, estas fases minerales contienen una proporción importante de silicio, causante de la alta proporción de óxido de silicio (SiO₂) encontrada en el análisis por AAS, con 62.76% para el Tepozán, 47.90% para el Caolín y 68.13% para el Bauwer. Por difracción de rayos X en las arcillas Tepozán y Caolín se identificó a la alunita, esta estructura contiene una importante cantidad de aluminio, esto podría justificar la cantidad de óxido de aluminio, para el Caolín y Tepozán con 28.33% y 22.06% respectivamente. En la arcilla Bauwer se identificó a la stevensita, este mineral está constituido por una cantidad importante de magnesio, por lo que la presencia de este mineral explica la alta proporción encontrada por AAS en esta arcilla (Torres, 2013).

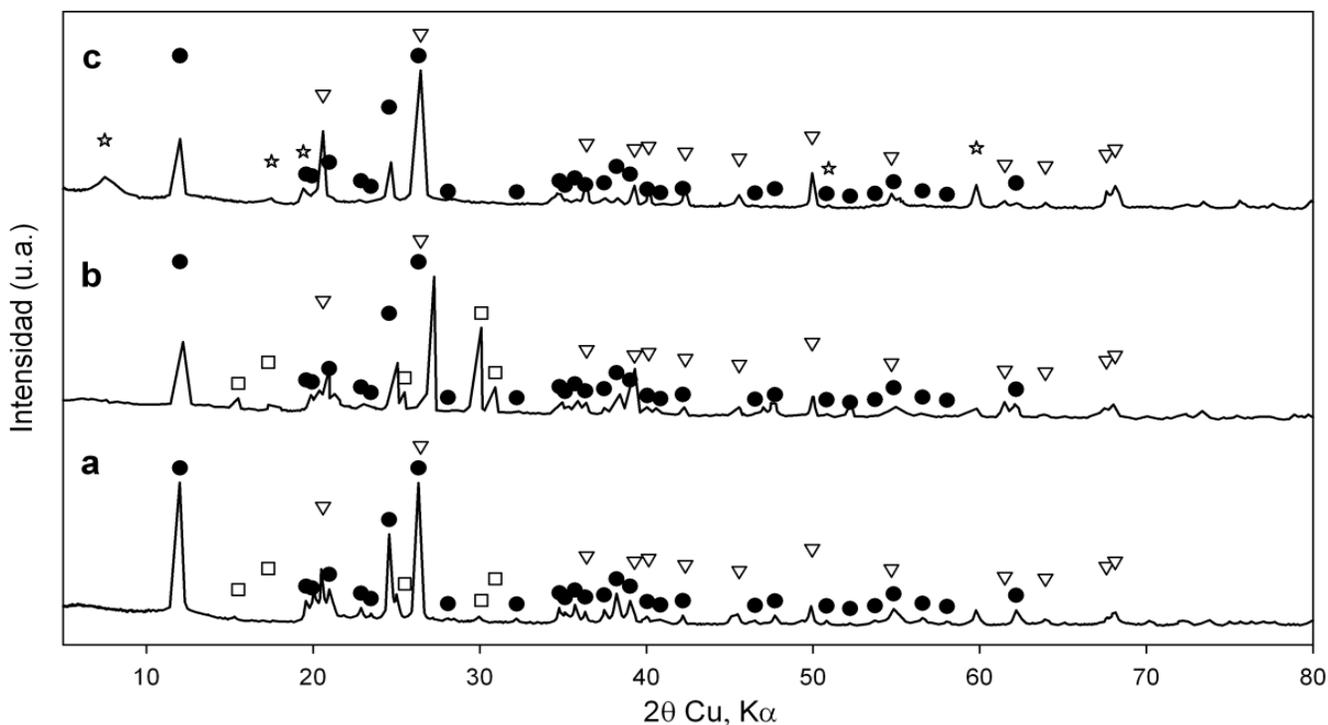


Fig. 2.3 Difractogramas de las arcillas: a) Tepezán, b) Caolín, c) Bauwer. Fases minerales identificadas: caolinita (•), alunita (□), cuarzo (▽), stevensita (☆).

En la Fig. 2.3 se muestra el balance mineralógico para las 3 arcillas, con los resultados obtenidos de la caracterización química y mineralógica, siguiendo el procedimiento propuesto por Gallaga-Ortega et al., en 2002. Se puede observar que la arcilla Tepezán tiene un mayor contenido de caolinita con 55.85%, seguida del Caolín con 47.21% y del Bauwer con 9.57%. La arcilla Caolín tiene una proporción importante de Alunite con 26.23%, el Tepezán presenta alunite como mineral minoritario con 1.94%.

El Bauwer es la arcilla que presenta mayor contenido de cuarzo con un 65.14%, mientras que esta misma arcilla contiene una cantidad importante de stevensita con 18.17%. Como el Bauwer tiene una cantidad importante de esméctica, y este mineral tiene la capacidad de absorber agua en el espacio interlamilar, se justifica la alta cantidad de agua cristalizada (%H₂O) como resultado de la humedad (Torres, 2013).

Tabla 2.3 Caracterización y balance mineralógico representativo de las arcillas Caolín, Tepezán y Bauwer.

FASE MINERAL	TEPOZAN	CAOLIN	BAUWER
Caolinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$	55.85	47.21	9.57
Alunite $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$	1.94	26.23	-
Cuarzo SiO_2	41.25	26.22	65.14
Esméctica (Stevensita) $(Ca,Mg)_xMg_6Si_6O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$	-	-	18.17
Agua	0.93	0.32	7.12

2.4 Análisis termogravimétrico.

- En la Fig. 2.4.1 se muestra el termograma de la arcilla Tepozán. Se observan 6 procesos endotérmicos. El primer proceso, centrado en 50.1°C es el inicio de la eliminación del agua en la superficie de la arcilla. El proceso centrado en 320.5°C es la eliminación del agua cristalizada en la alunita. El proceso endotérmico centrado en 563.3°C se asocia a la deshidroxilación de la caolinita y alunita, de igual manera a la formación de metacaolín. Los procesos endotérmicos centrados en 732.5°C y 850.5°C se asocian a la reacción de desulfatación de la alunita; al tener un porcentaje reducido de alunita estas bandas son apenas perceptibles. El proceso centrado en 979.0°C, está asociado a la transformación de metacaolín a espinela.

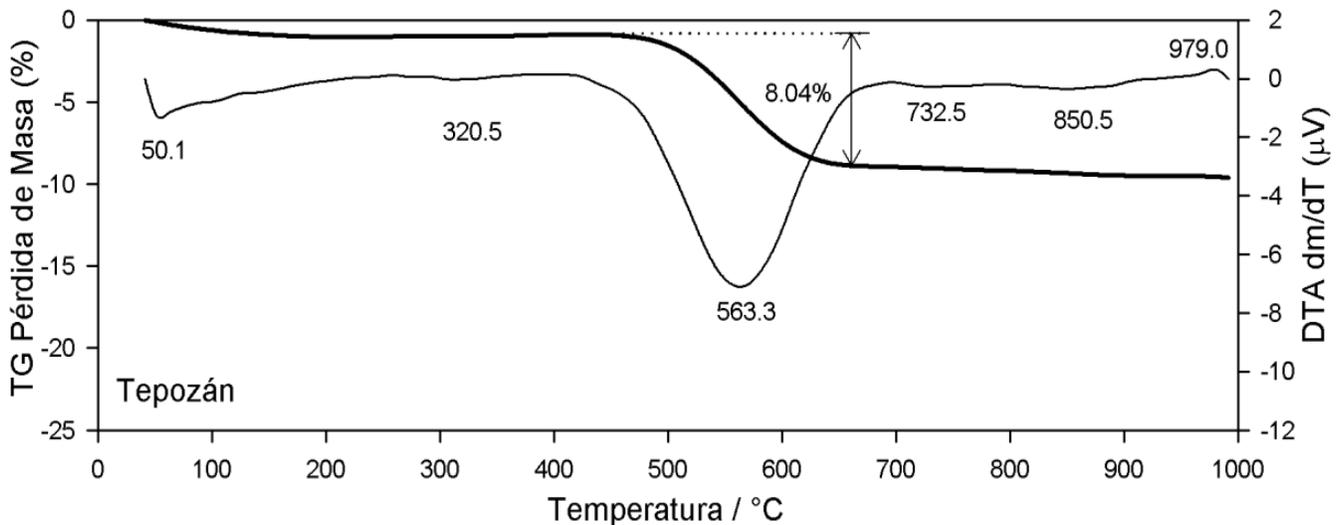


Fig. 2.4.1 Termograma de la arcilla Tepozán, intervalo de 25 a 1000°C, a una atmósfera de aire.

En la Fig. 2.4.2 se muestra el termograma para el Caolín. En este gráfico se pueden observar dos procesos endotérmicos importantes centrados en 566.4°C y 780.4°C, el primero está asociado a la deshidroxilación de la caolinita y su transformación a metacaolín y a la deshidroxilación de la alunita, ambos minerales contenidos en esta arcilla. El segundo proceso centrado en 780.4°C está asociado a la desulfatación de la alunita, este proceso tiene una banda intensa debido a la gran cantidad de este mineral (26.23%) encontrado por AAS. El proceso centrado en 867.5°C está asociado a la transformación de metacaolín a Al-Si espinela, mientras que el proceso exotérmico centrado en 975.2°C se asigna a la formación de mulita 2:1 por descomposición de Al-Si espinela (Torres, 2013).

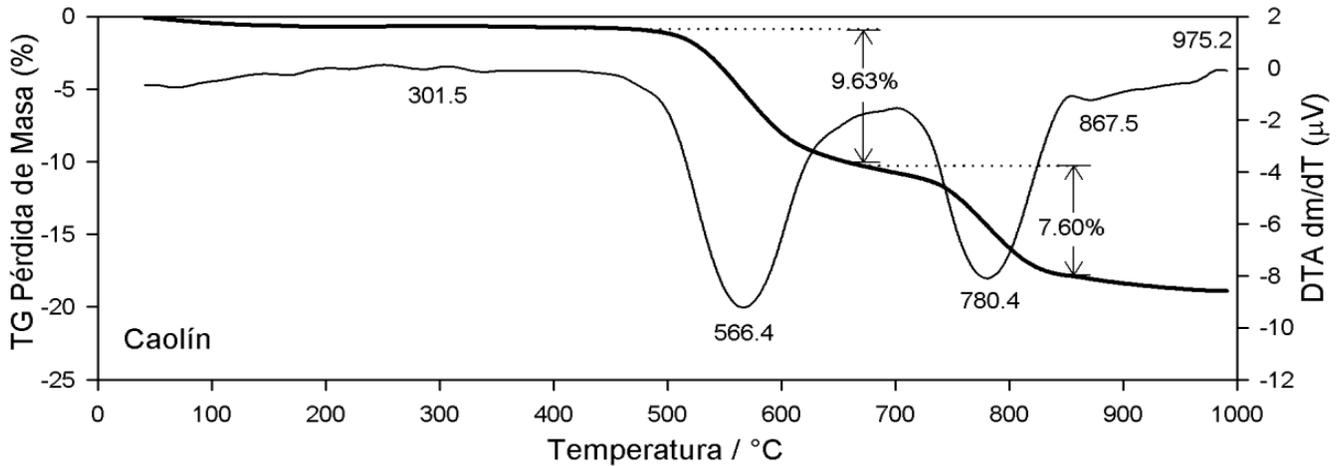


Fig. 2.4.2 Termograma de la arcilla Caolín, intervalo de 25 a 1000°C, a una atmósfera de aire.

En la Fig. 2.4.3 se muestra el termograma para la arcilla Bauwer. Se aprecia un proceso endotérmico importante centrado en 79.6°C, esto se asigna a la eliminación del agua cristalizada, la arcilla Bauwer contiene una proporción importante de esmectica (18.17%), este mineral tiene la característica de adsorber una importante cantidad de agua en el espacio interlaminar. El siguiente proceso endotérmico está centrado en 543.6°C, este se asigna a la deshidroxilación de la caolinita y la esmectica. El proceso exotérmico centrado en 904.8°C se asigna a la transformación de metacaolín a Al-Si espinela y, la banda centrada en 967.6°C se asigna a la transformación de Al-Si espinela en mulita 2:1 (Torres, 2013).

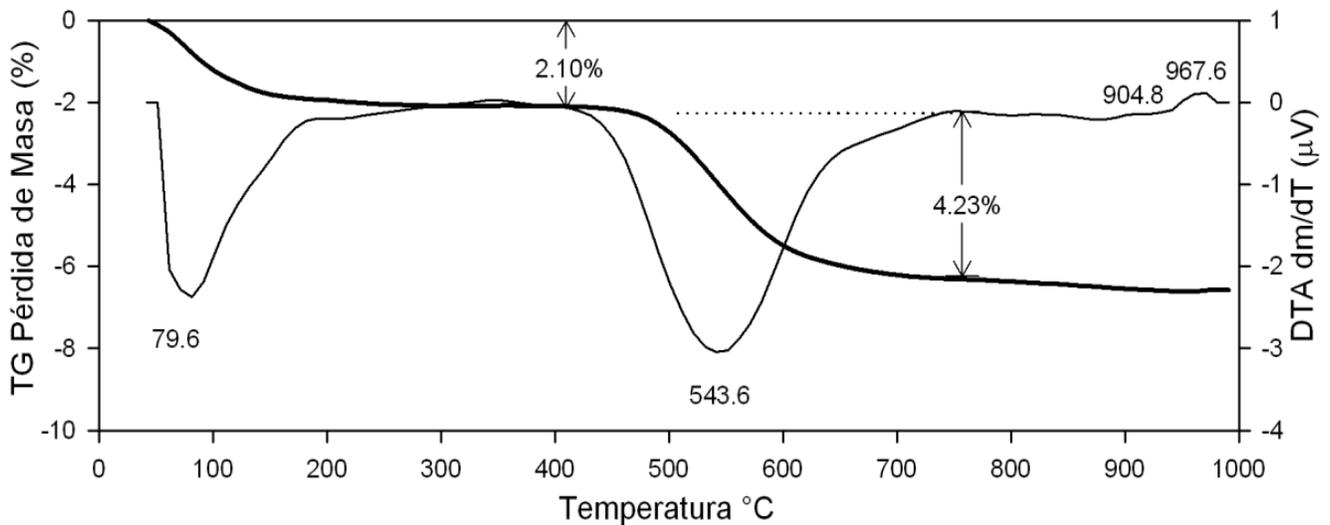


Fig. 2.4.3 Termograma de la arcilla Bauwer, intervalo de 25 a 1000°C, a una atmósfera de aire.

