



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

EFFECTO DE SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO PORTLAND POR CENIZAS DE BAGAZO DE AGAVE EN MORTEROS EVALUADOS A COMPRESIÓN COMO ALTERNATIVA DE USO EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN DISEÑO

PRESENTA:

AIRY JACQUELINE MAYORAL NORIEGA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. HÉCTOR GERARDO CAMPOS SILVA

CODIRECTORA:

DRA. PATRICIA MAGALY GALLEGOS ACEVEDO

H. Cd. De Huajuapán de León, Oaxaca. Septiembre 2022

D e d i c a t o r i a

*A la memoria de mis abuelos,
Adrián y Ernestina,
ejemplo de vida y recuerdo de amor.*

*Y especialmente a mi madre,
Ro, mi refugio en la tormenta,
y a veces la tormenta misma.*

A g r a d e c i m i e n t o s

A mis abuelos, Adrián y Ernestina por ser mis segundos padres, mi ejemplo de vida y mi amor eterno, gracias por enseñarme tanto aún después de su partida.

A mis padres, Israel y Rosa, gracias por creer en mí y brindarme todas las herramientas necesarias para alcanzar mis metas. Gracias Ro, por ser mi mayor motivación para levantarme cada día, por todo el apoyo, confianza y amor incondicional a lo largo de mi vida.

A mi hermana, por estar siempre conmigo, por enseñarme a vivir y compartir. Gracias Deni, por todo tu apoyo y consejos a lo largo de mi vida, en especial durante el desarrollo del presente trabajo, gracias por escucharme y entenderme, porque a pesar de la edad y la distancia, la fuerza nos acompaña.

A mi director de tesis, Dr. Héctor Campos por compartir conmigo sus conocimientos y su apoyo a lo largo de esta investigación.

A mi codirectora de tesis, Dra. Gallegos Acevedo, Directora del instituto de minería en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, por brindarme los materiales para poder desarrollar junto conmigo este proyecto, gracias por la paciencia y confianza que depositó en mí.

Gracias al Laboratorio Divisional de Microscopía Electrónica de Barrido de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco por la caracterización SEM, especialmente a la Dra. Deyanira Angeles Beltrán y al Ing. Marco Jared Niño Castellanos.

A mis hermanos Gloria y Marco porque a pesar de no compartir la misma sangre son parte de mi familia, gracias por darme grandes consejos y por ayudarme a ampliar mis perspectivas de la vida, gracias por inspirarme a finalizar esta etapa de mi vida.

Gracias infinitas a todas las personas que se cruzaron en mi vida dejándome alguna enseñanza porque gracias a ello soy la mejor versión de mí y logré desarrollar la presente tesis.

Resumen

Los altos porcentajes de contaminación por parte de la industria cementera, han ocasionado la búsqueda de materiales alternativos que tengan propiedades cementantes para emplearse como sustituto parcial o total del Cemento Portland (CP). La utilización de residuos agroindustriales como; la ceniza de cascarilla de arroz y la ceniza de bagazo de caña son un ejemplo de materiales utilizados como sustituto parcial de CP ya que funcionan como una puzolana natural.

En la presente tesis se realizaron pruebas físicas y mecánicas a las cenizas de bagazo de agave (CBA) con la finalidad de determinar en qué porcentaje es posible que éstas sustituyan parcialmente al CP en mezclas de mortero.

Para la investigación se elaboraron un total de 72 probetas entre ellas; dos relaciones de agua/cemento; de 0.45 y 0.6 y con tres porcentajes diferentes de sustitución del 10 %, 20 % y 30 % de CBA y la muestra patrón, para poder ser ensayadas a edades de 28, 56 y 92 días respectivamente.

Los resultados demostraron que la ceniza incrementó las propiedades de resistencia a compresión a edades superiores a los 90 días, por lo tanto se pueden obtener morteros con resistencias de hasta 25 MPa utilizando menor cantidad de CP.

Introducción

En México, un producto agroindustrial de gran importancia es el mezcal, principalmente en el estado de Oaxaca, ya que genera al menos 16 mil empleos directos y más de 48 mil indirectos, posicionando al estado como el principal productor y exportador de esta bebida ancestral CRM (2020), la cual se obtiene de la destilación del mosto de las piñas de Agave, previamente cocidas, molidas y sometidas a fermentación. Sin embargo, una vez que éstas plantas pasan por el proceso de destilación generan una gran cantidad de residuos sólidos, el bagazo, el cual por su cantidad y volumen es incinerado dentro de las mismas calderas de destilación, convirtiéndose ahora en un subproducto en forma de cenizas, provocando un alto riesgo de contaminación para los ríos y lagos cercanos a la mezcaleras.

Ésta ceniza como otros residuos agroindustriales (ceniza de cascarilla de arroz, ceniza de bagazo de caña, etc.) presentan propiedades puzolánicas, es decir, son materiales silíceos o silicoaluminicos que no tienen propiedades cementantes por sí mismos, pero son capaces de reaccionar con cal en presencia de agua y a temperatura ambiente, estando finamente divididos, para formar compuestos insolubles con propiedades cementantes (Lea, 1970), incrementando así la resistencia a compresión tanto en mortero como en concreto a edades avanzadas.

En la presente investigación se realizaron pruebas físicas y mecánicas a las Cenizas de Bagazo de Agave (CBA) generadas en una mezcalera ubicada en el municipio de Santiago Matatlán, Oaxaca y se diseñaron diferentes mezclas de mortero en donde se sustituyó parcialmente al cemento Portland (CP) por la CBA. Esto con la finalidad de analizar la influencia de la CBA en el incremento de resistencia a compresión para poder reducir las cantidades de CP utilizado en morteros y evitar la contaminación que generan las cenizas al medio ambiente.

El desarrollo de la presente tesis se divide en cuatro capítulos fundamentales; el primero aborda las bases para desarrollar esta investigación, tales como el planteamiento del problema seguido de la hipótesis, la justificación, el objetivo y las metas de este trabajo.

El capítulo dos se enfoca en brindar información sobre temas que conforman al marco teórico, dejando en claro algunas definiciones como: mortero, concreto, puzolanas, entre otros que son la base para poder abordar el capítulo tres, en el cual se desarrolla la parte experimental y metodología utilizada en esta investigación.

Y finalmente en el capítulo cuatro se encuentran las discusiones y conclusiones que se obtuvieron gracias a los resultados obtenidos en la presente tesis. Asimismo como una aportación a la ingeniería en diseño se propone una aplicación para estas mezclas de mortero que representan una alternativa en la industria de la construcción.

Índice

Dedicatoria	I
Agradecimientos	III
Resumen	V
Introducción	VII
1 Aspectos preliminares	1
1.1 Planteamiento del problema.	3
1.2 Justificación	5
1.3 Antecedentes	6
1.4 Hipótesis	8
1.5 Objetivos.	8
1.5.1 General	8
1.5.2 Específicos	9
1.6 Metodología de investigación.	10
2 Marco teórico	13
Cemento hidráulico	15
2.1 Cemento Portland	15
2.1.1 Alita (C_3S)	16
2.1.2 Belita ($\beta - C_2S$)	17
2.1.3 Celita (C_3A)	17
2.1.4 Ferrita (C_4AF)	17

2.2	Productos de hidratación del cemento	18
2.2.1	Silicato de calcio hidratado	18
2.2.2	Hidróxido de Calcio	19
2.2.3	Etringita y monosulfato	19
2.3	Cementos compuestos	19
2.4	Puzolanas	20
2.4.1	Cenizas de cascarilla de arroz	22
2.4.2	Cenizas de caña de azúcar	24
2.4.3	Cenizas de bagazo de agave	26
2.5	Reacción puzolánica	27
2.6	Reacción alcalí-sílice	27
2.7	Mortero	29
3	Desarrollo del proyecto	33
	Metodología del modelo experimental	35
3.1	Recolección de la ceniza	37
3.2	Pruebas físicas	37
3.2.1	Densidad	37
3.2.2	Absorción.	38
3.2.3	Microscopía óptica	39
3.2.4	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	40
3.3	Diseño de mezcla	42
3.3.1	Elaboración de mezclas para probetas	45
3.3.2	Fraguado de probetas	47
3.4	Evaluación en estado endurecido	48
3.4.1	Pruebas de resistencia a compresión	48
4	Resultados y discusiones	49
4.1	Análisis de las pruebas Físicas	51
4.1.1	Densidad y absorción	51

4.1.2	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	52
4.2	Análisis de la prueba mecánica	54
4.2.1	Resistencia a compresión	54
	Propuesta de aplicación.	61
	Conclusiones	65
	Trabajo a futuro.	67
	Referencias	69
	Anexos	77
	Anexo A: Listado de normas utilizadas	77
	Anexo B: Resultados de ensayo a compresión de las probetas con relación $a/c= 0.6$	79
	Anexo C: Resultados de ensayo a compresión de las probetas con relación $a/c= 0.45$	83

Índice de figuras

Figura 1	El Anfiteatro Flavio, mejor conocido como Coliseo Romano. Fuente: Construcción y tecnología en concreto, 2013.	6
Figura 2	Diagrama de fases del proyecto. Fuente: Propia, 2021.	11
Figura 3	Resido agroindustrial. Fuente: Tambichik et al., 2018.	22
Figura 4	Almacenamiento a granel de la ceniza de caña. Fuente: Triana et al., 2014.	24
Figura 5	Quema de bagazo de agave calcinado de 500 a 900 °C. Fuente: González et al. 2014.	26
Figura 6	Imagen de un concreto dañado por RAS, se observa el gel y el patrón típico de agrietamiento. Fuente: Olague et al., 2011.	28
Figura 7	Mortero para pegado. Fuente: Norma NMX-C-486-ONNCCE-2014. .	30
Figura 8	Mortero para relleno. Fuente: Norma NMX-C-486-ONNCCE-2014. .	31
Figura 9	Metodología del modelo experimental. Fuente: Propia, 2021.	35
Figura 10	Ceniza de bagazo de agave. Fuente: Propia, 2021.	37
Figura 11	Material utilizado en la prueba. Fuente: Propia, 2021.	38
Figura 12	Microscopía óptica a 10 X. Fuente: Propia, 2021.	39
Figura 13	(a) SEM de CBA a 5.00 KX. Fuente: Laboratorio Divisional de Microscopía Electrónica de Barrido de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, 2022.	40
Figura 14	Elaboración de mezclas para probetas. Fuente: Propia, 2021.	45
Figura 15	Vaciado de mezclas para probetas. Fuente: Propia, 2021.	46
Figura 16	Desmolde de probetas. Fuente: Propia, 2021.	46

Figura 17	Probetas desmoldadas y sumergidas dentro de un contenedor con agua y cal. Fuente: Propia, 2021.	47
Figura 18	Pruebas de resistencia a compresión. Fuente: Propia, 2021.	48
Figura 19	(a) SEM de ceniza volante a 1000X .Fuente: Muñoz, 2012.	52
Figura 20	Resultados de resistencia a compresión de las probetas con 0.6 a/c. Fuente: Propia, 2022.	56
Figura 21	Gráfica de resultados de resistencia a compresión en probetas con relación a/c de 0.45. Fuente: Propia, 2022.	58
Figura 22	Gráfica de resultados de resistencia a compresión en probetas con a/c= 0.45 comparadas con la patrón de a/c=0.6 . Fuente: Propia, 2022.	60
Figura 23	Módulo de piezas. Fuente: Propia, 2022.	62
Figura 24	Render. Fuente: Propia, 2022.	62
Figura 25	Render. Fuente: Propia, 2022.	63

Índice de Tablas

Tabla 1	Objetivos específicos y metas.	9
Tabla 2	Composición en óxidos típica para un CP.	16
Tabla 3	Tipos de mortero y resistencia de diseño a la compresión.	30
Tabla 4	Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia del cemento.	42
Tabla 5	Diseño de mezclas para las probetas con 0.45 a/c.	43
Tabla 6	Diseño de mezclas para las probetas con 0.6 a/c.	44
Tabla 7	Resultados obtenidos por la prueba de absorción.	51
Tabla 8	Resultados de resistencia a compresión en mezclas para las probetas con 0.6 a/c	55
Tabla 9	Resultados de resistencia a compresión en mezclas para las probetas con 0.45 a/c.	57
Tabla 10	Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.6, sin sustitución de CBA Fuente: Propia 2021	79
Tabla 11	Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.6, con sustitución de 10 % de cemento Portland por CBA.	80
Tabla 12	Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.6, con sustitución de 20 % de CP por CBA.	81
Tabla 13	Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.6, con sustitución de 30 % de CP por CBA.	82
Tabla 14	Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.45, sin sustitución de CP (patrón).	83

Tabla 15	Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación $a/c= 0.45$, con sustitución del 10% de CP por CBA.	84
Tabla 16	Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación $a/c= 0.45$, con sustitución del 20% de CP por CBA.	85
Tabla 17	Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación $a/c= 0.45$, con sustitución del 30% de CP por CBA.	86

Capítulo 1

Aspectos preliminares

1.1. Planteamiento del problema.

El reconocimiento del Mezcal a nivel internacional por su particular producción artesanal, ha generado un incremento en su demanda. Según los datos del informe estadístico anual del Consejo Regulador del Mezcal (CRM, 2019), la producción de esta bebida se ha incrementado considerablemente en la última década, produciéndose más de 7 millones de litros de Mezcal al año en la República Mexicana.

Oaxaca, por sus propias características agroclimáticas, favorece la producción de agave y mezcal (Bautista y Mascha, 2012), lo que lo ha posicionado a nivel nacional como el estado con mayor producción de litros de mezcal. Sin embargo, al incrementarse la producción, también se incrementa la generación de desechos sólidos, conocidos como “bagazo”, éstos se acumulan en torno a los palenques y a las fábricas de mezcal, llamadas también “mezcaleras”, los cuales equivalen en promedio a 9 kilos de bagazo por cada litro de mezcal producido, éstos normalmente se queman para reducir su volumen dentro de las mismas calderas y se genera un subproducto ahora en forma de cenizas residuales, las cuales son utilizadas comúnmente como abono para terrenos de cultivo del mismo maguey, resanador en alambiques de ollas de barro, o en su defecto son depositados en sitios cercanos a la fábrica. Según la investigación de Chávez et al. (2010), por cada litro de mezcal producido aproximadamente se generan 1.5 kg de cenizas. La dispersión de estas cenizas por el ambiente contamina el aire y el agua en ríos y lagos cercanos a las mezcaleras afectando también la salud humana.

Por otra parte, la industria cementera mexicana oferta uno de los productos más importantes para la industria de la construcción: el cemento (Vásquez y Corrales, 2017). La obtención de cemento implica un alto consumo energético y grandes emisiones de gases, lo que lo convierte en un material costoso y contaminante (Hendriks et al.,1998).

Hoy en día la producción anual de cemento global ha llegado a 2.8 mil millones de toneladas, y se espera que aumente a unos 4 mil millones de toneladas por año (Habert y Zürich, 2013) siendo ésta la industria responsable del 5% de las emisiones antropogénicas globales de CO_2 y del 7% del uso de combustibles industriales (IEA, 2007).

Contrario a lo que generalmente se cree, las emisiones de CO_2 que genera la fabricación del cemento son 8 veces mayores que las emisiones resultantes de las actividades metalúrgicas. La producción de 1 tonelada de cemento genera directamente 0.55 toneladas de CO_2 , que al mismo tiempo, requiere la combustión de combustible de carbono para producir 0.40 toneladas adicionales de dióxido de carbono, por lo tanto su equivalente es: 1 Ton de cemento = 1 Ton de CO_2 (Davidovits, 1994), lo que conlleva a mejorar la optimización de los procesos de producción o la búsqueda de materiales alternativos como sustituto del cemento.

1.2. Justificación

El estado de Oaxaca es el principal productor de mezcal en México, teniendo un total de 590 fábricas y 80 marcas, que anualmente ofertan al mercado 3.9 millones de litros equivalentes a 11.2 millones de dólares, por otra parte, se exportan hasta 700 mil litros de esta bebida ancestral a los principales mercados internacionales, como son: Estados Unidos, Japón, Taiwán, Italia, Holanda, España, Francia, Alemania y Canadá (SEECO, 2020).

Debido a la alta demanda que presenta el consumo de mezcal alrededor del mundo se producen grandes cantidades de residuos sólidos (bagazo) utilizado, entre otras cosas, como combustible para las calderas que destilan esta bebida (Cedeño, 1995). Las cenizas resultantes de este proceso son depositadas a cielo abierto en lugares cercanos a las mezcaleras provocando su dispersión por el aire y afectando a la salud humana además de contaminar el agua de ríos y lagos.

