



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Construcción)

Estudio de la actividad reactiva y resistencia mecánica de la cal con
residuo de toba volcánica en morteros.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Construcción)

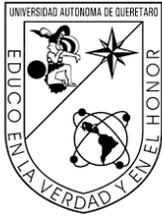
Presenta

Ing. Carlos Mario Tovar Kassab

Dirigido por

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Querétaro, Querétaro a 1 octubre 2020



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Maestría en Ciencias (Construcción)

Estudio de la actividad reactiva y resistencia mecánica de la cal con residuo de toba volcánica en morteros.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
 Maestro en Ciencias (Construcción)

Presenta

Ing. Carlos Mario Tovar Kassab

Dirigido por

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

SINODALES

FIRMAS

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Secretario

Dr. José Luis Reyes Araiza

Vocal

Dra. Teresa López Lara

Suplente

Dr. Francisco Javier García Rodríguez

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha Aprobación: Octubre/2020

México



Dirección General de Bibliotecas UAQ

-Mira de cerca al presente que estas construyendo, debería parecerse al futuro que estas soñando.-Alice Walker.



Agradecimientos

Profundos agradecimientos al CONACyT por hacer posible este proceso de formación como investigador, a través de los diferentes apoyos otorgados durante el curso de maestría.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro por el impulso que le otorga a mi formación académica a través de este posgrado en ciencias.

De la misma forma agradezco a los profesores que intervinieron en mi formación académica.

Agradecido con las personas que siempre me ayudaron, a mis padres por todo su apoyo y cariño incondicional.



ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
I. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	16
1.2 HIPÓTESIS	18
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
II. ANTECEDENTES	20
III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	26
3.1 Cemento Portland (CP)	26
3.2 Agua de mezclado.....	30
3.3 Puzolana	31
3.3.1 Principales tipos de puzolana	31
3.3.2 Clasificación y características	32
3.4 Actividad Puzolánica.....	32
3.5 Método de Chapelle.....	33
IV. METODOLOGÍA Y MATERIALES.....	35
4.1 Materiales y Recursos Humanos.....	38
4.2 Determinación del material	40
4.3 Cal hidratada.....	41
4.4 Agua de mezclado	42



4.5	Materiales de mezclado.....	42
4.6	Moldes.....	42
4.7	Maquina Universal.....	42
4.8	Mesa de Fluidez.....	43
4.9	Método de Chapelle (Reactividad Puzolánica).....	44
4.9.1	Cálculos.....	45
4.10	Procesado del material.....	48
4.11	Identificación de características de los materiales.....	49
4.12	Identificación inicial de las proporciones más adecuadas (Toba Volcánica/Cal).....	53
4.13	Prueba de absorción (porosidad).....	57
4.14	Prueba de Trabajabilidad.....	58
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
5.1	Identificación de características de los materiales.....	60
5.2	Resultados de prueba de Chapelle para medir actividad puzolánica.....	62
5.3	Pruebas de resistencia de las probetas de toba volcánica y cal.....	63
5.4	Prueba de absorción (Porosidad).....	67
5.5	Prueba de trabajabilidad.....	69
VI.	Aplicación de los resultados obtenidos.....	71
6.1	Posibles usos.....	71
6.2	Ejemplo de aplicación.....	71
VII.	CONCLUSIONES.....	74
VIII.	BIBLIOGRAFÍA.....	76



INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición química del cemento Portland. Fuente: (Estévez & Gutiérrez, 1990)	27
Tabla 2 Compuestos y óxidos principales del clinker. Fuente: (Estévez & Gutiérrez, 1990)	28
Tabla 3 Relación de mezclas de Agua y Cal	50
Tabla 4 Propuesta de porcentaje de mezclas de los materiales.	53
Tabla 5 Clasificación de morteros de acuerdo a su fluidez.....	59
Tabla 6 Resistencia a la compresión de los Cubos de Cal Hidratada con su respectiva relación agua-cal.....	60
Tabla 7 Actividad puzolánica de la toba volcánica.....	62
Tabla 8 Resistencia a la compresión de las probetas cubicas de toba volcánica con cal hidratada a los 7 días de fraguado.....	63
Tabla 9 Resistencia a edades de 7, 14 y 28 días de las mezclas propuestas.....	66
Tabla 10 Porcentaje de Absorción	67
Tabla 11 Porcentaje fluidez.....	69
Tabla 12 Características del muro a cubrir.....	71
Tabla 13 Rendimiento de Cal hidratada para revoque de 1 cm de grosor por cada metro cuadrado.....	72
Tabla 14 Cantidad de cal necesaria para el muro de 165 m ²	72
Tabla 15 Rendimiento calculado para la mezcla 13 (100% cal + 30% toba)	72
Tabla 16 Material necesario para un muro de 165 m ² con toba volcánica.....	73



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Cantera de material de construcción.....	14
Figura 2	Metodología experimental general, Fuente propia.	37
Figura 3	Espectro de difracción de rayos X de la Riolita (López et al., 2017).....	40
Figura 4	Material (toba volcánica) de Huichapan.....	41
Figura 5	Cal Hidratada (fuente: CALIDRA).....	41
Figura 6	Prensa Hidráulica Tinius Olsen de 30 toneladas (fuente propia)	43
Figura 7	Mesa de Fluidez, cono de fluidez y pisón. (fuente propia)	43
Figura 8	Montaje experimental del método de Chapelle.....	45
Figura 9	Montaje de experimento para método de Chapelle (Fuente Propia)	46
Figura 10	Pesado de materiales para prueba de Chapelle (Fuente propia)	47
Figura 11	Filtrado de la mezcla.....	47
Figura 12	A) Extracción de 25 ml de la solución B) Titulación de la mezcla con HCL 0.1N.....	48
Figura 13	Material en proceso de tamizado.	49
Figura 14	Proceso de elaboración de los cubos de cal hidratada.	51
Figura 15	Especímenes cúbicos en proceso de fraguado.....	52
Figura 16	Prueba de compresión simple a los 7 días de fraguado en maquina universal Tinius Olsen, con cabeceado de neopreno.	52
Figura 17	Mezcla de materiales en seco.	54
Figura 18	Determinación de volumen de agua necesario, proceso de elaboración de la mezcla.....	55
Figura 19	Ejemplo del primer lote de probetas cubicas.....	56



Figura 20 Inicio de ensayo de ensayo a compresión - Ensayo finalizado con la falla del espécimen..... 56

Figura 21 Proceso de saturación de las muestras. 57

Figura 22 "Esquema de mesa de fluidez ASTM C-230" 58

Dirección General de Bibliotecas UAQ



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Emisiones específicas de CO ₂ de la producción de cemento Portland y Cemento Portland-cal de 3 cementeras alemanas (adaptado de Sc (Schmidt, Cement with Interground Additives - Capability and Environmental Relief, 1992) Schmidt 1992).....	22
Gráfico 2 Resistencia al esfuerzo de compresión axial de las probetas cúbicas de cal hidratada con su respectiva relación agua-cal.....	61
Gráfico 3 Resistencia a la compresión de los compósitos de toba volcánica con cal hidratada.	65
Gráfico 4 Resistencia a la compresión simple de las mezclas propuestas.	67
Gráfico 5 Porcentaje de absorción (porosidad).....	68
Gráfico 6 Porcentaje de Fluidez.....	69
Gráfico 7 Rendimiento para revoque fino de 1 cm de espesor en sacos de cal hidratada para un muro con 165 m ² de área cubierta.	73



ABREVIATURAS/SIGLAS

CaO: Óxido de Calcio, Cal Viva.

Ca(OH)₂: Hidróxido de Calcio, Cal Hidratada, Cal Apagada, Cal.

ASTM : American Society for Testing Materials.

CP: Cemento Portland

CPC: Cemento Portland Compuesto

CSH : Silicato de Calcio Hidratado

DRX : Difracción de rayos x

FA : Ceniza Volante

SEM: Microscopia electrónica de barrido

MP: Materiales puzolánicos.



RESUMEN

La explotación de bancos de materiales para la construcción genera residuos sólidos que provocan el deterioro en la calidad del medio ambiente, la explotación de tobas volcánicas, que durante los procesos de disposición y detallado de su materia prima generan volúmenes significativos de residuos dentro de los que predominan los polvos como deshecho del proceso de corte. Este trabajo analiza las cualidades de los polvos de toba volcánica para revisar la factibilidad de las alternativas de uso con base en la naturaleza de sus componentes empleando normativas ASTM. Se propone enriquecer los morteros de cal hidratada en un porcentaje en peso de la mezcla con toba volcánica. La caracterización química del material nos indica una toba rica en sílice del orden del 76%, por lo que según a la bibliografía consultada el complemento de la mezcla de sílice - alúmina e hidróxido de calcio es viable. (Galetakis & A, 2016), todo esto en base a pruebas de compresión simple mediante ensayos de probetas cúbicas de acuerdo a la norma ASTM C109. Se demostró que la cal no presenta altas resistencias a compresión a comparación de otros compuestos como lo es el cemento, a diferencia de éste, la cal al estar en estado puro o más del 90% de pureza carece por completo de sílice y alúmina, dichos compuestos son muy importantes en el proceso de endurecimiento. La adición en porcentaje de peso de toba volcánico al hidróxido de calcio presentó mejor comportamiento mecánico a la resistencia de compresión simple a diferencia de la sustitución en porcentaje peso en la mezcla. Las adiciones del 10, 20 y 30% fueron la que a largo plazo (28 días) presentaron mejor resistencia, con aumento del 11.58%, 32.92% y del 57.88% respectivamente. El mejor porcentaje fue en adición de 30% de toba volcánica, con mejoramiento de resistencia a la compresión simple del 57.88%. La fluidez de la mezcla no se vio comprometida, pudiéndose aplicar como recubrimiento de mampostería, así como para pequeñas reparaciones de elementos no estructurales. La porosidad del material, reduciendo un 4% de porosidad en comparación de las muestras de cal.



ABSTRACT

The operation of building materials banks generates solid waste that causes deterioration in the quality of the environment, the exploitation of volcanic tuff, that during the processes of disposal and detailing of their raw material generate significant volumes of waste within which dust predominates as waste from the cutting process. This paper analyzes the qualities of the volcanic tuff powder to review the feasibility of the use alternatives based on the nature of their components using ASTM regulations. It is proposed to enrich the mortars with hydrated lime by a percentage by weight of the mixture with volcanic tuff. The chemical characterization of the material indicates a toba rich in silica of the order of 76%, so according to the literature consulted the complement of the mixture of silica - alumina and calcium hydroxide is viable. (Galetakis & A, 2016) , all based on simple compression tests using cubic test pieces according to ASTM C109. It was shown that lime does not present high resistance to compression compared to other compounds such as cement, unlike this, lime being in pure state or more than 90% purity completely lacks silica and alumina, these compounds are very important in the hardening process. The addition in percentage weight of volcanic tuff to calcium hydroxide presented better mechanical behavior to the simple compression resistance as opposed to the substitution in percentage weight in the mixture. The additions of 10, 20 and 30% were those that in the long term (28 days) presented better resistance, with an increase of 11.58%, 32.92% and 57.88% respectively. The best percentage was in addition of 30% volcanic tuff, with 57.88% improvement in simple compression resistance. The fluidity of the mixture was not compromised, being able to be applied as a masonry coating, as well as for small repairs of non-structural elements. The porosity of the material, reducing a 4% porosity compared to lime samples.



Dirección General de Bibliotecas UAQ



I. INTRODUCCIÓN



Figura 1 Cantera de material de construcción

Fuente: <http://canterastecnologia1002.blogspot.com/2015/11/canteras.html> Ilustrativa

El mundo actual presenta todos los días diversos retos a vencer, uno de ellos, el que más efectos adversos presenta, es el reto de la contaminación ambiental, la cual no sólo nos afecta directamente todos los días a los habitantes del mundo, sino que también compromete a las generaciones futuras a buscar diferentes medios para solventar los problemas que esta conlleva.

La industria de la construcción es una de las industrias más contaminantes, en especial la producción de materiales de construcción, como lo es la industria del cemento. Alrededor de 1 tonelada de CO_2 es liberada a la atmósfera por cada tonelada de cemento producida, esto debido a los procesos que involucran altas

temperaturas, alrededor de 1500 grados centígrados en los hornos rotatorios. Así también el proceso de extracción de los agregados genera contaminación del ambiente mediante la generación de polvos producto de proceso de trituración de materiales de las canteras.

Por lo que la reducción del uso de este material cementante, así como la reducción de los polvos de cantera, impactaría de forma benéfica al medio ambiente, obteniendo resultados secundarios como beneficios económicos y ahorro energético.