2.5 Arcilla y Material refractario.

Una clasificación de las arcillas corresponde a su Fusibilidad, propiedad que explica con qué facilidad un material puede derretirse o fundirse por un aumento de temperatura, según el punto o grado de cocción, existen dos tipos de arcillas: Las Refractarias y las Fusibles.

Las arcillas refractarias son arcillas y caolines cuyo punto de fusión está comprendido entre 1600 y 1750 °C, son arcillas y caolines blancas, grises y poco coloreadas después de su cocción. Las arcillas fusibles o arcillas de alfarería son cuyo punto de fusión se alcanza por encima de los 1100 °C, son de color castaño, ocre, amarillo o marfil tras su cocción, estas suelen encontrarse en la superficie del suelo.

Los materiales con una alta temperatura de fusión como el caso de los refractarios poseen bajos coeficientes de dilatación térmica. Se aspira a un valor aproximado para el caso de refractarios, que es de $5.4 \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$. La conductividad térmica en los cerámicos es baja debido a la porosidad que incrementa la dispersión del calor. Este se aproxima para el caso de refractarios que es de $0.0016 \text{ (Btu)(Plg)/(Ft}^2\text{s)(}^\circ\text{F)}$. La transferencia de calor en los materiales de tipo cerámicos es causada por vibraciones en la red o fotones. A causa de que no hay contribución electrónica, la conductividad térmica de la mayoría de los cerámicos es baja. Los materiales con una estructura muy compacta producen fotones de energía muy alta, que estos a su vez generan conductividades térmicas elevadas. Los efectos de la red y la porosidad incrementan la dispersión reduciendo la conductividad, así estructuralmente el mejor tipo aislante contiene un gran porcentaje de porosidad.

La resistencia al choque térmico, al enfriar una pieza con rapidez, se producen gradientes de temperaturas que dan lugar a diferentes contracciones en distintos puntos de la estructura. Estas contracciones distintas inducen al mismo tiempo esfuerzos de clase mecánicos en el material, estos esfuerzos pueden conducir a una fractura (Tufiño, et al, 2012).

2.5.1 Material refractario.

En base a las normas internacionales ASTM, los materiales refractarios son de tipo no metálicos los cuales tienen propiedades químicas y físicas que los convierte en aptos para emplearlos en estructuras o componentes de sistemas, ambientes que son expuestos a condiciones no normales o comunes como una alta temperatura, condición promedio de 538 grados centígrados en adelante, así como esta existen otras definiciones sobre los materiales refractarios, pero con la finalidad de mantener un panorama amplio y uniforme de lo que pueden ser se sugiere la siguiente definición:

“Los refractarios son materiales heterogéneos que pueden resistir a una gran variedad de condiciones de servicio incluyendo: alta temperatura, choque térmico, desgaste físico, ataque químico, y pueden retener su integridad por un periodo aceptable de tiempo”.

A nivel industrial y a nivel científico las formas de clasificar a un material refractario pueden diferir, pero sin embargo para evitar muchas variaciones se puede afirmar que los materiales refractarios se clasifican en su mayoría por la composición química o también por las características fisicoquímicas, y por su forma física (Valera, 2009).

Según su composición química.

La composición química del material refractario determina muchas características y posibles aplicaciones o usos, debido a que existen gran variedad de estos materiales, la clasificación más general en base a su composición es la que se presenta a continuación.

Refractarios silicoaluminosos, refractarios de alta alúmina, refractarios de sílice, refractarios básicos, refractarios de carbón y refractarios especiales.

Debido a la finalidad de esta investigación solo se menciona a los materiales refractarios silicoaluminosos de sílice clasificaciones a las cuales se encuentran relacionadas las arcillas Tepozán, Caolín y Bauwer.

Los materiales refractarios silicoaluminosos están compuestos principalmente de aluminosilicatos hidratados con proporciones menores de otros minerales. Dichos refractarios se clasifican en: Súper Refractario, altamente refractario, moderadamente refractario, poco refractarios y semi-sílice. El rango de alúmina contenida puede variar entre 18% y 44% mientras que de 50% y 80% de sílice. Los refractarios silico aluminosos son utilizados principalmente en zonas de baja temperatura de altos hornos, hornos de cocción de carbón, cucharones de colada, hornos de procesamiento de caliza, hornos de reverbero de procesamiento de zinc, hornos de vidrio, ciclones precalentadores en plantas de cemento, torres de FCC, revestimientos de hornos túneles entre otros.

Los materiales refractarios de sílice, por razones notorias está mayormente constituidos por SiO_2 alcanzando hasta un 93% en peso, pero suelen contener cal, alúmina, óxido de hierro. En el proceso de conformado se suelen utilizar aditivos como cal y arcillas que promueven la sinterización y actúan como enlazante. Se secan y se aplica un proceso de calcinación. Un punto importante que debe acotarse al respecto de los refractarios de sílice son las transformaciones polimorfas que sufre el material con el aumento de la temperatura (Valera, 2009).

Las características más importantes de los refractarios de sílice incluyen:

- 1) Bajo precio.
- 2) Relativamente baja gravedad específica.
- 3) Alta Resistencia mecánica a altas temperaturas.
- 4) Bajo coeficiente de expansión a altas temperaturas.
- 5) No exhibe contracción después de largos periodos de tiempo de servicio a altas temperaturas.
- 6) Alta resistencia a la corrosión de escorias acidas y otras condiciones acidas.
- 7) Expansión anormal alta a bajas temperaturas.

Como hemos mencionado, las características de este tipo de materiales los hacen buenos candidatos a diferentes usos, su comportamiento llega a ser igual o mejor que productos que actualmente son usados y presentan fallas a condiciones no comunes, en resumen, son una gran alternativa.

2.6 Agente activador alcalino.

Silicato de sodio

El silicato de sodio es una solución producto de disolver la sal de silicato de sodio en agua o, por una fusión alcalina de cuarzo con hidróxido de sodio. Es un producto que tiene comúnmente presentaciones con concentraciones molares en relación de 1.8-3.8 SiO₂:Na₂O dicho silicato puede ser descrito en una dispersión coloidal de silicatos amorfos, esto último explica que no tiene una forma o figura definida, en solución acuosa. El tamaño de los coloides puede ser variado, algunas publicaciones reportan tamaños de partícula entre 1 y 5 nm.

Como es de estado acuoso el silicato de sodio pierde agua de forma natural o tipo forzada con la adición de calor, llevando al silicato a un proceso de consolidación en donde este comienza a endurecer, regularmente el silicato de sodio consolidado forma redes amorfas, como se muestra en la Fig. 2.6.

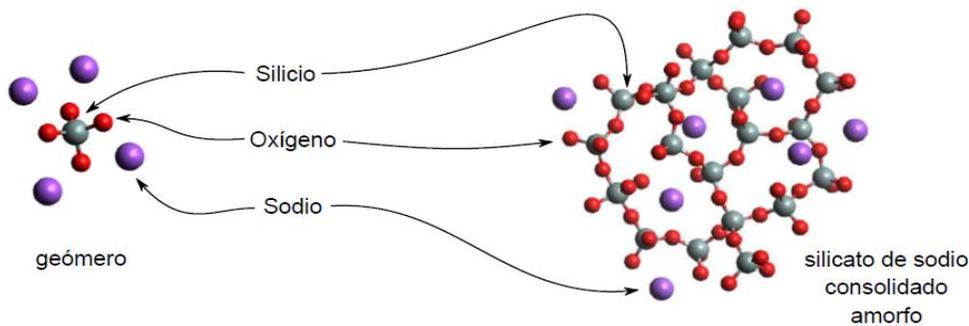


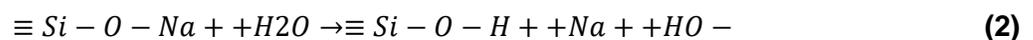
Fig. 2.6 Estructura amorfa del silicato de sodio consolidado.

Algunas investigaciones sobre las aplicaciones del silicato de sodio sugieren su uso en los procesos de consolidación de arena en la industria del petróleo, esto evita el movimiento de arena y su mezcla con los hidrocarburos. El grupo de investigación de Vargas et al. en 2004, analizaron el efecto espumante de mezclas de silicato de sodio y wallastonita por microondas, esto le da al silicato de sodio un uso potencial como precursor de cuerpos porosos para aplicaciones en la remoción de metales pesados en agua o como catalizador. Una de las características más importantes es la superficie protonada, la cual forma silanoles $-Si-OH$, esta superficie es útil para enlazar distintos grupos funcionales de una forma relativamente sencilla (Torres, 2013).

Una forma sencilla de explicar el proceso de consolidación del silicato de sodio es partiendo de la reacción de formación Ecuación (1). En esta reacción se conserva la coordinación IV del silicio.



Al proceso de pérdida de agua de las soluciones de silicato de sodio se le conoce como consolidación. El proceso de consolidación se puede describir en dos etapas importantes; la primera, la hidroxilación de la superficie Ecuación (2) y enlazamiento Ecuación (3) (Torres, 2013).



2.7 Geopolímeros.

El término polímeros se usa frecuentemente para denominar a una molécula bastante extensa orgánica con secuencias o cadenas repetitivas. En 1979 Joseph Davidovits introdujo el término *geopolímero* para denotar aquellos polímeros de origen inorgánico obtenidos tras la síntesis de una solución alcalina con un sólido constituido fundamentalmente por aluminosilicatos; surge así el concepto de la Geopolimerización. En general, los geopolímeros están constituidos por una red de silatos compuestos por tetraedros de SiO_4 y AlO_4 , enlazados alternativamente con átomos de oxígeno. Iones con carga positiva, tales como el Na^+ , K^+ o Ca^{2+} , son esenciales para el balance de la carga negativa del Al^{3+} , y se alojan en las cavidades de la estructura.

Son numerosas las variables que causan un efecto diferente en el proceso de elaboración del geopolímero algunos ejemplos son: tipo y composición de los materiales de partida, naturaleza y concentración del activador alcalino, temperatura y tiempo de curado, entre muchos más.

Los geopolímeros son una nueva clase de materiales cerámicos considerados revolucionarios debido a sus ventajas técnicas, tales como: resistencia mecánica elevada, excelente estabilidad frente a medios agresivos como puede ser la exposición a altas temperaturas. Además, su producción coadyuva a la utilización de tecnologías verdes, mitigando problemas ambientales como consecuencia del tipo de materias primas utilizadas: minerales naturales tales como el caolín calcinado a $800\text{ }^\circ\text{C}$, el metacaolín, procedente de la deshidroxidación del caolín, que es una arcilla blanca muy pura empleada para fabricar cerámica, porcelana y papel producido en los estados de Hidalgo, Zacatecas y Veracruz; de igual manera contribuye a la utilización de subproductos industriales y/o desechos siendo estos cenizas volantes (producidos en termoeléctricas), escorias de alto horno (siderurgia) y residuos industriales de aluminosilicatos, como es la ceniza volante generada en las plantas carboeléctricas. Sobre el empleo de este tipo de desechos, numerosos estudios se han llevado a cabo.

Los geopolímeros pueden ser sintetizados a partir de diferentes fuentes de materiales como arcillas calcinadas, minerales naturales, desechos industriales, rocas volcánicas o mezclas de dos o más materiales; además, estas tecnologías de procesamiento están asociadas a un bajo consumo energético y de explotación de recursos minerales. Tales méritos hacen del geopolímero un material ingenieril potencial en aplicaciones estructurales y/o funcionales.

Hablamos de productos estructurales tales como reforzamiento para la manufactura de moldes, cementos y re-emplazamiento de concreto en varios ambientes, materiales resistentes al fuego, aislamiento térmico, materiales de construcción de bajo costo, artefactos decorativos, refractarios resistentes al choque térmico, inmovilización tecnológica de residuos tóxicos y radioactivos. Estos materiales también pueden aplicarse en la industria aeroespacial y automovilística, compósitos para interiores de aviones, construcción naval, fundiciones no ferrosas y metalurgia, como por ejemplo en boquillas de tinas de vaciado, ingeniería civil e industria del plástico entre otras (Muñiz, et al, 2011).

2.7.1 Generalidades de Geopolímeros.

Los productos Geopoliméricos están constituidos fundamentalmente por compuestos Si-Al, ligados a una red de tetraedros de SiO₄ y AlO₄. Debido al hecho de que los aluminosilicatos son los compuestos más abundantes en la corteza terrestre, las fuentes de materias primas que contienen silicio y aluminio son abundantes y potenciales para sintetizar un geopolímero. La Fig. 2.7.1 muestra que comparten alternativamente oxígeno.