Con base en estos datos surge la necesidad de remover estos residuos del medio ambiente para evitar que sigan contaminando el agua y afectando a la salud humana, tomando en cuenta que los residuos por desechos agroindustriales han demostrado propiedades puzolánicas que los hacen favorables como sustituto o aditivo al cemento Portland (Giraldo et al., 2012) y considerando la investigación realizada por Jarre et al., (2017) que demostraron la factibilidad económica, social y ambiental de introducir el uso de la puzolana natural como sustituto parcial de más de un 35 % de CP en la elaboración de concretos, con posibilidades de reducir los impactos ambientales derivados de la industria de la construcción esta investigación se enfocó en realizar pruebas mecánicas a morteros con diferentes sustituciones de CP por CBA, de los cuales se seleccionó la mezcla que presentó mejor resistencia a compresión para poder ser aplicada en la industria de la construcción, constituyendo una valiosa alternativa que representa un doble beneficio, por un lado, valoriza un desecho y por otro, disminuye la cantidad de cemento utilizado en mezclas de mortero, sin tener una pérdida considerable de resistencia a compresión, convirtiéndose en una alternativa viable. De esta forma se obtuvo aporte científico para investigaciones futuras que tengan como objetivo implementar materiales sustentables para el medio ambiente.

1.3. Antecedentes

El cemento conocido como “Portland” es el utilizado como base en el concreto moderno; sin embargo, miles de años antes de su invención los romanos ya fabricaban su cemento mezclando ceniza volcánica con cal (CaO) y agua del mar. Esta combinación produce lo que se denomina reacción “puzolánica” llamada así por la localidad de Pozzuoli, situada en la Bahía de Nápoles, lugar de donde provenían las cenizas volcánicas (Escalante, 2002). Algunas de las edificaciones de los romanos se mantienen todavía en pie, un ejemplo es el Coliseo Romano (Figura 1), lo que refleja el alto nivel de su tecnología aún para nuestros días.



Figura 1 El Anfiteatro Flavio, mejor conocido como Coliseo Romano. Fuente: Construcción y tecnología en concreto, 2013.

Las puzolanas son aquellos materiales de composición rica en óxido de silicio (SiO_2), similares a las cenizas volcánicas utilizadas por los romanos; como por ejemplo: ceniza volcánica, la sílice condensada, algunos caolines, ceniza de cascarilla de arroz y desechos geotermiales (Escalante, 2002). Las propiedades puzolánicas de las cenizas permiten reemplazar, en los morteros y concretos, una parte del cemento Portland que sería necesaria para obtener la resistencia final deseada (Jarrige, 1956).

Dentro de los trabajos que sustentan la incorporación de cenizas obtenidas por bagazo de agave en morteros se encuentra el “Efecto de pequeña adición de cenizas de biomasa de agave en morteros de cemento” realizado por González et al., (2014) obteniendo como resultado que la temperatura de calcinación afecta a los compuestos de las cenizas, teniendo principalmente carbonato de calcio ($CaCO_3$) a temperaturas inferiores a 800 °C y óxido de calcio (CaO) a temperaturas superiores a este valor, así como compuestos de carbonato de magnesio ($MgCO_3$) y óxido de fosfato de potasio (KPO_3). Asimismo, la resistencia a la compresión de las muestras con adiciones del 5 % en masa, mostró un aumento del 90 % de resistencia a los 7 días en comparación con la muestra patrón. Por lo que concluyeron que el incremento de resistencia podría ser consecuencia de las características semi-reativas (reacción puzolánica) de los componentes de las cenizas.

Otro estudio relevante es el realizado por Chávez et al., (2010) “Reciclaje de cenizas de la industria mezcalera: Una fuente renovable de cal”, en este estudio se analiza el proceso de transformación de las fibras de agave mediante la incineración. La ceniza obtenida de este proceso demostró que estaba compuesta principalmente de carbonato de calcio ($CaCO_3$), óxido de calcio conocido comúnmente como cal (CaO) e Hidróxido de calcio o bien cal hidratada ($Ca(OH)_2$) lo que indica que las cenizas de éste residuo (bagazo de agave) tienen potencial para desarrollar una reacción puzolánica.

Finalmente, dentro de las aplicaciones que han tenido este tipo de materiales que integran cenizas de residuos como sustituto parcial del cemento se encuentran los “Bloques ecológicos transpirables no permeables, mediante la utilización de residuos o cenizas producidas por la incineración del bagazo de la caña de azúcar” realizada por Barrios et al., (2018) en donde fue posible determinar que la utilización de la ceniza de cuesco de palma africana que sirve como material puzolánico, permite mejorar las propiedades mecánicas del mortero y puede utilizarse en la elaboración de bloques de mampostería estructural contribuyendo ingenierilmente a la disminución del impacto ambiental que estos desechos generan y al uso de materiales alternativos en la construcción.

1.4. Hipótesis

Al incrementar los porcentajes de sustitución de CP por CBA en mezclas de mortero podría incrementar la resistencia a compresión en edades superiores a los 90 días comparadas con las muestras de referencia (patrón).

1.5. Objetivos.

1.5.1. General

Generar morteros que contengan ceniza de bagazo de agave como sustituto parcial de cemento Portland con la finalidad de evaluar sus propiedades físico-mecánicas y obtener una sustitución óptima como una alternativa en la industria de la construcción.

1.5.2. Específicos

Tabla 1 Objetivos específicos y metas.

Objetivos específicos	Metas
Caracterizar las propiedades físicas de la ceniza.	<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de densidad.• Pruebas de absorción.• Microscopia óptica• Estudio de microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar la morfología de las partículas.
Elaborar las mezclas de mortero con ceniza de bagazo de agave.	<ul style="list-style-type: none">• Establecer relación/agua cemento de 0.45 y 0.6. (*)• Elaborar una mezcla patrón con 0 % de adición de ceniza, otras con sustitución del 10 %, 20 % y 30 % de ceniza. (*)
Evaluar las propiedades mecánicas de morteros con ceniza en estado endurecido	<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de resistencia a compresión a los 28, 56 y 92 días. .• Comparar los resultados para inferir cuál es el óptimo como sustituto cementante.

Fuente: Propia 2021.

Nota (*):

Las especificaciones de la relación a/c y los porcentajes utilizados se encuentran en la sección 3.3 Diseño de mezcla (pp. 36) de la presente investigación.

1.6. Metodología de investigación.

Debido a las características de la presente investigación ésta se encuentra enmarcada bajo un tipo de investigación experimental, en donde se busca explicar la relación entre unos hechos (causa) y sus posibles repercusiones (efecto) (Barrios et al., 2018), teniendo como finalidad determinar las posibles mejoras en las resistencias finales de morteros que contengan CBA como sustituto parcial de CP.

Con la finalidad de alcanzar el objetivo deseado, esta investigación experimental se divide en 4 fases (Figura 2), la Fase I se basa en la recopilación bibliográfica de los conceptos previos que se necesitan para una mayor comprensión del tema y la obtención de las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) que en la fase II y III fueron aplicadas para realizarle las pruebas necesarias al material y finalmente en la fase IV se obtuvieron las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

Diagrama de fases del proyecto

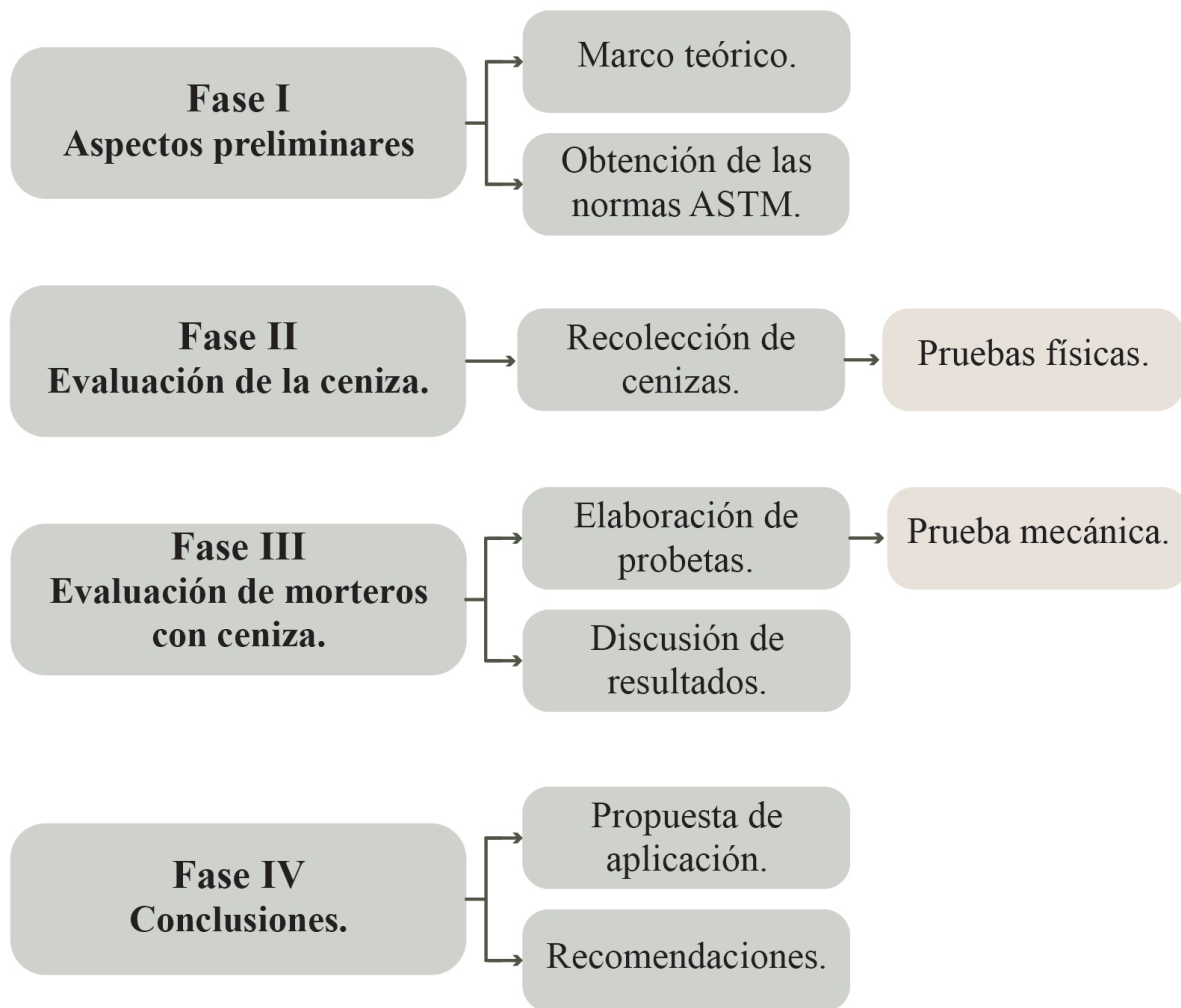


Figura 2 Diagrama de fases del proyecto. Fuente: Propia, 2021.

Capítulo 2

Marco teórico

Cemento hidráulico

El cemento puede ser definido como un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido, que cuando se mezcla con agua forma una pasta que fragua y endurece mediante reacciones y procesos de hidratación, y que después de endurecer, mantiene su resistencia y estabilidad, tanto en el aire, como bajo el agua (Taylor, 1997).

Dentro de los materiales de base cemento se encuentran tres categorías de productos; **la pasta de cemento**, producto de la mezcla de cemento con agua, el **mortero** y el **concreto**. Tanto el mortero como el concreto se logran a partir de la unión de agregados mediante la pasta de cemento que actúa como conglomerante hidráulico. En el caso del mortero los agregados son finos (arena) y en el caso del concreto la dosificación introduce una mezcla de agregados finos y gruesos (grava y arena) (Monteagudo, 2014).

2.1. Cemento Portland

Para comprender un poco sobre el proceso de la producción de cemento ordinario Portland Habert (2013) menciona en su investigación que la primera aproximación que se tiene es al obtener el Clinker. El estudio de García (2011), nos brinda una traducción y síntesis sobre los procesos de obtención del cemento citando el libro de Taylor “The chemistry of Portland cement manufacture” (1997), la cuál nos dice que el clinker del CP es fabricado mediante la calcinación y sinterización de una mezcla de materias primas que consisten principalmente de cal (CaO), óxido de silicio (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3). Otros materiales son usados durante el proceso, por ejemplo, el óxido de hierro (Fe_2O_3) que es adicionado para reducir la temperatura de clinkerización. El producto obtenido es llamado clinker, al cual se le añade aproximadamente un 5% de yeso para controlar el tiempo de fraguado; posteriormente es finamente molido para obtener el cemento como producto final.

De acuerdo a la norma ASTM C 219, el CP es un cemento hidráulico producido por la molienda de clinker, el cual consiste de al menos dos tercios en masa de silicatos de calcio

(Ca_2SiO_4), el resto contiene óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3); usualmente contiene uno o más de las formas de sulfato de calcio ($CaSO_4$) como adición en la molienda. La Tabla 2 muestra la composición en óxidos típica para un CP.

Tabla 2 Composición en óxidos típica para un CP.

Óxido	%
CaO	67
SiO_2	22
Al_2O_3	5
Fe_2O_3	3

Fuente: García, 2011.

De acuerdo a Taylor (1977) cuatro fases principales están presentes en el CP: alita, silicato tricálcico (C_3S); belita, silicato bicálcico ($\beta - C_2S$); celita, aluminato tricálcico (C_3A) y una fase ferrita, ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF); otras fases minoritarias, como los sulfatos alcalinos y la cal libre (CaO), pueden estar también presentes. A continuación García (2011) describe cada un de estas fases:

2.1.1. Alita (C_3S)

El silicato tricálcico ($3CaO \cdot SiO_2$) es un compuesto que se presenta en fase sólida formando una red cristalina con impurezas en forma de sustituciones por iones de magnesio (Mg), hierro (Fe) y aluminio (Al), razón por la que recibe el nombre de alita (Monteagudo, 2014). Es la fase más importante de un cemento portland ordinario, constituyendo un 50–70 %. Reacciona rápidamente con el agua dando como resultado de la hidratación el gel CSH y la portlandita (CH). Es la fase principal para el desarrollo de resistencia mecánica, a edades tempranas (García, 2011).

2.1.2. Belita ($\beta - C_2S$)

El silicato bicálcico ($2CaO \cdot SiO_2S$) suele contener iones de magnesio (Mg), aluminio (Al) y óxido de potasio (K_2O) por lo que recibe el nombre de belita (Monteagudo, 2014). Siendo la segunda fase en importancia, que constituye en un 15-30 % de un cemento portland ordinario. Esta fase reacciona lentamente con el agua; en consecuencia, contribuye un poco al desarrollo de resistencia durante los primeros 28 días, pero incrementa sustancialmente la resistencia a edades tardías (García, 2011).

2.1.3. Celita (C_3A)

Está presente en el cemento portland en un 5-10 %. Es un aluminato tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3$), modificado en composición y algunas veces también en estructura por sustitución iónica. Esta fase reacciona rápidamente con el agua, lo que puede provocar un fraguado falso; para evitar esta reacción rápida se agrega yeso, el cual actúa como un agente controlador de fraguado (García, 2011).

2.1.4. Ferrita (C_4AF)

El ferrito aluminato tetracálcico o ferrita ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) modificada en composición por la variación de la relación Al/Fe y por sustitución iónica contribuye hasta en un 5-15 % del cemento portland ordinario. La velocidad a la cual esta fase reacciona con el agua es variable, quizás debido a las diferencias en composición y otras características, pero en general es alta al principio y baja a edades tardías (García, 2011).

En resumen, los silicatos dominan el fraguado, endurecimiento y el desarrollo de las propiedades de la pasta de cemento, esto se debe a que ambos componentes intervienen en la formación de silicatos cálcicos hidratados (SCH) o matriz de gel CSH, que es el principal responsable del aporte de resistencias. Los aluminatos contribuyen en menor medida a las resistencias, siendo el C_4AF el que menos aporte tiene (Monteagudo, 2014).

Las fases intersticiales (aluminatos) juegan un rol muy importante en las propiedades tempranas

de reología de la pasta y también en la estabilidad dimensional de las pastas al estar expuestas a iones sulfato o tratamientos térmicos.

2.2. Productos de hidratación del cemento

El contacto del agua con el CP desencadena una serie de procesos que conducen a productos de hidratación que, a través de varios tipos de interacciones de unión, producen una matriz densa y estable. Una particularidad importante de esta compleja reacción es que los reactivos iniciales se encuentran en forma de polvo. La formación de productos de hidratación y el desarrollo de las características microestructurales dependen de los procesos de solución, las reacciones interfaciales (fenómenos topoquímicos) y, en última instancia, las reacciones en estado sólido (Jolicoeur y Simard, 1998).

El comportamiento de la hidratación de los cementos a edades tempranas está gobernado por las reacciones de las fases aluminatos, particularmente el aluminato tricálcico (C_3A); sin embargo, el fraguado y el desarrollo de resistencia depende de la hidratación de los silicatos, particularmente el silicato tricálcico (C_3S) a edades tempranas. La fase C_3S reacciona con el agua (H) y produce silicato de calcio hidratado, lo que se conoce como gel CSH, e hidróxido de calcio (CH). El CH , es el segundo producto más abundante en las pastas de cemento hidratado. Este producto puede reaccionar con las adiciones puzolánicas que se hacen al cemento para convertirse en un gel CSH (García, 2011).