El siguiente trabajo presenta una propuesta del uso de la cal hidratada enriquecida con polvo de cantera como un posible cementante de mayor resistencia, se analiza el desempeño mecánico de resistencia a la compresión entre otras características mecánicas de las diferentes propuestas, así como su posible uso en el mercado de la construcción.



1.1. JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Actualmente la crisis energética y ecológica obliga a reconsiderar las posibles formas de crear un ahorro, singularmente a la industria del cemento y de la cal, las cuales presentan un elevado consumo energético en su proceso de fabricación.

La energía térmica es la más importante, siendo del orden de 5 a 7 veces superior al consumo de energía eléctrica.

Gran parte del esfuerzo se ha centrado en el ahorro de energía térmica, enfocando el problema en tres aspectos: el proceso tecnológico, las materias primas y el producto acabado.

La solución más inmediata y más amplia para ahorrar combustible (energía térmica) es incorporar adiciones activas al producto en su fase final de preparación.

El posible mejoramiento de materiales como la cal hidratada, la cual cuenta con capacidades cementantes, así como buena trabajabilidad, es utilizada en la industria de la construcción para diferentes soluciones.

Dentro de las cualidades de cementante de la cal, presenta bajas resistencias a la compresión, por lo que actualmente no es una alternativa factible para su uso como un sustituto de cemento Portland, este es uno de los motivos por lo cual se utiliza como un agregado a la mezcla de cemento Portland para hacer concretos con mayor trabajabilidad, ya que las altas resistencias las aporta el cemento.

El mejoramiento de la resistencia a la compresión del hidróxido de calcio es una ventana de oportunidad, ya que se representa a un cementante con menor costo de producción y menores efectos contaminantes durante este mismo proceso.

La generación de residuos sólidos derivados de diversos procesos en la explotación de bancos de materiales de tobas volcánicas está ocasionando deterioro en la calidad del aspecto ambiental en el sitio y a los alrededores.



Se esta buscando el correcto aprovechamiento de la puzolana natural (toba volcánica) producto de desperdicio derivado de las canteras en diferentes partes del mundo para aminorar el impacto ecológico que estas generan en el sitio y sus alrededores, así como el mejoramiento de mezclas cementicias con hidróxido de calcio, nos invitan a desarrollar diferentes soluciones ecológicas.

Diversas empresas buscan alternativas que permitan dar un manejo adecuado a sus residuos, reduciendo la contaminación paisajística provocada y manteniéndose dentro del cumplimiento legal en materia de cuidado al medio ambiente que se les está demandando.

La Industria de la extracción de materiales, dedicada a la explotación de tobas volcánicas, que tras los procesos para disposición y detallado de su materia prima genera volúmenes significativos de residuos dentro de los que predominan los polvos como deshecho del proceso de corte. (Lara & Zaragoza, 2018)

La utilización del residuo denominado “polvo de cantera” (toba volcánica) en combinación con la cal como sustitución total o parcial del cemento para la elaboración de mortero puede afectar sus propiedades mecánicas deteriorando, conservando o mejorándola, por lo cual se debe experimentar y formular diferentes proporciones, el cual nos proporcionará el compósito con las mejores características físico-mecánicas.



1.2 HIPÓTESIS

Las propiedades mecánicas de las mezclas de mortero presentarán una mejora de resistencia a compresión a través de la adición de la mezcla de toba volcánica adicionada con óxido de calcio.

Dirección General de Bibliotecas UAQ



1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Determinar la proporción de la mezcla de toba volcánica y óxido de calcio, mediante la experimentación de diferentes proporciones de los materiales, definiendo la composición con mejor comportamiento mecánico en las mezclas de mortero convencional.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Determinar las proporciones para la experimentación mediante propuestas basadas en el estado del arte.
- Realizar las mezclas de residuo de toba volcánica con óxido de calcio para identificar las diferentes propiedades de la misma.
- Realizar mediante experimentación las pruebas mecánicas a los especímenes.
- Analizar de manera estadística los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas.



II. ANTECEDENTES

Durante muchos años se ha utilizado la cal en la industria de la construcción, se le conoce así a la piedra caliza pulverizada, la cual está formada principalmente de carbonato de calcio o carbonato de calcio y magnesio, el cual posee propiedades completamente distintas a la cal, es un óxido o hidróxido de calcio o magnesio manufacturado en hornos a temperaturas aproximadas a los 1,000 °C, el producto resultante: la “cal viva” (óxido de calcio, “CaO”), es usada para el mortero, transformándolo en una especie de masilla mezclándolo con agua convirtiéndola en “cal hidratada” (hidróxido de calcio, “Ca(OH)₂) (Secretaría de Economía, 2014)

Desde el siglo xix hasta hoy, la aparición del cemento Portland ordinario (OPC, por sus siglas en inglés) produjo un decrecimiento importante en el uso de la cal en la construcción, porque el OPC brinda un endurecimiento inicial más rápido y mayor resistencia a edades tempranas (Hill et al., 1992).

Derivado de lo anterior muchos de beneficios del uso apropiado de la cal en la industria de la construcción son opacados, como lo son las inferiores temperaturas a las del OPC y muchos menos energía durante su calcinación, lo cual implica menor emisión de gases invernaderos, así también, la cualidad de mínima contracción, con lo cual se evitan agrietamientos, los morteros de cal resisten algún grado de acomodamiento en la mampostería, mientras los basados en OPC carecen de tolerancia a los movimientos; el deterioro causado por los álcalis contenidos en el OPC y que no presentan este problema en los morteros de cal, menor conductividad térmica que hace a la habitaciones más confortables, mayor impermeabilidad y mejor adherencia para materiales de mampostería comparado con productos basados en OPC (Shi, 2001).



Los morteros de cal son materiales dinámicos, continúan interactuando con el ambiente después de endurecer durante el proceso de carbonatación, y se adaptan a los cambios en las estructuras (Holmes et al., 2003)

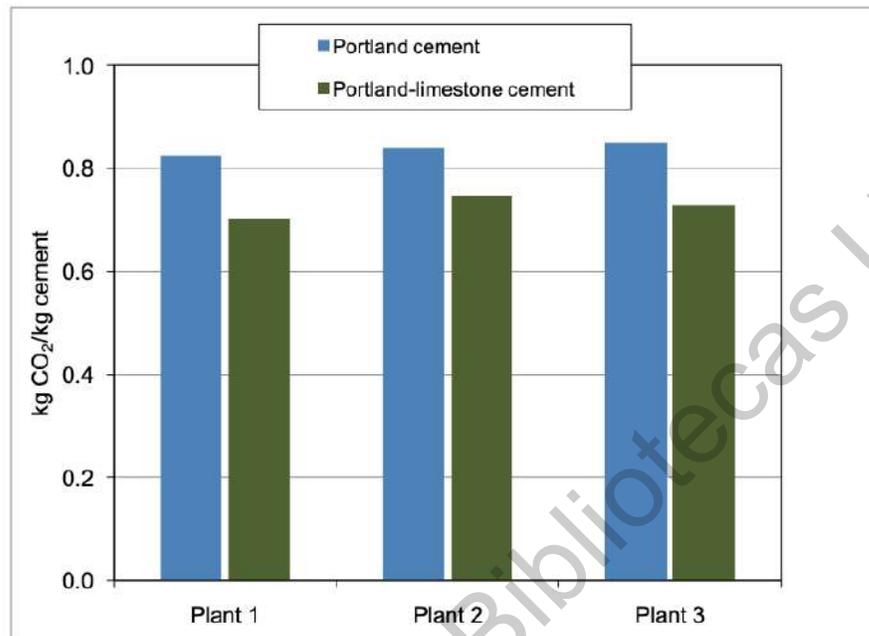
El concreto es el material más utilizado en el mundo, después del agua, y el cemento Portland es el elemento en la elaboración del concreto cuya producción genera un severo daño ambiental.

La producción de una tonelada de cemento emite alrededor de una tonelada de dióxido de carbono, el cual es el gas que mayor induce el efecto invernadero en la tierra. La contribución de gases invernadero a la atmósfera de la producción del cemento Portland ordinario a nivel mundial es de aproximadamente del 7%, por lo que es realmente necesario el desarrollo a alternativas de cementantes para hacer concreto (B.V. Rangan et al., 2005).

Dentro de las propuestas de reducción de los gases contaminantes que generan los gases invernadero existe la de sustitución de la masa de Clinker por un porcentaje de cal.

En general, la mezcla de cementos portland con cal hidratada son más finos que los cementos portland comunes, y por lo tanto pueden requerir una mayor energía en el proceso de molienda, sin embargo, se trata de un uso de energía relativamente menor que la producción de clinker y el cambio neto es para reducir las emisiones de CO₂ y el uso de energía para producir cementos mezclados. En el gráfico 1 se muestran ejemplos concretos de reducciones de las emisiones de CO₂ en tres cementeras alemanas (Schmidt, Cement with Interground Additives - Capability and Environmental Relief, 1992). Los cálculos incluyen la demanda total de energía de todas las etapas del proceso de producción, teniendo en cuenta la demanda específica de energía de los combustibles. La sustitución de alrededor del 15% por masa del clinker por piedra caliza reduce las emisiones de CO₂ en promedio un 12% (Schmidt et al. 2010). Resultados similares pueden calcularse para las emisiones de óxidos nitrosos (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂).





(Schmidt, Middendorf, & and N. B. Singh, Blended Cements, 2010)

Grafico 1 Emisiones específicas de CO₂ de la producción de cemento Portland y Cemento Portland-cal de 3 cementeras alemanas (adaptado de Sc (Schmidt, *Cement with Intergrround Additives - Capability and Environmental Relief*, 1992)hmidt 1992)

En México, la norma NMX C-414 define al cemento tipo CPC, llamado cemento Portland compuesto que puede contener entre 6% y 35% de cal y alguno otro elemento como lo es la escoria granulado de alto horno, puzolana, o humo de sílice en cantidades tales que el Clinker y la fracción del yeso no sea menor al 50% de la masa. (NMX-C-414-ONNCCE-2014, 2014)

Los antecedentes de mayor importancia en la utilización de las tobas volcánicas en la construcción los podemos encontrar en Italia, en distintas regiones de origen volcánico, como las del Vesubio, donde la extracción de este material es milenaria. Otro país de importancia es Etiopía, donde como ejemplo se puede citar la construcción en tobas rojas de las famosas iglesias monolíticas de Lalibela. En Alemania se trabajan las tobas porfíricas de Sachsen y las tobas Traquílicas de



Neurvied con similares fines a los anteriores. Los mampuestos, revestimientos y pisos de la gran mayoría de las iglesias construidas en México por los españoles, en el siglo" XVII , fueron realizadas en este material. (Meilan, 1984)

En (Galetakis et al.,2016) se explica que durante la explotación de bancos de materiales para construcción grandes cantidades de subproductos, como el polvo y lodos provenientes de los procesos de corte son generados, ocasionando, la manipulación y eliminación de estos subproductos graves problemas ambientales, ya que contribuyen a la acumulación y dispersión perjudicial en el aire, agua y el suelo de partículas sólidas finas.

Los bancos de material en varias partes de México, con la finalidad de disminuir la contaminación paisajística (Méndez, 2013) y dar cumplimiento a las exigencias en materia de cuidado ambiental, (NORMA Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. México, 2011) han realizado procesos para incorporar sus residuos en nuevas mezclas, sin considerar los efectos que producen diferentes dosificaciones, así como la naturaleza química de los compuestos.

La propuesta del uso de puzolanas como reemplazo del cemento fue hecha por Joseph Davidovits, quien propuso que los aglutinantes se pueden producir mediante la reacción de líquidos alcalinos con silicio y aluminio en fuentes de origen geológico. El denominó a estos polímeros como geo polímeros (Davidovits, 1987).

Se ha investigado acerca del comportamiento puzolánico de las tobas pumíticas de Guadalajara, todo esto para la fabricación de conglomerantes hidráulicos de características específicas y de bajo costo, tomando en cuenta la mineralogía, petrografía y composición química de los compuestos que se forman durante la reacción puzolánica. Se identificó la influencia de los componentes (cal hidratada, puzolana y cemento portland). Los resultados que se obtuvieron de manera general son muy alentadores en cuanto a las mejoras del material. (Del Río & Zarate, 2005).