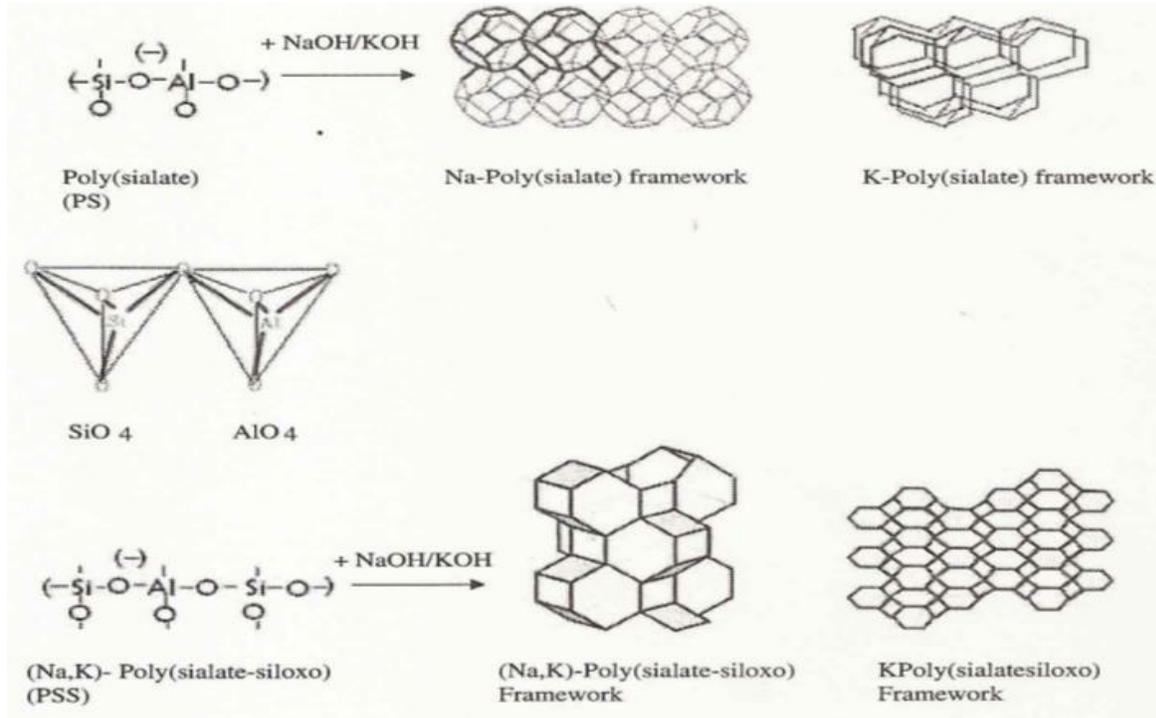


Fig. 2.7.1 Gráfico molecular computarizado de polímeros Mn-(Si-O-Al-O)_n polisialato.

El procesamiento típico de los geopolímeros implica la adición de un activador alcalino a unos aluminosilicatos su posterior mezcla y curarla a una temperatura moderada (Gilces, 2015).

Modelo General de Geopolimerización:

En la década de 1950 Glukhovsky propuso un mecanismo general para la activación de los materiales alcalinos principalmente compuesta por sílice y alúmina reactiva. El modelo Glukhovsky divide el proceso en tres fases: A) Destrucción de Coagulación; B) Coagulación de Condensación; C) Condensación de Cristalización. Más recientemente diversos autores han elaborado sobre Glukhovsky ampliaron y aplicaron teorías acumulando conocimientos sobre síntesis de zeolitas a fin de explicar los procesos en conjunto de la Geopolimerización.

2.7.2 Geopolimerización.

Geopolimerización es una geosíntesis (reacción que integra químicamente los minerales) que implica naturalmente silico-aluminatos. Cualquier compuesto puzolánico o fuente de sílice y alúmina que se disuelve fácilmente en la solución alcalina, actúan como fuente de especies geopoliméricas precursoras. El componente alcalino como activador es un compuesto del elemento del primer grupo en la tabla periódica, por lo que este tipo de material también se denomina como aglutinante alcalino, aluminosilicato activado o álcali material cementoso activado. Átomos de silicio y aluminio reaccionan para formar moléculas que son química y estructuralmente comparables con aquellas que se forman las rocas naturales, ver Fig. 2.7.2

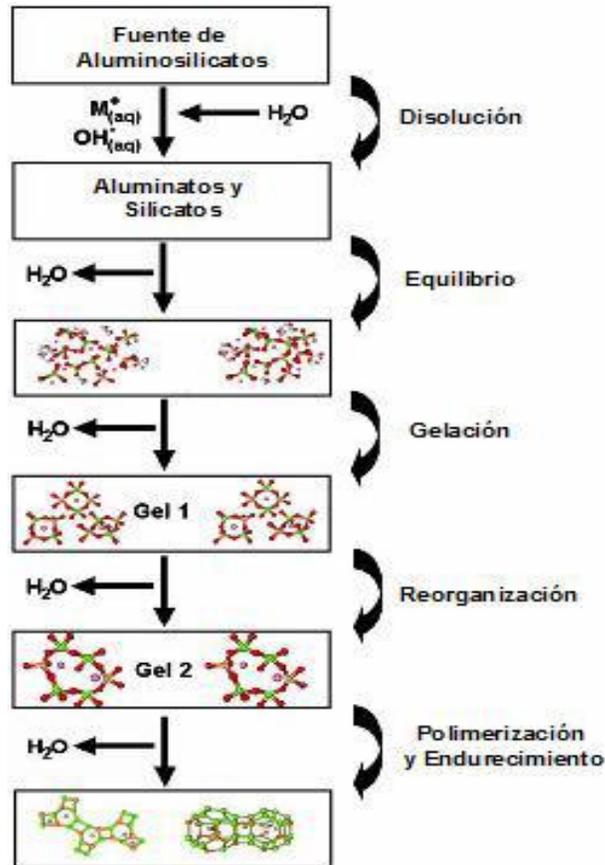


Fig. 2.7.2. Proceso de geopolimerización

La nucleación o la disolución del material de aluminosilicatos y formación de especies poliméricas es altamente dependiente de los parámetros termodinámicos y cinéticos y abarca los dos primeros pasos propuestos por Glukhovsky. El crecimiento los núcleos alcanzan un tamaño crítico, los cristales comienzan a desarrollarse. Estos procesos de reorganización estructural forman la microestructura y distribuyen los poros que tendrá dicho geopolímero cuando se consolide, ambos son de mucha importancia o fundamentales en la determinación de las propiedades físicas que tiene el material (Gilces, 2015).

2.7.3 Geopolímero consolidado 50S23T21C6B.

Mediante análisis espectrometría de absorción atómica (AAS) realizado al geopolímero consolidado 50S23T21C6B lograron obtener la composición química de este material, composición química que se muestra en la Tabla 2.7.3.

Tabla 2.7.3 Caracterización química representativa del geopolímero consolidado.

COMPUESTO	% m/m
SiO ₂	52.53
Al ₂ O ₃	15.20
CaO	0.36
MgO	1.36
Fe ₂ O ₃	0.67
Na ₂ O	5.49
K ₂ O	1.06
%H ₂ O (110°C)	5.94
%PPC (500 °C)	12.45
%PPC (1000 °C)	4.85

Podemos observar que los compuestos con mayor presencia en el geopolímero corresponden a SiO₂ y Al₂O₃, esto generado a partir de las arcillas Tepozán, Caolín, Bauwer y las proporciones en su formulación, también podemos ver la presencia de Na₂O generado en la composición por el silicato de sodio (Torres, 2013).

Caracterización Mineralógica

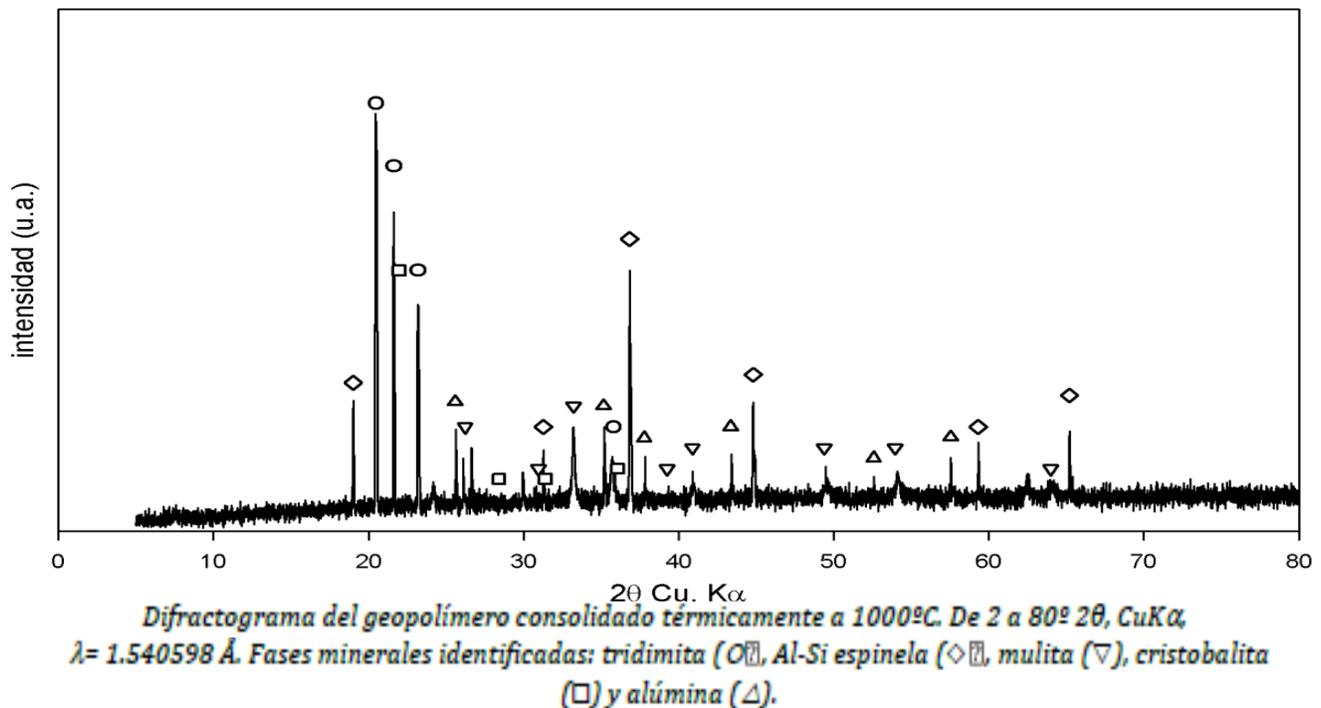


Fig. 2.7.3 Diffractograma del geopolímero consolidado a 1000 °C

En el difractograma de la Fig. 2.7.3 se identifican las fases minerales después de que el geopolímero es sometido a un proceso térmico a 1000°C que causa una transformación térmica. Se destaca la presencia de tridimita la cual se forma cuando el cuarzo en el tratamiento térmico alcanza una temperatura de 550 °C. La Al-Si Spinel, es resultado de la deshidroxilación de la caolinita. La mulita se produce por la transformación de Al-Si a 1000 °C y tenemos a la Alúmina Al_2O_3 la cual es producto de la desulfatación de la alunita aunque con picos no tan intensos. Observamos también los picos de la cristobalita, la cual se obtiene a temperaturas de 1000°C-1300°C de tratamiento con el cuarzo.

Caracterización termogravimétrica

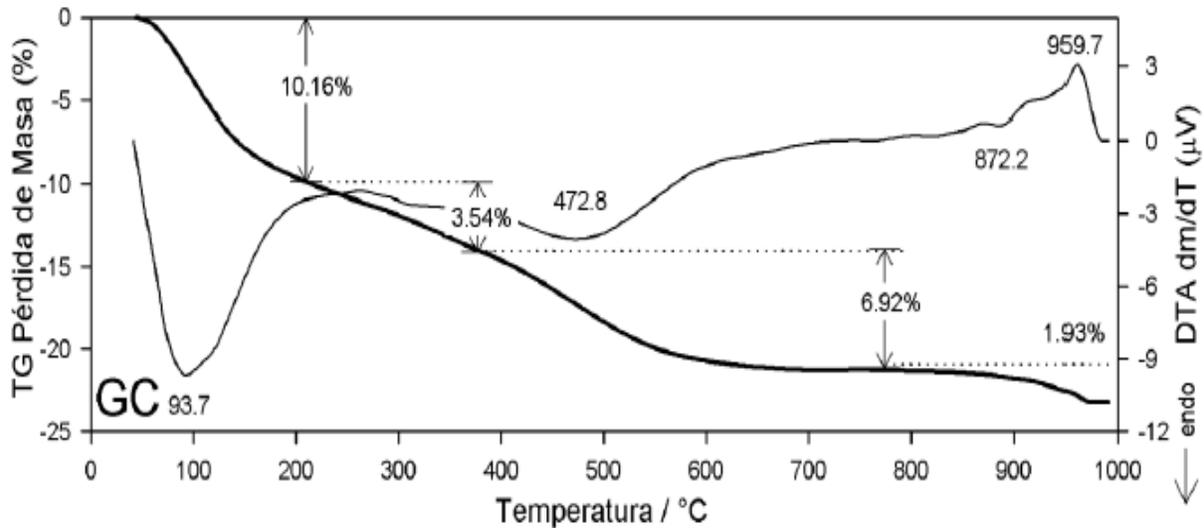


Fig. 2.7.3.1 Termograma del geopolímero consolidado de 25 a 1000°C a 1 atm

En la Fig. 2.7.3.1 se muestra el análisis termogravimétrico y se pueden observar 4 procesos importantes. El primero se centra en 93.73°C en donde surge una pérdida del 10.16% de masa, asociado a la deshidratación del mortero, seguida de otra pérdida de masa equivalente a 3.54% asociada a la eliminación del agua de cristalización en la consolidación del silicato de sodio. A una temperatura de 472.8°C surge un proceso endotérmico con una pérdida masa del 6.92% por la deshidroxilación de la caolinita y de la alunita presentes en el tepozán y caolín se pueden apreciar en los termogramas respectivos de estas arcillas.

Un proceso endotérmico centrado en 780.4°C debido a la desulfatación de la alunita, no aparece en el tratamiento térmico del mortero crudo, se podría suponer que el silicato de sodio actuaría como un inhibidor de la desulfatación de la alunita. Surge un proceso exotérmico centrado en los 872.2°C y un proceso endotérmico en 959.7°C donde surge la formación de Al-Si espinela además de perder una masa del 1.93% (Torres, 2013).

Un termograma realizado para el mortero ya horneado muestra características interesantes dicho termograma presenta lo siguiente:

El mortero ya no tiene cambios, ya no sufre pérdidas de masa, así como algún otro proceso significativo, por lo que se puede proponer que las estructuras después del primer tratamiento térmico se vuelven estables, siendo de mucha importancia para los materiales de tipo refractario, Fig. 2.3.7.2 (Torres, 2013).