García (2011) menciona que existen tres principales productos que surgen de la hidratación del CP que son:

2.2.1. Silicato de calcio hidratado

El silicato de calcio hidratado se conoce como gel CSH y es el producto principal de las reacciones de hidratación, ya que es el responsable de las propiedades de resistencia y durabilidad del cemento. Ocupa entre un 50 y 60 % del volumen de la pasta de cemento.

2.2.2. Hidróxido de Calcio

Los cristales de hidróxido de calcio (también llamados portlandita) constituyen del 20 al 25 % del volumen de sólidos en la pasta hidratada. En contraste al CSH, la estequiometría del hidróxido de calcio está definida como $Ca(OH)_2$.

2.2.3. Etringita y monosulfato

La etringita, $Ca_6Al_2(OH)_{12} \cdot (SO_4)_3 \cdot \sim 26H_2O$, formada inicialmente durante la hidratación del cemento, puede llegar a ocupar una fracción en volumen de alrededor 0.15 a 0.2 del total de la pasta de cemento hidratado y es comúnmente llamada AFt. La formación de etringita durante la etapa de hidratación inicial es importante para controlar el tiempo de fraguado de los aluminatos de calcio altamente reactivos. Después de la hidratación inicial la etringita se convierte parcialmente en monosulfato, $Ca_4Al_2(OH)_{12} \cdot (SO_4) \cdot 12H_2O$, este monosulfato es muy susceptible a la carbonatación, dando como resultado la formación de etringita y un hemicarbonato. La formación tardía de la etringita en el cemento endurecido puede ser nociva causando una gran expansión y agrietamiento en las estructuras.

2.3. Cementos compuestos

Taylor (1997), define a un cemento compuesto como un cemento hidráulico que consiste de dos o más constituyentes inorgánicos (donde al menos uno no es clinker o CP) que contribuyen a la resistencia mecánica y desarrollo del resto de las propiedades del cemento.

En general, estos materiales de reemplazo son subproductos industriales como la escoria granulada de alto horno, la ceniza volante y el humo de sílice y de materiales naturales como la ceniza volcánica y las arcillas calcinadas, entre otras. Estos materiales reaccionan con los productos de hidratación del cemento portland, produciendo silicatos hidratados adicionales, los cuales pueden beneficiar al desarrollo de resistencia y durabilidad del concreto (García, 2011). Los materiales de reemplazo pueden dividirse en dos categorías (Escalante, 2002):

- ✓ Los hidráulicos latentes, que poseen propiedades cementantes, pero necesitan de activación

externa para su reacción; un ejemplo es la escoria granulada de alto horno

- ✓ Los puzolánicos, que de acuerdo a la norma ASTM C595/C595M-12e1 son materiales naturales o subproductos industriales compuesto de materiales silíceos o silicoaluminosos, que carecen de propiedades hidráulicas y que casi no poseen valor cementoso, pero que al estar finamente molidos y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con hidróxido de calcio, para formar compuestos de hidratos de silicatos y aluminosilicatos de calcio que poseen propiedades similares a las del cemento hidratado. Algunos ejemplos relevantes y ampliamente usados son la ceniza volante, el metacaolín, el humo de sílice y la cascarilla de arroz.

Durante los últimos cuarenta años se han empleado diferentes tipos de materiales de reemplazo del cemento portland de manera sistemática, sin embargo, el efecto que cada uno tiene sobre el proceso de hidratación, el desarrollo de propiedades mecánicas, físicas y microestructurales no está muy claro aún en cementos compuestos con tres y cuatro constituyentes (García, 2011).

2.4. Puzolanas

La puzolana es un material silícico o silícico aluminoso que, cuando está en la forma de polvo fino y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) liberado por la hidratación del CP para formar silicato de calcio hidratado y otros compuestos cementantes (Kosmatka et al., 2004).

La norma americana ASTM C 618 clasifica las puzolanas en tres grandes grupos, clase F, clase C y clase N:

- ✓ Clase F, corresponde a cenizas volantes procedentes de la quema de antracita o carbón bituminoso.
- ✓ Clase C, corresponde a cenizas volantes procedentes de la quema de lignita o carbón sub-bituminoso.

- ✓ Clase N, corresponde a las puzolanas naturales, como tierras diatomeas, pizarras o cenizas volcánicas.

Gutiérrez (1989), considera conveniente dividir a estos materiales en puzolanas naturales, semi-artificiales y artificiales:

- ✓ Las puzolanas naturales son aquellas que se usan directamente sin sufrir modificaciones químicas ni mineralógicas. En su mayoría son de origen volcánico, en este grupo también se encuentran las tierras de diatomeas (polvo o gránulos de restos de algas fosilizadas). Luego de extraída del yacimiento, las rocas de diatomeas fosilizadas son sometida a un delicado proceso que las convierte en un fino talco. Así, los esqueletos de las diatomeas se convierten en microscópicas agujas de silicio constituidas por esqueletos síliceos de protozoarios.
- ✓ Las puzolanas semi-artificiales son aquellas que requieren de un tratamiento térmico con el cual sufren un cambio en su estructura sin llegar a tener cambios en su composición química. Generalmente son de origen sedimentario, como arcillas, caolines, etc.
- ✓ Las puzolanas artificiales son aquellas que sufrieron cambios tanto en su composición química como estructural. Son consideradas subproductos de otros procesos, como las cenizas volantes de las termoeléctricas, escorias de alto horno y vapores condensados de sílice que se obtienen como subproductos de la reducción de cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico en la fabricación de aleación de hierro y silicio.

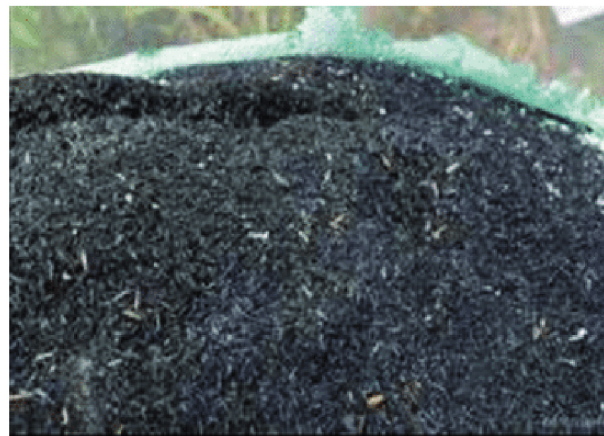
Existen también las cenizas de residuos agrícolas y son todos aquellos productos de origen natural que cuando son quemados, se obtiene un residuo mineral rico en sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3); como la ceniza de la cascarilla de arroz y ceniza de bagazo de caña de azúcar. (Ospina y Molina, 2018).

2.4.1. Cenizas de cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es un material de desecho agroindustrial que constituye alrededor del 20 % de la producción mundial de arroz, que se aproximó a los 700 millones de toneladas en el año 2011, la cascarilla de arroz (Figura 3a) es el mayor residuo resultante de la producción agrícola de granos y su disposición final es uno de los mayores problemas existentes en los países productores de arroz (Mattey et al., 2015). La Ceniza de Cascarilla De Arroz (CCA) (Figura 3b) puede llegar a contener más del 90 % de sílice (SiO_2). Por esto que la obtención de un gran porcentaje de sílice amorfa reacciona con el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) producto de las reacciones del cemento, de tal modo que se convierta en silicato de calcio hidratado y así mejore las propiedades mecánicas del concreto (Robayo y Vasto, 2013).



(a) Cascarilla de arroz



(b) Ceniza de cascarilla de arroz

Figura 3 Resido agroindustrial. Fuente: Tambichik et al., 2018.

La CCA sometida a una temperatura de $400^{\circ}C$, logra una calcinación del 93 % de óxido de sílice (SiO_2), lo cual contribuye a una mejora en la resistencia del concreto (Rodriguez y Tibabuzo , 2019).

Además, la investigación “aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agro-industrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales” que realizó Mattey et al., 2015 demostraron que la ceniza resultante del proceso de combustión de la cascarilla

de arroz presentó un porcentaje de sílice amorfa del 29,38 %. Y este residuo fue incorporado en mezclas de concreto con el fin de estudiar su efecto como puzolana en la sustitución parcial de CP tipo I y como agregado fino, en la fabricación de bloques no estructurales y bloques macizos. Los resultados obtenidos mostraron que la relación cemento: agregado de 1:6 y la adición del 20 % de CCA actuando como relleno y puzolana es la composición óptima para el uso de este residuo agro-industrial en una aplicación como los bloques no estructurales. Asimismo, se encontró que el proceso de mezclado en dos etapas mejora la calidad del producto, aumentando las propiedades mecánicas de las mezclas elaboradas a 28 días de curado.

La cascarilla de arroz mostró valores muy interesantes en la investigación “Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico” de Rodriguez y Tibabuzo (2019), destacando el hecho de que para sustituciones de 20 % de cemento por ceniza se logra un incremento de la resistencia a compresión de casi un 14 % a los 28 días. Siendo el porcentaje de sílice en la ceniza uno de los elementos principales para una puzolana de buena calidad se pudo apreciar que en este sentido la cascarilla de arroz es el material de mayor potencialidad. En este caso se logró una ceniza con poco más de 80 % de sílice en su composición. Concluyendo que las adiciones de ceniza de cascarilla de arroz provocan incrementos en la resistencia a la compresión, siendo el porcentaje ideal de sustitución de 20 % (Águila y Sosa, 2008).

2.4.2. Cenizas de caña de azúcar

Uno de los materiales que ha demostrado poseer características puzolánicas propias de los cementantes es la Ceniza de Bagazo de Caña (CBCA) (Chulim et al., 2019). India es uno de los mayores productores de caña de azúcar en el mundo, produce 300 millones de toneladas por año (Balasubramanian y Ratnavelu, 2001) y una gran cantidad de bagazo de caña de azúcar está disponible en la industria azucarera.

El bagazo de caña de azúcar es un subproducto que se genera después de la extracción de jugo de la caña de azúcar. La CBCA se adquiere mediante la quema controlada del bagazo de caña de azúcar que se realiza en calderas como parte del proceso de producción y como se observa en la Figura 4 se queda almacenada al aire libre. Sin embargo, para su aplicación efectiva en mortero y concreto requiere primero el uso controlado de la clasificación por tamaño de partícula para permitirle lograr la finura y homogeneidad que se requieren para cumplir con los estándares (Cordeiro, 2010).



Figura 4 Almacenamiento a granel de la ceniza de caña. Fuente: Triana et al., 2014.

En la investigación de Ríos et al. 2017, se estudió el comportamiento de adición en diferentes porcentajes de la ceniza de bagazo de caña sin tratar (UtSCBA) al Cemento Portland Compuesto (CPC) y los resultados que obtuvieron demostraron que la adición de 10 % de UtSCBA a la mezcla afectó la resistencia a la compresión en edades tempranas con respecto al concreto de referencia (patrón); sin embargo, este efecto ocurre solo en edades tempranas

porque después de 90 días la fuerza es comparable a la del de referencia. De igual forma en una adición del 20 % de UtSCBA disminuyó la resistencia en edades tempranas, pero fue similar a la muestra patrón después de 90 días.

Por otra parte Maza-Ignacio et al. (2020), realizó un estudio de ladrillos binarios ligeros agregando UtSCBA y ceniza volante llegando a la conclusión que la adición de UtSCBA en ladrillos binarios afecta negativamente su resistencia a la compresión, no obstante, el aumento de temperatura aumenta la resistencia a la compresión. A 1000 °C ladrillos hechos con UtSCBA excedió el valor mínimo de resistencia a la compresión (ASTM C62) y se puede clasificar como grado NW (clima insignificante resistente); los ladrillos de control y los fabricados con humo de sílice superaron el valor mínimo y se clasifican como grado MW (moderadamente resistente a la interperie), mientras que los fabricados con ceniza volante pueden clasificarse como grado SW (altamente resistente a la interperie).

En la investigación de Ganesan et al., (2007) se realizó el análisis del comportamiento que tiene la ceniza de bagazo en una sustitución de cemento Portland del 5 % al 30 % y en sus resultados se observa que es posible reemplazar hasta un 20 % del cemento Portland ordinario de manera óptima con cenizas de bagazo bien quemadas sin ningún efecto adverso sobre las propiedades deseables del concreto.

Las ventajas específicas de dicho reemplazo son: Desarrollo de alta resistencia temprana, una reducción de la permeabilidad al agua y resistencia apreciable a la permeación y difusión de cloruros.

2.4.3. Cenizas de bagazo de agave

Hoy en día el Agave se utiliza para producir principalmente las bebidas alcohólicas como el mezcal y el tequila, así como aguardiente, aguamiel y otros productos como alimentos y dulces (Chávez et al., 2010).

Los desechos del agave (raíces, hojas, bagazo y vinazas) representan casi el 50 % del peso de la planta (Nuñez et al., 2011). Para el bagazo resultante se le conocen varios usos, incluida la enmienda del suelo, fertilizantes, compostaje, extracción de celulosa fibras, alimentos para animales, adsorbentes (carbón activado), compuestos y, en particular, como biomasa para recuperación de energía (por combustión) o para conversión en combustible (por ejemplo, etanol) (Payá et al., 2018).

Por otra parte, la ceniza de bagazo (CB) es uno de esos desechos que se puede utilizar como material de mezcla. Singh et al. (2000), estudió las propiedades puzolánicas del CP mezclando BA y observó que en la presencia del 10 % de BA, la resistencia a la compresión los valores fueron superiores a las del cemento ordinario Portland (COP). Las propiedades puzolánicas de la CB también han sido estudiadas y se informó que se pueden reutilizar como material puzolánico en concreto (Hernandez et al., 1998, 2000, 2001; Payá et al., 2002).

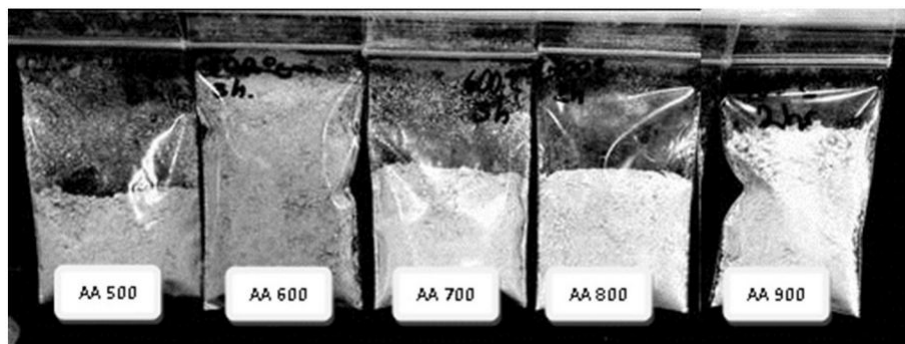


Figura 5 Quema de bagazo de agave calcinado de 500 a 900 °C. Fuente: González et al. 2014.

Los resultados obtenidos por González et al. (2014) en su investigación sobre los “efectos de adición de cenizas de biomasa de agave en cementos y morteros” demostraron que el uso de compuestos de esta naturaleza puede ser consistente dentro de las fases hidratadas de una matriz de cemento e incrementar la resistencia de morteros, sin embargo, la ceniza tuvo tratamientos térmicos (Figura 5) para poder ser evaluadas.

2.5. Reacción puzolánica

La reacción puzolánica involucra la interacción química de la puzolana con el hidróxido de calcio (CH), producto de las reacciones de hidratación del CP, y una cantidad de agua no definida para formar gel CSH. Este gel generalmente posee una densidad menor al producido mediante la hidratación del cemento. Sin embargo, aunque la reacción es más lenta, los productos de la reacción puzolánica llenan los espacios inicialmente ocupados por agua reduciendo la porosidad. Los productos de hidratación resultantes incrementan la resistencia mecánica y reducen la permeabilidad. El progreso de la reacción puzolánica es comúnmente evaluado en términos del consumo de CH en la matriz de cemento (Massazza, 1988).

2.6. Reacción álcalí-sílice

La Reacción Álcali Sílice (RAS) se produce cuando la disolución alcalina de los poros del concreto y los minerales de sílice de algunos áridos (agregados) reaccionan para formar un gel (Lanza, 2012), lo que genera tensiones internas que pueden causar expansión y agrietamiento (Figura 6).

La RAS es muy similar a la reacción puzolánica. La única diferencia sustancial entre ambas reacciones es la velocidad a la que se producen. La finura y elevada solubilidad de la sílice en las adiciones activas hace que la reacción puzolánica no produzca expansión (los geles formados terminan siendo geles SCH y SCAH finamente distribuidos en toda la pasta de cemento), sin embargo, RAS sí produce expansión (Thomas, 2011).