Hay trabajos donde se presenta la evaluación de las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros adicionados con toba volcánica y ceniza de bagazo de caña



de azúcar, incorporados en proporción del 10 y 20% en sustitución al cemento. En los morteros de análisis se llevaron a cabo ensayos de resistencia mecánica a la compresión y de durabilidad (absorción y porosidad, succión capilar, permeabilidad a cloruros y susceptibilidad a la carbonatación, así como el estudio del comportamiento del material frente a la corrosión del acero de refuerzo embebido en el material, llegando a la conclusión de que la resistencia mecánica no es un parámetro que permita concluir acerca de la durabilidad de un material en un determinado medio ambiente, siendo la composición química, la morfología y tamaño de partícula determinantes de dicho comportamiento. (Valencia et al., 2012)

Existe el análisis del efecto de la incorporación de los materiales volcánicos de zonas específicas (Tolima y Puracé, Colombia) del proceso de hidratación de pastas de cementicias, adicionando materiales volcánicos como reemplazo del 20% del peso del cemento Portland, demostrando la actividad puzolánica del material en las pastas (Burgos, 2016).

Se ha realizado el análisis y estudio de las tobas volcánicas referente a sus características químicas y geotécnicas, para que de esta manera se pudiese categorizar y revisar la factibilidad de las alternativas de uso con base a los elementos que la componen. Los resultados obtenidos en dicha investigación definen el residuo de cantera como “Riolita”, clasificado como limo inorgánico (ML), mientras que la difracción de rayos x indica un contenido del 76% de Sílice (SiO_2), lo que resulta adecuado para su empleo en la sustitución del cemento Portland. (Lara & Zaragoza, 2018)

En la India, uno de los países en desarrollo que debe enfrentar de las mayores crisis de contaminación en el mundo a incursionado en el uso de la toba volcánica como sustituto del agregado fino en la mezcla de morteros, por un intento de solucionar el control de residuos (toba volcánica), así como reducir la extracción desmedida de arena de río, lo cual genera daños a largo plazo de los ríos y genera el alto costo de transporte del mismo, por lo que a conclusión el uso de toba volcánica es una alternativa viable a la arena como agregado fino (Madhav et al., 2018).



En la región de Jordania se estudiaron 10 tobas volcánicas de la región para su aprovechamiento como reemplazo de cementantes, en el muestreo de las mismas se evaluó la composición química, morfología y actividad puzolánica. Se hizo el reemplazo de 10 hasta 40% del cemento Portland y se examinaron sus efectos en la trabajabilidad de la mezcla fresca y la susceptibilidad de las reacciones álcali-silica. Se determinó que las tobas volcánicas con altos índices de SiO_2 presentaron una alta resistencia a la compresión en los muestreos con menos tiempo de fraguado y aquellos con altos niveles de CaO mejoraron la resistencia del material en las muestras con tiempo de fraguado mayor. (Ababneh, 2018)



III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se hace una descripción de los términos utilizados en la metodología, junto con las normas y pruebas que se realizaron para evaluar la experimentación.

3.1 Cemento Portland (CP)

El CP es el producto más demandante en la construcción, es el ingrediente principal para las mezclas cementicias tradicionales actuando como aglutinante. El empleo del cemento se remonta desde la antigüedad y el hombre solamente se puede especular sobre su descubrimiento, fue desde entonces que se empleaban pastas y morteros elaborados con arcilla, yeso y cal para unir bloques en las edificaciones. El cemento se empezó a utilizar en la Antigua Grecia utilizando tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini, que fueron los primeros cementos naturales utilizados por el hombre.

El cemento Portland es un aluminosilicatos de calcio, denominado Portland por su semejanza a una piedra que abunda en esa localidad de Inglaterra. Se obtiene por el calentamiento de aproximadamente a 1300 °C de una mezcla de minerales molidos, formados por piedra caliza y arcilla. Este calentamiento se lleva a cabo en hornos giratorios levemente inclinados de 3 m. de diámetro y 100 m. de largo.

La escoria que resulta de la calcinación de la mezcla de arcilla y piedra caliza, se conoce como CP, para diferenciarlo del cemento natural o de otros cementos, es así que el cemento es un conglomerante formado a partir de esta mezcla y que son posteriormente molidas y que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. Hasta este punto la molienda entre estas rocas es llamada Clinker, esta se



convierte en cemento cuando se le agrega yeso, este le da la propiedad a esta mezcla para que pueda fraguar y endurecerse.

El cemento está compuesto, principalmente, por óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro, hasta en un 95%. A nivel internacional el cemento debe de cumplir con las especificaciones de la ASTM C150, en México la norma NMX- C-414-ONNCCE-2009 se encarga de regir la calidad y especificaciones de los cementos. En la actualidad existen diferentes tipos de cementos de acuerdo a las necesidades de la construcción.

La composición química (Tabla 1) del CP varía dependiendo del tipo y uso, componentes primarios, secundarios y otros. Los componentes químicos necesarios para la fabricación del cemento provienen de diferentes minerales, por ejemplo: la piedra caliza aporta el CaO , arcillas aportan SiO_2 y el Al_2O_3 , la hematita aporta Fe_2O_3 . La materia prima pasa por un proceso de horneado a $1450^{\circ}C$ de temperatura, donde se recombinan los cuatro elementos esenciales antes mencionados, produciendo clínker. Dentro de la composición química del cemento se presentan los siguientes óxidos y compuestos (Tabla 2).

Tabla 1 Composición química del cemento Portland. Fuente: (Estévez & Gutiérrez, 1990)

Componentes primarios	Componentes secundarios	Otros componentes
CaO	MgO	Mn_2O_3
SiO_2	SO_3	P_2O_5
Al_2O_3	$K_2O.Na_2O$	TiO_2
Fe_2O_3	CaO Libre, residual insoluble, Pérdida por ignición.	Fluoruros



Tabla 2 Compuestos y óxidos principales del clinker. Fuente: (Estévez & Gutiérrez, 1990)

Óxido	Abreviatura	Compuesto	Abreviatura
CaO	C	$3CaO \cdot SiO_2$	C3S
SiO_2	S	$2CaO \cdot SiO_2$	C2S
Al_2O_3	A	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C3A
Fe_2O_3	F	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C4AF
MgO	M	$Ca(OH)_2$	CH
SO_3	S	$4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_3$	C4A3S
H_2O	H	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O \cdot CaSO_4 \cdot 2H_2O$	CSH2

La descripción de los óxidos presentes se muestra a continuación:

Óxido de calcio: Se obtiene de la calcinación de las rocas (calizas o dolomías); con alto contenido de carbonato de calcio, a una temperatura de 900°C.

Bióxido de silicio (SiO_2): Se encuentra en las variedades cristalizadas de cuarzo, tridimita, cristobalita y en de manera amorfa en la sílice fundida. La sílice pura o cuarzo, estable a temperatura ordinaria, se transforma a 573°C en cuarzo, cristalizando en prismas hexagonales (densidad: 2,65 y dureza 2,7); a 870°C se obtiene la tridimita, y a 1470°C se forma la cristobalita (densidad: 2,33). Aunque la sílice sea químicamente inerte a la temperatura ordinaria, reacciona enérgicamente con las bases, a temperaturas elevadas, formando los silicatos. El bióxido de silicio, a pesar de no unirse directamente con el agua se le considera como anhídrido, formando gases del ácido silícico que, aunque no se hayan aislado, se les puede considerar como hidratos $SiO_2 \cdot H_2O$, o SiO_3H_2 (ácido meta silícico), y el $SiO_2 \cdot 2H_2O$ o SiO_4H_4 (ácido orto-silícico), aún con más moléculas de agua y bióxido de silicio se forman compuestos muy complejos.



Óxido de aluminio (Al_2O_3): llamado también alúmina, se encuentra en la naturaleza en forma de corindón incoloro, se funde a $2505^\circ C$, cristalizando en numerosas formas por enfriamiento. La alúmina se halla combinada en la arcilla y la eliminación de la sílice da origen a la formación de dos óxidos hidratados, el diásporo y la hidrargirita o gibstia, siendo la bauxita una mezcla de ambas.

Óxido férrico (Fe_2O_3): Muy abundante en la naturaleza; en el cemento portland se encuentra en pequeñas dosis, pues proviene de las impurezas de las arcillas. Este óxido da el color grisáceo al cemento.

Silicatos de calcio: el óxido de calcio y el bióxido de silicio reaccionan a elevada temperatura, formando los siguientes compuestos.

Silicato mono-cálcico o meta-silicato: cristaliza en el sistema monoclinico, es inerte hidráulicamente.

Silicato bicálcico u orto-silicato: existen tres formas alotrópicas, apreciándose en las escorias de altos hornos y en los cementos portland ricos en este compuesto.

Aluminatos de calcio: se forman cuatro compuestos definidos:

Aluminato manocálcico: se obtiene combinando alúmina y carbonato de calcio por encima de $950^\circ C$, se funde a $1660^\circ C$ y se cristaliza en el sistema monoclinico, tiene propiedades hidráulicas.

Aluminato tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3$): se funde a $1535^\circ C$, presentando propiedades hidráulicas menores que el anterior, hallándose en el cemento portland; se cristaliza en el sistema cúbico. En estado puro se hidrata y fragua rápidamente y contribuye al falso fraguado de los cementos.

Trialuminato pentacálcico ($5CaO \cdot 3Al_2O_3$): existen en dos formas alotrópicas. Se funde a $1455^\circ C$, encontrándose a veces en los cementos Portland y aluminosos; presenta fraguado rápido y menores resistencias que el aluminato monocálcico.

Pentaluminato tricálcico ($3CaO \cdot 5Al_2O_3$): se funde a $1720^\circ C$, hallándose a veces en los cementos aluminosos. Ferritos cálcicos: el óxido de calcio y el óxido de hierro



reaccionan a gran temperatura para dar el ferrito monocálcico: $CaO \cdot Fe_2O_3$ y el ferrito bicálcico: $2CaO \cdot Fe_2O_3$. Se funde a $1216^\circ C$, no teniendo propiedades hidráulicas, hallándose en los cementos aluminosos y metalúrgicos.

3.2 Agua de mezclado.

Muchos investigadores han concluido que la variable más importante para obtener un concreto de alta resistencia es la relación agua/cemento (a/c) puesto que la mayoría de las mezclas de concreto de alta resistencia contienen otros materiales como cementantes la cual se calcula con base a la masa. Se ha encontrado que la relación existente entre a/c y la resistencia a la compresión, que ha sido identificada en los concretos de resistencia normal, es válida también para concretos de resistencia más alta. Se ha probado que el uso de aditivos químicos y otros materiales cementantes son esenciales para diseñar un concreto que pueda ser colocado con una relación a/c baja.

El agua de mezcla cumple con dos funciones importantes, permitir la hidratación del cemento y hacer la mezcla manejable. De toda el agua que se emplea en la preparación de un mortero o concreto, parte hidrata el cemento y el resto no presenta ninguna alteración y con el tiempo se evapora, dejando vacíos, los cuales disminuyen la resistencia y la durabilidad del material. La cantidad de agua que requiere el cemento para su hidratación se encuentra alrededor del 25 y el 30% de la masa del cemento, pero con esta cantidad la mezcla no es manejable, para que la mezcla empiece a poder ser manipulable, se requiere como mínimo una cantidad de agua del orden el 40% de la masa del cemento (Rivera L, 2014). Como norma general se considera que el agua es adecuada para producir mezclas si su composición química indica que es apta para el consumo humano, sin importar si ha tenido o no un tratamiento preliminar; sin embargo, hay situaciones en que esto



no se cumple, porque existen aguas potables con contenidos de citratos o con pequeñas cantidades de azúcares, que no afectan su potabilidad, pero pueden hacerlas inadecuadas para la fabricación de mezclas de cemento.

3.3 Puzolana

La ACI (2002) define a la puzolana como: “material silíceo o silicoaluminoso, que en sí mismo puede poseer un pequeño o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad reacciona químicamente con hidróxido de calcio a temperatura normal formando compuestos con propiedades cementicias”.

El uso de puzolanas y materiales cementantes en la industria del cemento y del concreto ha ido cobrando una importancia cada vez mayor en las últimas décadas. Son varios los beneficios conseguidos con el uso de puzolanas, entre ellos se puede destacar la mejora de resistencias mecánicas, el aumento de durabilidad y en muchos casos beneficios económicos y medioambientales.

3.3.1 Principales tipos de puzolana

- a) Puzolanas artificiales: provienen de los subproductos industriales y de determinados materiales tratados térmicamente, como ejemplo, las cenizas producto de la combustión de carbones e hidrocarburos en centrales eléctricas; las cenizas que se producen por la calcinación de materia orgánica, como, por ejemplo, la cascara de arroz, bagazo de caña de azúcar; y arcillas que son activadas mediante altas temperaturas.