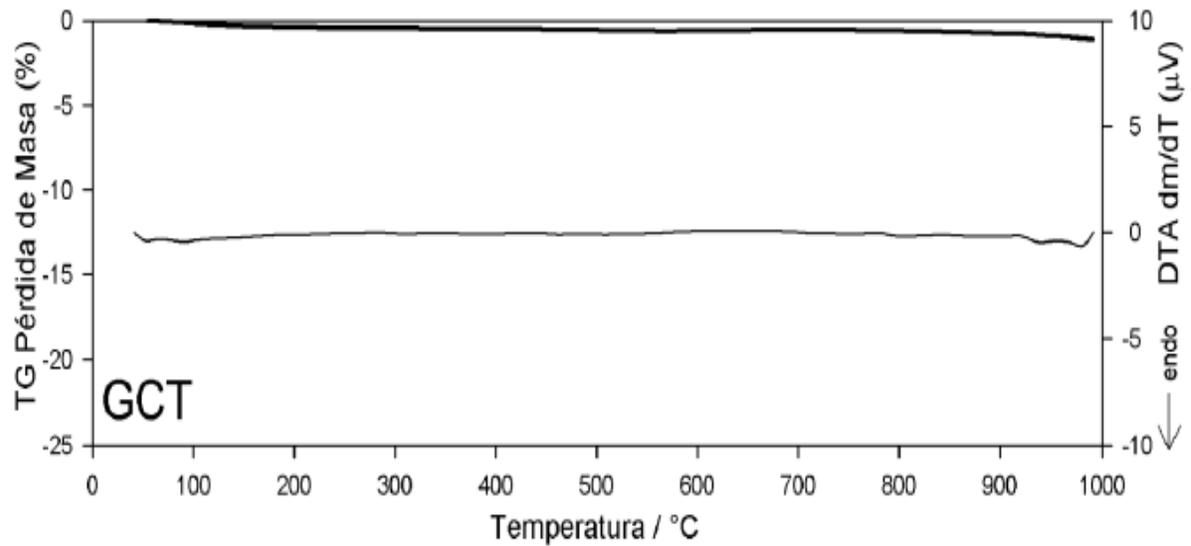


Fig. 2.7.3.2 Termograma del geopolímero consolidado térmicamente a 1000°C 1 atm, en un intervalo de 25 hasta 1000°C.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Búsqueda del estado del arte sobre geopolímeros.

Se han realizado estudios anteriormente por el grupo de investigación sobre el geopolímero conformado por las arcillas Tepozán, Caolín, Bauwer y han encontrado que a un tamaño de partícula de 235 µm su adherencia y resistencia al calor son buenas (Torres, 2013), basándose de éstas afirmaciones se realiza la búsqueda de más artículos sobre geopolímeros que han sido desarrollados a nivel internacional para poder tener un panorama sobre tamaños diferentes de partículas que puedan llegar a ser empleados en un geopolímero y mediante esto se realice una propuesta para esta investigación.

3.2 Identificación, búsqueda y recolección de la materia prima, en los bancos de arcillas.

3.2.1 Identificación

En el laboratorio de desarrollo sustentable se han elaborado ya proyectos que usan como materia prima diferentes tipos de arcillas, entre ellas de Tepozán, Caolín y Bauwer esto da un primer acercamiento y permite identificarlas visualmente, para que posteriormente se realice su búsqueda y recolección.

- Las arcillas no están organizadas en su totalidad, es necesario organizar y etiquetar.
- En un espacio destinado y en base a muestras separadas y catalogadas de proyectos anteriores, se reubican las demás arcillas, de esta manera se tiene un mejor manejo de la materia prima disponible.

3.2.2 Búsqueda y Recolección

Los Bancos de arcilla pertenecen a la comunidad de Delgado de Abajo, Municipio de Comonfort Guanajuato, esta comunidad se caracteriza por la variedad de bancos que poseen, por lo tanto, representa una fuente en bruto de materia prima para las industrias que hagan uso de arcillas, como las de productos Cerámicos o para desarrollo de los proyectos de investigación orientados a obtener nuevos productos como en este caso. Por conveniencia de los habitantes identifican a nuestras arcillas con el nombre del banco de donde son extraídas, por ejemplo, Banco Tepozán-Arcilla Tepozán y así sucesivamente por tanto se adoptó también tal denominación.

Previo a ir a la comunidad nos contactamos con el encargado de los bancos que está en turno, el Sr. Ignacio, para poder acceder a los bancos y recolectar el material. La vía para entrar es únicamente en camionetas o vehículos de carga pesada, debido a irregularidades del terreno. Los bancos se encuentran de 5 a 10 minutos del poblado, las labores de extracción son hechas manualmente.

Para recolectar las arcillas fue necesario tomar muestras existentes en el laboratorio, se utilizaron costales para el transporte de las arcillas. Los bancos de arcilla tienen una considerable presencia de humedad debido a las lluvias constantes en esta temporada del año en Guanajuato y por tanto se deberán tomar precauciones antes de utilizarlas, como secarlas al sol para que el exceso del agua sea evaporado.

3.3 Trituración, molienda y tamizado de las arcillas.

Las arcillas tienen que pasar por un proceso de preparación antes de ser utilizadas en la elaboración del geopolímero, ya que de otra manera no es posible emplearlas. Para tener una idea de que tamaños de tamices se necesitaban para ser empleadas, en base a los tamaños de partículas anteriormente seleccionadas se toma como referencia las siguientes medidas de mallas en mm y pulgadas.

Tabla 3.3 Número de malla y equivalencias en mm y pulgadas

Número Malla (U.S. STD. Sieve)	Abertura (mm)	Abertura (pulg)
18	1.00	0.0394
20	0.841	0.0331
25	0.707	0.0278
30	0.595	0.0234
35	0.500	0.0197
40	0.420	0.0165
45	0.354	0.0139
50	0.297	0.0117
60	0.250	0.0098
70	0.210	0.0083
80	0.177	0.0070
100	0.149	0.0059
200	0.074	0.0029
325	0.044	0.0017

En el laboratorio de química pesada del ITC tienen un área destinada para los equipos de trituración y molienda, es ahí en donde se llevará a cabo la reducción primaria de las rocas de arcilla, hasta un tamaño que permita posteriormente llevarlas a el molino de bolas facilitando el proceso y reduciendo los tiempos de operación. Una vez alcanzados los tamaños correspondientes con ayuda de un agitador eléctrico, herramienta que nos ayuda a llevar acabo con mayor facilidad el tamizado de las partículas en la torre de tamices FIICSA desde malla 30 a malla 100 Fig. 3.3.



Fig. 3.3 Tamizado de arcillas para obtener medidas de malla 30, 60, 100. Después del proceso de trituración y molienda.

3.4 Obtención de geopolímeros usando un agente activador en su formulación, conociendo la composición de las arcillas actualmente caracterizadas.

Cuando las arcillas ya fueron tamizadas, etiquetadas y separadas se procederá a calcular los gramos correspondientes a los porcentajes de la formulación base, en función del volumen que ocupa la capa de geopolímero sobre el área de las probetas representativas. Con una balanza analítica RADWAG AS 22/C/2, vasos de precipitado de 50 ML para almacenar las arcillas y una espátula para laboratorio estas se pesan individualmente y se van agregando una a una en un recipiente para mezclado, posteriormente se le adiciona el agente activador que también es pesado por la balanza en un vaso de los vasos de precipitado.

Para conocer cuánto geopolímero es necesario para cubrir las áreas de contacto en ladrillos tanto las probetas representativas como de tamaño real se usan las siguientes fórmulas:

1) $Vol=(L)\times(A)\times(h)=\text{cm}^3$ (Volumen que ocupa la capa de Geopolímero.)

h = grosor o altura de la capa de geopolímero.

2) Masa total geopolímero=(ρ)x(Vol)= Gramos

ρ = densidad del geopolímero

3) Masa Arcilla (i)= (Masa total geopolímero) x (%Arcilla (i))

%Arcilla (i)= representa el porcentaje que lleva de cada una de las arcillas, es decir Tepozán, Caolín, Bauwer, correspondiente a la formulación base.

4) Masa Silicato de sodio= (Masa total geopolímero) x (%50)

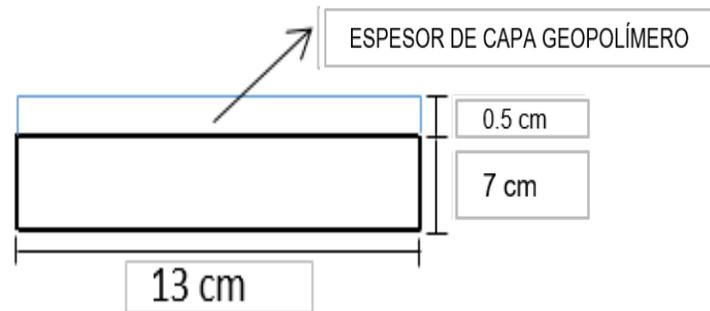


Fig. 3.4 Vista lateral de la capa de geopolímero sobre el ladrillo, conservando la mitad de la longitud de este.



Fig. 3.4.1 Vista superior de la capa de geopolímero sobre el ladrillo.

Las medidas que se ven en la Fig. 3.4 y Fig. 3.4.1, corresponden a las utilizadas para el cálculo de la masa de geopolímero, en las pruebas de tamaño real y se sigue el mismo método de cálculo para la capa de las probetas representativas, aunque estas últimas con sus medidas correspondientes debido a que se son de menor tamaño, respetando la condición de fijación que pide la prueba de adherencia que se describe posteriormente.

Así procedemos a mezclar por un tiempo estimado de 5 minutos, evitando la presencia de grumos de arcilla y activador, obteniendo el geopolímero para los tamaños de partícula propuestos, justo como se aprecia en la Fig. 3.4.



Fig. 3.4.2 Mezclado de las arcillas Tepozán, Caolín, Bauwer con Silicato de Sodio comercial.

3.4.1 Aplicación de geopolímeros a probetas representativas de ladrillo rojo como medio de soporte.

Las probetas de ladrillo rojo son cubiertas con los geopolímeros Fig. 3.4.1, una probeta para cada geopolímero que posee un tamaño de partícula diferente. Como son pequeñas cantidades se aplica con una espátula para laboratorio, evitando que la mezcla se escurra por los lados y provoque que no tenga los 5mm de grosor necesarios. Una vez realizada esta parte del proceso dejamos reposar durante 7 días.



Fig. 3.4.3 Aplicación de Geopolímero en una de las probetas de ladrillo rojo.

3.4.2 Prueba de secado del geopolímero.

Después de aplicarlos a las probetas, se dejan reposar por un periodo de 7 días para que el geopolímero seque adecuadamente no se utiliza ninguna técnica o equipo en esta etapa simplemente seca al aire y así posea las características necesarias para someterlo a las pruebas siguientes.

3.4.3 Pruebas de quemado de ladrillo con geopolímero, con rampas de temperatura y tiempo definido.

Para poder utilizar la mufla es necesario leer una serie de pasos a seguir del manual, esto nos permite configurarla y hacer el quemado más preciso, además de que nos permitirá controlar las rampas de temperatura. Una vez hecho lo anterior, se enciende la mufla colocando las probetas desde ese momento y se calienta 25 grados cada 10 minutos, estabilizar a la temperatura de 100 °C, se toma el tiempo en el que el proceso da comienzo, se siguen unas rampas de temperaturas ya propuestas que llegan hasta 400 °C con un tiempo específico para cada rampa, así como se describe a continuación: 100 °C por 30 minutos, 150 °C por 30 minutos, 250 °C por 60 minutos, 300 °C por 60 minutos y 400 °C por 30 minutos (Cervantes, 2018). Llegado a los 400 °C se sigue con una propuesta propia que retoma parcialmente el comportamiento anterior, es decir, 450 °C por 30 minutos, 550 °C por 60 minutos, 600 °C por 30 minutos, 700 °C por 30 minutos, 750 °C por 30 minutos, 850 °C por 30 minutos, 900 grados por 30 minutos y finalmente 1000 °C por 30 minutos, a continuación, se ilustra en la Fig. 3.4.3.



Fig. 3.4.3.1 Mufla FELISA FE-360 para quemar las probetas de ladrillo con geopolímero.

Esta prueba es fundamental porque define que geopolímero es más apto para ser utilizado como recubrimiento refractario para los hornos ladrilleros que es el objetivo de esta investigación, aquellos que no lo sean serán descartados, así mismo permite que se le realice la prueba de adherencia para conocer esta otra característica únicamente a la mejor probeta.

3.4.4 Tiempo promedio de absorción de agua del geopolímero.

La prueba de absorción se hará dejando caer una gota de agua en la superficie del geopolímero que cubre al ladrillo rojo, y tomando el tiempo en el que logra introducirse en la estructura del geopolímero, es decir cuánto permanece en dicha superficie antes de penetrarla. De tal manera que permita ver qué capacidad tiene el geopolímero para absorber el líquido cuando entra en contacto con él.

3.5 Pruebas de adherencia de los geopolímeros sobre el ladrillo rojo de tamaño real.

La norma mexicana NMX-C-082.1974, brinda los parámetros para poder realizar la prueba de adherencia del geopolímero a los ladrillos. A continuación, se muestra en resumen de como dicha prueba debe de ser ejecutada:

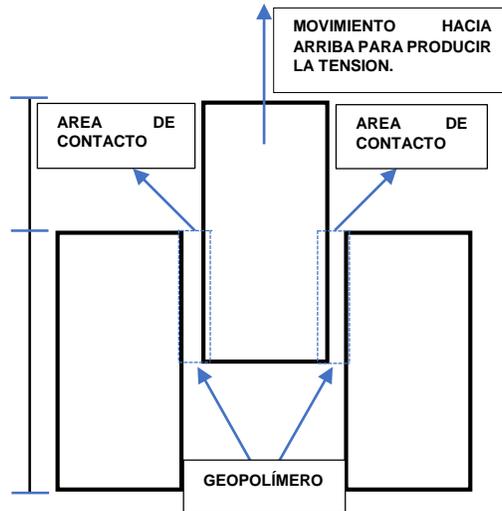


Fig. 3.5 Prueba de adherencia en equipo universal.