En la investigación de Valdez Tamez, et al. (2008) se estudió el comportamiento de las cenizas

puzolánicas en sustitución parcial al cemento ordinario Portland y demostraron que se puede disminuir considerablemente la reacción expansiva del RAS ya que las puzolanas contienen sílice reactiva, la cual, finamente dividida, reacciona rápidamente con los álcalis de la solución del poro disminuyendo el poder destructivo del gel en la matriz cementante.(Young, et al., 1998)

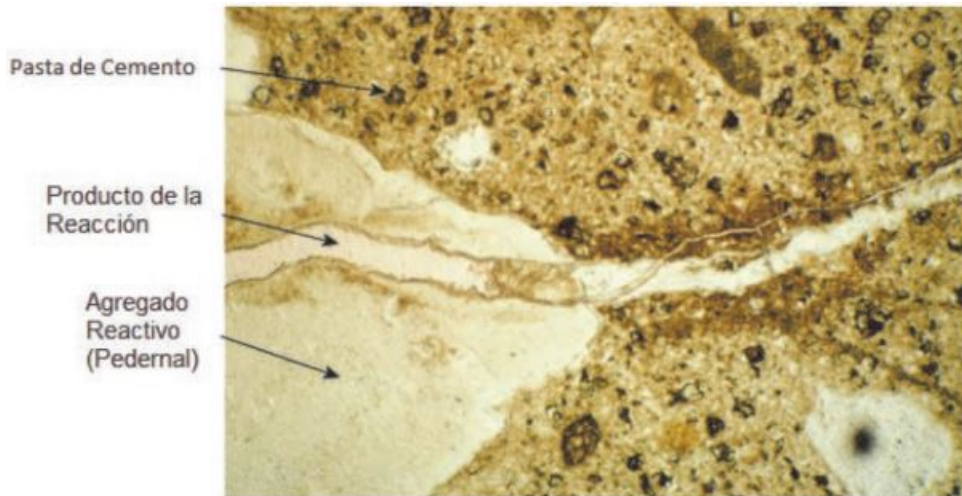


Figura 6 Imagen de un concreto dañado por RAS, se observa el gel y el patrón típico de agrietamiento. Fuente: Olague et al., 2011.

2.7. Mortero

Se denomina mortero a aquella pasta formada por la combinación de cemento, arena y agua. Es uno de los elementos de uso más común en construcción debido a su gran versatilidad; es posible encontrar una gran variedad de morteros que se diferencian según su composición y a la función para la cual son preparados. Estos pueden ser empleados como material de revestimiento (mortero para revoque o repello), como relleno (mortero de relleno o grouting) o para unir unidades de mampostería (mortero de pega) (Valbuena et al., 2016).

Mejía et al., (2012) mencionan que como material de construcción ofrece beneficios, entre los que se pueden distinguir dos etapas diferenciadas por su estado físico, que se denominan estado fresco y estado endurecido. La primera responde a la fase del mortero una vez mezclado y amasado. En esta etapa el mortero es plástico y trabajable, lo que permite su puesta en obra e influirá principalmente en el rendimiento y la calidad de la ejecución. Superada esta fase el mortero endurece hasta consolidarse. Las propiedades en estado endurecido son estipuladas por las prescripciones de proyecto y por el cumplimiento de las exigencias normativas y reglamentarias, entre una de sus funciones principales está el servir como dispositivo de unión y como dispositivo soportante de la compresión, producto de las cargas de los elementos de mampostería.

Esta resistencia a la compresión es una de las propiedades más importantes, ya que estará presente durante el transcurso de su vida útil y de ella depende la estabilidad de la obra que se ejecute. Por lo cual se requiere el adecuado conocimiento en el establecimiento de la resistencia a la compresión del mortero, para que este pueda soportar las cargas, según lo requerido por el diseño.

En cada país la clasificación de los morteros obedece a propiedades específicas de resistencia a la compresión. En México la norma NMX-C-486-ONNCCE-2014 establece tres tipos de mortero que se pueden apreciar en la Tabla 3 y las resistencias que cada uno debe cumplir. Esta norma mexicana es aplicable al mortero para uso estructural en elementos de mampostería, ya sea pre-dosificado o hecho en obra.

Tabla 3 Tipos de mortero y resistencia de diseño a la compresión.

Tipo de mortero	Resistencia promedio a la compresión MPa (kg/cm ²)	Resistencia mínima individual a la compresión MPa (kg/cm ²)
I	18	12.5
II	11	7.5
III	6	4

Fuente: Norma NMX-C-486-ONNCCE-2014.

Esta norma también clasifica a los morteros de acuerdo a su usos:

- ✓ Mortero de pega (Figura 7): debe tener cualidades especiales, diferentes a los morteros usados para otros fines porque está sometido a las condiciones especiales del sistema constructivo, y una resistencia adecuada ya que debe absorber esfuerzos de tensión y compresión.



Figura 7 Mortero para pegado. Fuente: Norma NMX-C-486-ONNCCE-2014.

- ✓ Morteros de relleno (Figura 8): Se utilizan para llenar las celdas de los elementos en la mampostería estructural, y al igual que el mortero de pega debe tener una adecuada resistencia.



Figura 8 Mortero para relleno. Fuente: Norma NMX-C-486-ONNCCE-2014.

Gutiérrez (2003) menciona que también se encuentran enmarcados dentro de la aplicación los **morteros de recubrimiento**: Ya que su función no es estructural sino de embellecimiento, o la de proporcionar una superficie uniforme para aplicar la pintura, no requieren una resistencia determinada; la plasticidad juega en ellos un papel muy importante.

Capítulo 3

Desarrollo del proyecto

Metodología del modelo experimental

En la Figura 9 se ilustran las etapas que se llevaron a cabo para realizar el desarrollo experimental. Todas las normas utilizadas en el presente proyecto de investigación están especificadas en la sección de ANEXO A de la presente investigación.

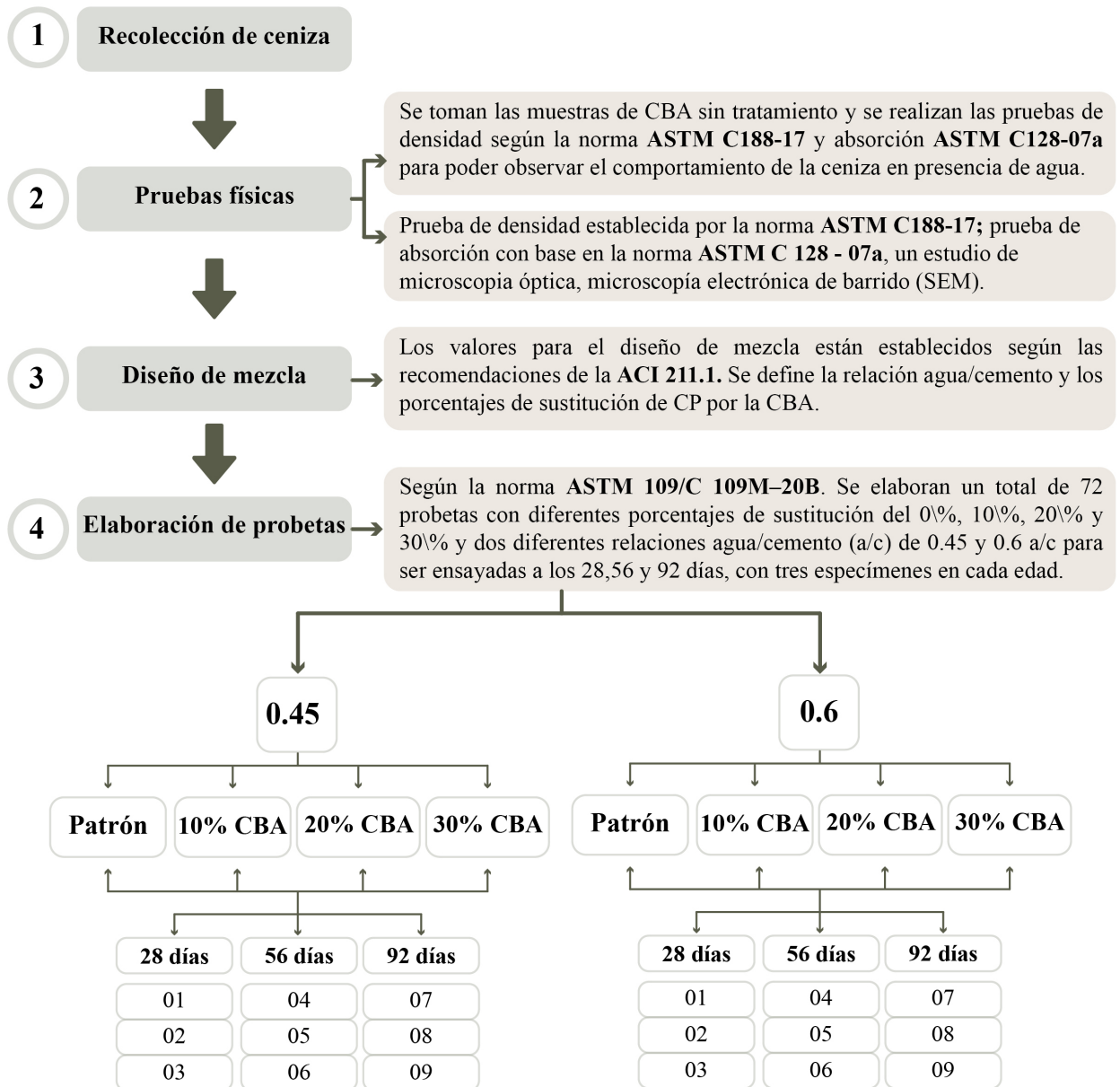
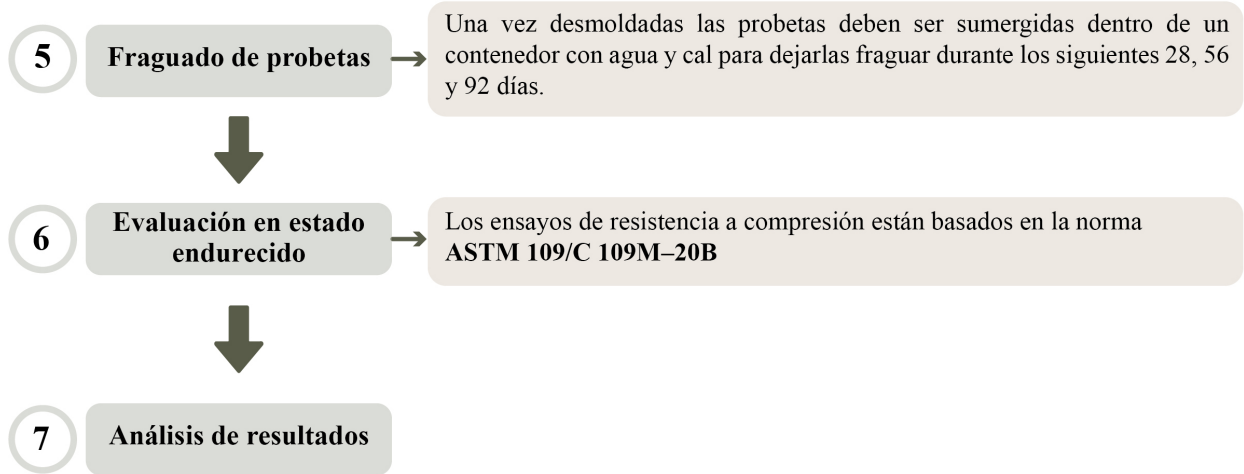


Figura 9 Metodología del modelo experimental. Fuente: Propia, 2021.



Metodología del modelo experimental. Fuente: Propia, 2021.

3.1. Recolección de la ceniza

En la presente investigación se recuperaron residuos de CBA de una fabrica mezcalera ubicada en el municipio de Santiago Matatlán, Oaxaca, México (Figura 10), con la finalidad de realizarle pruebas físicas y mecánicas, esperando que el comportamiento de éstas tenga resultados similares a las de las demás cenizas dedesechos agroindustriales que se han estudiado anteriormente.



Figura 10 Ceniza de bagazo de agave. Fuente: Propia, 2021.

3.2. Pruebas físicas

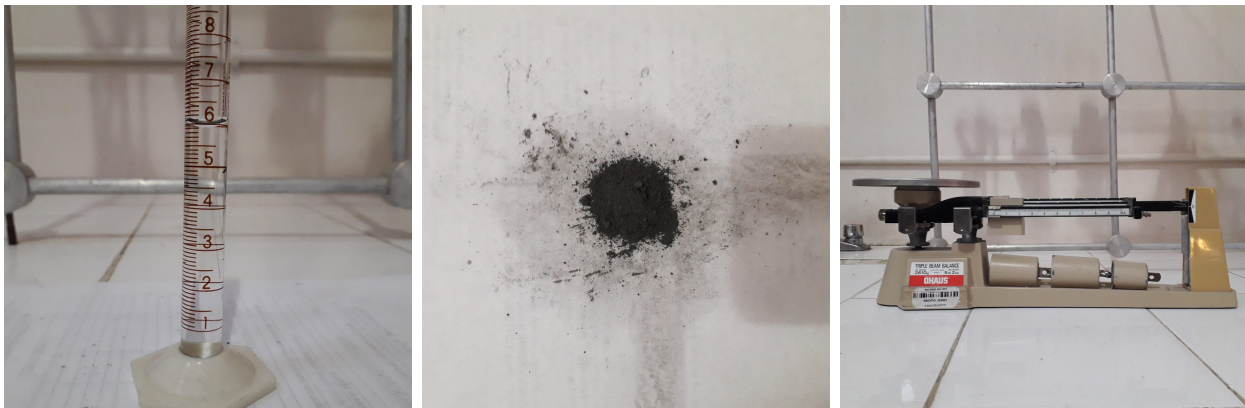
3.2.1. Densidad

Según la norma ASTM C188- 17: Método de Ensayo Estándar para densidad del Cemento Hidráulico. Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad del cemento hidráulico. Su utilidad particular esta en conexión con el diseño y control de mezclas de concreto.

3.2.2. Absorción.

Según la norma ASTM C 128 – 07a: Método de ensayo estándar para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados finos.

Los valores de absorción son usados para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de poro en el interior de las partículas constituyentes, comparado con la condición seca, cuando se considera que el agregado ha estado en contacto con agua por un período suficiente para poder satisfacer la absorción potencial. El ensayo se basa en sumergir una muestra en agua por 24 hr, después de transcurrido el tiempo, el material se remueve del agua, se seca la superficie de las partículas y se determina la masa. En la Figura 11 se muestra el equipo y material que se utilizó para poder realizar esta prueba (una probeta graduada de 10 ml con aproximación de 0.1 ml, una balanza de 2610 g de capacidad con aproximación de 0.1 g, CBA sin tratar).



(a) Probeta graduada.

(b) CBA utilizada.

(c) Balanza.

Figura 11 Material utilizado en la prueba. Fuente: Propia, 2021.

3.2.3. Microscopía óptica

En la Figura 12 se puede observar la morfología de las partículas que componen la CBA. Esta imagen fue tomada con un microscopio petrográfico con una resolución de 10X, en ella se puede apreciar que en general, son partículas angulosas.

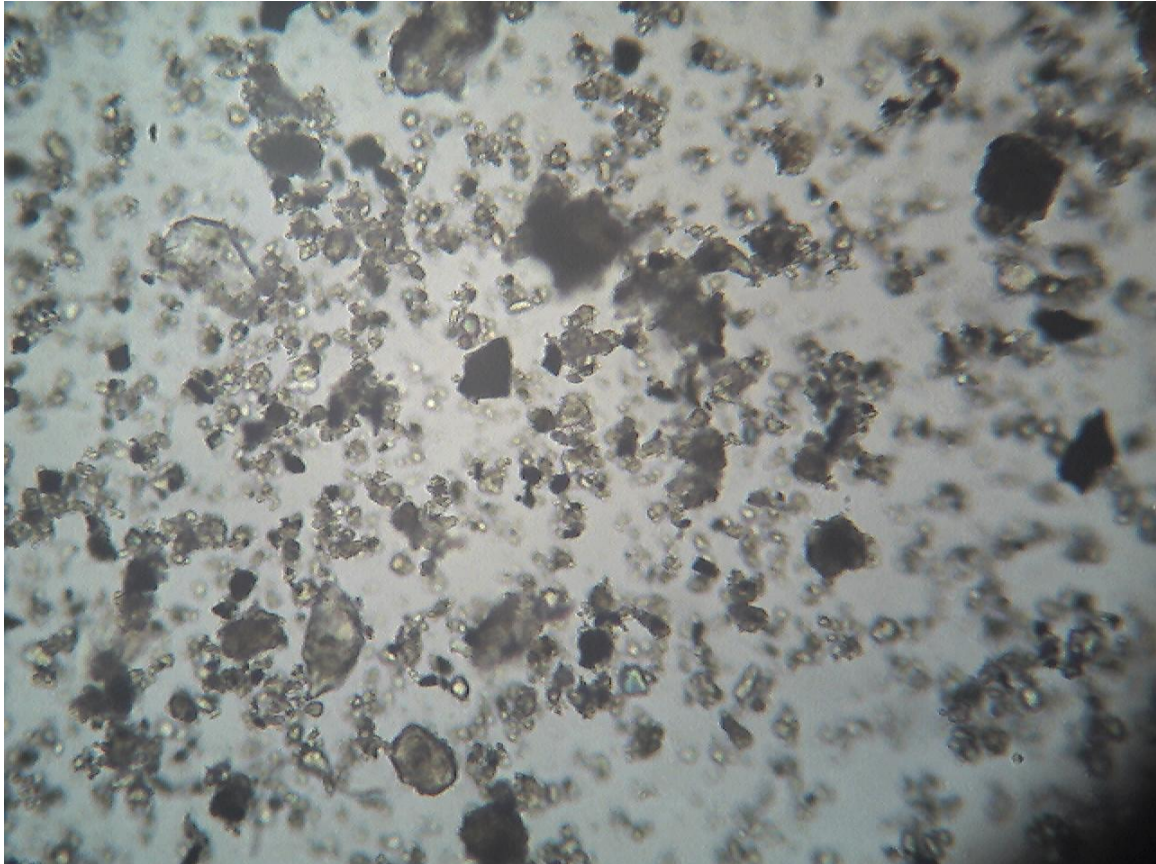


Figura 12 Microscopía óptica a 10 X. Fuente: Propia, 2021.