Puzolanas naturales: principalmente son las que emanan de materiales rocosos como la ceniza volcánica, tobas volcánicas, piedra pómez, escoria y obsidiana, suelos diatomáceos, entre otros. En las puzolanas naturales predomina la sílice amorfa o vidrio volcánico que se genera por el enfriamiento rápido de la lava (ceniza volcánica).

3.3.2 Clasificación y características

Las puzolanas se dividen y clasifican en tres tipos según la norma ASTM C 618-15 “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”

- a) Clase N: Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y varios materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas.
- b) Clase F: ceniza volante producida por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Estas cenizas poseen propiedades puzolánicas.
- c) Clase C: ceniza volante producida por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza además de tener propiedades puzolánicas, también tiene propiedades cementicias.

3.4 Actividad Puzolánica

La interacción en una mezcla, el cemento portland y la puzolana, en presencia de agua, participa por una parte la cal y los álcalis liberados por la reacción de la hidratación del cemento, y por la otro los óxidos presentes en la puzolana; la



presencia de la puzolana en el sistema de hidratación modifica la manera en que compuestos principales del cemento se hidratan, afectando directamente el calor de hidratación, contenido de portlandita, la cantidad de agua combinada y el grado de reacción de los componentes.

Es difícil determinar el mecanismo de la reacción puzolánica de manera acertada, debido a la naturaleza de la interacción entre la puzolana y el hidróxido de calcio. (Khalil et al., 2013; Cobreros et al., 2015).

Existen diferentes factores que deben ser considerados como influyentes en la reacción puzolánica, como lo son:

- Las fases activas de la puzolana (Características químicas-mineralógicas)
- Proporción de sustitución cemento-puzolana.
- Cal disponible
- Dimensiones de la puzolana
- Relación agua/cemento de la mezcla
- Tiempo y tipo de curado
- Temperatura de curado

3.5 Método de Chapelle

El método de Chapelle es un método acelerado que permite la determinación directa del consumo de calcio mediante una reacción química con un material puzolánico. Consiste en una suspensión de 1g puzolana/2g cal, la cal consumida es calculada por la diferencia entre el agregado y el restante de cal. El procedimiento se lleva a cabo para un blanco que será sin puzolana, y el cual servirá de referencia para el cálculo de la cal consumida para una puzolana determinada; los resultados se expresan en mg de Hidróxido de calcio fijado por la puzolana. [2]



Durante el desarrollo de este método, se utilizarán reactivos químicos con valores de pH variados de tal manera que se debe tener especial cuidado en la manipulación del óxido de calcio (pH básico) y de la solución de ácido clorhídrico (pH ácido), ya que puede afectar la piel, vistas y mucosas; se recomienda utilizar guantes, mascarilla y gafas. Se hará uso de planchas de calentamiento con una temperatura no mayor a 90 °C, por lo tanto, se debe evitar el contacto con la superficie de esta, se recomienda el uso de guantes aislantes de calor. No beber, consumir alimentos y usar los implementos de seguridad adecuados, además se debe de tener un control de la temperatura del sistema (mantener siempre abierta la llave del agua de enfriamiento) para evitar el recalentamiento del mismo. Después de realizado el método, depositar los residuos en los recipientes adecuados o almacenar para la posterior y correcta disposición (nunca eliminar por el vertedero).



IV. METODOLOGÍA Y MATERIALES.

La metodología está constituida por ensayos experimentales, siguiendo una planificación progresiva y ordenada con el fin de obtener una caracterización veraz. Los ensayos que aquí se exponen están regido por normativa internacional ASTM (American Society for Testing Material), la NOM (Normas Oficiales Mexicana)

Los procedimientos y especificaciones que no se detallan estarán establecidos en la respectiva norma. Todas las pruebas de laboratorio fueron realizadas en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Querétaro, específicamente en el laboratorio de suelos, laboratorio de geotecnia ambiental.

La experimentación de este proyecto queda dividida en tres fases:

Fase 1: Recepción, caracterización y preparativos previos de la toba volcánica.

Se eliminó el porcentaje de agua retenido, para posteriormente llevar a cabo la reducción de tamaño de partícula a través de tamizado mecánico, la reactividad puzolánica depende de factores de la granulometría del material puzolánico, el objetivo de la selección de la toba volcánica en diferentes tamaños.

De la misma forma se identificó las propiedades físicas de la cal, definiendo resistencias a compresión y fluidez de este material en estado puro, así como el porcentaje de agua más conveniente para trabajar las mezclas.

Fase 2: Elaboración de propuestas de mezclas, se lleva a cabo el procedimiento de mezclado en diferentes proporciones de cal y toba volcánica, de forma manual a temperatura ambiente. Todas las mezclas se realizaron bajo las mismas condiciones para identificar las características de resistencia a la compresión de estas mezclas a diferentes edades de fraguado (7, 14 y 28 días)



Fase 3: Se identifica las mezclas con mayor resistencia a la compresión simple, mediante el análisis de los datos obtenidos de las pruebas de la fase 2, así también se lleva a cabo la comparación de las mezclas en sus diferentes edades de fraguado (7, 12 y 28 días).

Dirección General de Bibliotecas UAQ



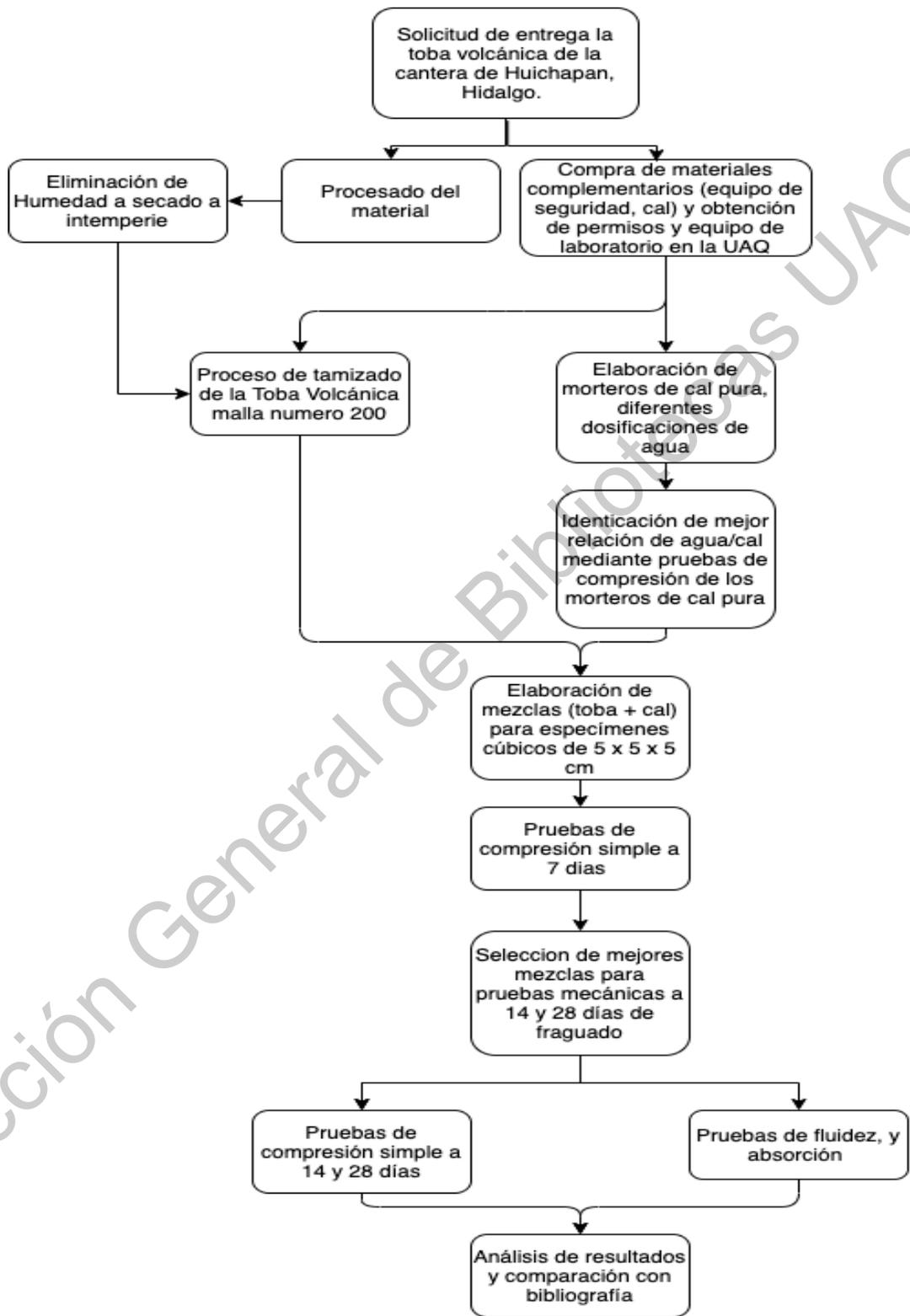


Figura 2 Metodología experimental general, Fuente propia.



4.1 Materiales y Recursos Humanos.

1) Máquina Universal Tinius Olsen.

- Ubicación: Laboratorio de materiales de la UAQ.
- Rango de carga: 3000 kg-30,000 kg.
- Rango de precisión: 5 kg – 250 kg.

Variable a medir: resistencia a compresión en los especímenes (Kg/cm²).

2) Báscula digital

- Ubicación: Laboratorio de materiales de la UAQ.
- Precisión: décimo de gramo.
- Variable a medir: peso de probetas (g).

3) Báscula mecánica

- Ubicación: Laboratorio de materiales de la UAQ.
- Precisión: ± 1 g.
- Variable a medir: peso de toba volcánica (g).
- Variable a medir: peso de cal (g).

4) Moldes para elaboración de probetas

- Dimensiones de 50x50x50 mm, para la realización de cubos de mortero, que cumplen con la normativa ASTM C-109.



- 5) Cuarto húmedo para el curado de los especímenes.
- 6) Cámara digital, computadora persona y cubículo de construcción
- 7) Revolvedora estándar de 3 velocidades de 25 kilogramos de capacidad.
 - Ubicación: Laboratorio de materiales de la UAQ
 - Función: elaboración de las probetas de mortero.
- 8) Difractómetro Rigaku Miniflex-II que funciona a 35 kV, 15 mA con una longitud de onda de radiación ($\text{CuK}\alpha$) de $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ de propiedad de Ciencias de la Tierra (Geociencia) de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Juriquilla.
- 9) Microscopio electrónico de barrido HITACHI modelo TM-1000.
 - Ubicación: (UNAM- Campus Juriquilla)
- 10) Cemento Portland Compuesto
- 11) Agua destilada
- 12) Agregado fino (arena)
- 13) Toba Volcánica
- 14) Hidróxido o Óxido de Calcio

Recursos humanos.

- Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza.



El trabajo de investigación se llevó a cabo primeramente con el desarrollo del estudio del estado del arte, consultando la bibliografía existente relacionada al tema de investigación, esto para identificar los puntos más importantes de aportación del trabajo.

4.2 Determinación del material

Se determinó el material a utilizar, se definió el banco de material de la región, en específico el depósito de residuos de la empresa “Canteras” Jaramillo ubicada en Rancho Dandhó s/n Huichapan Hidalgo México.

Milán et al. (1993) indica que la geología de la caldera de Huichapan corresponde a una Riolita superior con fracturamiento columnar y parcialmente soldada.

El análisis cualitativo de este material obtenido de la difracción de rayos x determina la presencia de sílice como elemento mayoritario. (López et al., 2017)

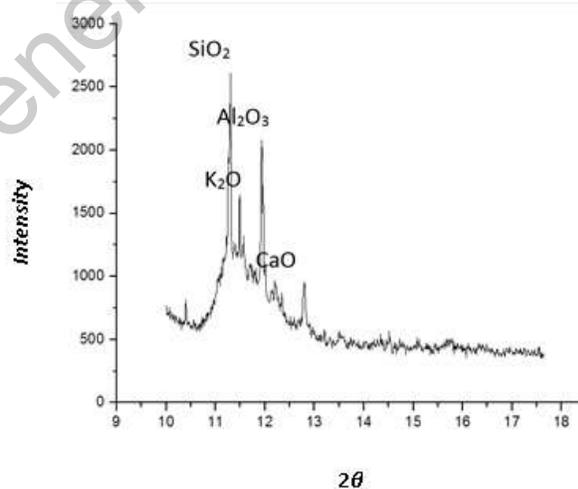


Figura 3 Espectro de difracción de rayos X de la Riolita (López et al., 2017)



Figura 4 Material (toba volcánica) de Huichapan.

4.3 Cal hidratada.

Se trabajo con cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ comercial, procesada por la empresa mexicana CALIDRA, el cual es utilizado en la industria de la construcción para la elaboración de mezclas de albañilería, morteros a base de cal, repellos, acabados finos, acabados gruesos, pegado de block, pegado de ladrillo, pegado de adobe.