La capa de geopolímero ocupa solamente la mitad del tamaño que posee el ladrillo en su longitud, esta capa va en ambos lados o caras, así como se muestra en la Fig. 3.5 y en esos costados van pegados los ladrillos adicionales. En el equipo universal se deben usar ya los ladrillos de tamaño real o comercial con la capa de geopolímero, la prueba requiere hacer uso de ganchos de acero, un dispositivo que permitan detener los ladrillos que están en los costados, siendo el ladrillo central el único que tendrá movimiento en dirección hacia arriba, generando tensión en el área que recubre el geopolímero hasta que este se fracture, en el lector del equipo se tomará la tensión máxima alcanzada con la que se obtendrá la adherencia, para efectos de comparación de adherencia, la mitad de las probetas de tamaño real se someterán a un proceso de quemado para análisis y determinación si genera algún efecto en el geopolímero.

El dispositivo está construido a la necesidad de la prueba y considerando la mecánica del equipo universal, dichos ganchos que serán empleados para las pruebas, Cumplen la función de mantener fijos los ladrillos laterales y mover únicamente el ladrillo central, el material con el que está construido es acero "cold rolled" en solera de 2 3/8" para que resista las pruebas de tensión.

3.5.1 Varianza y Desviación estándar para los resultados de adherencia.

La varianza de unos datos es la media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media de la misma. Se simboliza como σ^2 y se calcula aplicando la fórmula:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N} = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_N - \bar{x})^2}{N}$$

Se puede simplificar como:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} - \bar{x}^2 = \frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N} - \bar{x}^2$$

La varianza es un valor positivo, es decir que cuando los datos de la población son diferentes tiende ser mayores a 0. Mientras que un valor de la varianza bajo indica que los valores están por lo general más próximos a la media. Un valor de la varianza igual a cero implica que todos los valores son iguales, y por lo tanto también coinciden con la media aritmética.

Desviación estándar

Es la medida de dispersión más común, que indica qué tan dispersos están los datos alrededor de la media. El símbolo σ (sigma) se utiliza frecuentemente para representar la desviación estándar de una población, para calcular la desviación estándar se saca la raíz de la varianza. Las interpretaciones que se deducen de la desviación típica son, por lo tanto, parecidas a las que se deducían de la varianza.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Mediante el uso de estas fórmulas podremos calcular la varianza y la desviación de los datos que se obtengan del geopolímero en el ladrillo cuando se someta a la prueba de adherencia en la maquina universal y poder analizar qué tan dispersos están uno de otros con respecto a su media y población.

3.6 Análisis de composición de arcilla Bauwer con microscopio electrónico de barrido SEM.

El Instituto Tecnológico de Celaya cuenta con un microscopio electrónico de barrido SEM JEOL JSM-6510LV Oxford Instruments que permite realizar en nuestro caso estudios para conocer cualitativamente la composición aproximada de una de las arcillas que se utilizarán para esta investigación, se detallan a continuación los pasos requeridos para poder llevar a cabo dicho análisis.

La arcilla que será sometida al estudio debe ser acondicionada para que, en el proceso y los resultados exista el menor inconveniente y error posible, evitando la presencia de sustancias no deseadas o de poco interés como puede ser un exceso de humedad.

Primeramente, se debe de moler la arcilla hasta un tamaño mínimo de malla 40 para que esta sea fácil de manejar y ser analizada, posteriormente con sumo cuidado y uso de guantes de látex y una espátula tomamos una cantidad que puede oscilar entre 2-3 gramos de arcilla como se aprecia en la Fig. 3.6 y se coloca en un crisol de 25 ml.



Fig. 3.6 Arcilla Bauwer molida, aproximadamente 3 gramos.

A esta arcilla se le aplicará un proceso de secado para que el exceso de humedad pueda ser eliminado, es el segundo paso en el acondicionamiento de la muestra. El proceso de secado consiste en utilizar un Horno, FELISA FE-291D de 750 Watts y temperatura máxima de 250 °C, el horno es programado a las siguientes condiciones 4 horas a 90 °C constantes, toma un tiempo de aproximadamente 15 minutos en estabilizar la temperatura programada este horno mediante una alarma nos indica cuando ya está listo y así poder iniciar el proceso de secado de la muestra de arcilla, como se puede apreciar en las Fig. 3.6.1 y Fig. 3.6.2.



Fig. 3.6.1 Horno FELISA configurado a 90 °C por 4 horas para extraer el exceso de humedad que afectaría el análisis SEM.



Fig. 3.6.2 Arcilla Bauwer dentro del horno FELISA antes de iniciar el proceso de secado.

Concluidas las 4 horas de secado, usando guantes de carnaza se retira la arcilla del horno, y con ayuda de un desecador reposando un día aproximadamente antes de llevarlas a analizar, el desecador evita que la temperatura descienda bruscamente y que se contamine nuevamente por sustancias no deseadas, esto puede ser observado en la Fig. 3.6.3.



Fig. 3.6.3 Desecador con muestra de arcilla Bauwer reposando para análisis SEM.

En el microscopio electrónico de barrido se utilizan unos pines de cobre para que las muestras puedan ser analizadas, estos pines cada que sean utilizados deben someterse a un baño ultrasónico para poder retirar residuos de pruebas anteriores que un simple lavado no puede, como por ejemplo los restos de papel carbón. Se colocan los pines en vaso de precipitado con una pequeña cantidad de solvente como Tolueno o Benceno y se deposita dentro del baño sónico, así como se aprecia en la figura 3.6.4.



Fig. 3.6.4 Pines de cobre en presencia de un solvente sometidos a un baño ultrasónico.

Después del baño ultrasónico, estos pines se abrillantan con un químico especial, que nos ayuda a retirar más residuos y da un óptimo estado a la calidad del cobre para realizar el análisis, Fig. 3.6.5.

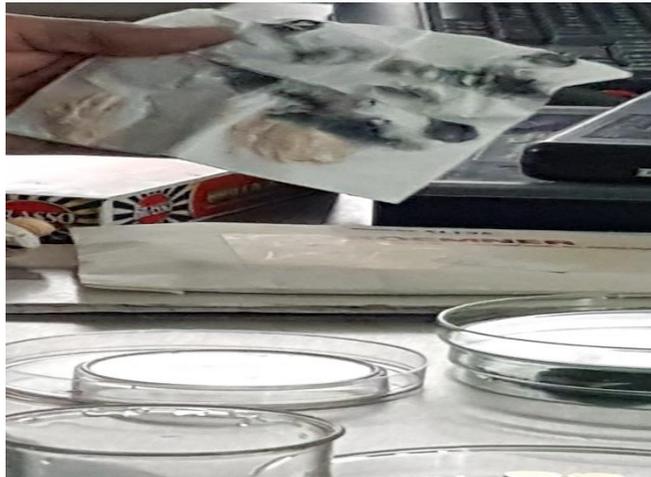


Fig. 3.6.5 Pines limpios sin residuos.

A los pines se les pega un diminuto pedazo de papel carbón como adherente para la muestra, con mucho cuidado haciendo uso de pinzas. El pin ya tiene el papel carbón y a este se le cubre con la arcilla para que quede impregnado la mayor cantidad posible, pero sin que exista excesos sobre la superficie es transportado en una caja Petri que evita el contacto directo con el exterior, el pin está listo para ser colocado en una porta pines y ser montado al Microscopio electrónico de barrido dando comienzo al análisis Fig. 3.6.6.



Fig. 3.6.6 Pines colocados en la porta pines con las muestras de arcilla para realizar el análisis SEM.

De este punto en adelante el Microscopio Electrónico de Barrido comienza a ser operado por personal capacitado para poder llevar a cabo el proceso de análisis, y este equipo pueda obtener una composición más aproximada posible a lo real de los elementos y compuestos presentes en la arcilla Bauwer, Fig. 3.6.7.

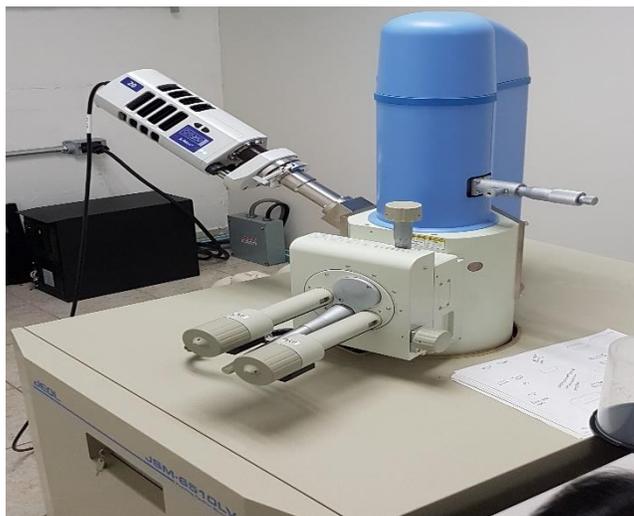


Fig. 3.6.7 Microscopio Electrónico de Barrido SEM, JEOL JSM-6510LV.



Fig. 3.6.8 Vista del proceso de análisis del microscopio electrónico de barrido SEM.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados que se obtuvieron en cada una de las pruebas realizadas al geopolímero, las cuales son secado, quemado, tiempo de absorción de agua y prueba de adherencia. Las prueba de secado consisten en un tiempo de curado de 7 días después del recubrimiento del ladrillo rojo con geopolímero en donde se libera cierto porcentaje de humedad del mismo, esperando no se presenten fracturas; la prueba de quemado consiste en someter en un lapso de 8 horas a temperaturas de 1000 °C con rampas en tiempos definidos para probar la resistencia al efecto del calor, en la prueba de absorción se determinó el tiempo en que tarda una gota de agua en ser absorbido y por último en las pruebas de adherencia se usó una maquina universal con la que se obtuvo la resistencia a la tensión para poder estimar la adherencia correspondiente al área que tiene recubierta el geopolímero en el ladrillo.

4.1 Prueba de secado de geopolímero.

Para estas pruebas se utilizaron las probetas de menor tamaño a las reales, es decir piezas de ladrillos cortadas, esto para facilitar el manejo y disminuir la cantidad de arcillas a utilizar evitando desperdicios y/o excesos en la aplicación, esto se puede observar la Fig. 4.1.1.



Fig. 4.1 Se aprecia la aplicación del geopolímero como cubierta de la probeta.

Después de los 7 días de secado se puede observar en la Fig. 4.1.1, Fig. 4.1.2 y Fig. 4.1.3 que no se presenta ninguna fractura aparente, en ninguno de los geopolímero que poseen diferentes tamaños de partículas y espesores que van desde 2 mm hasta 1.2 mm, como se observa a continuación.



Fig. 4.1.1 Geopolímero con tamaño de partículas correspondiente a Malla tyler 60, después de 7 días de secado.



Fig. 4.1.2 Geopolímero con tamaño de partículas correspondiente a malla Tyler 100, después de 7 días de secado.



Fig. 4.1.3 Geopolímero con tamaño de partículas correspondiente a Malla Tyler 30, después de 7 días de secado.

Pasados los 7 días de secado, ninguna probeta incluidas con sus 3 réplicas, presentaron fractura o agrietamiento alguno, siendo hasta ese punto todos los tamaños de partícula candidatas a ser utilizadas como recubrimiento para los hornos ladrilleros.

Cabe destacar que la malla 30 es la que tuvo menos cambios visibles, por lo tanto, se ubica en primer lugar dentro de los tres tamaños analizados. Después de este tiempo de curado se tomarán las probetas con réplicas para someterlas a las pruebas de quemado que se describen a continuación

4.2 Pruebas de quemado probetas representativas de ladrillo con geopolímero, con rampas de temperatura y tiempo definido.

Para realizar esta prueba fue necesario tener unas rampas de temperatura con tiempos definidos que parten desde la temperatura ambiente hasta los 1000 °C, con la finalidad de estudiar el comportamiento que tienen cada tamaño de partícula en la formulación de dicho geopolímero, que se pretende usar como recubrimiento para los hornos ladrilleros. Estas rampas de temperatura simulan la exposición a la quema real, a la que se exponen las paredes de dichos hornos, además de que por una investigación anteriormente realizada se encontró que así se libera la mayor cantidad de humedad del geopolímero ayudando a su consolidación.

Las rampas de temperaturas son las siguientes:

Partiendo desde la temperatura ambiente aumentar 25 grados cada 10 minutos, estabilizar a la temperatura de 100 °C, se siguen unas rampas de temperaturas ya propuestas que llegan hasta 400 °C con un tiempo específico para cada rampa, así como se describe a continuación: 100 °C por 30 minutos, 150 °C por 30 minutos, 250 °C por 60 minutos, 300 °C por 60 minutos y 400 °C por 30 minutos (Cervantes, 2018).

Llegado a los 400 °C sigue una propuesta propia que retoma parcialmente el comportamiento anterior, es decir, 450 °C por 30 minutos, 550 °C por 60 minutos, 600 °C por 30 minutos, 700 °C por 30 minutos, 750 °C por 30 minutos, 850 °C por 30 minutos, 900 grados por 30 minutos y finalmente 1000 °C por 30 minutos, los resultados de estas pruebas de quemado pueden ser observados en las siguientes figuras.



Fig. 4.2 Geopolímero quemado, probeta número 1, con tamaño de partícula correspondiente a malla 100 presentando evidentes fracturas.



Fig. 4.2.1 Geopolímero quemado probeta número 2 con tamaño de partícula correspondiente a malla 30, sin ninguna fisura o fractura.

El grosor de la capa que cubre al ladrillo juega un papel muy importante cuando se expone a altas temperaturas, debido a que si la capa es muy delgada es más propensa a fracturarse o mostrar daños a su estructura, cabe mencionar que en la probeta con tamaño de partículas de malla 30 esto no se cumple totalmente.