3.2.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Una muestra de la CBA fue tomada para poder ser analizada mediante un estudio de SEM (Scanning Electron Microscopy) microscopio electrónico de barrido. Sin embargo, la muestra de CBA mostró cierto nivel de humedad en su estructura por lo que se sometió a un proceso térmico para poder observar la morfología de la partícula a 5.00 KX; 10.00 KX y 20.00 KX (Figura 13 a, b y c respectivamente). Es posible observar que se presentan partículas aparentemente aglomeradas con tamaño menor de $1\mu m$ sin forma definida.

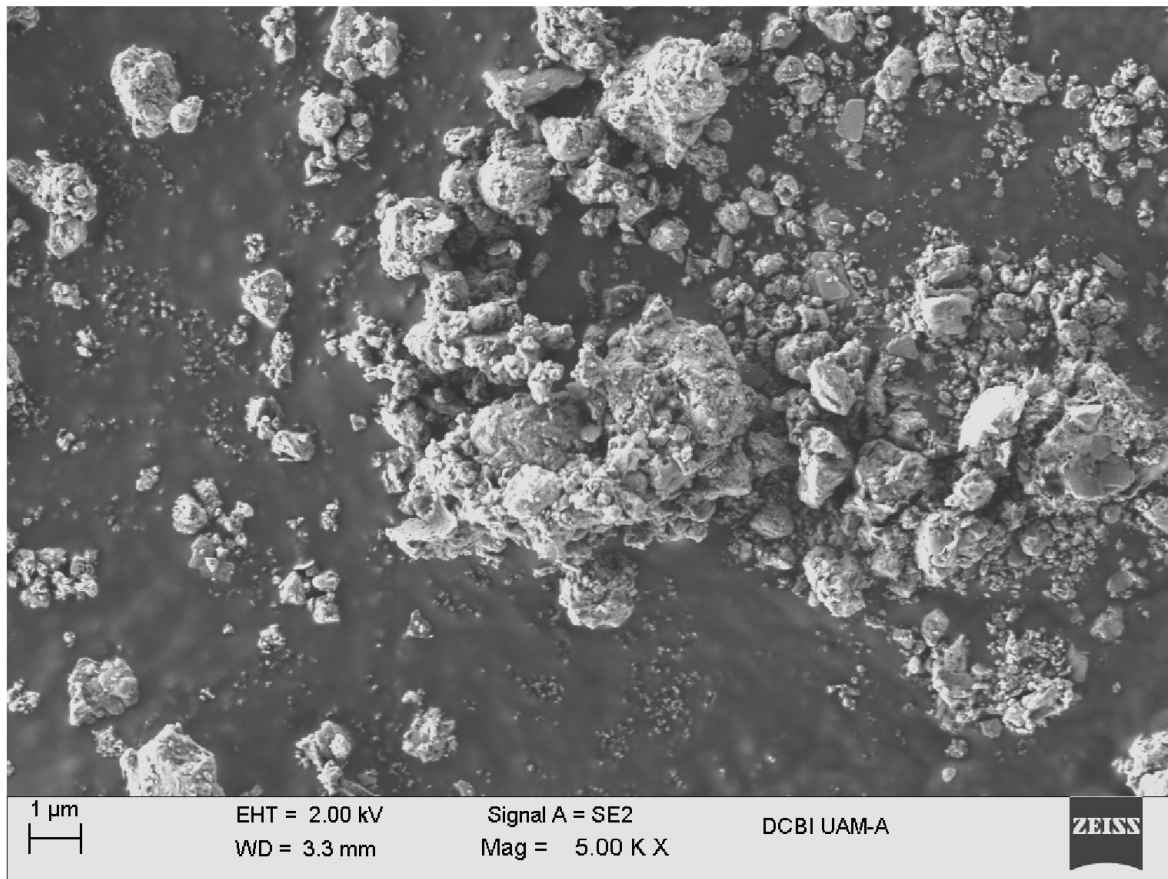


Figura 13 (a) SEM de CBA a 5.00 KX. Fuente: Laboratorio Divisional de Microscopía Electrónica de Barrido de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, 2022.

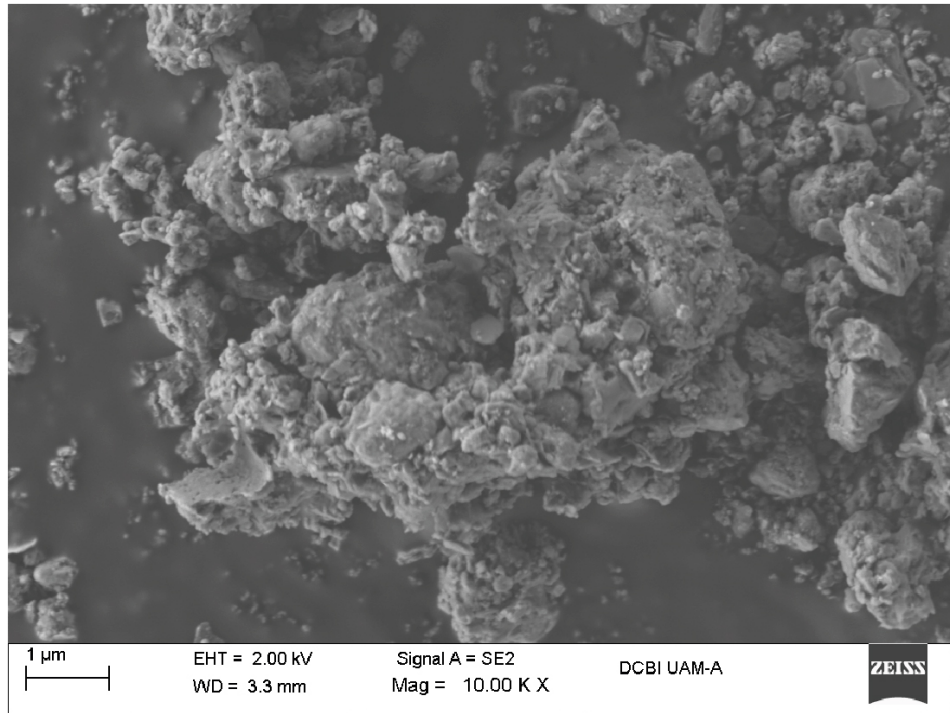


Figura 13 (b) SEM de CBA a 10.00 KX.

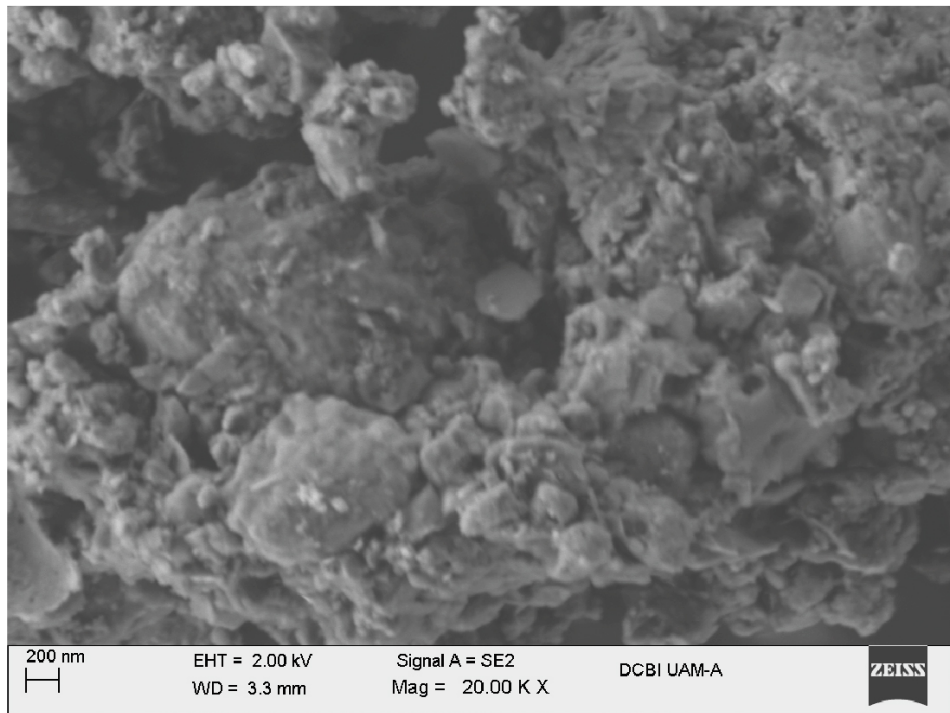


Figura 13 (c) SEM de CBA a 20.00 KX.

3.3. Diseño de mezcla

Para el diseño de mezcla de los cubos a ensayar se escogió la dosificación recomendada por la ACI 211.1. Para la proporción de la ceniza se reemplazó una parte porcentual del cemento, es decir, se disminuye una parte de CP y se sustituye la misma en CBA.

A continuación se muestra la Tabla 4, que se tomó como referencia para establecer la relación agua/cemento (a/c) de las pastas, esperando obtener resistencias similares a las que indica según la influencia de a/c. Además de que la investigación de Bustamante (2017) recomienda utilizar relaciones a/c entre los 0.45 y 0.70.

Tabla 4 Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia del cemento.

a/c	f'c (kg/cm ²)
0.36	420
0.40	370
0.45	340
0.50	295
0.55	275
0.60	230
0.65	220
0.70	185
0.75	165
0.80	140

Fuente: Guevara et al., 2012.

1 megapascal [MPa] = 10.197 kilogramo-fuerza/centímetro² [kg/cm²]

Para establecer los porcentajes de sustitución Rendón et al., 2021 mencionan que mezclas con sustitución del 30 % de ceniza volante por CP, no alcanzan resistencias a la compresión del orden alcanzado con mezclas con 100 % CP, es por ello que se decidió utilizar valores de sustitución por peso del 10 %, 20 % y 30 %.

Asimismo, para poder establecer la cantidad de mezcla para nueve especímenes por muestra, se calculó el volumen cúbico de los moldes que se utilizaron para realizar las probetas y se establecieron las cantidades que se muestran en las Tablas 5 y 6.

En la Tabla 5 se muestran las mezclas con relación a/c de 0.45, siendo la muestra 045CP100 la de referencia o patrón; la 045CBA10 con sustitución del 10 %; la 045CBA20 con sustitución del 20 % y la 045CBA30 con 30 % de CBA como sustituto de CP.

Tabla 5 Diseño de mezclas para las probetas con 0.45 a/c.

Muestra	Cemento (g)	CBA (g)	Agua (ml)	Arena (g)
045CP100	7310	0	3290	9700
45CBA10	6580	730	3290	9700
45CBA20	5850	1460	3290	9700
45CBA30	5110	2200	3290	9700

Fuente: Propia, 2021.

En la Tabla 6 se muestran las mezclas con relación a/c de 0.6, siendo la muestra 06CP100 la de referencia o patrón; la 06CBA10 con sustitución del 10 %; la 06CBA20 con sustitución del 20 % y la 06CBA30 con 30 % de CBA como sustituto de CP

Tabla 6 Diseño de mezclas para las probetas con 0.6 a/c.

Muestra	Cemento (g)	CBA (g)	Agua (ml)	Arena (gr)
06CP100	7310	0	4400	9700
06CBA10	6580	730	4400	9700
06CBA20	5850	1460	4400	9700
06CBA30	5110	2200	4400	9700

Fuente: Propia, 2021.

3.3.1. Elaboración de mezclas para probetas

Según la norma ASTM 109/C 109M-20B: Método de ensayo estándar para resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 2 in o [50-mm]. El método que se empleó para realizar la mezcla del concreto con CBA, agua y agregados fue manual para cada uno de los especímenes que se elaboraron, esto con la finalidad de no modificar los resultados finales, así todas las probetas fueron elaboradas de la misma manera. Los primeros materiales en agregarse a la mezcla fueron el CP, la CBA y poco a poco el agua, posteriormente se integró la arena. El proceso de mezclado se realizó durante un tiempo de 10 min, hasta que todos los materiales estuvieron completamente integrados.



(a) Cemento Portland, CBA, (b) Elaboración manual de (c) Moldes de acero armados y agregados y agua. mezcla. engrasados.

Figura 14 Elaboración de mezclas para probetas. Fuente: Propia, 2021.

Para realizar el vaciado según la norma ASTM 109/C 109M-20B se tomaron los moldes de acero previamente armados y engrasados y se colocaron en el lugar donde iba a fraguar la mezcla, se llenó aproximadamente a la mitad y se le realizó el apisonado con un total del 25 golpes, con el fin de evitar burbujas de aire dentro de los especímenes, por último se rellenó por completo y se le hicieron otros 25 golpes finales a cada uno, Una vez terminado el apisonado, el mortero se extendió ligeramente con un enrasador sobre el molde en forma de cubos. Todo este proceso se observa en las Figuras 14 y 15.



(a) Vaciado de la mezcla 06CBA30. (b) Moldes de acero colocados para su fraguado. (c) Consistencia de la mezcla 06CBA30.

Figura 15 Vaciado de mezclas para probetas. Fuente: Propia, 2021.



(a) Desmolde de las probetas 06CBA30. (b) Desmolde de las probetas 06CBA30. (c) Molde desarmado y probetas desmoladas.

Figura 16 Desmolde de probetas. Fuente: Propia, 2021.

3.3.2. Fraguado de probetas

Según la norma ASTM 109/C 109M-20B: Práctica Estándar para Elaboración y Curado en el Laboratorio de Especímenes de mortero para Ensayo.

Luego de pasadas 24 horas, cada espécimen fue retirado del molde para posteriormente ser depositado en un contenedor con agua y cal y así poder fraguarse durante 28, 56 y 92 días, como se observa en las Figuras 16 y 17.



(a) Probetas 06CBA30 y patrón desmoldadas. (b) Probetas 06CBA30 y patrón sumergidas.

Figura 17 Probetas desmoldadas y sumergidas dentro de un contenedor con agua y cal.
Fuente: Propia, 2021.

3.4. Evaluación en estado endurecido

3.4.1. Pruebas de resistencia a compresión

Los ensayos de resistencia a la compresión en morteros se realizarán según a ASTM 109/C 109M-20B: Método Normalizado de Ensayo de Resistencia a Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Utilizando Especímenes Cúbicos de 2 in o [50-mm]).

Para realizar esta prueba se utilizó la máquina de compresión automática marca PILOT COMPACT-Line de 1500 kN como se puede observar en la Figura 18.



(a) Colocación de la probeta.

(b) Probeta 06CBA30.

Figura 18 Pruebas de resistencia a compresión. Fuente: Propia, 2021.

Capítulo 4

Resultados y discusiones

4.1. Análisis de las pruebas Físicas

4.1.1. Densidad y absorción

La densidad es una propiedad de los materiales utilizada para poder establecer el diseño de mezcla, la CBA presentó una densidad de 2.0 gr/cm^3 , mientras que la densidad del cemento es de 3.01 gr/cm^3 , consistentes con lo que indican González et al., (2014) en la absorción obtenida por las muestras de ceniza de bagazo de agave calcinadas a diferentes temperaturas, obteniendo que la de menor densidad era la calcinada a 500° de 2.64 gr/cm^3 y la de mayor densidad fue la calcinada a 600° de 2.70 gr/cm^3 .

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos de la prueba de absorción.

Tabla 7 Resultados obtenidos por la prueba de absorción.

Muestra	CBA (gr)	Agua (ml)	Final
01CBA	2.0	5.8	6.8
02CBA	2.0	6.0	7.0
03CBA	2.0	6.0	6.9

Fuente: Propia, 2021.

Los valores de absorción son usados para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de poro en el interior de las partículas constituyentes, comparado con la condición seca, cuando se considera que el agregado ha estado en contacto con agua por un período suficiente para poder satisfacer la absorción potencial (ASTM C 128-07a).

De acuerdo con los resultados obtenidos es posible observar que la masa final no tiene un incremento considerable que indique que la CBA absorba agua, por lo tanto se establece que para fines del diseño de mezcla la absorción obtenida es cero. Cabe mencionar que la

absorción es importante en los diseños de mezclas para controlar la cantidad de agua que se le deberá adicionar al CP con el fin de lograr las resistencias deseadas.