Figura 5 Cal Hidratada (fuente: CALIDRA)

4.4 Agua de mezclado

El agua utilizada para la elaboración de los cubos de mortero es potable, adecuada para consumo humano; cabe destacar que el análisis y muestreo de las partículas contenidas en el agua no fueron requeridas para estas pruebas.

4.5 Materiales de mezclado

Se requirió el uso de vasos de aluminio de capacidad de 1 litro, probetas de 1 litro para la medición de agua, espátulas para el mezclado manual y charolas de acero para el mezclado de los elementos a temperatura ambiente.

4.6 Moldes

Fueron utilizados moldes con dimensiones de 50x50x50 mm, para la realización de cubos de mortero, que cumplen con la normativa ASTM C-109.

4.7 Maquina Universal

Para el ensayo de compresión, se hizo uso de una maquina de la marca Tinius Olsen de tracción hidráulica capaz de ensayar materiales a tensión y compresión hasta 30 toneladas fuerza, el cual cumple con las especificaciones para los ensayos.





Figura 6 Prensa Hidráulica Tinius Olsen de 30 toneladas (fuente propia)

4.8 Mesa de Fluidez

La mesa de fluidez se ha utilizado para la determinación del requerimiento de agua de las mezclas como lo establece la ASTM C-1437 con especificación de la ASTM C-311 y ASTM C-109.



Figura 7 Mesa de Fluidez, cono de fluidez y pisón. (fuente propia)

4.9 Método de Chapelle (Reactividad Puzolánica)

El método de Chapelle es un método acelerado que permite la determinación directa del consumo de calcio mediante una reacción química con un material puzolánico. Consiste en una suspensión de 1g puzolana/2g cal, la cal consumida es calculada por la diferencia entre el agregado y el restante de cal. El procedimiento se lleva a cabo para un blanco que será sin puzolana, y el cual servirá de referencia para el cálculo de la cal consumida para una puzolana determinada; los resultados se expresan en mg de Hidróxido de calcio fijado por la puzolana.

Durante el desarrollo de este método, se utilizarán reactivos químicos con valores de pH variados de tal manera que se debe tener especial cuidado en la manipulación del óxido de calcio (pH básico) y de la solución de ácido clorhídrico (pH ácido), ya que puede afectar la piel, vistas y mucosas; se recomienda utilizar guantes, mascarilla y gafas. Se hará uso de planchas de calentamiento con una temperatura no mayor a 90 °C, por lo tanto, se debe evitar el contacto con la superficie de esta, se recomienda el uso de guantes aislantes de calor. No beber, consumir alimentos y usar los implementos de seguridad adecuados, además se debe de tener un control de la temperatura del sistema (mantener siempre abierta la llave del agua de enfriamiento) para evitar el recalentamiento del mismo. Después de realizado el método, depositar los residuos en los recipientes adecuados o almacenar para la posterior y correcta disposición (nunca eliminar por el vertedero).

Se realizó la prueba de actividad puzolánica con este método a la toba volcánica.

En un vidrio reloj limpió y seco, se pesó 1 gramo de material puzolánico completamente disgregado, posteriormente en un vidrio reloj limpio y seco se pesó 2 gramos de óxido de calcio (CaO), se adicionó el material anteriormente pesado en un Erlenmeyer de 750 mL y se añadió 250 mL de agua destilada (utilizando una pipeta calibrada).



Se colocó el agitador magnético en el interior del Erlenmeyer para realizar el montaje adecuado colocándose el corcho, el termómetro y la columna de enfriamiento como lo indica la figura

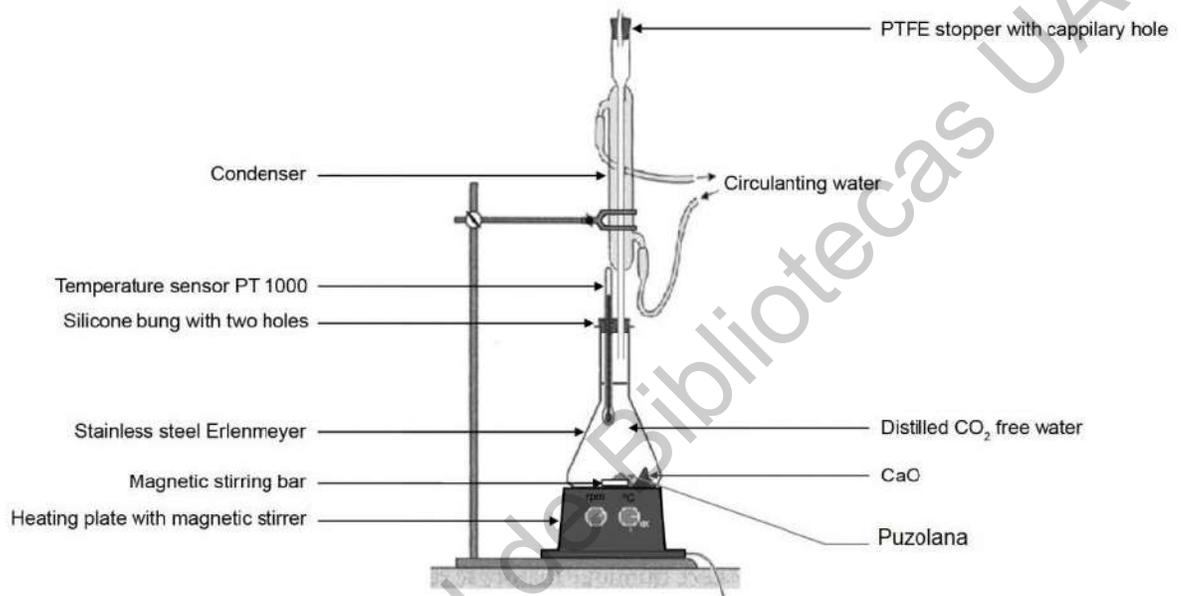


Figura 8 Montaje experimental del método de Chapelle.

4.9.1 Cálculos

Se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$m_g \text{ de } Ca(OH)_2 \text{ fijado} = \frac{52}{2 \times V_1} \dots (1)$$

El valor obtenido de ser menor a 1000 mg de hidróxido de calcio fijado.

$$m_g \text{ de } Ca(OH)_2 \text{ fijado} = 2 * \frac{V_1 V_2}{V_1} * \frac{74}{56} * 1000 \dots (2)$$

Donde:

V_1 = Es el volumen de HCl 0,1 N necesarios para los 25 mL de solución de la muestra en blanco.

V_2 = Es el volumen de HCl 0,1 N necesarios para los 25 mL de solución de la puzolana.



Figura 9 Montaje de experimento para método de Chapelle (Fuente Propia)

Se prepararon los reactivos y el equipo, el material trabajado fue pesado y colocado de acuerdo a las disposiciones indicadas de la norma, en el agitador a una velocidad constante de 300 rpm a 85 grados centígrados, con el sistema de enfriamiento por agua durante 16 horas. El proceso inicio a las 17:00 horas del día.



Figura 10 Pesado de materiales para prueba de Chapelle (Fuente propia)

Se llevó a cabo la conclusión del proceso de actividad puzolánica mediante el enfriamiento y titulación de la mezcla, así mismo, se elaboró la solución de sacarosa para la titulación de la muestra.

La solución de sacarosa fue añadida a la mezcla de la puzolana, se agitó y se procedió a su filtrado con ayuda una bomba de vacío.



Figura 11 Filtrado de la mezcla.

De la solución filtrada, se extrajo 25 ml con una pipeta graduada. Se procedió a añadirle Fenolftaleína, para posteriormente titular la mezcla con HCL 0.1.

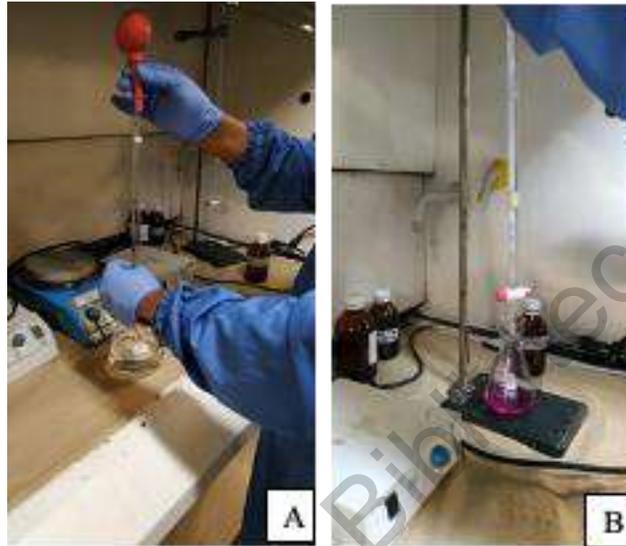


Figura 12 A) Extracción de 25 ml de la solución B) Titulación de la mezcla con HCL 0.1N

4.10 Procesado del material.

Después de recibir el material se procedió a procesarlo en el laboratorio de prueba de materiales. Primeramente, el material se sometió a un proceso de secado, ya que éste presentaba alto contenido de humedad con el cual dificultaba el proceso, el tamizado. Después de haber conseguido eliminar la humedad del material, éste se tamizó, separando las gravas, arenas y finos con ayuda de los respectivos tamices (malla número 4, malla número 200).

Las propiedades cementicias de los materiales son influenciadas directamente por la distribución del tamaño de partícula que la constituye, ya que puede afectar la

reología, volumen de vacíos y la demanda o consumo de agua en el proceso de hidratación. (Tennis et al., 2014)

Por lo anterior se pretenden obtener los tamaños de partícula más pequeños del material, las partículas finas pasante del tamiz número 200 son las necesarias para equiparar el tamaño de partícula del hidróxido de calcio, esto para garantizar una mezcla más homogénea de los materiales, así como facilitar las reacciones químicas entre ambos materiales.



Figura 13 Material en proceso de tamizado.

4.11 Identificación de características de los materiales.

Se procedió a trabajar con el hidróxido de calcio, el cual de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-C-003-ONNCCE-2018 establece con relación a la cal hidratada: tipo único, 80.00% mínimo de contenido de óxido de calcio, y máximo 5.00% de óxido de magnesio.

De acuerdo a la Norma ASTM C109/C109M para la determinación de resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico se elaboraron los especímenes cúbicos con dimensiones de 5 centímetros por lado de cal hidratada con diferentes proporciones de agua.

Posteriormente se identificó la mejor proporción de mezcla de agua y cal, la cual demostró obtener una trabajabilidad adecuada.

En las mezclas donde la cal hidratada esta en proporciones menores al 20% del peso de la mezcla con una puzolana natural la demanda de agua para el proceso de hidratación no es afectado significativamente, mientras que para mayores porcentajes de cal hidratada existe una tendencia casi lineal de demanda de agua (Shi, 2001) por lo que obtener el dato de hidratación ideal es de suma importancia, ya que estaremos trabajando en totalidad con morteros de cal hidratada.

Estos especímenes fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión simple, respetando tiempos de fraguado tempranos de 7 días a temperatura constante de 28 grados centígrados, para acotar las proporciones de cal hidratada con mayor resistencia a la compresión.

Las proporciones agua cemento propuestas son las mostradas en la tabla 3.

Tabla 3 Relación de mezclas de Agua y Cal

Relación Agua/Cal
0.65
0.75
0.8
0.85
0.9

50





Figura 14 Proceso de elaboración de los cubos de cal hidratada.

La relación agua- cal se calcula de la siguiente forma:

$$A/C = \frac{\text{Volumen o Masa de Agua}}{\text{Volumen o Masa de Cal}}$$

La determinación de este cociente puede ser a través de relación de volúmenes o relación de masa, es de suma importancia definir primeramente las unidades.

Como ejemplo, una relación agua – cal de 0.7 puede ser definida por 500 gramos de cal mezclada con 350 gramos de agua.

$$\frac{A}{C} = \frac{350 \text{ g}}{500 \text{ g}} = 0.7$$



Figura 15 Especímenes cúbicos en proceso de fraguado.



Figura 16 Prueba de compresión simple a los 7 días de fraguado en maquina universal Tinius Olsen, con cabeceado de neopreno.

4.12 Identificación inicial de las proporciones más adecuadas (Toba Volcánica/Cal)

Una vez identificada la mejor relación agua cemento de la cal, se procedió a experimentar con diferentes proporciones de los materiales de toba volcánica y cal hidratada, manteniendo constante el valor de la relación agua cemento de 0.65. Los valores propuestos de combinación son los mostrados en la tabla 4.