Fig. 4.2.2 Geopolímero quemado prueba número 2 con tamaño de partícula correspondiente a malla 60 con una fractura y algunas fisuras menores.



Fig. 4.2.3 Geopolímero quemado probeta número 2 con tamaño de partícula correspondiente a malla 100 presentando leves fisuras y dos fracturas.



Fig. 4.2.4 Replica Geopolímero quemado probeta número 3 con tamaño de partícula correspondiente a malla 60, con fisura.

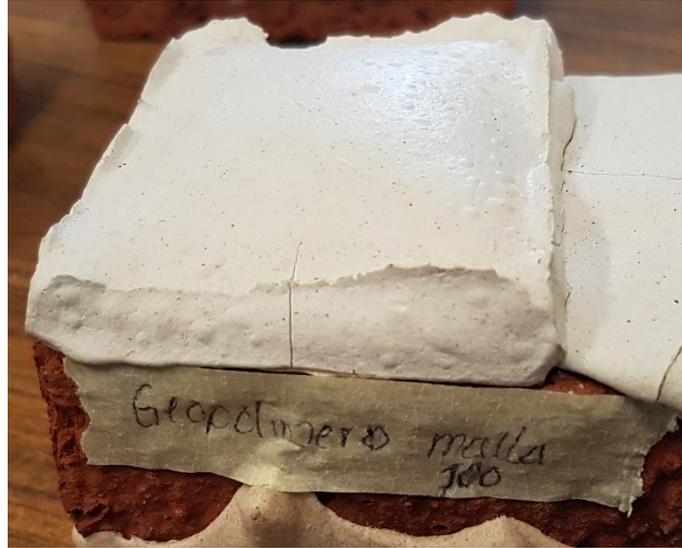


Fig. 4.2.5 Replica Geopolímero quemado probeta número 3 con tamaño de partícula correspondiente a malla 100 con fisura.



Fig. 4.2.6 Replica Geopolímero quemado probeta número 3, con tamaño de partícula correspondiente a la malla 30 sin ninguna fisura o fractura.

Como se puede observar en las pruebas de quemado si existen fracturas, en los tamaños de partícula correspondientes a malla 60 y malla 100. El único tamaño de partícula que no presenta en ninguna de sus réplicas fracturas es la malla 30 con un grosor de capa mínimo aproximado de 5 mm, basado en esos resultados experimentales, se toma como la única opción viable para realizar la prueba de adherencia, además de que es el tamaño de partícula que mejor resiste la exposición a altas temperaturas sin sufrir daños en su estructura.

4.3 Tiempo promedio de absorción de agua del geopolímero.

Para esta prueba se aplicó una gota de agua en la superficie de cada una de las réplicas en sus diferentes tamaños de partícula. Con ayuda de un cronómetro se midió el tiempo en el que esa gota es absorbida por el geopolímero, se repitió en más ocasiones el mismo proceso para cada probeta con la finalidad de obtener un promedio de tiempo estimado y así ver la capacidad de absorción de agua que poseen, esta prueba se puede apreciar en la Fig. 4.3 y Fig. 4.3.1. mostradas a continuación como representativas de todas las réplicas realizadas.



Fig. 4.3. Geopolímero con tamaño de partícula correspondiente a malla 30 sometido a prueba de absorción.



Fig. 4.3.1 Geopolímero con tamaño de partícula correspondiente a malla 60 sometido a prueba de absorción.

Los tiempos que se obtuvieron para cada uno de los geopolímeros y sus réplicas están agrupados en la siguiente Tabla 4.3., se hicieron 6 repeticiones para cada una con la finalidad de tener una mayor certeza en los resultados.

Tabla 4.3 Tiempos de absorción de agua de los diferentes geopolímeros

PROBETAS	REPETICION						PROMEDIO DE TIEMPO EN MINUTOS
	1	2	3	4	5	6	
PROBETA MALLA 60 (1)	32.15	23.19	24.06	39.09	20.01	32.09	28.43
PROBETA MALLA 100 (1)	10	31.37	14.04	52.33	20.45	36.23	27.40
PROBETA MALLA 30 (2)	0.21	1	4.02	2.04	1.24	0.31	1.47
PROBETA MALLA 60 (2)	1.58	1.5	0.12	8.26	4.2	2.58	3.04
PROBETA MALLA 100 (2)	0.45	2.49	2.11	2.58	2.13	2.17	1.98
PROBETA MALLA 30 (3)	0.36	0.12	.27	0.44	0.21	0.32	0.28
PROBETA MALLA 60 (3)	15.01	18.12	15.11	8	10.08	10.07	12.73
PROBETA MALLA 100 (3)	17.26	11.1	10.26	12.24	15.15	11.16	12.86

se construyó la siguiente gráfica Fig. 4.3.2., que agrupa cada valor por su tamaño de malla, se toman los tiempos promedio obtenidos en la parte experimental.

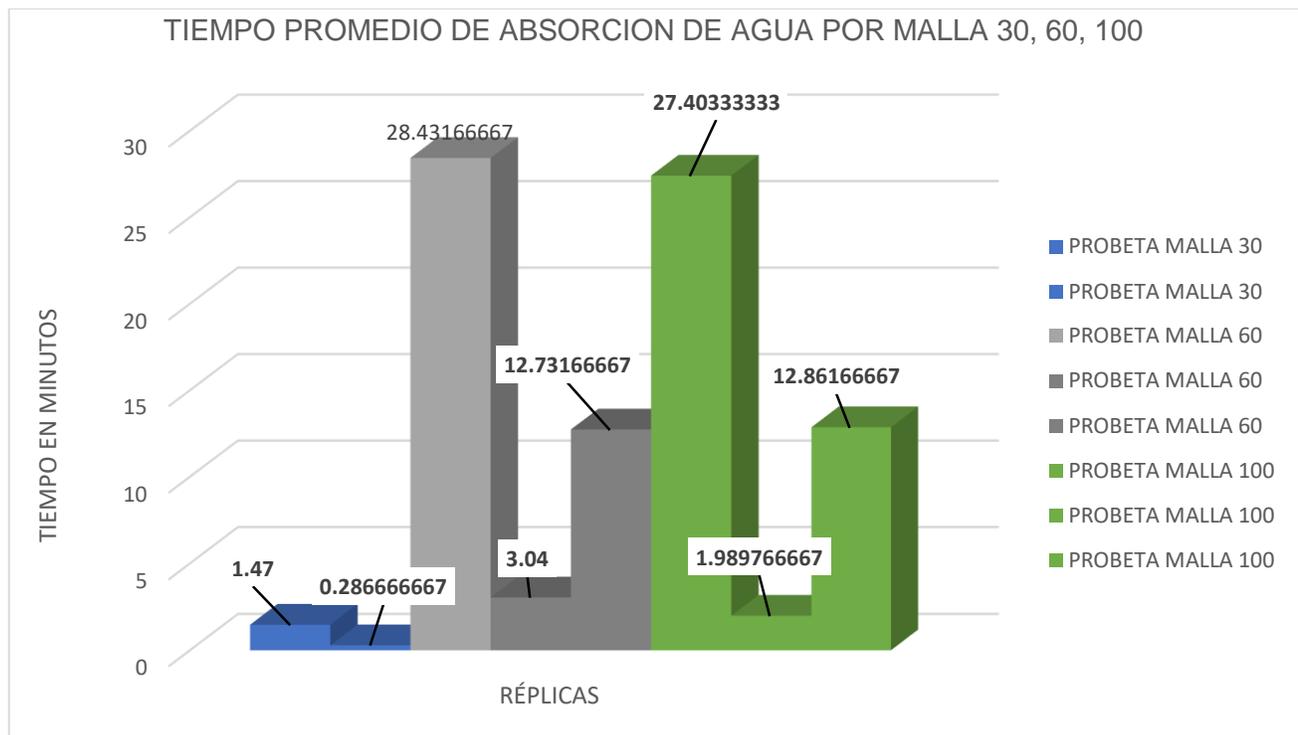


Fig. 4.3.2 Gráfica de tiempo promedio de absorción de agua de los geopolímeros

Como podemos observar, las réplicas de geopolímero que más tiempo requieren para poder absorber la gota de agua, corresponden a la malla 100, tienen un tamaño aproximado de partícula de 150 µm, y contrariamente, las que requieren de un mínimo de tiempo son las réplicas de geopolímero correspondientes a la malla 30, con un tamaño de partícula aproximado de 595 µm.

4.4 Pruebas de adherencia del geopolímero sobre el ladrillo rojo de tamaño real.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las probetas de ladrillo de tamaño real. La maquina universal nos proporciona una medida de la fuerza de tensión con la que posteriormente se puede encontrar el valor de la adherencia en base al área que recubre la capa de geopolímero, los datos que se muestran en las tablas 4.4 y 4.4.1 son correspondientes a las probetas que se le sometió a un proceso de quemado con la finalidad de comparar con las probetas que no fueron quemadas y determinar si presentan algún cambio, así mismo las tablas 4.4.2 y 4.4.3 muestran los resultados de las pruebas para las probetas que no fueron quemadas.

La formulación que posee el geopolímero consolidado en todas las probetas sometidas a esta prueba es 50% silicato de sodio, 23% arcilla tepozán, 21% arcilla caolín, 6% arcilla bauwer, con un tamaño de partícula de 595 μm correspondiente a la malla 30 y posee un grosor de capa de 5 mm el recubrimiento en el ladrillo. La nomenclatura propuesta es la siguiente: 50S23T21C6B, es una forma de denominar y representar la formulación explicada anteriormente. El área recubierta de ladrillo con el geopolímero fue de $(13 \text{ cm}) \times (12.26 \text{ cm}) = 159.38 \text{ cm}^2$ en una cara del ladrillo, para las dos caras el área total recubierta es 318.76 cm^2 .

Tabla 4.4 Fuerza de tensión de las probetas de ladrillo quemadas.

TIPO DE PROBETA	NOMENCLATURA	FUERZA DE TENSION kgf			
		1	2	3	4
QUEMADA	50S23T21C6B	230	350	190	230

Tabla 4.4.1 Adherencia de las probetas de ladrillo quemadas

TIPO DE PROBETA	NOMENCLATURA	ADHERENCIA kgf/cm²			
		1	2	3	4
QUEMADA	50S23T21C6B	0.72154599	.09800477	0.59605973	0.72154599

Tabla 4.4.2 Fuerza de tensión de las probetas de ladrillo sin quemar

TIPO DE PROBETA	NOMENCLATURA	FUERZA DE TENSION kgf			
		5	6	7	8
SIN QUEMAR	50S23T21C6B	500	390	480	550

Tabla 4.4.3 Adherencia de las probetas de ladrillo sin quemar

TIPO DE PROBETA	NOMENCLATURA	ADHERENCIA kgf/cm²			
		5	6	7	8
SIN QUEMAR	50S23T21C6B	1.56857824	1.22349103	1.50583511	1.725436061

Como podemos observar, al realizarle un quemado a una parte de las probetas, los resultados obtenidos muestran una disminución en la adherencia del geopolímero al ladrillo rojo.

4.5 Análisis de desviación estándar y varianza para adherencia.

Los resultados que se presentan en la tabla 4.5 corresponden al cálculo de la desviación estándar y varianza de los resultados de la prueba de adherencia.

Tabla 4.5 Desviación estándar y Varianza para resultados de adherencia

TIPO DE PROBETAS	ADHERENCIA	
	DESVIACION ESTANDAR σ	VARIANZA σ^2
QUEMADAS	0.217	0.047
SIN QUEMAR	0.210	0.044

Para obtener el análisis de desviación estándar y varianza, para los valores de adherencia, se empleó un software llamado Minitab en su versión 18 que nos permite trabajar con nuestros datos y realizar diferentes tipos de análisis estadísticos dependiendo a la necesidad del usuario, en nuestro caso particular fueron los anteriormente mencionados.

Los resultados obtenidos nos muestran valores de varianza y desviación estándar que son relativamente bajos, es decir que se aproximan a cero, es decir, que los valores de adherencia son cercanos y no existe mucha variación entre la población y la media de esta, esto se traduce a que los resultados obtenidos en la prueba son confiables, ya que si los valores estuviesen muy dispersos y distantes de la media, los resultados obtenidos serían poco confiables y por lo tanto se necesitaría de una población mayor o un número mayor de réplicas para ser analizadas y así poder determinar la confiabilidad de estos resultados.

4.6 Análisis de composición de arcilla Bauwer con microscopio electrónico de barrido SEM

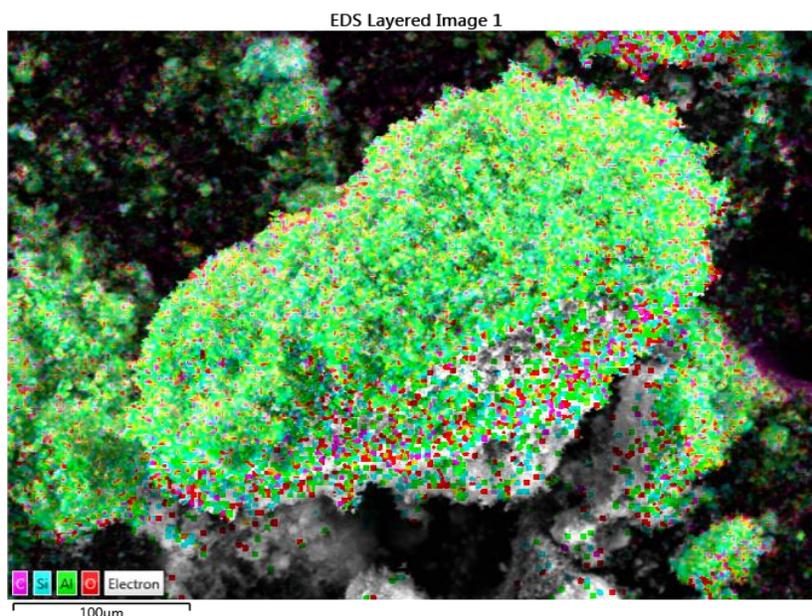


Fig. 4.6 Imagen EDS de arcilla Bauwer mediante Microscopio electrónico de barrido SEM.