4.1.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En la Figura 19 (a) se observa la morfología de la ceniza volante que tiene partículas con formas esféricas y ayudan a la trabajabilidad de los concretos, por otro lado la Figura 19 (b) muestra la morfología que tiene la CBA que en general se observan partículas aglomeradas sin forma definida, con un tamaño menor a $1 \mu m$, lo cual es consistente con los resultados de González et al., (2014) que se muestran en la Figura 19 (c), se observa un SEM de ceniza de bagazo de agave calcinada a $600 \text{ }^\circ\text{C}$ y se aprecia que el tamaño de partícula aparente en promedio está entre 25 y $32 \mu m$ para todas las temperaturas de incineración. Sin embargo, al observar en el microscopio electrónico de barrido, los aglomerados se encuentran formados por partículas tan pequeñas como 300 nm y la desintegración de las partículas más grandes depende de la temperatura. Lo cual podría explicar la morfología aglomerada de la CBA de este estudio.

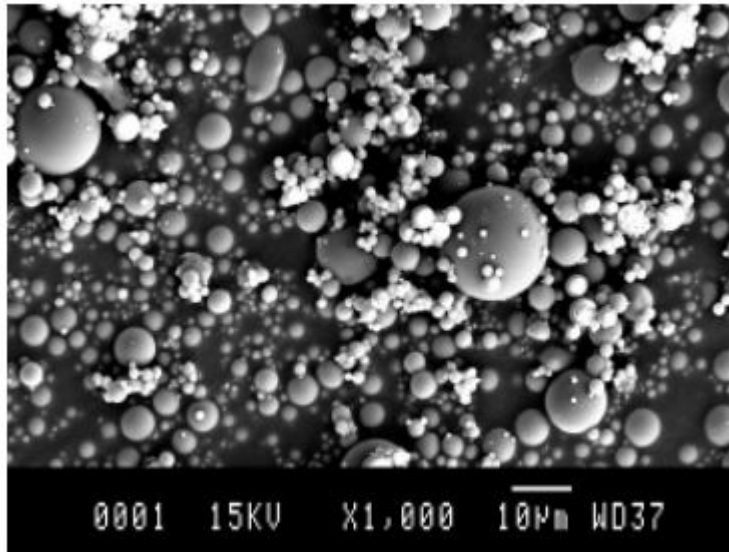


Figura 19 (a) SEM de ceniza volante a 1000X .Fuente: Muñoz, 2012.

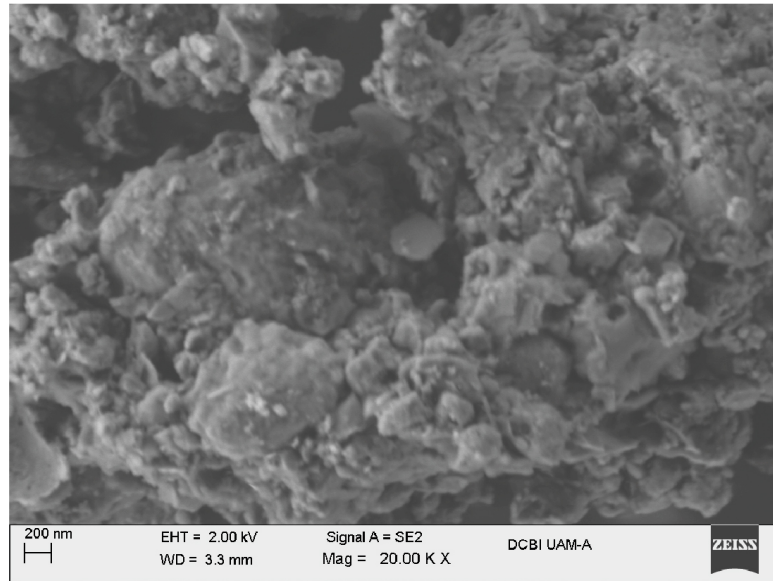


Figura 19 (b) SEM a 10 00 kX de CBA. Fuente: UAM, 2022.

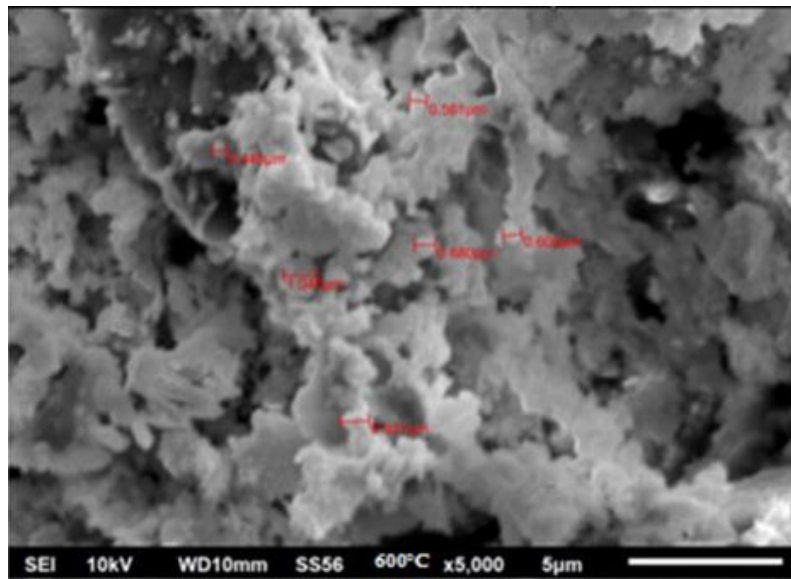


Figura 19 (c) SEM de bagazo de agave incinerada a 600°C a 5.00 KX. Fuente: González et al., 2014.

4.2. Análisis de la prueba mecánica

4.2.1. Resistencia a compresión

Es importante mencionar que la reacción puzolánica de la ceniza se desarrolla durante las fases hidratadas de cemento y según la investigación de García (2010) desde los primeros 10 minutos de hidratación, ya comienzan a aparecer geles alrededor de los granos de cemento no hidratado, junto con fibras largas de CSH. Aproximadamente a la hora, el gel adquiere un espesor considerable. Entre las 2 a 6 horas se contempla la aparición de una cierta cohesión en la pasta. Los productos que se forman fuera de la frontera original del grano se denominan productos externos, mientras que los que se forman dentro de la misma son los llamados productos internos. Durante las 6 a 10 horas iniciales, la reacción del óxido de calcio (C_3S) genera productos externos CSH. A las 24 horas, el óxido de calcio (C_3S) sigue reaccionando y generando productos internos, en este período la mayoría de los granos pequeños del cemento ya se han hidratado completamente. Después de 2 días el espacio ocupado originalmente por el agua es ocupado por los productos de la hidratación. Los productos externos se vuelven fibrosos y más densos. Sin embargo la ceniza sigue reaccionando incluso hasta después de los 90 días de hidratación, como lo demuestra Ríos et al. (2017), en su investigación con cenizas de caña de azúcar, es por ello que las probetas se quedaron almacenadas en un recipiente con agua hasta que cada espécimen fue ensayado a edades de 28, 56 y 92 días.

A continuación se muestra la Tabla 8 y la Figura 20 con los resultados de resistencia a compresión obtenidos de las probetas con relación a/c de 0.6 en donde se utilizaron los valores promedio de todas las probetas ensayadas a los 28, 56 y 92 días respectivamente.

Tabla 8 Resultados de resistencia a compresión en mezclas para las probetas con 0.6 a/c

	06CP100 (MPa)	06CBA10 (MPa)	06CBA20 (MPa)	06CBA30 (MPa)
28 días	18.23	16.86	15.86	10.52
56 días	19.17	18.03	18.29	12.93
92 días	21.78	20.35	19.71	14.95

Fuente: Propia, 2021.

En la Tabla 8 es posible observar que las cuatro muestras tuvieron un incremento de resistencia durante las 3 edades. Las probetas patrón, es decir, sin sustitución de CP por CBA, mostraron las resistencias más altas en las 3 edades, sin embargo, su incremento de resistencia de los 28 días a los 92 fue tan sólo del 19.5 %, a diferencia de los especímenes con sustitución, que a pesar de obtener bajas resistencias finales tuvieron un incremento de hasta el 42.11 %. Así mismo, es posible discutir que sustituir un 10 % de CP por CBA no implica una pérdida considerable de la resistencia a compresión, ya que a los 92 días la muestra patrón (06CP100) alcanzó una resistencia de 21.78 MPa y la muestra 06CBA10 alcanzó una resistencia de 30.35 MPa, no obstante se están generando morteros que disminuyen el consumo de CP y valorizan un desecho agroindustrial sin tener una pérdida de resistencia considerable, además, tomando en cuenta que por cada tonelada de CP se sustituyen 100 kg de CBA, lo que implica un ahorro económico.

En la Figura 20 se observan las curvas de evolución de resistencia a compresión de cada uno de los especímenes ensayados y se puede apreciar el comportamiento de los especímenes 06CBA30 (con un 30 % de sustitución de CP por CBA), los cuales obtuvieron las resistencias más bajas, sin embargo fueron éstas probetas las que tuvieron un mayor incremento de resistencia a edades de 92 días. Esto se debe a que el concreto de CP que incorpora materiales puzolánicos desarrolla excelentes propiedades mecánicas y a largo plazo durabilidad al reducir la permeabilidad y la difusión de humedad y especies agresivas a la interfaz de concreto de acero (Cook, 1986).

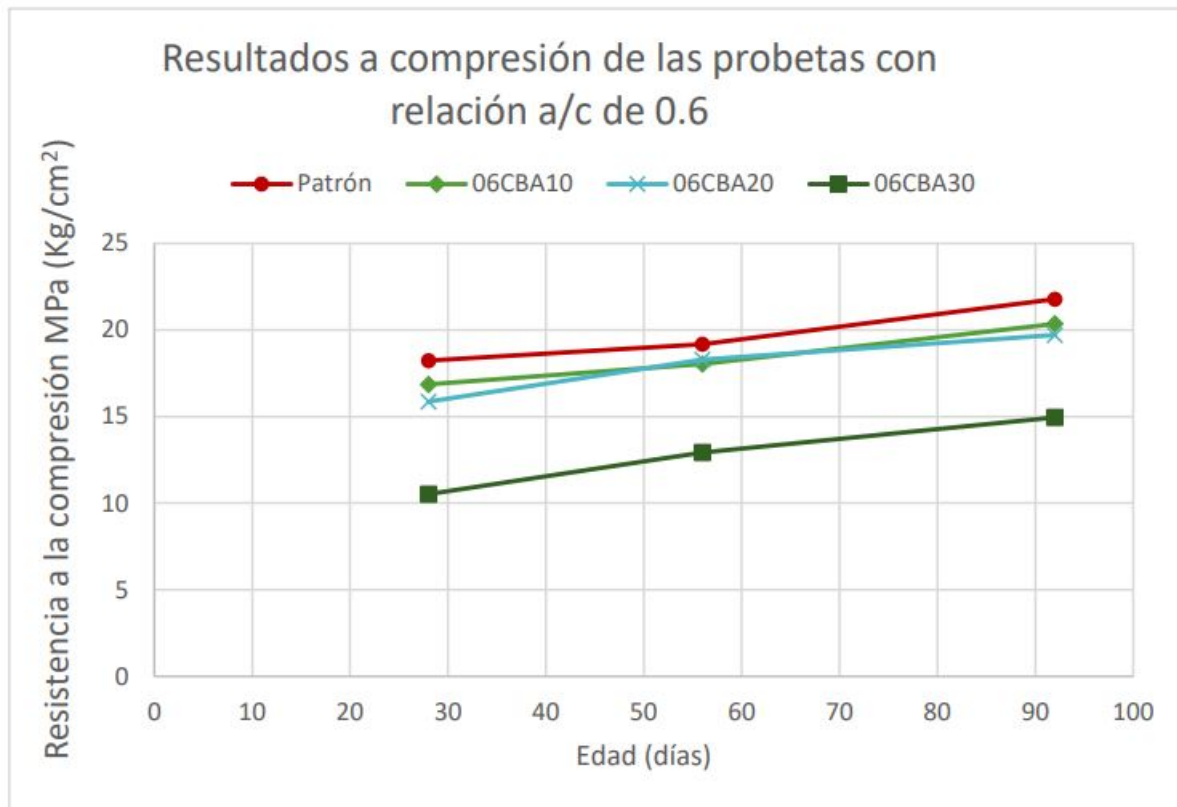


Figura 20 Resultados de resistencia a compresión de las probetas con 0.6 a/c. Fuente: Propia, 2022.

Con estos resultados es posible obtener la pendiente de cada una de estas rectas y de esta forma sería posible obtener la misma resistencia a compresión de la muestra patrón y la muestra 06CBA30 a la edad de dos años, siendo de 57.19 MPa y 59.1 MPa respectivamente, en el caso que la CBA siga reaccionando a edades tan avanzadas. Tal es el caso de estudio de Valencia et al., (2021) en donde evaluaron las propiedades mecánicas de concretos con altas cantidades de ceniza volante y demostró la viabilidad de obtener materiales con resistencias a la compresión a 28 días de hasta 46 MPa, que incrementan hasta 92.75 MPa al cabo de 4 años.

Finalmente, es posible observar que tanto las sustituciones; del 10% y 20% alcanzaron resistencias de 20.35 MPa y 19.71 MPa respectivamente a los 92 días, sobrepasando los valores de resistencia de la mezcla patrón ensayada a los 28 días, que obtuvo una resistencia de tan solo 18.23 MPa. Lo cual, permite valorar en ciertos casos la pertinencia de la utilización

de éstas mezclas considerando el aprovechamiento de un residuo y el ahorro económico que demostraron.

A continuación se encuentra la Tabla 9 y la Figura 21 que muestran los resultados de resistencia a compresión obtenidos de las probetas con las mezclas de relación a/c de 0.45 en donde se utilizan los valores promedio de las 3 probetas ensayadas cada 28, 56 y 92 días.

Guevara et al., (2012) hacen énfasis en que la importancia del agua resulta de gran magnitud, ya que ella y su relación con el cemento están altamente ligados a una gran cantidad de propiedades del material final que se obtendrá, en donde usualmente conforme más agua se adicione, aumenta la fluidez de la mezcla y, por lo tanto, su trabajabilidad y plasticidad, lo cual presenta buenos beneficios para la mano de obra; no obstante, también disminuye la resistencia debido al mayor volumen de espacios creados por el agua libre.

Tabla 9 Resultados de resistencia a compresión en mezclas para las probetas con 0.45 a/c.

	045CP100 (MPa)	045CBA10 (MPa)	045CBA20 (MPa)	045CBA30 (MPa)
28 días	27.8	22.92	20.16	17.55
56 días	28.41	25.22	20.34	19.40
92 días	31.44	25.40	23.83	19.74

Fuente: Propia, 2021.

Lo que se puede observar con los resultados de la Tabla 8 es el considerable incremento de resistencia en las cuatro mezclas comparadas con los resultados de las probetas con relación a/c= 0.6. Las probetas patrón, es decir, sin sustitución de CP por CBA, mostraron las resistencias más altas en las 3 edades, sin embargo, su incremento de resistencia de los 28 días a los 92 fue tan sólo del 19.5%, a diferencia de los especímenes con sustitución, que a pesar de obtener bajas resistencias finales tuvieron un incremento de hasta el 42.11%. Así

mismo es posible discutir que al sustituir un 10 %, 20 % y 30 % en relaciones a/c de 0.45, se obtienen resistencias para morteros de tipo I que requiere una resistencia promedio mínima de 18 MPa, recomendado para mampostería con o sin refuerzo, donde se requiera resistir altas cargas de compresión, haciéndolo útil para elementos enterrados como cimentaciones, y además el ahorro económico y sustentable puede ser significativo cuando se realizan obras con grandes volúmenes de mortero, tomando en cuenta que por cada tonelada de CP se sustituyen 100, 200 y hasta 300 kg por CBA.