Tabla 4 Propuesta de porcentaje de mezclas de los materiales.

Mezcla	Porcentaje en peso de material (%)	
	Cal Hidratada	Toba Volcánica
1	50	50
2	55	45
3	60	40
4	65	35
5	70	30
6	75	25
7	80	20
8	85	15
9	90	10
10	100	0
11	100	10
12	100	20
13	100	30



Los especímenes se elaboraron de acuerdo a la normal ASTM C109/C109M, las probetas cúbicas de 5x5x5 cm de lado se elaboraron con las mezclas propuestas.

Los materiales se pesaron de acuerdo a las proporciones indicadas, se procedió a realizar la mezcla de los materiales finos en seco, de forma manual, durante 10 minutos de forma continua, para garantizar la homogeneidad de la mezcla, posteriormente se adicionó agua para iniciar la reacción de endurecimiento y formar así una pasta trabajable con las diferentes proporciones, para así, constituir las probetas cúbicas.

Se elaboraron 3 repeticiones de cada diseño de mezcla propuesto, siendo un total de 39 probetas cúbicas.



Figura 17 Mezcla de materiales en seco.



Figura 18 Determinación de volumen de agua necesario, proceso de elaboración de la mezcla

Pasado el tiempo de curado temprano de 7 días, las probetas fueron ensayadas a compresión simple para determinar la mezcla con mayor resistencia.

Las mezclas con toba volcánica demostraron tener una consistencia mas suave a los 7 días de fraguado, a comparación de las probetas de cal pura, esto demuestra un fraguado más lento en las mezclas, es una característica común en los cementantes puzolánicos.



Figura 19 Ejemplo del primer lote de probetas cubicas.



Figura 20 Inicio de ensayo de ensayo a compresión - Ensayo finalizado con la falla del espécimen.

4.13 Prueba de absorción (porosidad)

Posterior a las pruebas de resistencia a la compresión, los elementos que mostraron tener mejor comportamiento mecánico fueron sometidos a la prueba de absorción, para identificar el nivel de porosidad y así comparar los resultados con las muestras de cal hidratada pura.

Las muestras de sometieron primeramente al proceso de secado en horno de masa constante a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ durante 24 horas. Pasado el tiempo descrito se procede al pesado de las muestras, para que posteriormente se sumerjan a su totalidad en agua durante 24 horas.

Pasado este tiempo, las muestras se retiran, se secan superficialmente y se procede a pesarlas, con este dato se calcula el porcentaje de absorción con la utilización de la siguiente formula.

$$\text{Porosidad \%} = \frac{\text{Peso Saturado} \times 100}{\text{Peso Seco}}$$



Figura 21 Proceso de saturación de las muestras.

4.14 Prueba de Trabajabilidad

Con el uso del cono y mesa de fluidez, de acuerdo a la norma ASTM C-230 se obtuvieron datos cuantitativos de la fluidez de las mezclas.

En esta prueba se obtiene el porcentaje que aumenta el diámetro original de la base de un cono truncado formado previamente con un molde al centro de la mesa de fluidez, la medición del diámetro final se hace después de que la mesa ha sido sometida a una serie de caídas por medio de una hélice truncada que la levanta y la deja caer súbitamente (b), la norma ASTM C-230 presenta algunos principios aplicables al control de la fluidez en los morteros.

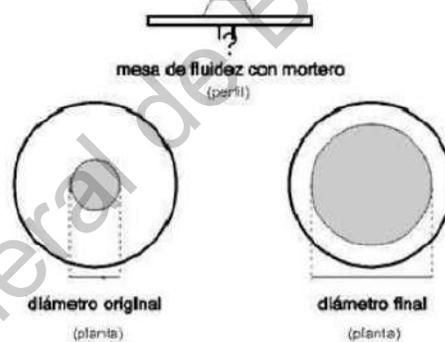


Figura 22 "Esquema de mesa de fluidez ASTM C-230"

La fluidez en los morteros es clasificada de acuerdo a lo señalado en la tabla 5.

Tabla 5 Clasificación de morteros de acuerdo a su fluidez.

Consistencia	Fluidéz %	Condición de colocación	Ejemplo tipo de estructura	Ejemplo de sistema de colocación
Dura (seca)	80-100	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, recubrimientos, pantallas de cimentación, pisos.	Proyección neumática, con vibradores de formaleta.
Media (plástica)	100-120	Sin Vibración	Pega de mampostería, baldosines, revestimientos	Manual con palas y palustres
Fluida (húmeda)	120-150	Sin Vibración	Rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos	Manual, bombeo, inyección



V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Identificación de características de los materiales

Durante el proceso de determinación de la relación agua – cal se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 6 Resistencia a la compresión de los Cubos de Cal Hidratada con su respectiva relación agua-cal.

Relación Agua/Cal	Resistencia a la compresión en kg/cm ²
0.65	6.460
0.75	3.584
0.8	4.135
0.85	3.993
0.9	3.495



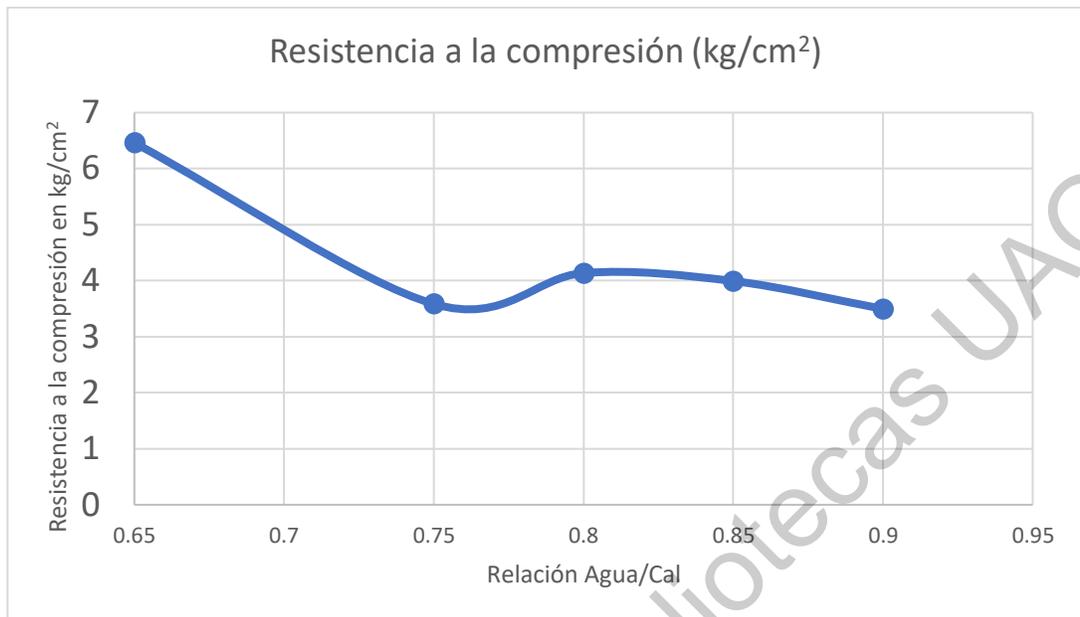


Gráfico 2 Resistencia al esfuerzo de compresión axial de las probetas cúbicas de cal hidratada con su respectiva relación agua-cal.

La proporción del 0.65 se definió como porcentaje inicial de hidratación al presentar la cantidad de agua mínima que permitió trabajar con el material y elaborar los moldes, por lo que tiene una trabajabilidad buena, se propuso aumentar el porcentaje de agua a partir de este valor.

De acuerdo a los valores registrados, el aumento de agua en el compuesto debilita significativamente la resistencia a compresión, se observa como valor máximo una resistencia aproximada de 6.46 kg/cm² para el compuesto con menor porcentaje de agua, mientras que se obtuvo una resistencia a la compresión aproximada de 3.5 kg/cm² para la mezcla con mayor cantidad de agua. Esto representa una disminución de resistencia del 45.82 %. Resultado esperado de acuerdo a lo consultado en la bibliografía.



Esta determinación sirve de referencia para utilizar el mejor porcentaje de hidratación del hidróxido de calcio (cal), para favorecer el comportamiento mecánico en las probetas con toba volcánica.

5.2 Resultados de prueba de Chapelle para medir actividad puzolánica.

Del procedimiento descrito en la metodología se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7 Actividad puzolánica de la toba volcánica.

Actividad puzolánica con cal	
Cantidad de HCL 0.1N utilizado (ml)	8.2
Actividad puzolánica de la toba volcánica	
Cantidad de HCL 0.1N utilizado (ml)	6.96 (promedio)

$$2 \times \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times \frac{74}{56} 1000 = \text{mg de } Ca(OH)_2 \text{ fijado / gramo de puzolana}$$

Donde

V_1 = Volumen de HCl 0.1 N necesarios para los 25 ml de solución de la muestra en blanco

V_2 = Volumen de HCl 0.1 N necesarios para los 25 ml de solución de la puzolana.

$$AP = 387 \text{ mg de } Ca(OH)_2 \text{ fijado / g puzolana}$$



La toba volcánica demostró tener capacidad de fijación de calcio, la fijación no es la más óptima, pero se espera este resultado de una puzolana natural de origen volcánico, ya que tenemos una reacción de fijación lenta pero creciente.

Este resultado es alentador ya que permitió seguir con el proceso de experimentación.

5.3 Pruebas de resistencia de las probetas de toba volcánica y cal.

La resistencia del mortero es una propiedad importante que determina su calidad como material de construcción.

Una vez identificada la actividad puzolánica y determinado el mejor porcentaje de agua para la hidratación de la cal, se procedió a elaborar y ensayar a compresión axial simple las probetas cúbicas de 5 x 5 x 5 cm (ASTM C-109) de mezclas conformada por la toba volcánica y la cal hidratada.

En la tabla 7 se presentan los valores de resistencia que presentaron cada proporción de mezcla a los 7 días de fraguado.

Tabla 8 Resistencia a la compresión de las probetas cúbicas de toba volcánica con cal hidratada a los 7 días de fraguado.

	Porcentaje en peso de material (%)	
--	------------------------------------	--



Tipo de mezcla	Cal Hidratada	Toba Volcánica	Resistencia a la compresión en kg/cm ²
1	50	50	3.167
2	55	45	3.474
3	60	40	3.682
4	65	35	4.064
5	70	30	3.467
6	75	25	3.371
7	80	20	4.358
8	85	15	4.349
9	90	10	4.403
10	100	0	6.460
11	100	10	6.541
12	100	20	6.633
13	100	30	6.693



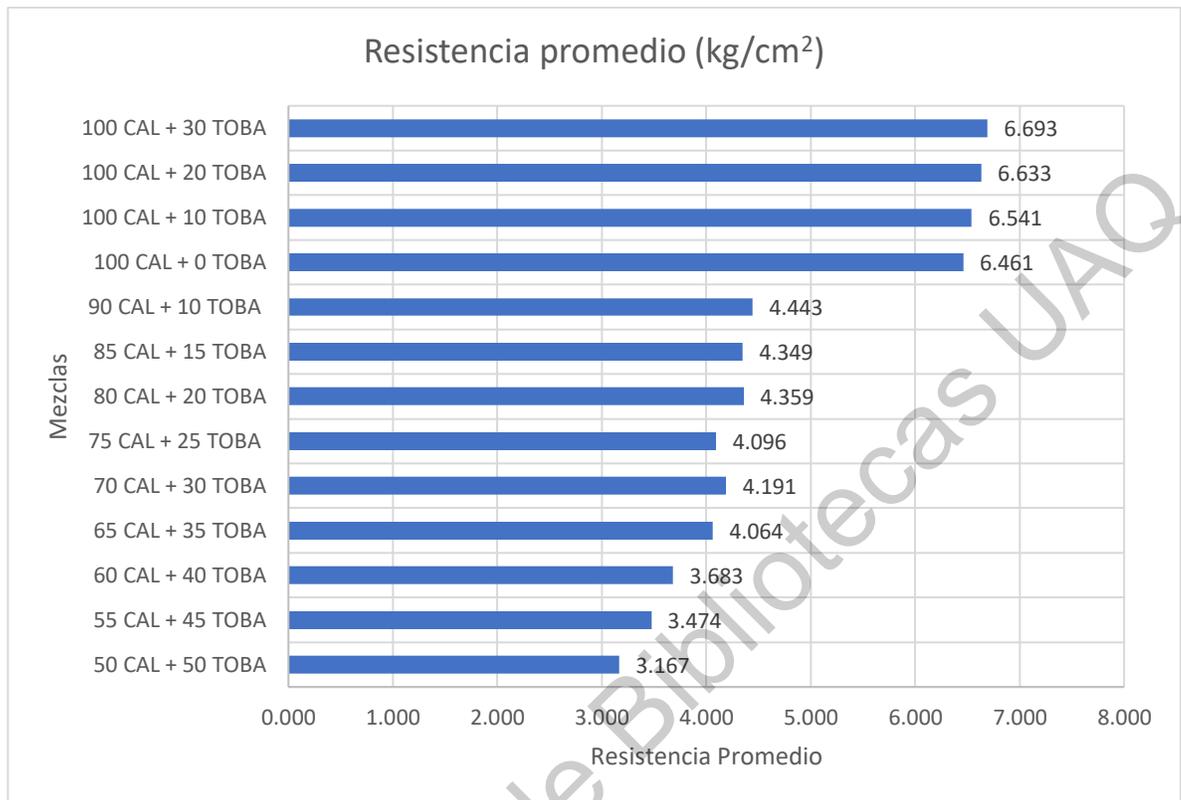


Gráfico 3 Resistencia a la compresión de los compósitos de toba volcánica con cal hidratada.