Tabla 4.6 Composición química cualitativa de la arcilla Bauwer

Element	Apparent Concentration	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label
O	126.17	59.26	0.28	SiO ₂
Al	30.22	17.49	0.15	Al ₂ O ₃
Si	27.02	19.07	0.17	SiO ₂
S	0.80	0.53	0.04	FeS ₂
K	0.35	0.15	0.03	KBr
Ca	0.29	0.12	0.03	Wollastonite
Ti	1.11	0.53	0.04	Ti
Cu	2.85	1.33	0.07	Cu
Zn	1.93	0.90	0.07	Zn
Sr	1.32	0.62	0.20	SrF ₂
Total:		100.00		

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones.

En la presente investigación se estudió el efecto que tiene el modificar el tamaño de partículas, en la formulación base establecida del geopolímero 50S23T21C6B con tamaño único de partícula de 235 μm , se propusieron 3 tamaños de partícula diferentes en base a un rango funcional de tamaños para geopolímeros que va desde 150-750 μm , los tamaños propuestos fueron los siguientes: 150 μm , 250 μm , 595 μm , tamaños que corresponden a mallas Tyler de numeración 100, 60 y 30. La prueba de secado realizada a cada geopolímero con los tamaños de partículas propuestos, demuestra que para esos tamaños el comportamiento del geopolímero consolidado aplicado a las probetas representativas de ladrillo es estable porque no presentan fisuras ni rupturas, el secado toma 7 días de reposo como mínimo sin intervención de calor, tiempo en el que se analiza como el geopolímero comienza a endurecer su estructura sin fracturarse.

Cuando el geopolímero base con los tamaños propuestos, fue sometido al proceso de quemado 2 de los 3 tamaños no lograron resistir a la exposición de calor a altas temperaturas, dichos tamaños son de 150 y 250 μm , teniendo únicamente al tamaño de partícula de 595 μm sin fracturas, sin grietas o alguna alteración que muestre daño a su estructura, los enlaces que forman las 3 arcillas con el silicato de sodio, en las fases minerales, permite una distancia de poros mayor por el tamaño de las mismas partículas, es decir, que al estar más distantes una de otra permite que el calor se distribuya uniforme y de manera más progresiva, lo cual ayuda a dispersar mejor el calor en todos los poros de dicho geopolímero permitiendo la dilatación del material, por lo tanto el geopolímero gana mayor resistencia a las altas temperaturas con tamaños de partícula relativamente más grandes en base a los resultados experimentales, este comportamiento es debido en parte a que las arcillas que tienen características refractarias debido a los porcentajes de silicio y aluminio en su composición, estos son metales con altos puntos de fusión que ayudan al geopolímero, tales resultados concuerdan con lo reportado por otros autores.

Las fracturas surgen en el rango de 450-650 $^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, para los geopolímeros de tamaño de partícula de 150 y 250 μm , etapa en donde las arcillas liberan la mayor concentración de agua en su estructura, provocando que esta desorción fracture también a los geopolímeros debido a su menor presencia de poros. El geopolímero con tamaño de partícula de 595 μm supera esta etapa sin fracturarse y se consolida a 1000 $^{\circ}\text{C}$ con un grosor de capa mínimo de 5mm, se confirma también que el geopolímero se estabiliza y mantiene su estructura desde el primer ciclo de quemado, de tal manera que ya no sufre cambios perceptibles si se le aplica calor nuevamente, por lo tanto, este tamaño de partícula que constituye al geopolímero se determina como el mejor de los tres por su buena resistencia a la exposición de calor, es decir, su comportamiento como material refractario.

La adherencia de este geopolímero se ve disminuida, cuando las probetas de tamaño real se someten a un proceso de quemado, si se compara con la contraparte que no lo está, para el primer caso tenemos un máximo de 350 kgf de tensión y una adherencia de 1.098 kgf/cm², a diferencia de 550 kgf de tensión y 1.7254 kgf/cm² en el segundo caso, entonces la adherencia del geopolímero es mejor cuando no se quema. Se propone además que a mayor tamaño de partícula va disminuyendo la adherencia, factor por el cual los valores no son muy altos, pero va en aumento la resistencia a la exposición de calor como muestran los resultados experimentales, comparados con resultados de otros autores. Ahora bien, en base a estos resultados obtenidos se puede sugerir su uso como recubrimiento en las paredes de los hornos ladrilleros, por la parte interna, debido a su buena resistencia a la exposición de calor, si bien la adherencia no es alta, es suficiente para mantener fija y estable a la capa de geopolímero en las paredes

de ladrillo, siendo una alternativa para aumentar la durabilidad y los ciclos de quemado de los hornos ladrilleros.

5.2 Recomendaciones.

A continuación, presento algunas recomendaciones sobre el proyecto de investigación realizado:

- 1) El geopolímero tiene buen comportamiento al exponerlo al calor en los procesos de quemado, con calor por radiación, por lo tanto, se recomienda probar el mismo geopolímero, pero a exposición directa de calor o conducción, y analizar el comportamiento.
- 2) En la prueba de adherencia en algunas réplicas, los ladrillos se fracturaron, se recomienda buscar ladrillos de mejor calidad y repetir en más ocasiones estas pruebas y probar en otros materiales como concreto, para determinar si el geopolímero es capaz de mejorar su adherencia.
- 3) Se recomienda analizar más a detalle a que se debe cuando al variar el tamaño de las partículas del geopolímero base, a unas de mayor tamaño, comienza a disminuir la adherencia de este geopolímero.

COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y APLICADAS.

Durante la realización de mi residencia profesional en el laboratorio de desarrollo sustentable que se ubica en el Instituto Tecnológico de Celaya, hice uso de mis conocimientos obtenidos y habilidades desarrolladas durante el transcurso de la carrera, además de adquirir nuevos conocimientos y técnicas que en su momento eran hasta cierto punto desconocidas para mí, a continuación, explico un poco de lo anterior mencionado:

Operaciones Unitarias I.

Como preparación de las muestras era necesario hacer uso de técnicas de separación, como lo son la molienda y tamizado de materiales en este caso de arcilla con ayuda de molinos de quijadas y de bolas, los cuales durante mi carrera aprendí a hacer uso de ellos y algunos conceptos básicos sobre su funcionamiento además de conocer y reafirmar conceptos básicos como por ejemplo el de la separación primaria, y sobre qué tipo de molino aplica para las necesidades del proyecto, y el manejo de los tamices fue de gran importancia para obtener el tamaño de partícula requerido.

Análisis Instrumental.

Mis conocimientos en esta materia fueron indispensables para entender como es el proceso de preparar y analizar una muestra en el microscopio electrónico de barrido y poder interpretar los resultados. Fue de utilidad también para comprender la información proporcionada por algunos estudios realizados anteriormente a las arcillas en donde se llevaron a cabo análisis como AAS y Difracción de rayos X, son métodos de análisis que anteriormente estudié, pero terminé de comprenderlos después de realizarlos o tener contacto más cercano con estos en mi residencia profesional.

Procesos de Transferencia de calor y masa.

Se requiere de un tratamiento térmico, de un secado y quemado, en donde se consolida la nueva estructura del geopolímero, durante este proceso el calor genera cambios en el material como pérdida de masa por la evaporación de agua contenida en su estructura, procesos endotérmicos a altas temperaturas que generan transformaciones químicas como la de caolín en caolinita y con estos conocimientos poder interpretar los resultados. Por lo tanto, saber cómo afecta los procesos en donde interviene el calor fue importante para comprender como reaccionan las arcillas y el geopolímero, además que también parte de estos conocimientos termine de adquirirlos realizando mi residencia profesional

Laboratorio Integral I, II Y III.

Mis conocimientos de estas asignaturas me fueron de utilidad para el manejo y uso correcto de equipos de laboratorio, requeridos para mi investigación como fueron hornos, balanzas analíticas, estufas para secar muestras, desecadores por mencionar algunos.

Trabajo en equipo.

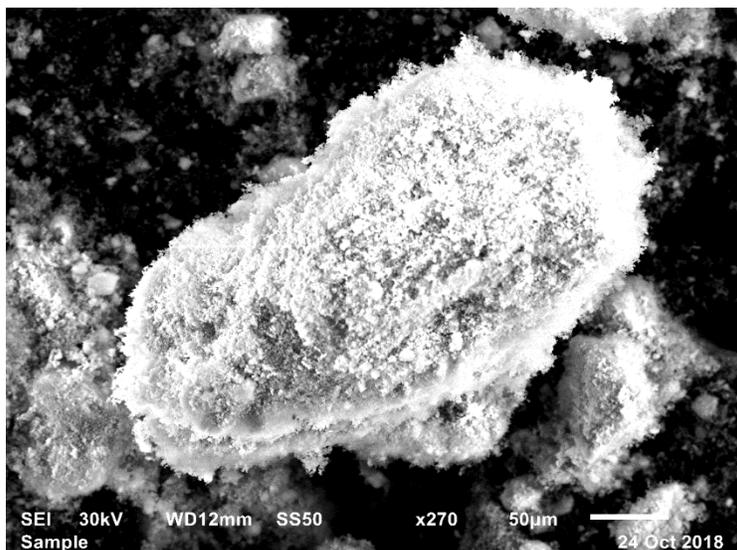
Además del desarrollo de las actividades de mi proyecto, proporcione ayuda ocasional a mis compañeros que también realizaban su residencia profesional en el laboratorio generando así un ambiente de trabajo en equipo, responsable y de confianza al igual participe en actividades de acondicionamiento del laboratorio, como inventarios de materiales y equipos, limpieza, organización entre otras más. Se contribuyó a la complementación del aprendizaje de un grupo de jóvenes de ingeniería química con la especialidad de materiales, explicándoles un poco de lo que se realiza en mi proyecto.

REFERENCIAS

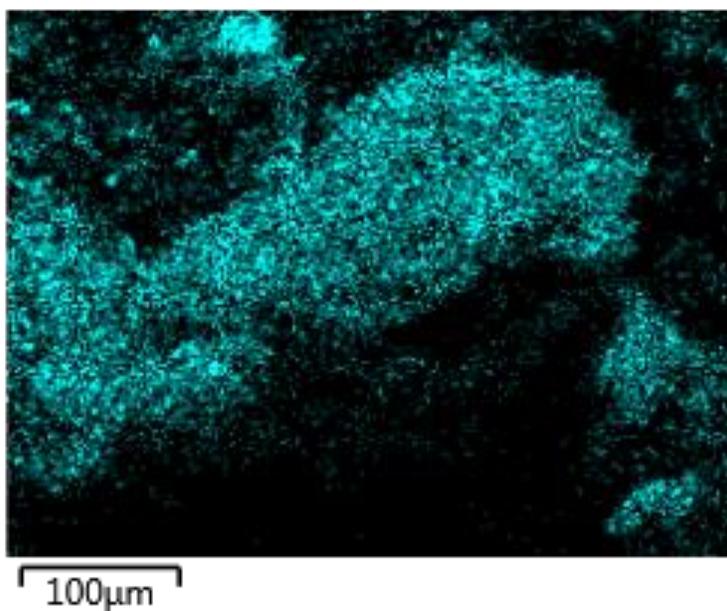
- Carbotecnia. (11 julio, 2014). Zapopan, Jalisco, México. Granulometría. Número de malla. <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/granulometria/>
- Cervantes-Resendiz, J.D. (2018). Estudio de Arcillas de neutla, Gto. Tesis para obtener el grado de ingeniero químico. Instituto tecnológico de Celaya, México.
- García R.E., Suárez B. M. (25 de noviembre de 2018). Biblioteca Virtual FAHUSAC. Las arcillas: propiedades y usos, <https://bvhumanidades.usac.edu.gt/items/show/1752>. Universidad Complutense (Madrid).
- Gilces-Demera, R.E. (2015). Optimización a la resistencia de compresión y eflorescencias usando diseño estadístico de experimentos en materiales Geopoliméricos manufacturados a partir de Zeolitas y activadores alcalinos. Escuela Superior Politécnica Del Litoral Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. Guayaquil, Ecuador.
- Kovárik, T., Rieger, D., Kadlec, J., Krenek, T., Kullová, L., Pola, M., Belský, P., France, P., Ríha, J. (2017). Thermomechanical properties of particle-reinforced geopolymer composite with various aggregate gradation of fine ceramic filler. Construction and Building Materials. 143, 599-606.
- Muñiz Villarreal M.S., Ramón Gasca J., Manzano Ramírez A., Rubio Ávalos J.C., CIENCIA Y DESARROLLO. (febrero 2011). Querétaro, México. Geopolímeros para un desarrollo sustentable. <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/249/articulos/geopolimeros-para-un-desarrollo-sustentable.html>
- Díaz Rodríguez L.A., Torrecillas R. (2002). Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio. No. 41, p. 459-470.
- Torres-Ochoa, J.A. (2013). Síntesis de un Geopolímero Refractario: Estudio de Un proceso de consolidación térmica y su aplicación como recubrimiento interno de hornos ladrilleros. Maestría en Ciencias. Instituto Tecnológico de Celaya, México.
- Tufiño G., Vieira N., Lascano L., Guerrero V., (2012). Propiedades térmicas de arcillas ecuatorianas para ser utilizadas como material refractario. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Valera Mejías A. A. (2009). Evaluación de la adherencia de dos capas de un refractario Silicoaluminoso. Informe de Pasantía para optar el título de Ingeniero de Materiales. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, Baruta.