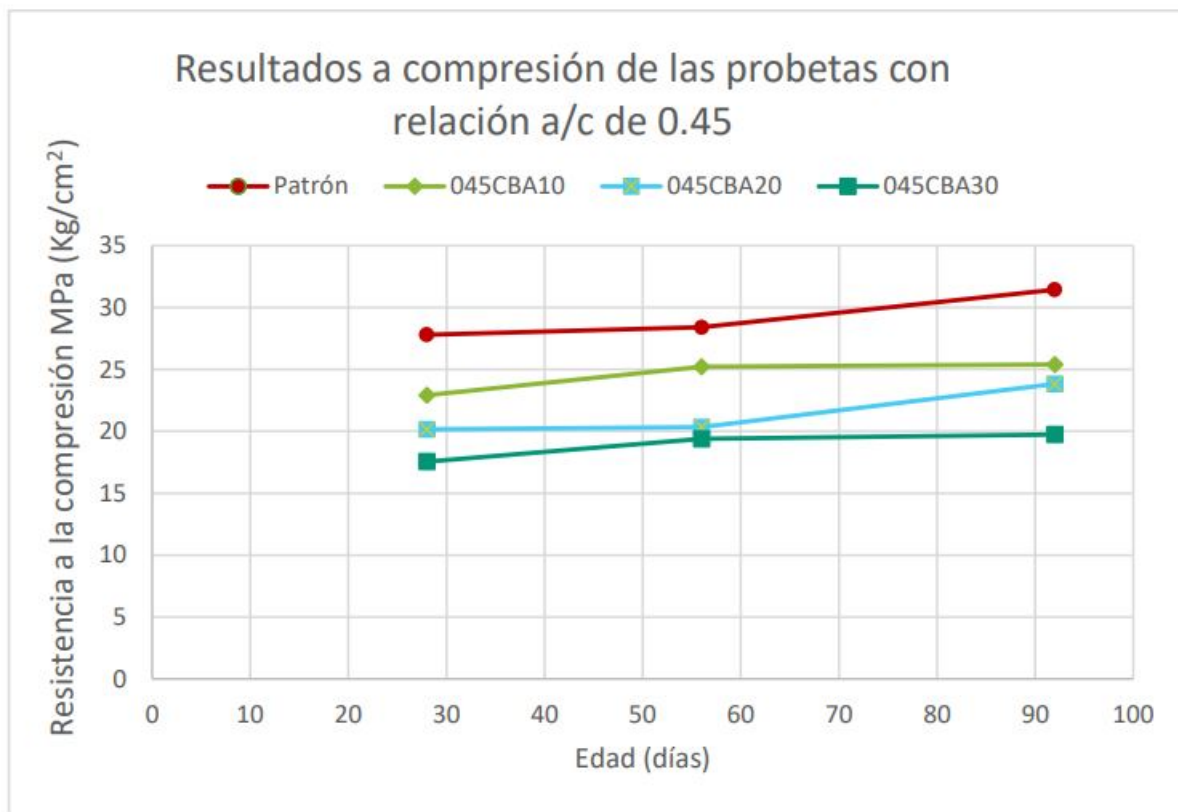


Figura 21 Gráfica de resultados de resistencia a compresión en probetas con relación a/c de 0.45. Fuente: Propia, 2022.

En la Figura 21 se observa claramente el incremento de resistencia de los especímenes 045CBA20 (con un 20 % de sustitución de CP por CBA) siendo el más alto de las cuatro mezclas con un incremento del 18.20 % en comparación con la mezcla 06CBA10 (con un 10 % de sustitución de CP por CBA) de menor incremento con tan solo el 10.82 % que fue incluso menor con la muestra patrón que tuvo un incremento del 13.09 %. Hay que recordar

que la reacción puzolánica requiere de agua y tiempo para poder llevarse a cabo y que conforme bajamos la relación a/c las resistencias de nuestros concretos se incrementan con la consecuente disminución de la porosidad (Guevara et al., 2012).

Por su parte, las mezclas con relación a/c= 0.6 y sustitución de CP por CBA presentaron altos porcentajes en el incremento de su resistencia comparadas con el incremento que presentaron las mezclas de referencia (patrón), lo cual nos permite inferir que en estas se llevó a cabo de manera más eficiente el curado y de manera indirecta la reacción puzolánica, sin embargo, no fue suficiente para compensar la pérdida en la resistencia debida a la disminución de cemento. Finalmente, a pesar de que ninguna mezcla con sustitución logró alcanzar las resistencias de la mezcla patrón es importante mencionar que todas alcanzaron resistencias para ser consideradas como concreto estructural de acuerdo a la norma ACI 318.

Como se muestra en la Figura 22, los resultados de resistencia a compresión de las probetas con relación de 0.45 a/c superaron las resistencias de las probetas patrón con relación a/c= 0.6 por lo tanto, se puede inferir que es posible sustituir hasta un 20% de CBA y obtener los mismos resultados de la mezcla patrón con relación a/c= 0.6 usando una menor cantidad de CP en la mezcla. Por otra parte, la investigación realizada por Jarre Castro et al. (2017) demostraron la factibilidad económica, social y ambiental de introducir el uso de la puzolana natural como sustituto parcial de más de un 35% de CP en la elaboración de concretos, con posibilidades de reducir los impactos ambientales derivados de la industria de la construcción.

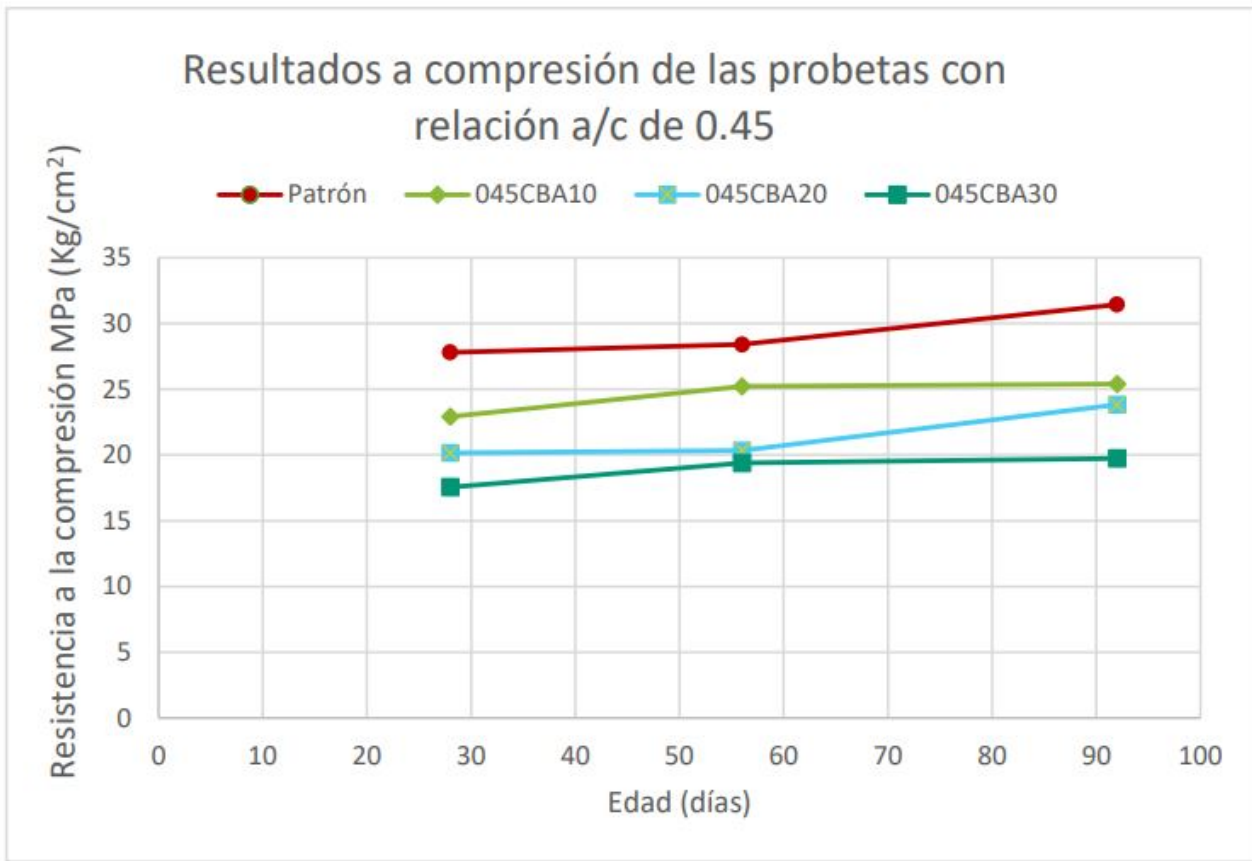


Figura 22 Gráfica de resultados de resistencia a compresión en probetas con a/c= 0.45 comparadas con la patrón de a/c=0.6 . Fuente: Propia, 2022.

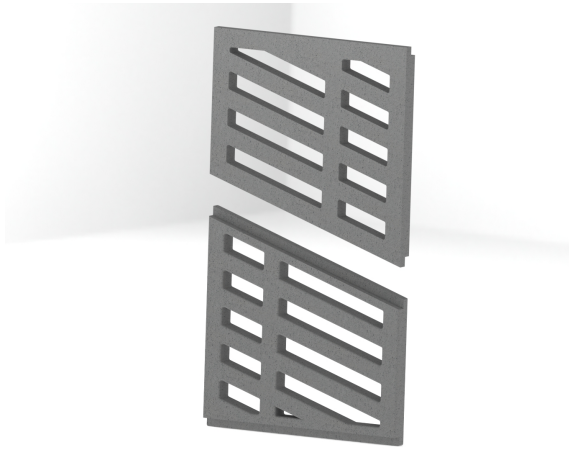
Propuesta de aplicación

Al demostrar un buen comportamiento en el incremento de resistencia a compresión, las mezclas de mortero con sustitución de CP por CBA resultan una alternativa viable en la industria de la construcción en diversas aplicaciones de uso general.

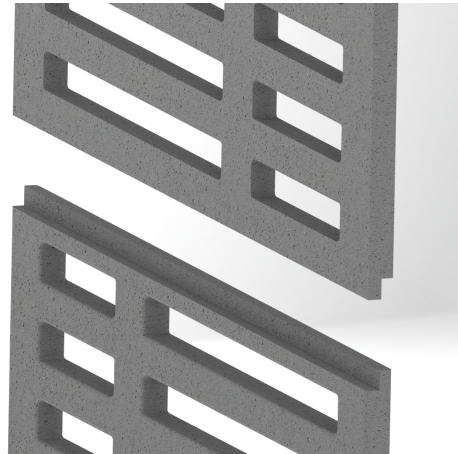
Las mezclas con relación a/c de 0.45 y sustitución del 10 %, 20 % y 30 % pueden ser aplicadas como concreto estructural, como se menciona en la Tabla 1, recomendado para mampostería con o sin refuerzo, donde se requiera resistir altas cargas de compresión, haciéndolo útil para elementos enterrados como cimentaciones. Por otro lado las mezclas con relación a/c de 0.6 y sustitución del 10 % y 20 % pueden ser utilizadas en aplicaciones como; aplanados, entortados así como en el pegado de bloques de cemento y tabicones. Del mismo modo puede ser usado en pisos, firmes, banquetas y guarniciones, esto debido a las resistencias a compresión que obtuvieron a edades de 92 días.

La mezcla con mejores resultados de resistencia a compresión y mayor porcentaje de sustitución resultó ser la 045CBA20 con un 20 % de sustitución y relación a/c= 0.45, alcanzando una resistencia final de 23 MPa con la cual se pueden realizar la mayoría de aplicaciones anteriormente mencionadas y gracias a la puzolana presente en la CBA es recomendable que este tipo de mezclas sean utilizadas en exteriores ya que de esta forma se incrementa la posibilidad de reaccionar e incrementar la resistencia de la misma.

Por lo tanto una aplicación específica que se propone es su utilización para prefabricados en molduras y otros elementos ornamentales, un ejemplo se observa en las Figuras 23, 24 y 25, es un panel prefabricado que se compone de dos módulos y su aplicación está recomendada para espacios semi-abiertos.



(a) Pieza Base 1 y Base 2 unidas.



(b) Unión de piezas.

Figura 23 Módulo de piezas. Fuente: Propia, 2022.



Figura 24 Render. Fuente: Propia, 2022.



Figura 25 Render. Fuente: Propia, 2022.

Conclusiones

Con base en el análisis y discusión de resultados obtenidos en este trabajo de investigación donde se fabricaron pastas de morteros a base de CBA como sustituto parcial de CP, se concluye que:

La capacidad de absorción de la CBA utilizada para este estudio es de el 0 %, es, decir, no absorbe agua y presentó una densidad de 2.0 gr/cm³.

Las diferentes mezclas de mortero con sustitución de CP por CBA demostraron un buen comportamiento en el incremento de resistencia a compresión para fines de construcción por lo que su aplicación en el diseño resulta favorable como una alternativa viable que sustituye el uso de cemento Portland por un residuo agroindustrial (Cenizas de Bgazo de Agave).

Es posible apreciar el comportamiento de la puzolana contenida en las mezclas 06CBA20 (con relación a/c de 0.6 y sustitución de CP por CBA del 20 %) y la 06CBA10 (con relación a/c de 0.6 y sustitución de CP por CBA del 10 %) ya que sobrepasan la resistencia a compresión a la mezcla patrón ensayada a 28 días cuando éstas cumplieron los 92 días.

En las relaciones de $a/c = 0.45$ todas las mezclas con sustitución de CP por CBA alcanzaron resistencias en la categoría de concreto estructural de acuerdo a la norma ACI 318.

Finalmente se concluye que, sustituir el 20 % de CP por CBA con mezclas de relaciones a/c de 0.45 muestran buenos resultados en cuanto a resistencia, ahorro económico y la disminución de CP utilizado para la industria de la construcción. Lo cual, permite valorar en ciertos casos la pertinencia de la utilización de estas mezclas considerando el ahorro económico y sustentable que demostraron.

Trabajo a futuro

Como parte de las interrogantes que surgieron a lo largo de la realización del presente trabajo se recomienda que para investigaciones futuras se tomen en cuenta los siguiente parámetros:

Realizar un estudio de fluidez en morteros con el fin de establecer su comportamiento reológico.

Realizar un tratamiento térmico o mecánico a la CBA para observar si esto favorece la reacción puzolánica como se ha observado en otras puzolanas.

Para poder observar la existencia de compuestos presentes en la ceniza se recomienda realizar un estudio de espectroscopia de energía dispersa (EDS), haciendo mayor énfasis en los elementos como: cal (CaO), óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y sus fases hidratadas.

Se recomienda dejar estos especímenes bajo un fraguado de edades superiores a un año para evaluar el incremento de resistencia y por lo tanto la reacción de la puzolana con el cemento Portland.

Este estudio fue realizado en morteros pero se espera que su comportamiento sea extrapolable en concretos ya que el tamaño del agregado no interfiere con la reacción puzolánica y la ganancia de resistencia, por lo cual los siguientes trabajos podrían tomarlo como base y utilizar los resultados en mezclas de concretos.

Referencias

- ✓ Águila I. y Sosa M. (2008). Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 23(4), 55-66. Recuperado en 24 de noviembre de 2021,
- ✓ Balasubramanian S.V. y Ratnavelu K.N., (2001). Budget performance of sugar industry: 2000–2001. In: Proceeding of South India sugar mills association, India.
- ✓ Barrios Trejo, B. A., Castro Cruz, Y. S., y Daza Novoa, H. L. (2018). Elaboración de bloques de mampostería mediante el uso de mortero, adicionado con ceniza del cuesco y de fibra de palma africana en el departamento del meta. Tesis para obtener el título como Ingeniero Civil de la Universidad cooperativa de colombia facultad de ingeniería. repository.ucc.edu.co.
- ✓ Bautista, J. y A. Mascha (2012) "Sustentabilidad y agricultura en la región del mezcal de Oaxaca Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol. 3, núm. 1, enero-febrero 2012. pp. 5-20.
- ✓ Bustamante, I. G. (2017). Estudio de la correlación entre la relación agua/cemento y la permeabilidad al agua de concretos usuales en Perú. Pontificia universidad catolica del peru facultad de ciencias e ingeniería.
- ✓ Cedeño, C. (1995). Tequila production. Critical Reviews in Biotechnology, Pág. 1-11. Vol. 3.
- ✓ Chávez Guerrero L., Flores J. y Kharissov B.I. (2010), Recycling of ash from mezcal industry: A renewable source of lime, Chemosphere, Volume 81, Issue 5.
- ✓ Chulim Tec, D. Y., Yeladaqui Tello, A., y Trejo Arroyo, D. L. (2019). Propiedades físico-mecánicas del concreto con sustitución parcial de ceniza de bagazo de caña de azúcar. Núm.2, Vol.VII, Julio-Diciembre 2019, Edición Especial, pp. 87-93

- ✓ Cook, J.D. (1986), “Rice husk ash”, in Swamy, R.N. (Ed.), *Cement Replacement Materials, Concrete Technologies and Design*, Vol. 3, Surrey University Press, London, pp. 171-86.
- ✓ Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., y Fairbairn, E. D. M. R. (2010). Ultrafine sugar cane bagasse ash: high potential pozzolanic material for tropical countries. *Revista IBRACON de estruturas e materiais*, 3(1), 50-67.
- ✓ CRM (2020). *Informe Estadístico*, Oaxaca, México: Consejo Regulador del Mezcal.
- ✓ Davidovits, J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World resource review*, 6(2), 263-278
- ✓ Escalante García, J. I. (2002). *Materiales alternativos al cemento pórtland. Avance y perspectiva*, Article 000190008.
- ✓ Ganesan, K., Rajagopal, K., y Thangavel, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as corrosion resisting admixture for carbon steel in concrete. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 54(4), 230–236. doi:10.1108/00035590710762375
- ✓ García Guillén, G. (2011). “Estudio del proceso de hidratación de pastas de cemento portland reemplazadas con escoria granulada de alto horno, ceniza volante y metacaolín, utilizando dos aditivos superplastificantes.” Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León . <http://eprints.uanl.mx/2416/1/1080221573.pdf>
- ✓ Giraldo Escandón, C. E., Vidal Velasco, D. V., Martínez López, C., y Torres Agredo, J. (2012). Ceniza de bagazo de caña como aditivo al cemento Portland para la fabricación de elementos de construcción. *Acta Agronómica*, 61(5), 77–78.
- ✓ González López J.R., Ramos Lara J.F., Zaldivar Cadena A., Chávez Guerrero L., Magallanes Rivera R.X. y Burciaga Díaz O. (2014). Small addition effect of agave biomass ashes in cement mortars.
- ✓ Guevara, G; Hidalgo, C; Pizarro, M; Rodríguez, I; Rojas, L y Segura, G. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en Marcha*. Vol. 25, N° 2. Abril-Junio 2012. Pág 80-86.