El comportamiento presentado de resistencia indica un decremento de resistencia aproximado del 31.25% de acuerdo a la probeta de referencia conformada por el 100% de cal hidratada. La sustitución de la cal del 10% (mezcla 9) y 15% (mezcla 10) con valores de resistencia de 4.40 y 4.34 kg/cm² respectivamente mostraron el menor valor de decremento del orden de 31.25% y 32.81%.

La diferencia de resistencia entre las mezclas 11, 12 y 13 es muy pequeña a edades tempranas 7 y 14 días, ligeramente superior a la cal hidratada para las mezclas 12 y 13 con 20 y 30% de toba volcánica adicionada. La diferencia mas notable existe a los 28 días de fraguado, con una notable dispersión de resistencia entre mezclas, siendo la mezcla numero 13 (30% toba volcánica) la de mayor resistencia a la compresión con 11.11 kg/cm².



Este dato es significativo, ya que representa un aumento importante de resistencia a la compresión en comparación con la cal hidratada, del orden del 57.88% de aumento de resistencia.

Se procede a realizar pruebas de fluidez, pruebas de porosidad y resistencias a la compresión a edades de 14 y 28 días de fraguado de las mezclas mas resistentes.

En la siguiente tabla se indican las resistencias a compresión de las mezclas a tres edades diferentes, 7 , 14 y 28 días de fraguado.

El comportamiento a edades tempranas de la cal hidratada no muestra diferencias considerables, de la misma manera las demás mezclas. Los cambios notables aparecen a los 28 días de fraguado, cuando el proceso de fijado de calcio de la puzolana empieza a verse reflejado, las mezclas con porcentajes de 20 y 30 % de puzolana demostraron tener un aumento de resistencia considerable en comparación de la cal hidratada pura, de alrededor del 58.75 % para la mezcla 13 y del 33.68% para la mezcla 12.

Tabla 9 Resistencia a edades de 7, 14 y 28 días de las mezclas propuestas.

Mezcla	Resistencia (kg/cm ²)		
	7 días	14 días	28 días
Mezcla 8 (85Cal+15Toba)	4.353	5.390	7.443
Mezcla 9 (90Cal+10Toba)	4.403	5.473	5.888
Cal Hidratada	6.460	6.485	7.045
Mezcla 11 (100Cal+10Toba)	6.541	6.716	7.855
Mezcla 12 (100Cal+20Toba)	6.633	6.681	9.358
Mezcla 13 (100Cal+30Toba)	6.693	6.680	11.115



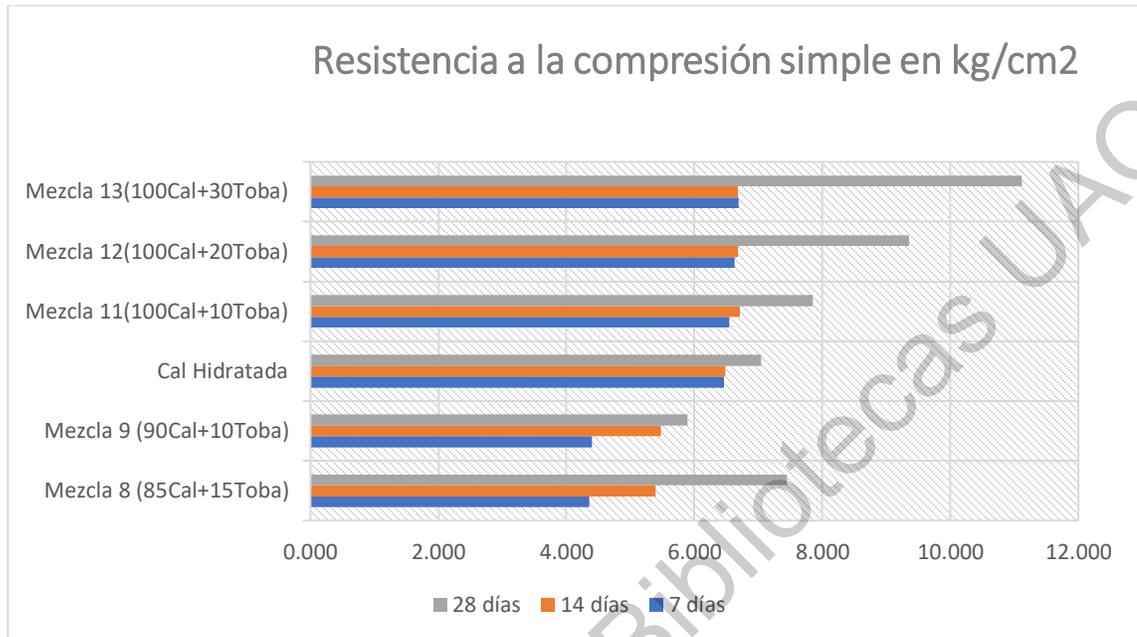


Gráfico 4 Resistencia a la compresión simple de las mezclas propuestas.

5.4 Prueba de absorción (Porosidad)

Se realizó la prueba de absorción a las dos mezclas con mejor comportamiento mecánico, obteniendo los siguientes resultados (tabla 9)

Tabla 10 Porcentaje de Absorción

Elemento	Peso Seco (gramos)	Peso Saturado (gramos)	Porcentaje de Absorción
Cal Pura	121.8	173	142.036
Mezcla 12	135.8	189.1	139.250
Mezcla 13	135.1	184.3	136.418

El porcentaje de absorción de afecto directamente con la proporción de toba volcánica agregada, este tuvo una disminución del 2.786% para la mezcla 12 y del 5.618% para la mezcla 13.

Como se indica en la bibliografía, el porcentaje de porosidad esta directamente relacionado con la resistencia a la compresión, por lo que la mezcla menos porosa es la mezcla con mayor resistencia.

Parte de este comportamiento se debe a que las partículas “gruesas” de la toba volcánica actuarían como filler mientras se lleva a cabo el proceso de fijado de calcio, al tener estas partículas existe un mejor acomodo de las mismas reduciendo los vacíos existentes en la mezcla.

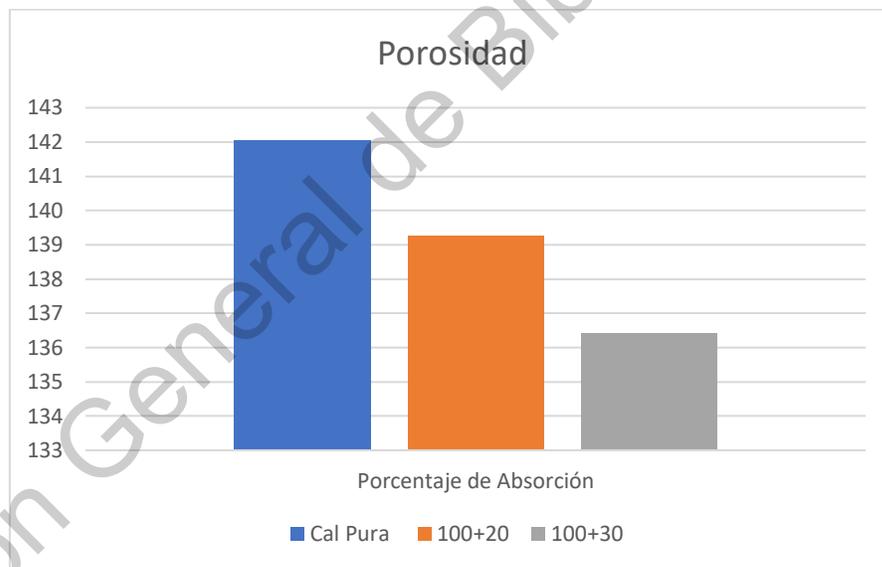


Gráfico 5 Porcentaje de absorción (porosidad)

5.5 Prueba de trabajabilidad.

Derivado de la prueba de fluidez de la mezcla se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 11 Porcentaje fluidez

Mezcla	Porcentaje Fluidez %
Mezcla 8 (85Cal+15Toba)	47.88
Mezcla 9 (90Cal+10Toba)	68.90
Cal Hidratada	125.15
Mezcla 11(100Cal+10Toba)	104.48
Mezcla 12(100Cal+20Toba)	99.31
Mezcla 13(100Cal+30Toba)	84.79

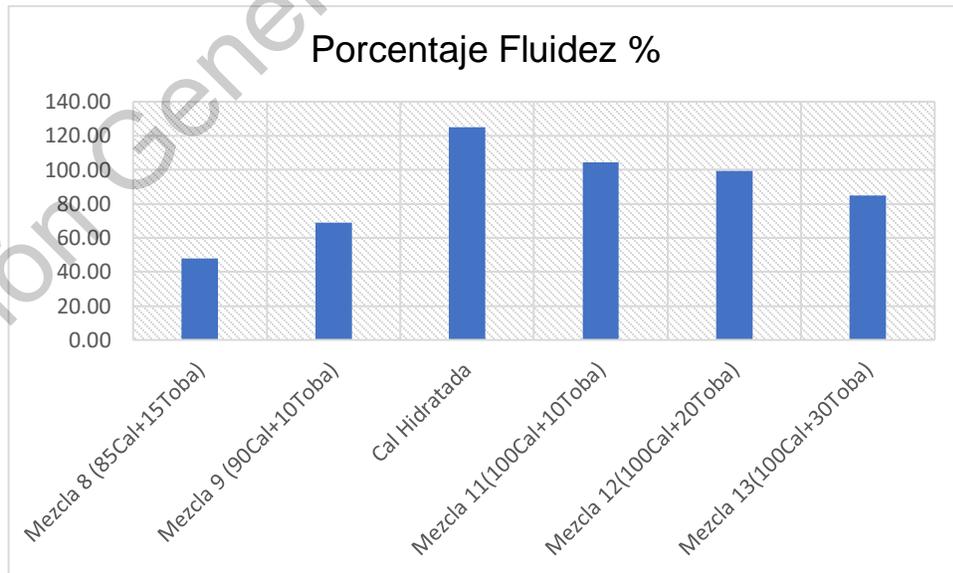


Gráfico 6 Porcentaje de Fluidez



Se puede observar que el procedimiento de sustitución de la cal por toba volcánica existe una disminución de fluidez considerable, alrededor de 77.27% menos fluida para la mezcla 8 con el 15% de sustitución y para la mezcla 9 con el 10% existe un decremento de fluidez de 56.25%.

Para las mezclas del tipo adición también se observa una disminución de fluidez, pero en este caso se presenta en menor proporción, 20.67%, 25.84% y 40.36% para las mezclas 11, 12 y 13 respectivamente.

Lo anterior debido a que la toba volcánica al añadirse sin humedad consume parte del agua de la mezcla.

De acuerdo a los resultados, se observa que la incorporación de toba volcánica disminuye la trabajabilidad de la mezcla, a medida que se incrementa la concentración de toba el agua requerida es mayor, conduciendo a una relación agua/cemento más elevada para mantener las características de fluidez de la cal. Aun así, se trabajo con el mismo porcentaje de agua, de 65 % en peso del material cementante (cal).

De acuerdo a la norma ASTM C-618 el límite máximo permitido de requerimiento de agua para una puzolana natural es 115% ,por lo tanto, la zeolita con un valor de 65% cumple con este requerimiento físico.



VI. Aplicación de los resultados obtenidos.

6.1 Posibles usos

Las características de trabajabilidad de la cal han hecho de este material una excelente alternativa para procesos muy importantes en la construcción, como lo son es el proceso de los acabados en la obra.

Las mezclas probadas en este trabajo han demostrado mantener las cualidades de trabajabilidad de la cal con el beneficio de la mejora de resistencia a la compresión en comparación a la cal pura.