ANEXO 1

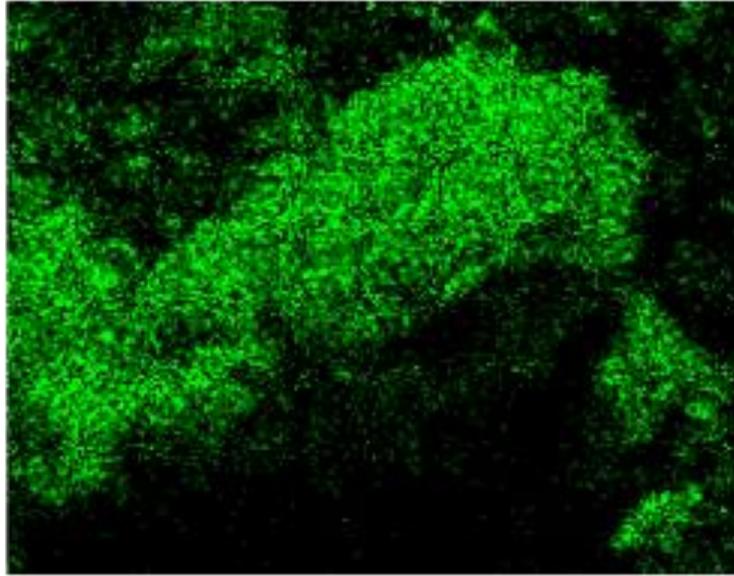
EN EL ANEXO 1 SE MUESTRAN LAS IMAGENES OBTENIDAS POR EL ANÁLISIS SEM REALIZADO A LA ARCILLA BAUWER, DONDE SE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN APROXIMADA DE LOS DE ELEMENTOS PRESENTES.



Arcilla Bauwer

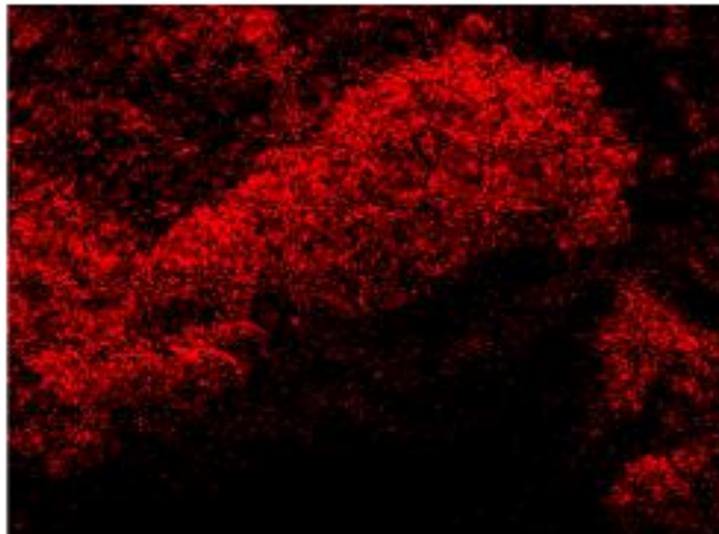


Distribución de Silicio en la estructura de la arcilla Bauwer



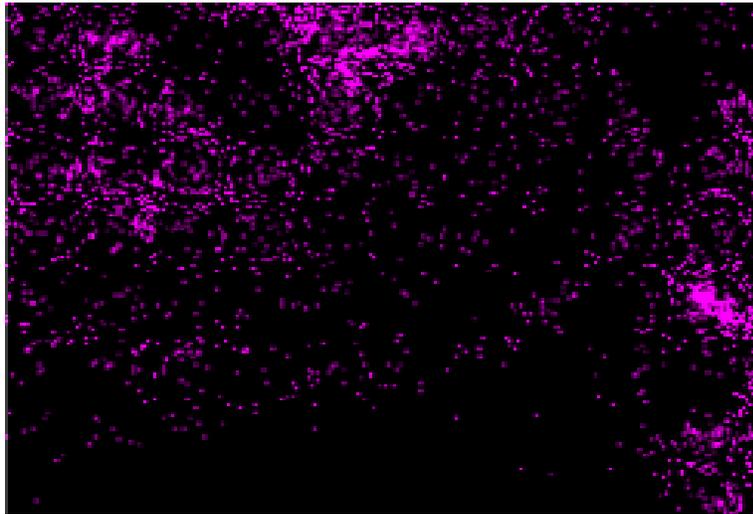
100 μ m

Distribución de Aluminio en la estructura de la arcilla Bauwer.



100 μ m

Distribución de Oxígeno en la estructura de la arcilla



100 μ m
Distribución de Carbono en la estructura de la arcilla Bauwer.

ANEXO 2

EN EL ANEXO 2 SE MUESTRAN LOS GRAMOS DE ARCILLAS Y GEOPOLÍMERO QUE CONTIENEN LAS PROBETAS REPRESENTATIVAS DE MALLA 30, 60, 100, Y PARA EL RECUBRIMIENTO DE LOS LADRILLOS DE TAMAÑO REAL CON TAMAÑO DE PARTICULA DE 595 μm CORRESPONDIENTE A MALLA 30.

PROBETAS REPRESENTATIVAS

PRIMERA REPLICA

PROBETA R. #1 MALLA 60	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
	22.2814	20.3439	5.8125	48.438	96.8758

PROBETA R. #1 MALLA 100	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
	25.7094	23.4728	6.7068	55.89	111.779

SEGUNDA REPLICA

PROBETA R. #2 MALLA 30	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
	20.82	19.01813	5.4386	45.7871	91.0683

PROBETA R. #2 MALLA 60	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
	20.8285	19.019	5.4353	45.9189	91.2017

PROBETA R. #2 MALLA 100	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
	20.8293	19.0189	5.4348	45.6423	90.9253

TERCERA REPLICA

PROBETA R. #3 MALLA 30	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
	20.8292	20.1844	5.4348	45.6467	92.0951

PROBETA R. #3 MALLA 60	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
	20.2897	19.018	5.434	47.164	91.9057

PROBETA R. #3 MALLA 100	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
	20.8191	19.0187	5.4339	48.5965	93.8682

LADRILLOS DE TAMAÑO REAL CON TAMAÑO DE PARTICULA DE 595 µm CORRESPONDIENTE A MALLA 30.

PROBETA #1 MALLA 30	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
CARA 1	25.2957	23.0946	6.5986	55.0005	109.9894
CARA 2	25.2982	23.0937	6.5958	54.9835	109.9712
				TOTAL	219.9606

PROBETA #2 MALLA 30	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
CARA 1	25.2992	23.01950	6.5986	54.9637	109.9565
CARA 2	25.2995	23.0941	6.5992	54.9883	109.9811
				TOTAL	219.9376

PROBETA #3 MALLA 30	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
CARA 1	25.2992	23.0949	6.5985	54.9535	109.9461
CARA 2	25.2936	23.0941	6.5982	54.9742	109.9601
				TOTAL	219.9062

PROBETA #4 MALLA 30	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
CARA 1	25.2936	23.0942	6.5983	54.9886	109.9747
CARA 2	25.2936	23.0941	6.5982	54.9856	109.9715
				TOTAL	219.9462

PROBETA #5 MALLA 30	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
CARA 1	25.2936	23.0941	6.5983	54.9852	109.9712
CARA 2	25.2936	23.0941	6.5983	54.9894	109.9754
				TOTAL	219.9466

PROBETA #6 MALLA 30	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
CARA 1	25.2936	23.0941	6.5983	54.9863	109.9723
CARA 2	25.2936	23.0941	6.5983	54.9855	109.9715
				TOTAL	219.9438

PROBETA #7 MALLA 30	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
CARA 1	25.2936	23.0941	6.5983	54.9880	109.9740
CARA 2	25.2936	23.0941	6.5983	54.9860	109.9720
				TOTAL	219.9460

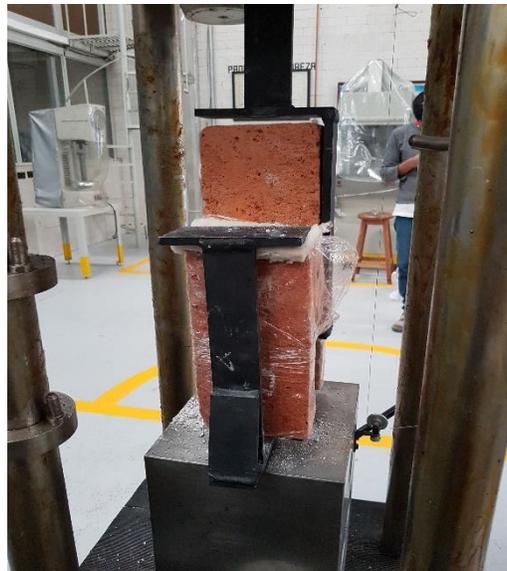
PROBETA #8 MALLA 30	TEPOZÁN gr	CAOLÍN gr	BAUWER gr	SILICATO DE SODIO gr	MASA DE GEOPOLÍMERO gr
CARA 1	25.2936	23.0941	6.5983	54.9861	109.9721
CARA 2	25.2936	23.0941	6.5983	54.9861	109.9721
				TOTAL	219.9442

ANEXO 3

DISPOSITIVO DE ACERO COLL ROLLED TIPO SOLERA FABRICADO PARA LA PRUEBA DE ADHERENCIA PARA LADRILLOS DE TAMAÑO REAL.



Dispositivo para prueba de adherencia solera de 2,3/8 " acero coll rolled.



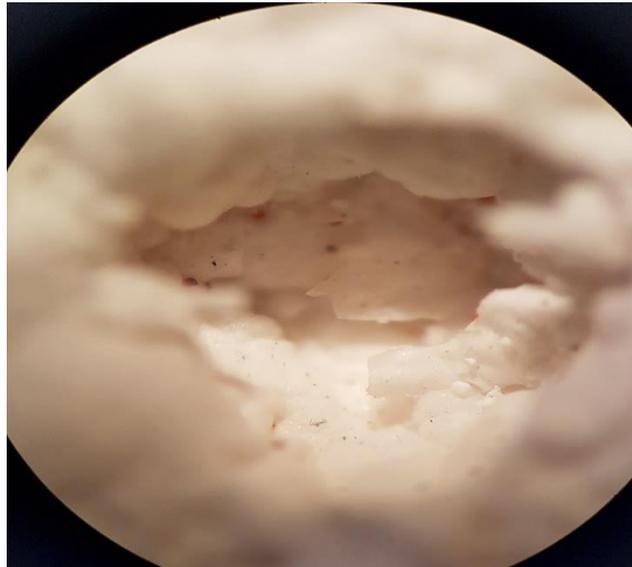
Dispositivo montado con la probeta de ladrillo de tamaño real, en donde el gancho de la parte central ejerce un movimiento hacia arriba.



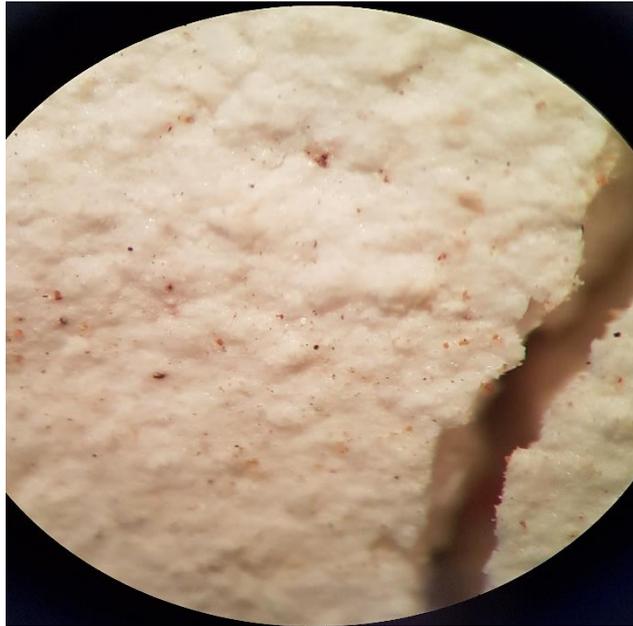
Como podemos observar el gancho central es el único que tendrá movimiento hacia arriba provocando la tensión, y los laterales permanecerán fijos en la mordaza que se aprecia en la figura.

ANEXO 4

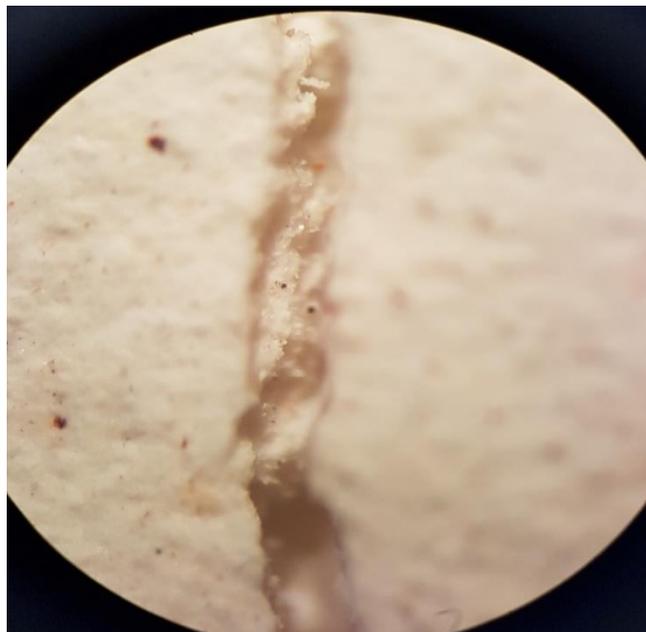
IMÁGENES DE ESTRUCTURA DE LA CAPA DEL GEOPOLÍMERO CON MEDIDAS DE PARTÍCULA DE 150 μm , 250 μm Y 595 μm .



Poros y estructura de la capa de geopolímero quemado con tamaño de partícula de 595 μm correspondiente a malla 30, sin fracturas, sin fisuras visto desde un microscopio Zeiss stemi dv4 .



estructura de la capa de geopolímero quemado con tamaño de partícula de 250 μm correspondiente a malla 60, con evidente fractura, visto desde un microscopio Zeiss stemi dv4



estructura de la capa de geopolímero quemado con tamaño de partícula de 150 μm correspondiente a malla 100, con evidente fractura, visto desde un microscopio Zeiss stemi dv4.