- ✓ Gutiérrez de López, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. Universidad Nacional de Colombia.
- ✓ Gutiérrez, L. M. (1989). Estudio en el sistema de la reacción puzolana natural Ca (OH)₂ en presencia de agua. Tesis de maestría, universidad autónoma de Nuevo León facultad de ciencias químicas.
- ✓ Habert G., y Zürich, E. (2013). Environmental impact of Portland cement production. www.sciencedirect.com. <https://doi.org/10.1533/9780857098993.1.3>
- ✓ Hendriks, C. A. et al. (1998). Emission reduction of greenhouse gasses from the cement industry. Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Interlaken, August 30-September 2, 1998.
- ✓ Hernandez, J.M., Middendorf, B. and Gehrke, M. et al., (1998), "Use of wastes of the sugar industry as Pozzolana in lime-Pozzolana binders: study of the reaction", Cement and Concrete Research, Vol. 28 No. 11, pp. 1525-36.
- ✓ Hernandez, J.M., Betancourt-Rodriguez, S. and Middendorf, B. et al., (2000), "Pozzolanic properties of residues of sugar industries (first part)", Materiales de Construccion, Vol. 50 No. 260, pp. 71-8.
- ✓ Hernandez, J.M., Betancourt-Rodriguez, S. and Middendorf, B. et al., (2001), "Pozzolanic properties of residues of sugar industries (second part)", Materiales de Construccion, Vol. 51 No. 261, pp. 67-72.
- ✓ IEA 2007. Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions. international Energy Agency: Paris.
- ✓ Jarre Castro C. M., Howland Albear J. J., Guerrero Alcivar M. S., Brito S. (2017). Impacto de la utilización de puzolanas naturales ecuatorianas. Volumen 2. número 1. art. 1
- ✓ Jarrige M.A. (1956). Los empleos de las cenizas volantes en construcción. 2020, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

- ✓ Jolicoeur, C., y Simard, M.-A. (1998). Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts. *Cement and Concrete Composites*, 20(2-3), 87–101. doi:10.1016/s0958-9465(97)00062-0.
- ✓ Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004.
- ✓ Lanza Fernandes, V. D. (2012). Estudio de la reactividad alcalí-sílice originada por componentes reactivos minoritarios. Tesis de doctorado. Universidad Politecnica de Madrid.
- ✓ Lea, F.M., *The Chemistry of Cement and Concrete*, 3^a ed., Arnold, London, 1970, p 4 14.
- ✓ Malhotra V.M. y P.K. Mehta (2005), *High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportions, Properties, Construction Practice, and Case Histories*. 2nd ed. 2005, Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc.
- ✓ Matthey, P.; Robayo Salazar Rafael; Diaz, Jherson Eveiro; Delvasto Silvio y Monzo, J.. (2015). Aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agroindustrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 35. 285-294.
- ✓ Maza-Ignacio, O. T., Jiménez-Quero, V. G., Guerrero-Paz, J., y Montes-García, P. (2020). Recycling untreated sugarcane bagasse ash and industrial wastes for the preparation of resistant, lightweight and ecological fired bricks. *Construction and Building Materials*, 234, 117314. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117314
- ✓ Mejía García, M. A.; Chinchilla Rivera, V. P. y Mendoza Barrios, C. M. (s. f.). Determinación de la resistencia a la compresión de mortero empleando especímenes cilíndricos y cúbicos, utilizando arena del occidente del país Tesis para optar al grado de Ingeniero civil. Universidad de el salvador facultad multidisciplinaria de occidente ingeniería y arquitectura.

- ✓ Monteagudo Viera, S. M. (2014). “Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de los cementos con adiciones”. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Madrid.
- ✓ Muñoz Lucas, M. I. (2012). Caracterización y acondicionamiento de cenizas volantes para la eliminación de metales pesados en aguas contaminadas. <https://buleria.unileon.es>.
- ✓ Nasvik, J. (2006). El ABC del concreto autocompactable. México. Construcción y Tecnología. IMCYC, México. Marzo 2006, 50-55
- ✓ Núñez H. M., Rodríguez L. F. y Khanna M. , (2011). “Agave for tequila and biofuels: an economic assessment and potential opportunities,” *Global Change Biology Bioenergy*, vol. 3, pp. 43-57.
- ✓ Olague Caballero, C., Wenglas Lara, G., y Astorga Bustillos, F. (2011). Adiciones minerales como atenuantes de la reacción álcali sílice en estructuras de concreto hidráulico.
- ✓ Ospina Pérez, E. F., y Molina Calderón, Y. P. (2018). Influencia del contenido de ceniza de bagazo de caña de azúcar en las propiedades mecánicas de flexión y compresión de un material compuesto por cemento portland, puzolana y arena.
- ✓ Palma Felipe, Pérez Pilar Y Vinicio Meza. (2016). Diagnóstico de la Cadena de Valor Mezcal en las Regiones de Oaxaca. 2020, de COPLAD.
- ✓ Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Tashima, M. M., y Soriano, L. (2018). Bagasse ash. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, 559–598. doi:10.1016/b978-0-08-102156-9.00017-1
- ✓ Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Serna, P., Velázquez, S., Ordóñez, L.M. (2002). El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas. VIII Congreso nacional de propiedades mecánicas de sólido. Gandia, 591-600
- ✓ Ríos-Parada, V., Jiménez-Quero, V. G., Valdez-Tamez, P. L., y Montes-García, P. (2017). Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. *Construction and Building Materials*, 157, 83–95. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09

- ✓ Robayo R. y Vasto S., (2013). Comportamiento Mecánico de un Concreto Fluido Adicionado con Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA) y Reforzado con Fibras de Acero. Revista de la construcción (scielo), vol. 12, n^o 2.
- ✓ Rodríguez Sánchez, A. M., y Tibabuzo Jiménez, M. P. (2019). Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico. Universidad Santo Tomás.
- ✓ Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio, P. B., Valencia, S. M., y Torres, C. P. M. (2014). Metodología de la investigación (6.a ed.). McGraw-Hill Education.
- ✓ Singh, N.B., Singh, V.D. and Rai, S. (2000), “Hydration of bagasse ash-blended Portland cement”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1485-8
- ✓ Tambichik, Afiq; Mohamad, Noridah; Abdul Samad, Abdul Aziz; Mohd Bosro, Mohamad y Iman, Muhamad Afif. (2018). Utilization of construction and agricultural waste in Malaysia for development of Green Concrete: A Review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 140. 012134. 10.1088/1755-1315/140/1/012134.
- ✓ Taylor H.F.W. (1997) “The chemistry of Portland cement manufacture”; Cement chemistry; Editorial Thomas Telford; Second Edition.
- ✓ Thomas, M. (2011) “The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review ” Cement and concrete research, 40, 209-206.
- ✓ Triana-Hernández, Omar; León-Martínez, Tamara S.; Céspedes-Vázquez, María I y Cámara-Pérez, Amalia (2014.) Caracterización de los residuos de la cosecha de la caña de azúcar almacenados a granel ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. 48, núm. 1, pp. 65-70 Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Ciudad de La Habana, Cuba.
- ✓ Ulrich, K. T., y Eppinger, S. D. (2004). Diseño y desarrollo de productos (5.a ed.). McGraw-Hill Education.

- ✓ Valbuena Porras, S. G.; Mena Serna, M. y García Ubaque, C. A. (2016). Evaluación de la resistencia a la compresión en morteros de pega de acuerdo con la dosificación establecida por el código Sismo Resistente Colombiano. Estudio de caso. *Tecnura*, vol. 20, núm. 48, pp. 115-122, 2016. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- ✓ Valdez Tamez, P. L., Fajardo San Miguel, G., Hermosillo Mendoza, R., y Flores Vivian, I. (2008). Efectividad de las puzolanas naturales para reducir la expansión álcali-agregado reducir la expansión álcali-agregado.
- ✓ Valencia-Saavedra, W. G., Robayo-Salaza, R. A. y Mejía de Gutiérrez, R. (2021, 10 mayo). Propiedades de ingeniería de concretos híbridos activados alcalinamente basados en altos contenidos de ceniza volante: un análisis a largas edades. *Revista UIS Ingenierías*, 20(3). <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021001>
- ✓ Vásquez B., Corrales S., 2017. Industria del cemento en México: Análisis de sus terminantes, *Problemas del Desarrollo*, Volume 48, Issue 188, Pages 113-138, ISSN 0301-7036, <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2017.01.006>.
- ✓ Villar J. C., Meijide B. G., Domenech Quesada J. L., Gutiérrez Mainar S., Gutiérrez Lanza H., Martínez Abella F., y González Fonteboa B. (2010). Cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción. *Laboratorio de energía sostenible*.

Anexos

Anexo A: Listado de normas utilizadas

- ✓ ASTM C188-17a Standard Test Method For Density Of Hydraulic Cement.
Método de prueba estándar para la densidad del cemento hidráulico
Este método de prueba cubre la determinación de la densidad del cemento hidráulico.
Su utilidad particular está relacionada con el diseño y control de mezclas de concreto.
- ✓ ASTM C219 Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement.
Esta terminología define términos relacionados con los cementos hidráulicos, sus componentes, características, propiedades y ensayos de los mismos.
- ✓ ASTM C595/C595M-12e1 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.
Especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados.
Esta especificación se refiere a cementos hidráulicos mezclados para aplicaciones generales y especiales, utilizando escoria o puzolana, o ambas, con cemento portland o clínker de cemento portland o escoria con cal.
- ✓ ASTM C618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete - Especificación estándar para cenizas volantes de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para uso en concreto.
Esta especificación cubre las cenizas volantes de carbón y la puzolana natural cruda o calcinada para uso en concreto donde se desea una acción cementosa o puzolánica, o ambas, o donde se pueden desear otras propiedades normalmente atribuidas a las cenizas volantes o puzolanas, o donde ambos objetivos deben ser buscados.
- ✓ ASTM C62-10 Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale)
Especificación estándar para la construcción de ladrillos (unidades de mampostería sólidas hechas de arcilla o esquisto).

- ✓ ASTM C128 - 07a Método de prueba estándar para la densidad, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.
Este método de prueba cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino (sin incluir el volumen de huecos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.
- ✓ ASTM 109/C 109M – 02: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Usando Especímenes Cúbicos de 2 in).
- ✓ NMX-C-486-ONNCCE-2014. Establece las especificaciones y métodos de ensayo que debe cumplir el mortero a base de cemento hidráulico, cemento de albañilería y/o cal hidratada; para la construcción de elementos de mampostería de uso estructural.
- ✓ ACI 318 S-05 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural Las estructuras y los elementos estructurales deben ser diseñados para que tengan en cualquier sección una resistencia de diseño al menos igual a la resistencia requerida, calculada esta última para las cargas y fuerzas mayoradas en las condiciones establecidas en este reglamento.
- ✓ ACI 211.1 Práctica Estándar para Seleccionar el Proporcionamiento de Concreto de Peso Normal, Pesado y Masivo.

Anexo B: Resultados de ensayo a compresión de las probetas con relación $a/c = 0.6$

Tabla 10 Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación $a/c = 0.6$, sin sustitución de CBA Fuente: Propia 2021

Fecha de elaboración: 7/JUN/2021						
Clave	Ensayadas	Peso (kg)	28 días (MPa)	56 días (MPa)	92 días (MPa)	Promedio
09CP100	5/JUL/21	2.3	18.21			18.23
08CP100		1.94	16.56			
07CP100		2.4	19.93			
06CP100	2/AGO/21	-		-		19.17
05CP100		2.01		18.5		
04CP100		1.99		19.84		
03CP100	7/SEP/21	2.01			20.91	21.78
02CP100		2.05			23.21	
01CP100		2.01			21.23	

Tabla 11 Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.6, con sustitución de 10% de cemento Portland por CBA.

Fecha de elaboración: 10/JUN/2021						
Clave	Ensayadas	Peso (kg)	28 días (MPa)	56 días (MPa)	92 días (MPa)	Promedio
09CBA10	8/JUL/21	2.06	17.67			16.86
08CBA10		2.03	14.84			
07CBA10		2.04	18.07			
06CBA10	5/AGO/21	2.05		17.43		18.03
05CBA10		2.02		19.40		
04CBA10		2.01		17.28		
03CBA10	31/AGO/21	2.06			20.11	20.354
02CBA10		2.08			20.46	
01CBA10		2.04			20.49	

Fuente: Propia 2021

Tabla 12 Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.6, con sustitución de 20 % de CP por CBA.

Fecha de elaboración: 10/JUN/2021						
Clave	Ensayadas	Peso (kg)	28 días (MPa)	56 días (MPa)	92 días (MPa)	Promedio
09CBA20	8/JUL/21	2.05	16.31			15.86
08CBA20		2.03	15.59			
07CBA20		2.04	15.70			
06CBA20	5/AGO/21	2.01		18.22		18.29
05CBA20		2.04		18.75		
04CBA20		2.02		17.91		
03CBA20	31/AGO/21	2.06			19.67	19.71
02CBA20		2.06			20.05	
01CBA20		2.05			19.42	

Fuente: Propia 2021

Tabla 13 Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.6, con sustitución de 30 % de CP por CBA.

Fecha de elaboración: 7/JUN/2021						
Clave	Ensayadas	Peso (kg)	28 días (MPa)	56 días (MPa)	92 días (MPa)	Promedio
09CBA30	5/JUL/21	2.03	10.43			10.52
08CBA30		2.05	10.54			
07CBA30		2.05	10.59			
06CBA30	2/AGO/21	2.04		14.02		12.93
05CBA30		1.99		12.97		
04CBA30		2.02		11.81		
03CBA30	7/SEP/21	2.03			14.63	14.95
02CBA30		2.05			14.96	
01CBA30		2.03			15.28	

Fuente: Propia 2021

Anexo C: Resultados de ensayo a compresión de las probetas con relación $a/c = 0.45$

Tabla 14 Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación $a/c = 0.45$, sin sustitución de CP (patrón).

Fecha de elaboración: 13/JUL/2021						
Clave	Ensayadas	Peso (kg)	28 días (MPa)	56 días (MPa)	92 días (MPa)	Promedio
0945CP100	10/AGO/21	2.13	26.38			27.8
0845CP100		2.17	28.45			
0745CP100		2.17	28.57			
0645CP100	7/SEP/21	2.16		29.25		28.41
0545CP100		2.17		25.29		
0445CP100		2.18		30.68		
0345CP100	13/OCT/21	2.13			30.99	31.44
0245CP100		2.13			35.94	
0145CP100		2.11			27.39	

Fuente: Propia 2021

Tabla 15 Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.45, con sustitución del 10 % de CP por CBA.

Fecha de elaboración: 12/JUL/2021						
Clave	Ensayadas	Peso (kg)	28 días (MPa)	56 días (MPa)	92 días (MPa)	Promedio
0945CBA10	9/AGO/21	2.11	23.54			22.92
0845CBA10		2.13	21.58			
0745CBA10		2.12	23.64			
0645CBA10	6/SEP/21	2.15		26.03		25.22
0545CBA10		2.14		24.05		
0445CBA10		2.14		25.59		
0345CBA10	12/OCT/21	2.14			26.07	
0245CBA10		2.18			26.14	
0145CBA10		2.17			24.00	

Fuente: Propia 2021

Tabla 16 Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.45, con sustitución del 20% de CP por CBA.

Fecha de elaboración: 13/JUL/2021						
Clave	Ensayadas	Peso (kg)	28 días (MPa)	56 días (MPa)	92 días (MPa)	Promedio
0945CBA20	10/AGO/21	2.19	20.37			20.16
0845CBA20		2.13	20.52			
0745CBA20		2.16	19.60			
0645CBA20	7/SEP/21	2.11		19.56		20.34
0545CBA20		2.12		20.74		
0445CBA20		2.17		20.73		
0345CBA20	13/OCT/21	2.13			22.50	23.83
0245CBA20		2.15			25.82	
0145CBA20		2.13			23.18	

Fuente: Propia 2021

Tabla 17 Resistencia a compresión en MPa de las probetas elaboradas con mezclas de relación a/c= 0.45, con sustitución del 30 % de CP por CBA.

Fecha de elaboración: 8/JUL/2021						
Clave	Ensayadas	Peso (kg)	28 días (MPa)	56 días (MPa)	92 días (MPa)	Promedio
0945CBA30	5/AGO/21	2.12	18.46			17.55
0845CBA30		2.10	18.21			
0745CBA30		2.10	15.98			
0645CBA30	2/SEP/21	2.06		19.44		19.40
0545CBA30		2.09		19.27		
0445CBA30		2.12		19.50		
0345CBA30	8/OCT/21	2.07			20.07	19.74
0245CBA30		2.15			22.56	
0145CBA30		2.15			16.61	

Fuente: Propia 2021