Al tener resistencias no tan altas a fraguados mas lentos que los cementos Portland, el uso estructural queda completamente descartado.

Por lo anterior, se recomienda el uso de la mezcla en acabados en muros para trabajos de revoques y reparaciones estéticas.

A continuación, se muestran un ejemplo sencillo de las ventajas aplicadas a estas soluciones:

6.2 Ejemplo de aplicación

Se considera un trabajo de acabados para la cara interior de un muro perimetral de una casa habitación con las siguientes características:

Tabla 12 Características del muro a cubrir.

Unidad a medir	Cantidad
Altura	3 metros
Largo	55 metros
Área a cubrir	165 metros cuadrados



Se calculo un rendimiento con la cal hidratada para un metro cuadrado de muro con un espesor de revoque de 1 cm.

Tabla 13 Rendimiento de Cal hidratada para revoque de 1 cm de grosor por cada metro cuadrado.

Rendimiento	
Peso de material (cal) en kg	Área a cubrir m ²
13.33	1

El área a cubrir es de 165 m² , por lo que de acuerdo al rendimiento calculado son necesarios:

Tabla 14 Cantidad de cal necesaria para el muro de 165 m²

Material necesario para muro de 165 m²	
Peso de material (cal) en kg	Área a cubrir m ²
2200	165

Son necesarios 2200 kilogramos de cal pura, lo que equivale aproximadamente a 88 sacos de 25 kilos de material.

Para este ejemplo se utilizará la mezcla numero 13, la cual esta conformada por el 100% de cal adicionada con el 30% de Toba volcánica.

Esta mezcla presenta un abudamiento del 30% en su peso, por la adición de la toba, esto, directamente afecta el rendimiento de forma favorable, permitiendo cubrir más área con la misma cantidad de cal.

Tabla 15 Rendimiento calculado para la mezcla 13 (100% cal + 30% toba)

Rendimiento de la mezcla 13 (100% cal+ 30% toba)	
Peso de material (cal) en kg	Área a cubrir m ²
13.33	1.3



Por lo que, para el muro de 165 metros cuadrados, será necesario la aplicación de la cantidad calculada a continuación:

Tabla 16 Material necesario para un muro de 165 m² con toba volcánica

Material necesario para un muro de 165 m² con toba volcánica	
Peso de material (cal) en kg	Área a cubrir m ²
1691.90	165

Lo cual representa el uso de 67.68 sacos de material, lo cual representa un 23% menos de Cal necesaria en comparación al revoque de cal pura.

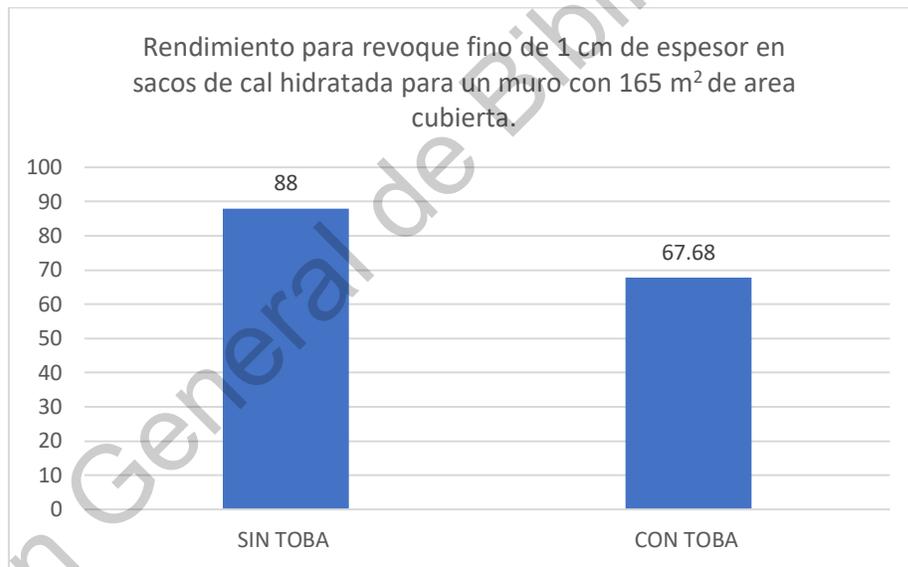


Gráfico 7 Rendimiento para revoque fino de 1 cm de espesor en sacos de cal hidratada para un muro con 165 m² de área cubierta.

Es un resultado positivo ya que se puede hacer uso de material de deshecho en la solución de acabados en la construcción, así como disminuir el porcentaje de cal utilizada en la obra pudiendo afectar de forma benéfica el costo directo del material.

VII. CONCLUSIONES

La investigación demostró que la cal hidratada no presenta altas resistencias a compresión a comparación de otros compuestos como lo es el cemento portland, a diferencia de éste, la cal hidratada al estar en estado puro o más del 90% de pureza carece por completo de sílice y alúmina, dichos compuestos son muy importantes en el proceso de endurecimiento, en la llamada activación alcalina de aluminosilicatos. La toba volcánica analizada es rica en silicio y en alúmina por lo que, por lo menos, de forma teórica, al unirse la cal hidratada con este polvo se deberá generar una mezcla más estable.

La adición en porcentaje de peso de toba volcánica al hidróxido de calcio presentó mejor comportamiento mecánico a la resistencia de compresión simple a diferencia de la sustitución en porcentaje peso en la mezcla.

Las adiciones del 10, 20 y 30% fueron la que a largo plazo (28 días de fraguado) presentaron mejor comportamiento de resistencia, con aumento del 11.58%, 32.92% y del 57.88% respectivamente.

El mejor porcentaje de peso en adición fue de 30% de toba volcánica, obteniendo un aumento de resistencia a la compresión simple del 57.88% en comparación al hidróxido de calcio puro.

Por lo que se determino que la reacción fijación de calcio es lenta tal como indicó la prueba de Chapelle para determinación de actividad puzolánica, se recomienda realizar pruebas de resistencia a compresión a mayores edades, 180 días y 365 días para observar el comportamiento de crecimiento de resistencia.

La fluidez de la mezcla en adición del 30% no se vio comprometida con solo un decremento del 40%, por lo que conserva la virtud de trabajabilidad de la cal hidratada pura, pudiéndose aplicar como recubrimiento de mampostería y colocación de pisos, así como para pequeñas reparaciones de elementos no estructurales.



Otro aspecto importante a tomar en cuenta es el factor de la porosidad del material, reduciendo un 4% de porosidad en comparación de las muestras de hidróxido de calcio, debido a que la toba volcánica puede estar trabajando como un filler además de su capacidad de fijación del Ca(OH)_2 , con variedad de tamaños de partícula que permiten la eliminación de vacíos en su acomodo.

Para determinar estos puntos es de suma importancia llevar a cabo la caracterización química de las mezclas, mediante microscopía electrónica de barrido, lamentablemente el proceso de experimentación de este trabajo se vio interrumpido parcialmente por cuestiones sanitarias por la pandemia global del virus COVID19.

Dentro de sus posibles usos esta el de reparación estética y acabados que se llevan a cabo en la obra civil, se ha demostrado un aumento de rendimiento de la mezcla, el cual permitió utilizar menos cal, alrededor del 23% menos, para realizar un trabajo de recubrimiento de un muro, lo cual deja una excelente alternativa del uso de la toba volcánica en la construcción.



VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Lagomarsino, J. (2009). *Rocas y Minerales*. Reino Unido.: Parragon Books Ltd.
- Chatoli, V. Q. (2015). Indirect and direct Chapelle's methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials. *Ibracon structures and materials*, 1 - 7.
- CEMEX CONCRETOS. (2015). *Manual del constructor*. Mexico: CEMEX.
- Cobrerros, C. J.-r.-F.-M. (2015). Barley Straw Ash: Pozzolanic Activity and Comparison with other Natural and Artificial Pozzolans from México. 3757–3774.
- López, T. L., & Hernández, J. B. (2018). Alternativas sustentables para uso de residuos de explotación de tobas volcánicas en materiales de construcción. 1-26.
- Ababneh, A. (2018). Potential use of Jordanian volcanic tuffs as supplementary cementitious materials. *Department of Civil Engineering*, 1-10.
- AFNOR, N. P.-5. (2015). Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons (Définitions, Spécifications, Critères de confortmité).
- B.V. Rangan, D. H., & V. (2005). Fly ash based geopolymer concrete: a construction material for sustainable development. *Concr. Aust*, 25-30.
- Burgos, D. M. (2016). *Microstructural evolution of cement pastes blended with two types of volcanic materials*.
- Davidovits, J. (1987). Ancient and modern concretes: what is the real difference? 23-28.
- Del Río, D. V., & Zarate, P. F. (2005). ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE LAS TOBAS PUMÍTICAS DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA. *e-Gnosis*, 1-19.
- Díaz, E. D. (2018). Actividad puzolánica de la zeolita natural y su efecto en la evolución de la resistencia mecánica en mezclas de mortero. *Tesis*, 111.
- Estévez, J. M., & M. P. (1990). *Hormigón de alta resistencia: estado actual de conocimientos*.
- Estévez, M. G., & Gutiérrez, M. P. (1990). *Hormigón de alta resistencia: estado actual de conocimientos*.
- FERRAZ, E. (2015). POZZOLANIC ACTIVITY OF METAKAOLINS BY THE FRENCH STANDARD OF THE MODIFIED CHAPELLE TEST: A DIRECT METHODOLOGY. *Acta Geodyn. Geomater*, 289-298.
- G, V., R, M. d., J, B., & S, D. (2012). *Estudio de durabilidad y corrosión en morteros armados adicionados con toba volcánica y ceniza de bagazo de caña de azúcar*.
- Galetakis, M., & A. S. (2016). A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials*, 210-220.



- Galvan, R. M. (2011). Cal, un antiguo material como una renovada opción para la construcción. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 93 - 102.
- González, L. M. (1989). *Estudio de la reacción en el sistema puzolana natural Ca(OH)₂ en presencia de agua*. Nuevo Leon, Monterrey.
- Gutiérrez, R. S., & Mujica, J. A. (n.d.). El Hidróxido de Calcio y los bloques de tierra comprimida, alternativa sostenible de construcción. *NOVA SCIENTIA*.
- Hill N. Holmes S., M. D. (1992). Lime and Other Alternative Cements. *Intermediate Technology Publications*.
- Holmes S., W. M. (2003). Building with Lime. *UK: ITDG Publishing*.
- IMCyC. (2016). El concreto en la obra, problemas, causas y soluciones. *CONCRETON*, 52-55.
- Khalil Abdul, H. P. (2012). Bamboo fibre reinforced composites. *A review. Mater. Des.*, 353 - 368.
- M., M., C., Y., I., N., S.P., V., & G, C. (1993). Geología y geoquímica de elementos mayores de la Caldera de Huichapan Hidalgo México. *Geofísica Internacional*, 2(32), 261 - 275.
- Madhav, T. V., Reddy, I. R., Vaishali, G. G., & S. J. (2018). Compressivestrength study of geopolymer mortar using quarry rock dust. 1-4.
- Meilan, D. (1984). *Conveniencia de la utilización de tobas volcánicas en la construcción de viviendas económicas*. Buenos Aires: Instituto de Tecnología Minera (INTEMIN).
- Mendez, A. (2013). Visual Pollution. *Gestión y Ambiente*, 45-60.
- NMX-C-003-ONNCCE-2018. (n.d.). *Industria de la Construcción - Cal Hidratada - Especificaciones y Métodos de Ensayo*.
- NMX-C-414-ONNCCE-2014. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- CEMENTANTES HIDRÁULICOS -ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. México. (2011). *Diario Oficial de la Federación*.
- Química del Cemento Portland. (2019, Marzo 12). *UNNE*. Retrieved from <http://ing.unne.edu.ar/pub/quimica/cemento.pdf>
- Schmidt, M. (1992). *Cement with Interground Additives - Capability and Environmental Relief* (Vol. 45). Alemania: Zement-KalkGips Vol. 45 No.2.
- Schmidt, M., Middendorf, B., & and N. B. Singh, N. (2010). *Blended Cements* (Vol. 10). Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association.
- Secretaría de Economía. (2014). Perfil de mercado de la caliza. 82.



Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales . (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. *Diario Oficial*, 73.

Shi, C. (2001). Studies on Several Factors Affecting Hydration and Properties of Lime-Pozzolan Cements. *Mat. in Civ. Engrg.*, 441- 445.

Tennis, P., Thomas, M., & Weiss, W. (2014). *State of the art report on use of limestone in cements at levels up to 15%*. Portland Cement Association.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

